

การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตกำลังสูง
ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จีเถ้าแกลบ
เถ้าลอยลิกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ

๒๕๖ พ.ศ. ๒๕๔๐

ปริญญานิพนธ์
ของ
สุพรรณิ มีกุล

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา

มีนาคม ๒๕๔๐

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

๖๔๑๑๖

การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตกำลังสูง
ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้ากลบ
เถ้าลอยลิกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ

บทคัดย่อ
ของ
สุพรรณิ มีกุล

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา
มีนาคม 2540

จากการศึกษาการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซี๊เถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ โดยให้มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์เท่ากับหรือมากกว่าคอนกรีตควบคุม ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง ทำได้โดยวิธีใส่สารผสมเพิ่มต่าง ๆ ลงไป เพื่อไปปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีตให้มีกำลังเพิ่มขึ้น และการลดจำนวนน้ำในการผสมคอนกรีตลงมากเกินไปจะทำให้มีความพรุนสูง และมีกำลังรับแรงต่ำ ความสามารถในการทำงานลดลง ในการทำคอนกรีตกำลังสูง จึงใส่สารลดน้ำพิเศษเพื่อช่วยให้คอนกรีตเพิ่มความหนืด และช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานและมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นด้วย ประยุกต์ใช้ซี๊เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยนำมาบดละเอียดใช้เวลา 75 นาที เพราะการบดซี๊เถ้าแกลบจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีได้สูงขึ้น และเถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งประกอบด้วยสารซิลิกา และอลูมินา จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ ทำให้มีกำลังรับแรงอัดที่อายุมากขึ้น โดยการศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีตกำลังสูง ในด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง การรับกำลังแรงอัด การรับกำลังแรงดึง ค่าการยุบตัว การทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น พบว่าสูตรอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 90 เถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 10 สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1.25 เป็นสูตรที่ดีอยู่ในเกณฑ์ของคอนกรีตควบคุมมากที่สุด มีความสามารถทำงานได้ดี มีค่ายุบตัวดี ให้กำลังรับแรงอัดดี

จากการศึกษาพอสรุปได้ว่า ในการผสมของซี๊เถ้าแกลบ และเถ้าลอยลิกไนต์ทราย หิน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และสารผสมเพิ่ม สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังสูงได้

**Optimum Mix Proportion for High Strength Concrete
Containing Portland Cement , Rice Husk Ash ,
Lignite Fly Ash and Superplasticizer**

**AN ABSTRACT
BY
SUPANNEE MEEKUSUL**

**Present in partial fulfilment of the requirements for Master
of Education Degree in Industrial Educational
at Srinakharinwirot University
March 1997**

The experiment was conducted to obtain the optimum of high strength concrete which containing Portland cement, rice husk ash, lignite fly ash, and superplasticizer by equal or better mechanical properties compare to the control concrete. High strength concrete can be made by the incorporation of admixture to improve some properties of concrete. In the test rice husk ash from Ayutthaya province was used. Grinding time of this rice husk ash yields to 75 minutes. This process will make material higher chemical reaction which can be used to replace cement. And lignite fly ash which is containing of silica and alumina which react with calcium hydroxide form hydration of Portland cement and water and causes increasing in compressive strength was also used. The results indicated that at Portland cement 90%, lignite fly ash 10% and superplasticizer 1.25% is the best ratio which in the objective of this control concrete. Its workability, slump, and compressive strength are good.

The test results from experiments indicated that the mixture of rice husk ash, lignite fly ash, sand, gravel, Portland cement, water and superplasticizer can be used to produce the high strength concrete.

คณะกรรมการควบคุมและคณะกรรมการสอบได้พิจารณาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต
วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้

คณะกรรมการควบคุม

.....ประธาน

(ผศ.ดร.วิชัย แหวนเพชร)

.....กรรมการ

(ดร. นุรฉัตร นัทรวิระ)

.....กรรมการ

(อาจารย์สุคใจ เหง้าสีไพร)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธาน

(ผศ.ดร.วิชัย แหวนเพชร)

.....กรรมการ

(ดร. นุรฉัตร นัทรวิระ)

.....กรรมการ

(อาจารย์สุคใจ เหง้าสีไพร)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(ดร. กัญญา ทองนิม)

บัณฑิตวิทยาลัยอนุมัติให้รับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา ของมหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ดร. ศิริยุภา พูลสุวรรณ)

วันที่ 13 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2540

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงด้วยความเมตตา ให้คำแนะนำ แก่ใจ คูแล และให้กำลังใจอย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.วิชัย แหวนเพชร ประธานคณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ คร.บูรฉัตร ฉัตรวีระ และอาจารย์สุจิต เหว้าสีไพร ที่สละเวลาเป็นกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ คร. กัญญา ทองฉิม ที่กรุณาร่วมเป็นกรรมการสอบ และรศ.ดร. พิชัย นิมิคยงสกุล ได้สนับสนุนช่วยเหลือ ให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ให้กำลังใจและให้แนวคิดในการดำเนินงานเพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นายถนอม ผดุงสงฆ์ อาจารย์ใหญ่โรงเรียนสาธิตวิทยา ที่กรุณาให้โอกาส และสถานที่ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยความเรียบร้อย

ขอขอบคุณ ข้าราชการและเจ้าหน้าที่ฝ่ายคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง กองวิจัยและทดลองกรมชลประทาน และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จังหวัดปทุมธานี ที่กรุณาอนุเคราะห์สถานที่พร้อมเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบในการดำเนินการวิจัย ทำให้การวิจัยครั้งนี้ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย

ขอขอบคุณ นายวินัย พุ่มเทศ และนายวิวัฒน์ กลังวิจิตร ที่ให้คำปรึกษาช่วยเหลือติดต่อประสานงาน สนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงด้วยความเรียบร้อย

ขอขอบคุณ บริษัทคัมบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัด และคุณสุรพล ชำรงลักษณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สารลดน้ำพิเศษและซิลิกาฟุ่ม ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

อนึ่ง ผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนและกำลังใจเป็นอย่างยิ่งจากคณาจารย์และกรรมการบริหารหลักสูตรสาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษาทุกท่าน ทั้งจากคณะศึกษาศาสตร์ (บางเขน) และสถาบันราชภัฏพระนคร ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนร่วมงาน นิสิตปริญญาโทอุตสาหกรรมศึกษาที่ให้กำลังใจ และบุคคลอื่นที่ไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมดที่มีส่วนช่วยเหลือ แนะนำ สนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอน้อมรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดา ครู-อาจารย์ อันเป็นที่เคารพรักสูงสุด ให้ทั้งความรู้ กำลังใจ กำลังทรัพย์ และผู้ที่จะมีมิได้ คือ คุณวาสนา เทพรัตน์ และคุณพินทิพย์ มีกุล ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ อันพระคุณนี้หาที่เปรียบมิได้

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
คำนำ.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	5
ความสำคัญของการวิจัย.....	5
ขอบเขตของการวิจัย.....	5
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	7
สมมุติฐานการวิจัย.....	9
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคอนกรีต.....	11
ความหมายของคอนกรีต.....	11
องค์ประกอบของคอนกรีต.....	11
ซีเมนต์เพสต์.....	15
การผสมคอนกรีต.....	17
วิธีการผสมคอนกรีต.....	20
การบ่มคอนกรีต.....	22
วัสดุผสมที่นำมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูง.....	26
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	27
ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	27
สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	29
สารปอซโซลาน.....	32
จีเถ้าแกลบ.....	32
เถ้าลอยลิกไนต์.....	35
ซิลิกาฟูม.....	36

วัสดุผสม.....	39
วัสดุผสมละเอียด.....	39
วัสดุผสมหยาบ.....	41
น้ำ.....	47
สารลดน้ำพิเศษ.....	47
คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีต.....	49
การทดสอบหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง.....	49
การทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	49
การทดสอบกำลังรับแรงดึง.....	51
การทดสอบค่าการยุบตัว.....	52
การทดสอบความทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนेशन.....	55
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	55
 3 วิธีดำเนินการศึกษา.....	 59
ประชากรที่ใช้ในการทดลอง.....	59
วัสดุผสมที่ใช้ในการทดลอง.....	60
จัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	60
ลำดับขั้นตอนการทดลอง.....	61
การเปรียบเทียบและสรุปผลการทดลอง.....	68
การวิเคราะห์และอภิปรายผล.....	69
สถานที่และระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง.....	69
 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	 70
การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ.....	 70

บทที่	หน้า
5 สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	75
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	75
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	76
การดำเนินการวิจัย.....	76
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	77
สรุปผลการวิจัย.....	77
อภิปรายผล.....	79
ข้อเสนอแนะ.....	82
บรรณานุกรม.....	83
ภาคผนวก :	
ตอน ก.....	88
ตอน ข.....	94
ตอน ค.....	111
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	153

บัญชีตาราง

ตาราง

หน้า

1 อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ผสมซีเมนต์เก่า แกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ ทราย หิน น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ.....	6
2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่นิยมใช้กับงานประเภทต่าง ๆ	18
3 ขอบเขตความคลาดเคลื่อนของการชั่งน้ำหนักวัสดุ เพื่อใช้ผสมคอนกรีตตาม มอก. 213-2520.....	19
4 เวลาขั้นต่ำในการผสมคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกา.....	20
5 ข้อดีข้อเสียของการบ่มคอนกรีตด้วยวิธีเพิ่มความชื้น.....	22
6 ข้อดีข้อเสียของการบ่มคอนกรีตด้วยวิธีป้องกันการความชื้น.....	23
7 ข้อดีข้อเสียของการบ่มคอนกรีตด้วยวิธีการเร่งกำลัง.....	24
8 กำหนดเวลาที่น้อยที่สุดที่คอนกรีต ควร ได้รับการบ่มนับจากวันที่หล่อเสร็จแล้ว 24 ชั่วโมงเป็นต้นไป.....	25
9 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	29
10 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีต.....	32
11 ค่าความละเอียดของซีเมนต์เก่า.....	33
12 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซีเมนต์เก่า.....	34
13 แสดงองค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปของเถ้าถ่านหิน Class F และ Class C	36
14 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์เก่า ซิลิกาฟูม และซีเมนต์ ลอยแม่เมาะ.....	38
15 ขนาดของทรายในลักษณะงานต่าง ๆ.....	40
16 ขนาดมาตรฐานของหิน.....	42
17 ขนาดที่เรียกเป็นหมายเลขของหินเกร็ด.....	43
18 ขนาดกะของมวลรวม.....	46
19 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม.....	46
20 ค่าการยุบตัวสำหรับงานก่อสร้างชนิดต่าง ๆ	53

21	ค่าการยุบตัวสำหรับงานพิเศษบางประเภท.....	54
22	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมซีเถ้าแกลบ ซีเถ้าลอยลิกไนต์ และไม่ใส่สารลดน้ำพิเศษ.....	58
23	อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ ทราย หิน น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ.....	62
24	เปรียบเทียบและสรุปผลคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีตกำลังสูง จากส่วน ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ หิน ทราย น้ำ สารลดน้ำพิเศษ เทียบกับมาตรฐานคอนกรีตควบคุม.....	68
25	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลศาสตร์ในด้านต่าง ๆ ของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และ สารลดน้ำพิเศษ เทียบกับคอนกรีตควบคุม(สูตรที่ 1 และ 2).....	71
26	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลศาสตร์ ของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ สูตรที่ 4.....	79
27	การเปรียบเทียบผลการทดสอบด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งของคอนกรีต กำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ.....	89
28	การเปรียบเทียบผลการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสม ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และ สารลดน้ำพิเศษ.....	90
29	การเปรียบเทียบผลการทดสอบด้านกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสม ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และ สารลดน้ำพิเศษ.....	91
30	การเปรียบเทียบผลการทดสอบด้านค่าการยุบตัวของคอนกรีตกำลังสูง มีส่วนผสม ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์และสารลดน้ำพิเศษ....	92

31 การเปรียบเทียบผลการทดสอบด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นของ คอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์และสารลดน้ำพิเศษ.....	93
32 แสดงค่าหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ในแต่ละแท่งตัวอย่าง.....	95
33 แสดงค่าของผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วน ผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และ สารลดน้ำพิเศษ.....	96
34 แสดงค่ากำลังรับแรงอัด ในแต่ละแท่งตัวอย่าง.....	98
35 แสดงค่าของผลการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วน ผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และ สารลดน้ำพิเศษ.....	99
36 แสดงค่ากำลังรับแรงดึง ในแต่ละแท่งตัวอย่าง.....	101
37 แสดงค่าของผลการทดสอบด้านกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วน ผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และ สารลดน้ำพิเศษ.....	102
38 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตกำลังสูงโดยคิดเป็นร้อยละของกำลังรับ แรงอัดของผลการทดสอบ.....	104
39 แสดงค่าของผลการทดสอบด้านค่าการยุบตัวของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วน ผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และ และสารลดน้ำพิเศษ.....	106
40 แสดงค่าการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น ในแต่ละแท่งตัวอย่าง.....	108
41 แสดงค่าของผลการทดสอบด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นของ คอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์และสารลดน้ำพิเศษ.....	109

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีต.....	12
2 แสดงปัจจัยในการทำคอนกรีตที่ดี.....	13
3 แสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต.....	15
4 ปริมาณของสารประกอบของส่วนผสมคอนกรีตธรรมดา.....	16
5 รูปร่างลักษณะของ C_3S ซึ่งเป็นรูปผลึก รูปหกเหลี่ยม และ C_2S เป็นเม็ดกลม สีดำ.....	31
6 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์.....	31
7 ขนาดของซิลิกาฟูมเทียบกับปูนซีเมนต์.....	37
8 การแทรกตัวของอนุภาคของซิลิกาฟูม ระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์.....	38
9 แสดงแผนภาพขนาดผลของทรายผ่านขนาดตะแกรงมาตรฐาน.....	44
10 แสดงแผนภาพขนาดผลของหินผ่านขนาดตะแกรงมาตรฐาน.....	45
11 ลักษณะการทำงานของสารลดน้ำพิเศษ.....	48
12 รูปแบบการยุบตัว.....	54
13 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งของ คอนกรีตกำลังสูง.....	97
14 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกำลังสูง...	100
15 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ด้านกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตกำลังสูง....	103
16 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตกำลังสูง โดยคิดเป็นร้อยละของ กำลังรับแรงอัด.....	105
17 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ด้านค่าการยุบตัวของคอนกรีตกำลังสูง.....	107
18 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของ คอนกรีตกำลังสูง.....	110
19 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง	112
20 น้ำยาลดน้ำพิเศษ.....	112

21	ซิลิกาฟูมผง.....	113
22	ซิลิกาฟูมชนิดเหลว.....	113
23	โรงงานเผาอิฐ.....	114
24	ซีเมนต์จากโรงงานเผาอิฐ.....	114
25	ซีเมนต์จากโรงงานเผาอิฐที่ยังไม่บด.....	115
26	ซีเมนต์บดแล้ว.....	115
27	ถ้ำลอยลิกไนต์.....	116
28	สารเตตระโซเดียมไดฟอสเฟต ($\text{Na}_4 \text{P}_2 \text{O}_7$).....	116
29	เครื่องบดซีเมนต์.....	117
30	รูปแท่งที่ใช้ไปในเครื่องบดซีเมนต์.....	117
31	การนำแท่งเหล็กใส่ลงในเครื่องบด.....	118
32	การใส่ซีเมนต์ลงในเครื่องบด.....	118
33	เครื่องผสมคอนกรีตแบบกระทะ.....	119
34	เครื่องผสมคอนกรีตแบบลูกข่าง.....	119
35	การจี้เขย่าคอนกรีต.....	120
36	แสดงการตักคอนกรีตใส่แม่พิมพ์.....	121
37	แสดงการปาดตกแต่งผิวตัวอย่าง.....	122
38	เมื่อปาดตกแต่งเรียบร้อยแล้ว.....	122
39	แสดงการบ่มคอนกรีตโดยการแช่น้ำ.....	123
40	การทดสอบค่าการยุบตัว.....	124
41	การเคลื่อนผิวคอนกรีตให้เรียบทั้งสองด้าน.....	125
42	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	126
43	แสดงการทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	127
44	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึง.....	128
45	แสดงการทดสอบกำลังรับแรงดึง.....	129
46	แสดงการทดสอบการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น โดยการฉีดสารละลาย ฟีนอล์ฟทาไลน์.....	130

47 แสดงการวัดค่าคาร์บอนชั้น.....	130
----------------------------------	-----

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

การพัฒนาประเทศเพื่อก้าวไปสู่การเป็นประเทศอุตสาหกรรมนั้น ก่อให้เกิดปัญหาอย่างหนักตามมา คือ ความแออัด ทั้งในเขตเมืองหลวง และเขตปริมณฑล รวมทั้งจังหวัดที่เป็นแหล่งท่องเที่ยว รวมไปถึงด้านสภาพลักษณะหรือภูมิทัศน์ ปัญหาที่เกิดขึ้นกับเมืองใหญ่ ๆ เหล่านี้ คือ การ ก่อสร้างอาคารสูงตามย่านธุรกิจ อันเนื่องจากที่ดินมีราคาสูงมาก จึงมีการก่อสร้างอาคารสูงอย่างแพร่หลาย เพื่อการใช้ประโยชน์จากที่ดินให้มากที่สุด ซึ่งในการออกแบบอาคารสูง จะมีค่าน้ำหนักบรรทุกถ่ายลงสู่เสาหรือระบบผนังรับแรงและยังมีแรงกระทำในแนวราบ เช่น แรงลม แรงที่เกิด จากแผ่นดินไหว ทำให้เกิดการแอ่นตัวในทางราบของตัวอาคาร ในการออกแบบต้องให้เสาหรือผนังรับแรงมีความแข็งแรงมีการทำให้ฐานรากและโครงสร้างขนาดใหญ่จึงเป็นเหตุให้มีพื้นที่ในการใช้สอยลดลง (สุดา เกลิงพงษ์, 2537 : 1) จากปัญหาดังกล่าวเป็นจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงทางด้านคอนกรีตเทคโนโลยีมีการวิจัยและพัฒนาคอนกรีตขึ้นมาโดยหันมาพิจารณา คอนกรีตกำลังสูงซึ่งคอนกรีตชนิดนี้มีคุณสมบัติดีกว่าคอนกรีตทั่วไปในด้านการลื่นไหลของคอนกรีตสามารถเทในแบบหล่อได้ง่ายเนื่องจากคอนกรีตมีค่ายุบตัวไม่ก่อให้เกิดปัญหาในระยะก่อนและหลังแข็งตัวและมีความคงทนสูง (สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2536 : 6) สามารถช่วยลดขนาดโครงสร้างให้มีขนาดเล็กลงส่งผลให้มีพื้นที่ใช้สอยเพิ่มขึ้น ทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านวัสดุก่อสร้าง และสามารถลดจำนวนแรงงานฝีมือลงไปได้ (ชูโชค ศิวะคุณากร, 2536 : 1)

งานคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่อพื้นที่สูงเกินกว่า 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรถือว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูงจากการปฏิบัติงานในห้องทดลองพบว่า สามารถผลิตคอนกรีตกำลังสูงที่มี กำลังอัดระดับ 1100 - 1200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรได้โดยใช้สารผสมเข้าช่วยเน้นหนักที่ การลดปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตให้เหลืออัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ ประมาณร้อยละ 0.28 - 0.36 และใช้สารผสมเพิ่มเติมลงไป เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติ

สมบัติในการสิ้นเปลืองการใช้สารไมโครซิลิกา (microsilica) หรือซิลิกาฟูม (silicafume) เดิมลงไป เพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น ซิลิกาฟูมจะเป็นส่วนผสมที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงตามที่ต้องการได้ แต่มีข้อเสียคือมีราคาที่แพง ส่งผลให้ต้นทุนของคอนกรีตสูงตามไปด้วย (จุโชค ศิวะคุณากร. 2536 : 2)

แนวความคิดในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงโดยการลดสัดส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์และใส่สารผสมเพิ่มเพื่อให้สามารถเทได้ง่ายทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ เพื่อเพิ่มกำลังให้กับมอร์ต้าโดยใช้สารปอชโซลาน เช่น ขี้เถ้าแกลบ และเถ้าลอยลิกไนต์ เพื่อเพิ่มปริมาณ แคลเซียม ซิลิเกต ไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate-CSH) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานที่ดีทำให้มอร์ต้ายึดเกาะมวลรวมได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นหากจะมีการศึกษาเทคโนโลยีในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง โดยการหาสิ่งที่มาทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ รวมทั้งการนำเศษวัสดุดังกล่าวกลับมาใช้ประโยชน์ย่อมเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างประหยัด และเกิดประโยชน์สูงสุด อีกทั้งยังช่วยลดมลภาวะของสิ่งแวดล้อมได้บางส่วน

ขี้เถ้าแกลบ (rice husk ash) แม้จะเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่อาจนำไปใช้ประโยชน์หลายอย่าง เช่น ใช้ผสมดินเหนียวสำหรับทำอิฐเผา แต่ก็ยังคงมีขี้เถ้าแกลบเหลือทิ้งอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากในปีหนึ่ง ๆ ประเทศไทยได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 3 ล้านตัน การนำแกลบไปเผาจะได้ขี้เถ้าแกลบเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักผลการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่า ขี้เถ้าแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 90 เมื่อนำมาบดละเอียดสามารถใช้เป็นสารประเภทปอชโซลานที่มีคุณสมบัติดี (บุรณัฏฐ์ นัฏฐวีระ และคนอื่น. 2537 : 109 - 122) ขี้เถ้าแกลบสามารถนำมาผลิตปูนซีเมนต์ปอชโซลาน โดยวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ไม่ต้องใช้ความร้อน และ ลงทุนน้อย มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยขี้เถ้าแกลบที่บดละเอียด 3 ส่วน ผสมกับปูนขาว 2 ส่วนโดยน้ำหนักคูลูกเกล้าในเครื่องผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน และนำปูนปอชโซลาน 1 ส่วน ผสมทราย 3 ส่วน และน้ำ 0.7 ส่วน โดยน้ำหนักจะสามารถผลิตวัสดุก่อสร้างอิฐซึ่งสามารถรับแรงกดได้ดี (กรมวิทยาศาสตร์. 2529 : 6 - 7) ในงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตวัสดุปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบที่มีประสิทธิภาพและประหยัด จึงมีการวิจัยค้นคว้า การใช้ขี้เถ้าแกลบให้มีประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมการก่อสร้างและพบว่า

วัสดุปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบ สามารถใช้ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาได้ (บุรณัทร นัทรวิระ. 2537 : 54 - 55) และในการทดลองทำปูนซีเมนต์จากแกลบโดยการนำซีเมนต์แกลบซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 100 มาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 คุณภาพของปูนซีเมนต์ดีกว่าปูนซีเมนต์ตราเสือแต่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ถ้าหากผสมแกลบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วน 3 ต่อ 7 ปูนซีเมนต์จะมีคุณภาพดีกว่าปูนซีเมนต์ตราเสือ (อนุจิต กิจสวัสดิ์. 2522 : 1 - 26) นอกจากผลการทดสอบของคอนกรีตผสมซีเมนต์แกลบจะได้กำลังสูงแล้ว ยังพบว่ามีความต้านทานต่อสภาพการเป็นกรดดีมาก (บุรณัทร นัทรวิระ. 2537 : 42 - 49) จึงได้มีการประยุกต์ใช้ซีเมนต์แกลบในคอนกรีตกำลังสูง โดยการนำซีเมนต์แกลบมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในอัตราร้อยละ 30 และนำมาผสม ทราช หินปูน น้ำ และน้ำยาลดน้ำพิเศษ สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังสูงมากได้ (บุรณัทร นัทรวิระ. 2537 : 117 - 130)

เถ้าลอยลิกไนต์ (lignite fly ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งซึ่งได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์ ประมาณเกือบ 45,000 ตันต่อวัน และมีเถ้าลอย 13,400 ตันต่อวันที่จะต้องนำไปทิ้งซึ่งนับว่าเป็นภาระมากอันหนึ่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เถ้าลอยมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์ผสมอยู่สูง (สร้อยดาว วินิจนันทรรัตน์. 2538 : 185) จากการศึกษาเถ้าลอยลิกไนต์มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะวัสดุคล้ายปูนซีเมนต์ แต่กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่ทำจากซีเมนต์เถ้าลอยนั้นอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ซีเมนต์เถ้าลอยสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในช่วงร้อยละ 0 - 40 โดยที่ กำลังรับแรงอัดไม่ลดลง (บุรณัทร นัทรวิระ. 2537 : 20 - 46)

จากการศึกษาพบว่า มีวัสดุผสมชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับซิลิกาฟูม ก็คือ เถ้าลอยลิกไนต์ เมื่อนำมาเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องความร้อนที่เกิดขึ้นกับคอนกรีต โดยควบคุมไม่ให้เกิน 60 - 70 องศาเซลเซียส เพื่อให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นไปอย่างช้า ๆ ช่วยลดการแตกร้าวของคอนกรีตที่อาจจะเกิดขึ้นและรวมถึงค่ายุบตัวของคอนกรีตกำลังสูงทำให้ไม่เกิดการแตกร้าว จึงเหมาะสมที่จะใช้กับงานคอนกรีตที่มีปริมาณมากมีบริเวณกว้าง และมีโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ทดแทนปูนซีเมนต์

บางส่วน จะมีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าการผลิตคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟูม (ชูโชค ศีวะคุณากร. 2536 : 2) ส่วนในการผสมซีเมนต์กับน้ำและน้ำเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาของซีเมนต์กับน้ำได้เร็วกว่าปฏิกิริยาซีเมนต์กับน้ำ และจะให้กำลังรับแรงก่อนข้างสูง โดยที่ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อซีเมนต์กับน้ำ 40 ต่อ 20 ต่อ 40 จะให้กำลังแรงอัดสูงสุดและเมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษ ร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนักของวัสดุผสม ส่วนผสมทั้งหมดจะมีกำลังรับแรงอัดดีขึ้น (บุรณัฏฐ์ นิตร์วิระ และคนอื่น. 2537 : 109 - 122)

สารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer) ช่วยให้งานเทคอนกรีตที่ทำได้ยากสามารถไหลเข้าแบบได้ง่ายโดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์ หรือใช้ทำให้คอนกรีตมีความสามารถรับกำลังแรงอัดได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อสารปูนซีเมนต์คงที่จะสามารถลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดในช่วงต้นที่สูงมาก ทำให้สามารถถอดแบบและตัดลวดได้ในเวลารวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายสารลดน้ำพิเศษนิยมใช้ในคอนกรีตกำลังสูง (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539 : 54 - 59)

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยอาศัยเหตุผลที่ว่า ซีเมนต์กับน้ำ และน้ำลดลิกไนต์ มีคุณสมบัติเหมาะสมในการผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประกอบกับซีเมนต์กับน้ำ และน้ำลดลิกไนต์เป็นวัสดุเหลือทิ้ง และมีซิลิกา และแคลเซียมออกไซด์ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงต้องการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของซีเมนต์กับน้ำ น้ำลดลิกไนต์ เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน และใส่สารลดน้ำพิเศษ เพื่อช่วยลดปริมาณน้ำ เพิ่มการลื่นไหลดีขึ้น และมีการยุบตัวเพิ่มขึ้น ช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และให้ได้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม การศึกษานี้ นอกจากเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีในการก่อสร้าง โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งที่มีอยู่แล้วมากมาย ทำให้ลดต้นทุนในการผลิตให้ถูกลง ช่วยลดมลภาวะของสิ่งแวดล้อมได้บางส่วน และส่งเสริมเศรษฐกิจของท้องถิ่นและประเทศโดยรวม

ความมุ่งหมายของการวิจัย

เพื่อทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้ากลบ เถ้าลอยลิกไนต์ กับหิน ทราย น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ โดยให้มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ด้านกำลังรับแรงอัด ด้านกำลังรับแรงดึง ด้านค่าการยุบตัว และด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตกำลังสูง โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม

ความสำคัญของการวิจัย

1. สามารถนำผลงานวิจัยไปผลิตคอนกรีตกำลังสูง ที่มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์มากกว่าหรือเท่ากับคอนกรีตควบคุม
2. เป็นการใช้วัสดุเหลือทิ้งให้เกิดประโยชน์ และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง

ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้ากลบ เถ้าลอยลิกไนต์ กับหิน ทราย น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ
2. ในแต่ละอัตราส่วนผสมจะมีซีเถ้ากลบไม่เกินร้อยละ 30 และเถ้าลอยลิกไนต์ไม่เกินร้อยละ 30 และสารลดน้ำพิเศษ ร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนักของวัสดุผง
3. การทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ มีดังนี้
 - 3.1 ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง (unit weight)
 - 3.2 ด้านกำลังรับแรงอัด (compressive strength)
 - 3.3 ด้านกำลังรับแรงดึง (tensile strength)
 - 3.4 ด้านค่าการยุบตัว (slump)
 - 3.5 การทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น (carbonation reaction)

4. ประชากร คือ คอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์
 แกลบเถ้าลอยลิกไนต์ กับ หิน ทราย น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ สูตรละ 27 แห่ง
 จำนวน 11 สูตร

5. การทดลองนี้ ใช้วิธีการทดลองตามแนวของงานวิจัยอย่างมีระบบ ดังตาราง 1

ตาราง 1 อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมซีเมนต์แกลบ เถ้าลอยลิกไนต์
 หิน ทราย น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ ร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนักของวัสดุผง

สูตร ที่	OPC	:RHA	: FA	: SI	OPC (กก.)	: RHA (กก.)	: FA (กก.)	: SI (กก.)	หิน (กก.)	ทราย (กก.)	น้ำ (กก.)
1	100	: 0	: 0	: 0	450	: 0	: 0	: 0	1140	699	143
2	90	: 0	: 0	: 10	405	: 0	: 0	: 45	1140	699	143
3	90	: 10	: 0	: 0	405	: 45	: 0	: 0	1140	699	143
4	90	: 0	: 10	: 0	405	: 0	: 45	: 0	1140	699	143
5	80	: 20	: 0	: 0	360	: 90	: 0	: 0	1140	699	143
6	80	: 10	: 10	: 0	360	: 45	: 45	: 0	1140	699	143
7	80	: 0	: 20	: 0	360	: 0	: 90	: 0	1140	699	143
8	70	: 30	: 0	: 0	315	: 135	: 0	: 0	1140	699	143
9	70	: 20	: 10	: 0	315	: 90	: 45	: 0	1140	699	143
10	70	: 10	: 20	: 0	315	: 45	: 90	: 0	1140	699	143
11	70	: 0	: 30	: 0	315	: 0	: 135	: 0	1140	699	143

- หมายเหตุ
1. OPC : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
 2. RHA : ซีเมนต์แกลบ
 3. FA : เถ้าลอยลิกไนต์
 4. SI : ซิลิกาฟูม

จากตาราง 1 แสดงถึงผลการทดสอบความเป็นไปได้ ในการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้ซีเมนต์จากโรงงานเผาอิฐ ซีเมนต์ลอยลิกไนต์ ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ให้มีกำลังตามมาตรฐานอุตสาหกรรม อนึ่งหากจะมีการศึกษาถึงการนำซีเมนต์จากโรงงานทำอิฐ ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มาทำการทดลองวิจัยเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง

ตัวแปรต้น

อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ลอยลิกไนต์ กำหนดให้หิน ทราช น้ำ มีสัดส่วนคงที่ ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อซีเมนต์ลอยลิกไนต์ผกผันดังแสดงในตาราง 1 และสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนักของวัสดุผง

ตัวแปรตาม

คุณสมบัติทางกลศาสตร์ ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ด้านกำลังรับแรงอัด ด้านกำลังรับแรงดึง ด้านค่าการยุบตัว ด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น ของคอนกรีตกำลังสูง

นิยามศัพท์เฉพาะ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หมายถึง ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐานปอร์ตแลนด์ และมีจำหน่ายในท้องตลาด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง

ซีเมนต์ลอยลิกไนต์ หมายถึง ซีเมนต์ที่ได้จากการเผาอิฐโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงตามโรงงานอิฐ ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีลักษณะสีขาวปนเทา นำมาบดใช้เวลา 75 นาที ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325

ถั่วลยถิกไนต์ หมายถึง ถั่วลยจากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิต กระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ทราย หมายถึง ทรายน้ำจืด ปราศจากอินทรีย์วัตถุเจือปน ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 4 หิน หมายถึง หินที่นำมาย่อยเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 1/2 นิ้ว น้ำ หมายถึง น้ำประปาที่ใช้ตามบ้านทั่วไป

สารลดน้ำพิเศษ หมายถึง น้ำยาลดน้ำพิเศษประเภทซิลิโพนต แนนพทาติน พอร์มัล ดีไฮด์ คอนเดนเสต ใช้ชื่อทางการค้าว่า คาร์เร็กซ์ ซุปเปอร์ 20 ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทดับบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัด

ซิลิกาฟูม หมายถึง ผงซิลิกอนที่บดละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ 100 เท่าและมีราคาค่อน ข้างสูง ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทดับบลิว อาร์ เกรซ (ประเทศไทย) จำกัด

น้ำหนักมวลรวม หมายถึง ปริมาณของมวลของวัสดุที่นำมาผสมกันครบ ตามอัตรา ส่วนผสมคอนกรีตผสม โดยวัดปริมาณเป็นหน่วยน้ำหนักมวลรวมกัน

เมช (mesh) หมายถึง หน่วยวัดขนาดหรือความละเอียดของมวลวัสดุ ที่สามารถ ลอดช่องตะแกรงที่มีจำนวนรูต่อตารางนิ้วเท่าใด มีค่าเท่ากับเท่านั้นเมท

อัตราส่วน หมายถึง ปริมาณของวัสดุที่นำมาประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ ใช้หน่วย วัดปริมาณ เป็นหน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรอย่างใดอย่างหนึ่ง และมีหน่วยจัดรวมเท่ากับ 100

อัตราส่วนที่ต้องการ หมายถึง ปริมาณของวัสดุที่นำมาประกอบกันเป็นผลิต ภัณฑ์โดยใช้หน่วยวัดปริมาณเป็นหน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรอย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งมีหน่วย วัดรวมกันเท่ากับ 100 เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 80 จี๊เจ้าเกลบร้อยละ 10 ถั่วลยถิกไนต์ร้อยละ 10 แล้ว เป็นผลให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ

คอนกรีตกำลังสูง หมายถึง คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ประมาณ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรขึ้นไป

คอนกรีตควบคุม หมายถึง ส่วนผสมคอนกรีตที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ตราซังร้อยละ 100 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 90 กับเติมสารผสมเพิ่ม ซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1.25 โดยน้ำหนักของวัสดุผง

คุณสมบัติทางกลศาสตร์ หมายถึง คุณสมบัติทางด้านความหนาแน่น ด้านกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ด้านค่าการยุบตัว และด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต ที่สามารถทดสอบได้

หน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง หมายถึง ค่าน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรที่ระดับปริมาณความชื้นระดับใดระดับหนึ่ง มีหน่วยวัดเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

กำลังรับแรงอัด หมายถึง คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ที่ทำให้คอนกรีตรับแรงอัดเป็นส่วนใหญ่ ค่าของการรับกำลังแรงอัดของคอนกรีต เพื่อผลของคุณภาพ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังรับแรงดึง หมายถึง ค่ากำลังรับแรงดึงจากการทดสอบแบบดึงโดยตรง กับการทดสอบกับการแยกตัวออกเป็น 2 ส่วน มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่าการยุบตัว หมายถึง การทดสอบดูความเหลวของคอนกรีตที่ผสมได้แก่การจากการเผอิฐ เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงงานผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ และใช้สารลดน้ำพิเศษผสมเพิ่ม เพื่อให้การยุบตัวประมาณ 10 ± 2 เซนติเมตร

การทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น หมายถึง การทดสอบหาระยะและลักษณะการเกิดการแตกร้าวของเนื้อคอนกรีต โดยการฉีดพ่นสารเคมีเพื่อตรวจสอบในเนื้อคอนกรีตที่ผ่าซีก แล้วว่ามีการทนทานต่อคาร์บอนมากเท่าใด

สมมุติฐานการวิจัย

อัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตกำลังสูง จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ หิน ทราช น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ด้านกำลังรับแรงอัด ด้านกำลังรับแรงดึง ด้านค่าการยุบตัว และด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตกำลังสูงเท่ากับคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีตควบคุม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจากเอกสารตำรา และงานวิจัย ที่จะเป็นประโยชน์ และทำให้การวิจัยครั้งนี้บรรลุจุดมุ่งหมายที่ตั้งไว้โดยแยกเป็นหัวข้อต่อไปนี้

1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับงานคอนกรีต
 - 1.1 ความหมายของคอนกรีต
 - 1.2 องค์ประกอบของคอนกรีต
 - 1.3 ซีเมนต์เพสต์
 - 1.4 การผสมคอนกรีต
 - 1.5 วิธีการผสมคอนกรีต
 - 1.6 การบ่มคอนกรีต
2. วัสดุผสมที่นำมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูง
 - 2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
 - 2.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
 - 2.1.2 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
 - 2.2 สารปอชโซลาน
 - 2.2.1 ซีเมนต์แกลบ
 - 2.2.2 เถ้าลอยลิกไนต์
 - 2.2.3 ซิลิกาฟูม
 - 2.3 วัสดุผสม (มวลรวม)
 - 2.3.1 วัสดุผสมละเอียด
 - 2.3.2 วัสดุผสมหยาบ
 - 2.4 น้ำ
 - 2.5 สารลดน้ำพิเศษ

3. คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีต
 - 3.1 การทดสอบหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง
 - 3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด
 - 3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึง
 - 3.4 การทดสอบค่าการยุบตัว
 - 3.5 การทดสอบการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนेशन
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคอนกรีต

1.1 ความหมายของคอนกรีต คอนกรีต ก็คือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน คือ วัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ น้ำ และ น้ำยาผสมคอนกรีต ผสมกับวัสดุผสม ได้แก่ ทราย หิน หรือกรวด เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็งมีความแข็งแรง และสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น ตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น (ัชชาลย์ เศรษฐบุตร. 2539 : 1)

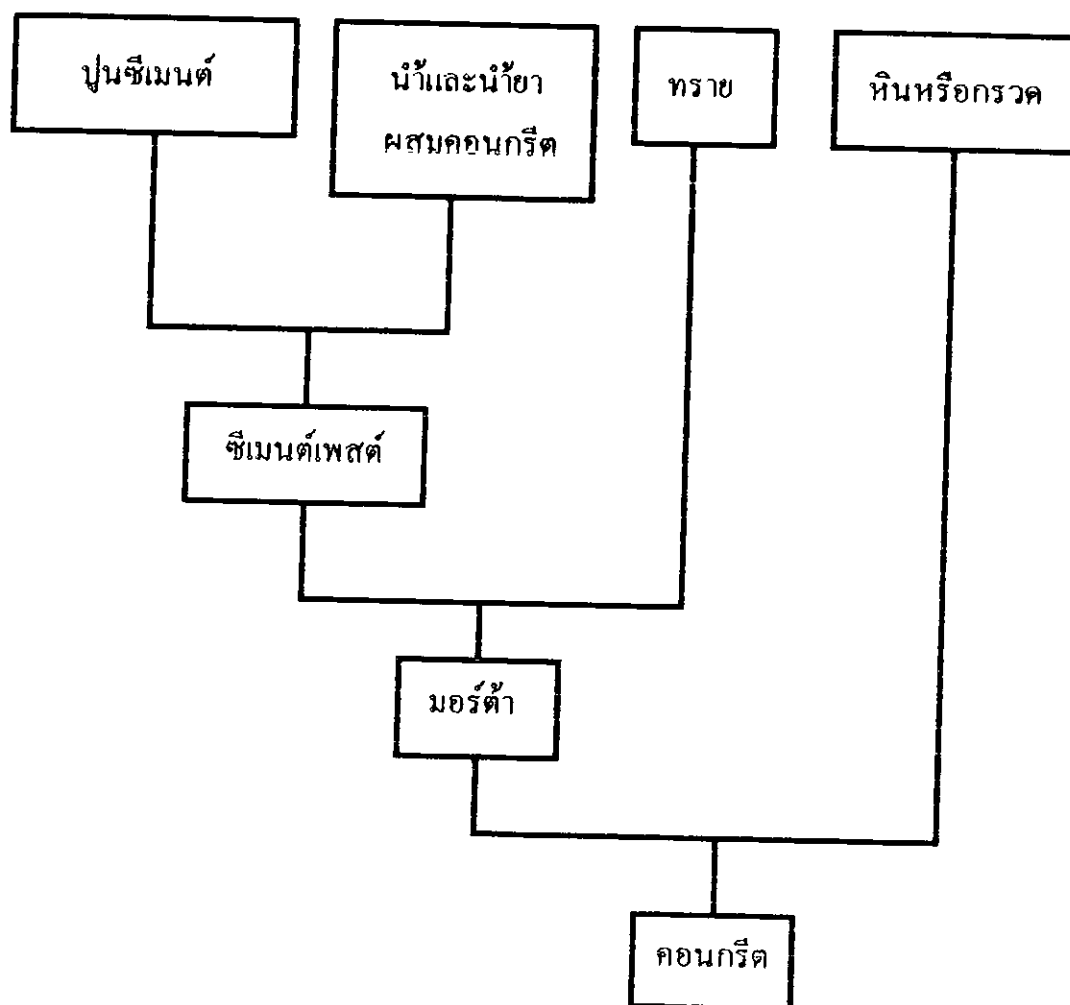
1.2 องค์ประกอบของคอนกรีต

คอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต โดยเมื่อนำส่วนผสมต่าง ๆ เหล่านี้มาผสมกัน จะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต เรียกว่าซีเมนต์เพสต์ (cement paste)

ซีเมนต์เพสต์ ผสมกับ ทราย เรียกว่า มอร์ต้า (mortar)

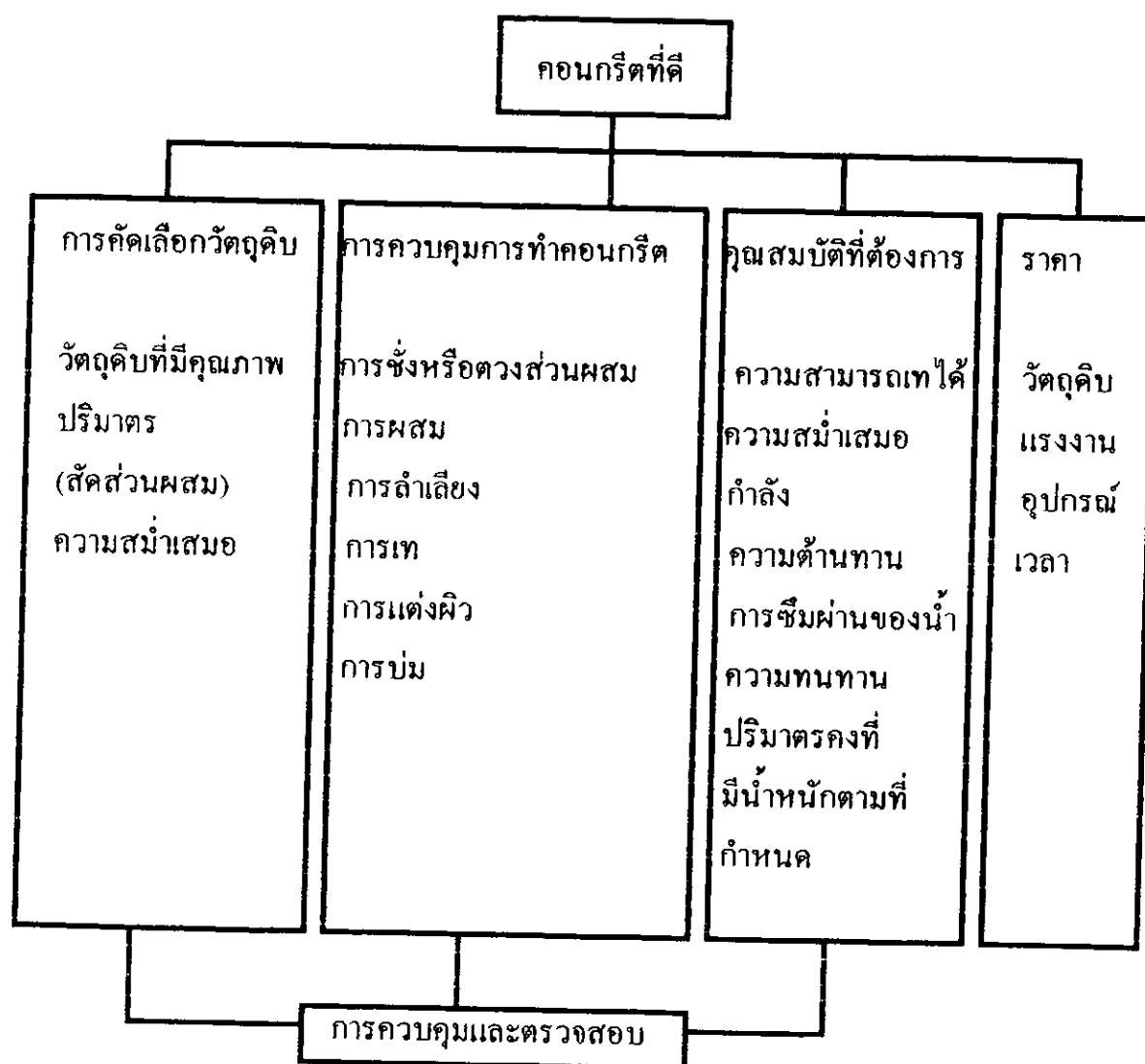
มอร์ต้า ผสมกับ หินหรือกรวด เรียกว่า คอนกรีต (concrete) สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 การเรียกชื่อองค์ประกอบต่าง ๆ ของคอนกรีต
(จักรวาลย์ เสริมรูปบุตร. 2539 : 4)

คอนกรีตที่ดี คือ คอนกรีตที่มีคุณสมบัติอยู่ในสภาพคอนกรีตเหลว ตั้งแต่ผสม
ลำเลียงจากเครื่องผสม จนถึงเทลงแบบหล่อ และมีการอัดแน่นของคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้ว

การทำคอนกรีต ต้องมีขบวนการผลิตที่เป็นขั้นตอน เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติ
สม่ำเสมอ ทั้งทางด้านความสามารถเทได้ (workability) ด้านกำลัง (strength) ด้านความต้าน
ทานการซึมผ่านของน้ำ (permeability) และด้านความคงทน (durability) ดังภาพประกอบ 2

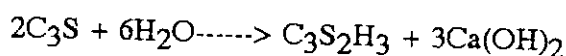


ภาพประกอบ 2 แสดงปัจจัยในการทำคอนกรีตที่ดี (อุคมวิทย์ กาญจนวงศ์. 2537 :203)

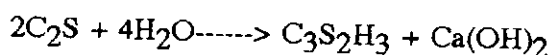
ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) เป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดความร้อน ความร้อนนี้ทำให้น้ำระเหยออกไปจากเนื้อคอนกรีตเร็วขึ้น ถ้า น้ำในคอนกรีตแห้งเร็วเกินไป จะทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตลดลง ฉะนั้นจะต้องทำให้คอนกรีตมีความชื้นก่อนนำไปใช้งานประมาณ 28 วัน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งทำได้โดยการบ่มคอนกรีต (อรรถน์ ประภาพิทยากร. 2531 : 251)

เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นจึงแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละประเภทดังนี้

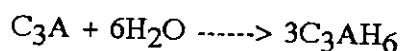
1. ปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)



2. ปฏิกิริยาของไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

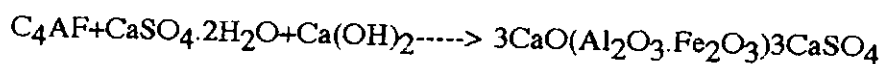


3. ปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)



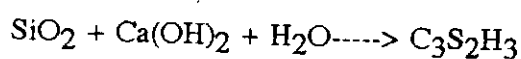
ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นทันทีที่ทำให้ซีเมนต์เฟสแข็งตัวอย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิบซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูนซีเมนต์เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยา

4. ปฏิกิริยาของเตตราแคลเซียมอลูมิโนฟอร์ไรท์ (C_4AF)



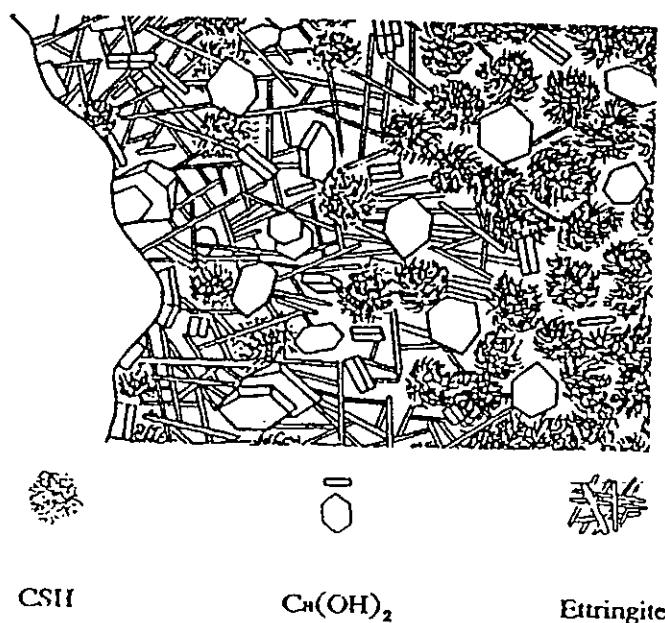
ซึ่งจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเหล่านี้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C_3S_2H_3$) ที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานในเนื้อคอนกรีต

ปฏิกิริยาของซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2)



จากปฏิกิริยานี้จะเห็นว่าซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($C_3S_2H_3$) เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอีก

ดังนั้นการเพิ่มซิลิกาไดออกไซด์ลงในคอนกรีตจึงเป็นวิธีการเพิ่มเชื่อมประสานในคอนกรีต เป็นผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น (สมชาย ปิ่นนุช และคนอื่น. 2538 : 3 - 4)



ภาพประกอบ 3 แสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต (จักรวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539 : 15)

1.3 ซีเมนต์เพสต์ หมายถึงส่วนผสมของปูนซีเมนต์ล้วน ๆ กับน้ำซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกัน ทำให้มีคุณสมบัติเป็นวุ้น และจับตัวเป็นแผ่นกับวัสดุผสมได้ มอร์ต้าเป็นส่วนผสมของซีเมนต์ น้ำและวัสดุผสมย่อย นำมาผสมกับวัสดุผสมมวลหยาบ ก็จะได้คอนกรีตเช่นเดียวกัน (พิภพ สุนทรสมัย. 2533 : 16) คอนกรีตที่ผสมใหม่และยังเหลวอยู่นั้น ส่วนที่เป็นของแข็งรวมทั้งปูนซีเมนต์จะลอยตัวอยู่ในน้ำชั่วคราว เมื่อปูนซีเมนต์แต่ละเม็ดจะถูกแยกไว้ด้วยชั้นบางๆ ของน้ำในขณะเดียวกันจะเกิดแรงยึดเกาะขึ้นในระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์เล็ก ๆ ทำให้ส่วนผสมนี้เหลวพอเทได้ โดยปกติคอนกรีตที่ผสมแล้วในขณะที่ยังเหลวอยู่สามารถแยกออกเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ คือ ซีเมนต์เพสต์และมวลรวม ซึ่งมวลรวมแต่ละชิ้นจะถูกหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ปริมาณของส่วนผสมที่ได้ จะเท่ากับปริมาณของซีเมนต์รวมกับปริมาณของมวลรวมตามภาพประกอบ 4

อากาศ	น้ำ	ปูนซีเมนต์	มวลรวม
ร้อยละ 2 - 5	ร้อยละ 10 - 20	ร้อยละ 10 - 20	ร้อยละ 66 - 78

ซีเมนต์เพสต์	ตัวแปรที่เป็นแร่ธาตุเจือย
--------------	---------------------------

ภาพประกอบ 4 ปริมาตรของส่วนประกอบของส่วนผสมคอนกรีตธรรมดา
(อรุณ ชัยเสรี. 2532 : 15)

ปริมาตรของอากาศที่เกิดขึ้นนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาตรของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ถ้าอัตราส่วนผสม และคุณสมบัติของวัสดุผสมลดลงที่ ปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ลดลง ปริมาณของอากาศจะเพิ่มขึ้นช่องว่าง (voids) ที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเป็นช่องว่างตามธรรมชาติ

คอนกรีตจะมีคุณสมบัติที่ดี หรือไม่นั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับกำหนดยส่วนผสมที่ดี และเหมาะสมอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับได้กำหนดจำนวนของน้ำที่มีต่อปูนซีเมนต์ที่ผสม เรียกว่า อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (water cement ratio หรือ W/C Ratio) ดังตัวอย่างอัตราส่วนต่อไปนี้ ซึ่งใส่ลงในปูนซีเมนต์ 1 ถุงหนัก 50 กิโลกรัม

สมมติให้ใช้น้ำ 10 ลิตร หนักเท่ากับ 10 กิโลกรัม

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } W/C \text{ Ratio} &= \frac{\text{น้ำ (กก.)}}{\text{ปูนซีเมนต์ (กก.)}} \\ &= \frac{10}{50} = 0.2 \end{aligned}$$

ถ้าใส่น้ำในจำนวนปูนซีเมนต์ 1 ถุงเท่าเดิมแต่เพิ่มเป็น 20 ลิตร หรือ 20 กิโลกรัม

$$W/C \text{ Ratio} = \frac{20}{50} = 0.4$$

1.4 การผสมคอนกรีต คอนกรีตโดยทั่วไปเป็นของผสมที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์กับวัสดุผสม ได้แก่ ทราย หิน หรือกรวด และน้ำเข้าด้วยกันตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ให้ได้ส่วนผสมที่ขึ้นเหลวพอเทได้และสะดวกแก่การใช้งาน (good workability)

โดยทั่วไปการวัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ และมวลรวมที่จะนำมาผสมเป็นคอนกรีตนั้นทำได้ 2 วิธีคือ

วิธีตวงส่วนผสม ซึ่งเท่ากับการวัดปริมาตรเทียบกัน และวิธีชั่งส่วนผสม ซึ่งเท่ากับใช้น้ำหนักของวัตถุแต่ละอย่างตามจำนวนกำหนด

การวัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยปริมาตร เหมาะสำหรับงานก่อสร้างขนาดเล็ก และคอนกรีตที่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ แต่หากทำให้ถูกต้องก็สามารถผลิตคอนกรีตที่มีคุณภาพได้พอสมควร โดยผู้รับเหมาควรใช้กะเบาะมาตรฐานในการตวงปริมาตรของหิน ทราย ส่วนปริมาณน้ำต้องพิจารณา ความชื้นบนผิวมวลรวม เพราะจะมีผลต่อปริมาณน้ำเติมลงไปมาก โดยเฉพาะมวลละเอียดอาจมีหน่วยน้ำหนักเมื่อขึ้น และเมื่อแห้งต่างกันถึง ร้อยละ 30 เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพจึงควรตรวจสอบความชื้นดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{จำนวนความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักที่หายไป}}{\text{น้ำหนักของทรายที่แห้ง}} \times 100$$

ส่วนผสมที่กล่าวหมายถึงทรายแห้งและหินแห้ง แต่วัสดุดังกล่าวจะไม่อยู่ในสภาพเช่นนั้น โดยทำทรายที่ขึ้นนั้นให้แห้งด้วยความร้อน 100 - 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง แล้วเข้าสู่สูตรคำนวณดังนี้

เพื่อเป็นการควบคุมจำนวนน้ำให้มีจำนวนตามกำหนด เมื่อน้ำมีอยู่ในทรายจำนวนเท่าใดก็นำไปหักออกจากจำนวนกำหนดนั้น ใส่น้ำลงไปตามจำนวนที่แท้จริง ฉะนั้นจึงต้องกระทำการหักล้าง เมื่อความชื้นของทรายเปลี่ยนไปการวัดปริมาณปูนซีเมนต์โดยทั่วไปจะประมาณจากจำนวนถุงเพราะปูนซีเมนต์มีน้ำหนักแน่นอน คือ 1 ถุงหนัก 50 กิโลกรัม ส่วนปริมาณน้ำ อาจใช้ค่าชุปตัวเป็นตัวควบคุม (ัชชาวลย์ เศรษฐบุตร. 2539 : 79)

ตาราง 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่นิยมใช้กับงานประเภทต่าง ๆ (ประณต กุล-ประสูตร. 2536 : 88)

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตโดยปริมาตร	ประเภทของงาน
ปูน : ทราย : หิน	
1 : 1.5 : 3	เสาและส่วนของโครงสร้างอาคารที่ต้องการพื้นน้ำ
1 : 2 : 4	งานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป
1 : 2.5 : 4	งานถนน ทางเท้า ฐานรากอาคาร เชื้อนก้นดิน
1 : 3 : 5	งานคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น ฐานรากขนาดใหญ่

การวัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนัก

การวัดส่วนผสมของคอนกรีตโดยน้ำหนักนั้น ในต่างประเทศมักใช้กันมากกว่าการผสม โดยปริมาตร เพราะจะได้ส่วนผสมที่แน่นอนใกล้เคียงและหลีกเลี่ยงผลแตกต่างของส่วนผสมแต่ละครั้งได้ โดยเฉพาะในงานก่อสร้างใหญ่ ๆ งานคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete) ที่ต้องการคอนกรีตกำลังสูง (high strength concrete) จะต้องพิถีพิถันในเรื่องการวัดส่วนผสมมาก มิฉะนั้นจะไม่ได้กำลังตามที่ต้องการสม่ำเสมอ

ส่วนผสมของคอนกรีตกำหนดไว้เป็นกิโลกรัม เช่น ปูนซีเมนต์ 300 กิโลกรัม ทราย 700 กิโลกรัม หิน 1,100 กิโลกรัม เป็นต้น หรือจะกำหนดเป็นอัตราส่วน เช่น ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน 11 : 2.3 : 3.7 โดยน้ำหนักก็ได้ การที่จะกำหนดส่วนผสมนี้ได้จะต้องทราบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ และมวลรวมซึ่งได้จากการทดลอง และกำหนดกำลังที่ต้องการมาคำนวณ เพื่อออกแบบส่วนผสม (mixed design)

วิธีหาส่วนผสมคอนกรีตโดยน้ำหนัก โดยมากวิศวกรจะเป็นผู้กำหนดส่วนผสมคอนกรีตให้ไว้ในแบบแปลนหรือรายการก่อสร้าง (specification) ถ้าเป็นการผสมโดยน้ำหนักมักจะกำหนดไว้ดังนี้คือ

ส่วนผสมของคอนกรีต ใน 1 ลูกบาศก์เมตร ใช้

ปูนซีเมนต์	300	กิโลกรัม
ทรายหยาบ	659	กิโลกรัม
หินหรือกรวด	1,225	กิโลกรัม
น้ำ	174	กิโลกรัม

การยุบตัวของคอนกรีต 7.5 เซนติเมตร

เมื่อทราบอัตราส่วนผสมดังกล่าวแล้ว ก็สามารถปฏิบัติการผสมในสนามได้ แต่ในกรณีที่ผสมคอนกรีตทีละหนึ่งลูกบาศก์เมตร โดยมากจะต้องเป็นงานขนาดใหญ่ที่ใช้คอนกรีตจำนวนมากและมีเครื่องผสมขนาดใหญ่ โดยทั่ว ๆ ไปแล้วงานก่อสร้างมักจะใช้เครื่องผสมขนาดเล็ก ซึ่งเหมาะจะใช้กับงานทั่ว ๆ ไป และเคลื่อนย้ายได้ง่าย

การผสมคอนกรีตโดยน้ำหนักนี้ จะทำให้ได้ส่วนผสมคอนกรีตที่สม่ำเสมอ (พิภพ สุนทรสมัย. 2536 : 18-21)

ตาราง 3 ขอบเขตความคลาดเคลื่อนของการชั่งน้ำหนักวัสดุเพื่อใช้ผสมคอนกรีต ตาม มอก. 213 - 2520 (ฉัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539 : 79)

วัตถุดิบ	ปริมาณ	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (ร้อยละ)
1.ปูนซีเมนต์	น้อยกว่า 200 กก.	± 2
	มากกว่าหรือเท่ากับ 200 กก.	± 1
2.มวลรวม	น้อยกว่า 500 กก.	± 3
	มากกว่าหรือเท่ากับ 500 กก.	± 2
3.น้ำ		± 3
4.สารผสมเพิ่ม		± 3

1.5 วิธีการผสมคอนกรีต คอนกรีตอาจจะผสมได้ทั้งด้วยเครื่องผสมคอนกรีต หรือผสมด้วยมือ การผสมด้วยเครื่องผสมจะทำให้ส่วนผสมสม่ำเสมอดีกว่าการผสมด้วยมือ อย่างไรก็ตาม คอนกรีตทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตที่ผสมด้วยเครื่องผสม หรือที่ผสมด้วยมือก็ตาม จะต้องผสมเข้าด้วยกันอย่างทั่วถึงจนกระทั่งดูเป็นสีเดียวกัน และวัสดุผสมทั้งหมดควรจะกระจายออกไปอย่างสม่ำเสมอโดยทั่วถึงกัน

การผสมด้วยเครื่องผสม (machine mixing)

เครื่องผสมคอนกรีตส่วนใหญ่จะบอกขนาด (ปริมาตรของส่วนผสม) ที่ตัวเครื่องสามารถจะรับได้ จึงไม่ควรที่จะใส่ส่วนผสมเกินขนาดที่กำหนด เพราะจะทำให้เกินกำลังที่เครื่องจะหมุนได้ ในการผสมแต่ละครั้งเครื่องจะต้องหมุนด้วยอัตราความเร็วคงที่ แต่ไม่ควรจะหมุนเกินกว่า 30 รอบต่อนาที

ตาราง 4 เวลาขั้นต่ำในการผสมคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกา

ขนาดของเครื่อง (ลบ.ม.)	เวลาที่ใช้ในการผสม (นาที)
1.0	1.00
1.5	1.25
2.5	1.50
3.0	1.75
4.0	2.00
4.5	2.25

การผสมด้วยมือ (hand mixing)

การผสมคอนกรีตด้วยมือ โดยปกติจะต้องกระทำการกระเบผสมคอนกรีตหรือกระทำการพื้นที่ราบที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ จะต้องมียี่พื้นที่กว้างไม่น้อยกว่า 2 เมตร ยาวไม่น้อยกว่า 2.5 เมตร ลำดับขั้นตอนการทำงานในการผสมด้วยมือมีดังต่อไปนี้คือ

1.5.1 เททรายในปริมาณที่ตวงแล้วลงบนกระเบผสมคอนกรีต หรือลงบนพื้นที่ใช้เป็นที่ผสมคอนกรีตแล้วเกลี่ยให้ทั่ว

1.5.2. กระจายปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ตวงแล้วลงบนทรายให้ทั่ว แล้วเคล้าให้เข้ากันด้วยพลั่วจนกระทั่งเป็นสีเดียวกันโดยสม่ำเสมอ

1.5.3. เกลี่ยส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ทรายให้ทั่ว แล้วกระจายหินในปริมาณที่ตวงแล้วลงไปในส่วนผสมให้ทั่วเช่นกัน

1.5.4. ผสมหรือคลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากันอีกครั้งหนึ่งด้วยพลั่ว

1.5.5. เกลี่ยส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ออกให้เป็นแอ่งตรงกลางแล้วค่อย ๆ เติมน้ำในปริมาณที่ตวงแล้วลงไป

1.5.6. ผสมหรือคลุกเคล้าต่อไปจนกระทั่งส่วนผสมได้ทีกล้าว คือส่วนผสมจะเข้ากันจนดูเป็นสีเดียวกันทั้งหมด

สิ่งสำคัญ คอนกรีตที่ผสมแล้วจะต้องใช้ให้หมดภายใน 30 นาที หรือภายในระยะเวลาก่อตัวขึ้นต้น (initial setting time) ยกเว้นกรณีที่ใช้สารหน่วงการก่อตัว (slow-setting agent) คอนกรีตที่ผสมไว้นานเกินกว่านี้ไม่สมควรนำมาใช้แต่ควรทิ้งไป

หมายเหตุ ในการเติมน้ำลงไปในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ทราย และหินนั้นให้ค่อย ๆ เติมทีละน้อย แล้วต้องปล่อยให้ น้ำซึมไปจนทั่วกองเสียก่อนจึงค่อยผสมหรือคลุกเคล้า ทำดังนี้จนกระทั่งเติมน้ำได้ปริมาณตามที่กำหนด แล้วจึงผสมหรือคลุกเคล้าส่วนผสมต่อไปจนได้ที่ (ประณต กุลประสูตร. 2537 : 126-128)

1.6 การบ่มคอนกรีต การบ่มคอนกรีตเป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญมากที่สุด ของงานก่อสร้างถ้าไม่ได้รับการบ่มอย่างถูกวิธีหรือไม่ได้รับการบ่มเลย ก็อาจจะทำให้คอนกรีตแตกร้าว และเสียความแข็งแรงไปในที่สุดการบ่มคอนกรีตที่ถูกวิธี นอกจากจะสามารถป้องกันการแตกร้าวได้แล้ว ก็ยังจะทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นอีกด้วยคอนกรีตที่ได้รับการบ่มอย่างถูกวิธีเพียง 7 วัน จะมีความแข็งแรงสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้รับการบ่มถึง ร้อยละ 50 ถ้าบ่มนานถึง 1 เดือน ก็จะมีมีความแข็งแรงสูงถึงสองเท่า คอนกรีตโดยทั่วไป ควรจะได้รับการบ่มติดต่อกันอย่างน้อยที่สุด 7 วัน

วิธีบ่มคอนกรีต การบ่มคอนกรีต ไม่เพียงแต่จะป้องกันความชื้นหรือน้ำภายในคอนกรีตมิให้ระเหยออกมาเท่านั้นหากยังจะช่วยเพิ่มความชื้น หรือน้ำให้แก่ผิวคอนกรีตโดยตรงได้อีกด้วย ทั้งนี้จะทำให้น้ำหรือความชื้นภายในคอนกรีตได้มีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ต่อไปจนหมดอันจะเป็นผลทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นยังทำให้คอนกรีตไม่แข็งตัวเร็วจนเกินไปจนถึงกับเกิดการแตกร้าวได้ การบ่มคอนกรีตจะต้องกระทำในทันทีหลังจากคอนกรีตแข็งตัว หรือหลังจากการตกแต่งผิวหน้าชั้นสุดท้ายสิ้นสุดลง

สำหรับวิธีบ่มคอนกรีต โดยทั่วไปสามารถจำแนกออกได้ดังตาราง 5 - 8

ตาราง 5 ข้อดีและข้อเสียของการบ่มคอนกรีตด้วยวิธีเพิ่มความชื้น (ประณต กุลประเสริฐ. 2537 : 137 - 145)

วิธีบ่มคอนกรีต	ข้อดี	ข้อเสีย
การปล่อยน้ำข้าง วิธีทำ ใช้ดินเหนียวทำเป็นขอบปิดกัน โดยรอบพื้นผิวคอนกรีตแล้วปล่อยน้ำเข้าไปให้สูงขึ้นมาจากผิวคอนกรีตประมาณ 1 นิ้วหรือกว่านั้น	1. สะดวกต่อการทำและ การซ่อมแซม 2. ราคาถูก 3. วัสดุหาง่าย	1. ใช้ได้เฉพาะกับผิวคอนกรีต แนวราบ 2. ต้องหมั่นตรวจการแตกร้าวหรือ การพังทลายของดินเหนียว ที่ปิดกันเพื่อป้องกันน้ำแห้ง 3. ต้องทำความสะอาดคอนกรีต หลังเสร็จงานบ่ม
การฉีดพ่นน้ำ วิธีทำ ใช้น้ำที่มีแรงดันฉีดพ่นบริเวณ จะทำการบ่ม การใช้วัสดุเปียกชื้นคลุม วิธีทำ ใช้กับวัสดุคลุมอันใดก็ได้แก่ กระสอบ ผ้าใบ ฟางข้าว จีเลื่อย เป็นต้น คลุมให้ทั่ว บริเวณ แล้วฉีดน้ำให้ชุ่มอยู่ เสมอตลอดเวลา	1. ใช้ได้กับผิวคอนกรีตทั้ง แนวราบและแนวตั้ง 2. สะดวกต่อการทำงาน 3. ราคาถูก 1. ใช้ได้กับผิวคอนกรีตทั้ง แนวราบและแนวตั้ง 2. วัสดุหาง่าย 3. ฟางข้าว	1. ใช้น้ำมากและต้องการแรงดัน ของน้ำสูง 2. ถ้าฉีดพ่นไม่สม่ำเสมออาจทำให้ คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ 1. ต้องฉีดน้ำให้ชุ่มอยู่เสมอตลอด เวลา 2. ในกรณีพื้นที่กว้าง ๆ จะเปลือง เวลา 3. วัสดุคลุมจะต้องปราศจากสาร ที่เป็นอันตรายต่อปูนซีเมนต์ หรือสารที่ทำให้ผิวคอนกรีต ดำ 4. จะต้องระมัดระวัง เรื่องเพลิง ไหม้และลมพัด

ตาราง 6 ข้อดีและข้อเสียของการบ่มคอนกรีตด้วยวิธีป้องกันการเสียน้ำ

วิธีบ่มคอนกรีต	ข้อดี	ข้อเสีย
การใช้กระดาษ วิธีทำ ใช้กระดาษชนิดกันน้ำได้ปิดคลุมให้ทั่วบริเวณที่จะทำการบ่ม	1. สะดวกต่อการทำและสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว 2. สามารถป้องกันมิให้คอนกรีตแห้งเร็วไปแต่ต้องคอยรดน้ำไว้ด้วย	1. ราคาแพง 2. ไม่สะดวกต่อการเก็บรักษา
การใช้ผ้าพลาสติก วิธีทำ ใช้ผ้าพลาสติกปิดคลุมบริเวณที่จะทำการบ่มเช่นเดียวกับวิธีใช้กระดาษกันน้ำ	1. สะดวกต่อการทำและน้ำหนักเบา 2. ไม่ต้องคอยรดน้ำให้ชุ่มอยู่เสมอ	1. ราคาแพง 2. ขำรดง่ายเพราะบางมาก 3. ต้องหาของหนักทับเพื่อกันลมพัดปลิว
การใช้สารเคมี วิธีทำ ใช้สารเคมีฉีดพ่นคลุมให้ทั่วบริเวณที่จะทำการบ่ม	1. สะดวกต่อการทำ 2. ไม่ต้องคอยรดน้ำ 3. สามารถใช้เมื่อบ่มด้วยวิธีอื่นไม่ได้ผล	1. ราคาแพง 2. ต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ 3. อาจเป็นอันตรายแก่ผู้พ่นหรือบุคคลใกล้เคียง
การใช้ไม้แบบ วิธีทำ ใช้น้ำฉีดพ่น ไม้แบบให้ชุ่มอยู่ตลอดเวลาและต้องรักษาไม้แบบไว้ให้นานที่สุด	1. สะดวกต่อการทำ	1. ไม่สามารถนำไม้แบบไปใช้งานอื่นได้ 2. ใช้ได้เฉพาะคอนกรีตที่มีไม้แบบหุ้มโดยรอบเท่านั้น

ตาราง 7 ข้อดีและข้อเสียของการปั๊มคอนกรีตด้วยวิธีเร่งกำลัง

วิธีปั๊มคอนกรีต	ข้อดี	ข้อเสีย
การปั๊มด้วยไอน้ำ		
1. ปั๊มที่ความดันบรรยากาศ	1. ใช้เวลาน้อย	1. ราคาแพง
2. ปั๊มที่ความดันสูง	2. สามารถกำหนดระยะ เวลาในการปั๊มได้ อย่างแน่นอน	2. ต้องใช้บุคคลที่มีความรู้ ควบคุมการปั๊ม
	3. สามารถเร่งระยะ เวลาการปั๊มได้	3. อาจเกิดอันตรายได้ถ้า ควบคุมไม่ทั่วถึง หรือขาด ความระมัดระวัง
	4. ได้รับความเชื่อถือสูง	4. ต้องเสียเวลาในการเตรียม งานมาก

ตาราง 8 กำหนดเวลาน้อยที่สุดที่คอนกรีตควรได้รับการบ่มน้ำจากวันที่หล่อเสร็จแล้ว 24 ชั่วโมงเป็นต้นไป (ประณต กุลประเสริฐ. 2537 : 137-146)

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์			
ประเภทของงาน	ตราเสือ	ตราช้าง	ตราเอราวัณ
	ตรางูเห่า	ตราพญานาคสีเขียว	ตราพญานาคสีแดง
	ตรานกอินทรี	ตราเพชรเม็คเคียว	ตราสามเพชร
	ตราทีพีไอ (สีเขียว)	ตราทีพีไอ (สีแดง)	ตราทีพีไอ (สีดำ)
งานธรรมดา			
-เสา คาน และกำแพง	7 วัน	7 วัน	4 วัน
-พื้นบ้าน พื้นถนนในบ้าน ฯลฯ	8 วัน	8 วัน	4 วัน
-ถนนชั้นหนึ่ง ลานจอดรถหรือ ทางวิ่งของเครื่องบิน	-	14 วัน	7 วัน
-เข็มสำหรับจะนำไปตอกเป็น ฐานราก	28 วัน	14 วัน	7 วัน
-แผ่นพื้นบาง ๆ	14 วัน	14 วัน	7 วัน
-รูปหล่อที่เล็กบางซึ่งใช้ ปูนซีเมนต์ผสมมาก	-	14 วัน	7 วัน

2.วัสดุผสมที่นำมาใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูง

ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง (high strength concrete) ซึ่งจะช่วยพัฒนาความก้าวหน้าในงานคอนกรีต ช่วยลดเวลาการก่อสร้าง เร่งเวลาการใช้งาน และลดขนาดของโครงสร้าง ขึ้นอยู่กับการเลือกสรรของชนิด และความเหมาะสมตลอดจนการควบคุมดูแลเป็นพิเศษของวัตถุดิบที่นำมาใช้ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวม คือ หิน ทราย และ

น้ำ นอกจากนี้ใช้สารผสมเพิ่มคุณภาพสูง ซึ่งเป็นสารปอซโซลาน และเพิ่มสารลดน้ำพิเศษตามรายละเอียดดังต่อไปนี้ (สุดา เถลิงพงษ์. 2537 : 8)

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมของออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอนและอะลูมิเนียม จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่จะนำไปใช้ในงานก่อสร้าง ต้องมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานสำหรับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของกรมวิทยาศาสตร์กระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งแบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภทคือ (สนั่น เจริญเผ่า และคนอื่น 2530 : 4)

ประเภทหนึ่ง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (type I-normal Portland cement) จัดเป็นปูนซีเมนต์มาตรฐาน เหมาะสำหรับงานก่อสร้างทั่ว ๆ ไป ที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษนอกเหนือไปกว่าธรรมดา ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้กับงานคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น งานก่อสร้างคานคอนกรีต ทางเท้า ถนน อาคาร สะพาน ถังน้ำ บ่อน้ำ ท่อระบายน้ำและอื่น ๆ ไม่เหมาะกับการที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟตจากดินหรือน้ำ ที่ซึ่งความร้อนอันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะไม่เป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงขีดอันตรายได้แก่ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชรเม็ดเดียว และตราพญานาคเขียวสีเขี้ยว ส่วนปูนซีเมนต์ประเภทนี้ที่ส่งเข้ามาจากต่างประเทศ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราดอกจิก

ประเภทสอง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (type II-modified Portland cement) จัดเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทดัดแปลง เพื่อให้มีความต้านทานต่อซัลเฟตปานกลาง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะต่ำกว่า และเพิ่มได้ช้ากว่าประเภทแรก ช่วยลดอุณหภูมิของคอนกรีตในอากาศร้อนได้ดี เหมาะกับการก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น ตอม่อขนาดใหญ่ สะพานเทียบเรือ เขื่อน หรือกำแพงกันดินในบริเวณที่โคนน้ำเค็มเป็นครั้งคราว ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาค 7 เขียว

ประเภทสาม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดแรงสูงเร็ว (type III-high-early strength Portland cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้เมื่อปูนจะบดละเอียดกว่า ปูนซีเมนต์แบบธรรมดา เป็นผลทำให้แข็งตัวและรับแรงได้เร็วกว่าแบบธรรมดาแต่จะต้องบ่มให้ดี โดยปกติจะสามารถรับแรงได้เมื่อคอนกรีตมีอายุเพียงประมาณ 1 ถึง 3 วัน จึงนิยมนำไปใช้

กับงานเร่งด่วนที่ต้องทำแข่งกับเวลา หรือในกรณีที่ต้องการถอดหรือรีบบ่อยกว่าปกติ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราพญานาคเศียรเดียวสีแดง และตราสามเพชร

ประเภทสี่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดความร้อนต่ำ (type IV-low heat Portland cement) จัดเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เหมาะสมกับงานซึ่งต้องการควบคุมทั้งปริมาณ และ อัตราความร้อนที่เกิดขึ้นให้น้อยที่สุด การเกิดกำลังของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะเป็นไปอย่างช้า ๆ นิยมไปใช้กับงานขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนกั้นน้ำซึ่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ถ้ามากเกินไปจะเป็นอันตรายอย่างมากกับตัวเขื่อน เนื่องจาก จะทำให้เกิดการแตกหรือร้าวได้

ประเภทห้า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้านทานซัลเฟตได้สูง (type V- sulfate-resistance Portland cement) จัดเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีคุณสมบัติในการต้านทานต่อ ซัลเฟตได้สูงจึงเหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างในบริเวณที่มีการกระทำของซัลเฟตอย่างรุนแรง เช่น ในบริเวณดิน หรือน้ำที่มีความเป็นด่างสูง ระยะเวลาในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ประเภทนี้ จะช้ากว่าประเภทอื่น ๆ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลามและตราช้างพื้นสีฟ้า

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พิเศษ นอกจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง 5 ชนิดที่กล่าว มา ยังมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อีกบางประเภทที่นิยมใช้กัน คือ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กักอากาศ (air-entraining Portland cement) รหัสซี-157 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้วัสดุที่มีคุณสมบัติในการกักอากาศปริมาณเล็กน้อย จะถูก เติมเข้าไป และบดรวมกับปูนเม็ดในระหว่างการผลิตเหมาะกับการใช้งานคอนกรีตในบริเวณที่มี อากาศหนาวจัดหรือมีหิมะ และมีผลต่อการใช้ประโยชน์จากเกลือในการขจัดหิมะและน้ำแข็ง คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ ประเภทนี้จะมีฟองอากาศขนาดเล็กที่แยกตัวออกจากกันอย่าง สมบูรณ์ กระจายกันอยู่อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เตาถลุง (Portland blast-furnance slag cement) รหัส ซี-205 จำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท ซึ่งได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เตาถลุง (Portland blast-furnance slag cement) และประเภท ไอเอสเอ ได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เตาถลุงกัก อากาศ (air-entraining Portland blast-furnance slag cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ตะกรันเตาถลุง

ที่ได้รับการคัดเลือกคุณภาพจะถูกบด ร่วมกับปูนเม็ดในระหว่างการผลิต ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการน้ำหนักและปริมาตรมากกว่าความแข็งแรง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (portland Pozzolan cement) รหัส ซี-340 จำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือประเภทไอพี ได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน และประเภทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานกักอากาศ (air-entraining Portland pozzolan cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ได้จากการนำเอาปอซโซลาน ซึ่งเป็นเถ้าภูเขาไฟที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือที่ทำเทียมขึ้นบดผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบธรรมดา ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้กับงานโครงสร้างได้น้ำทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็มเช่น งานสะพาน เขื่อน หรือ ทำเขิบบริโอ เนื่องจากสามารถทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดีพอสมควร

ปูนซีเมนต์ผสม (mixed cement) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปูนซีเมนต์ซิลิกา (silica cement) ได้จากการนำเอาทรายหรือหินปูนบดละเอียด ผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบธรรมดาในอัตราประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 เพื่อให้มีปริมาณมากขึ้นและราคาถูกลง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีคุณภาพค่อนข้างต่ำจึงเหมาะกับงานที่ไม่สำคัญ และงานที่ไม่ต้องรับแรงมากนัก เช่นงานคอนกรีตเทพื้นบนดินถมอัด ซึ่งไม่ได้มีการถ่ายเทน้ำหนักจากพื้นไปสู่โครงสร้างส่วนอื่น ๆ กระเบื้องมุงหลังคา โอง ท่อระบายน้ำ หรือถังส้วมเป็นต้น เนื่องจากมีคุณสมบัติแข็งตัวช้าและไม่ยึดหดตัวมากนัก ใช้กับงานปูนก่อ ปูนฉาบ และปูนตกแต่งทั่ว ๆ ไป เพราะสามารถช่วยลดการแตกร้าวของผิวลงได้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเสือ ตรางูเห่า และตรานกอินทรี

ปูนซีเมนต์บ่อน้ำมัน (oil well cement) เป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดหนึ่งซึ่งแตกต่างไปจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบธรรมดาตรงที่ก่อตัวช้ามากในอุณหภูมิสูง ๆ เช่นที่เกิดขึ้นตามบ่อลึก (ประณต กุลประสูตร. 2537 : 22-24)

2.2 สารประกอบในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง คือ

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate) มีสูตรทางเคมีว่า $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ชื่อย่อคือ C_3S ซึ่งทำให้ปูนซีเมนต์สร้างกำลังได้เร็ว

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate) มีสูตรทางเคมีว่า $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ชื่อย่อคือ C_2S ซึ่งทำให้ปูนซีเมนต์สร้างกำลังได้ช้า

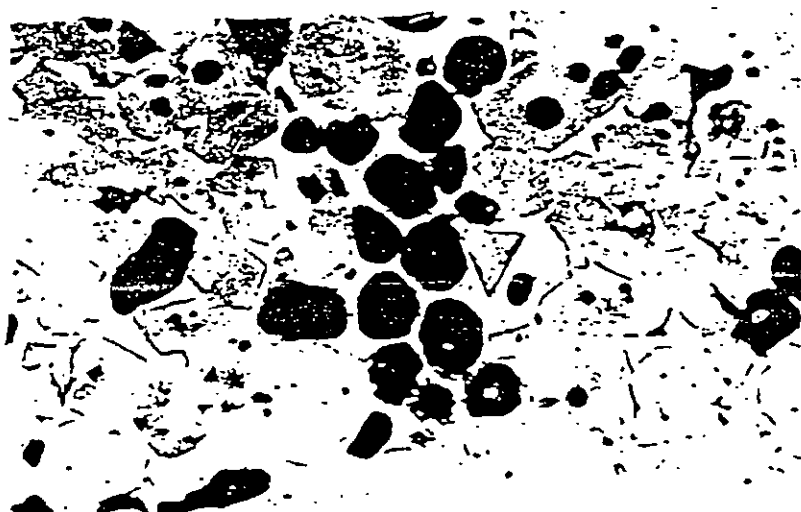
3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (tricalcium aluminate) มีสูตรทางเคมีว่า $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ชื่อย่อคือ C_3A ซึ่งทำให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาเริ่มแข็งตัว และยิบซั่มเป็นตัวด่วงให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวตามความต้องการ

4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (tetra-calcium aluminoferrite) มีสูตรทางเคมีว่า $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ชื่อย่อ C_4AF

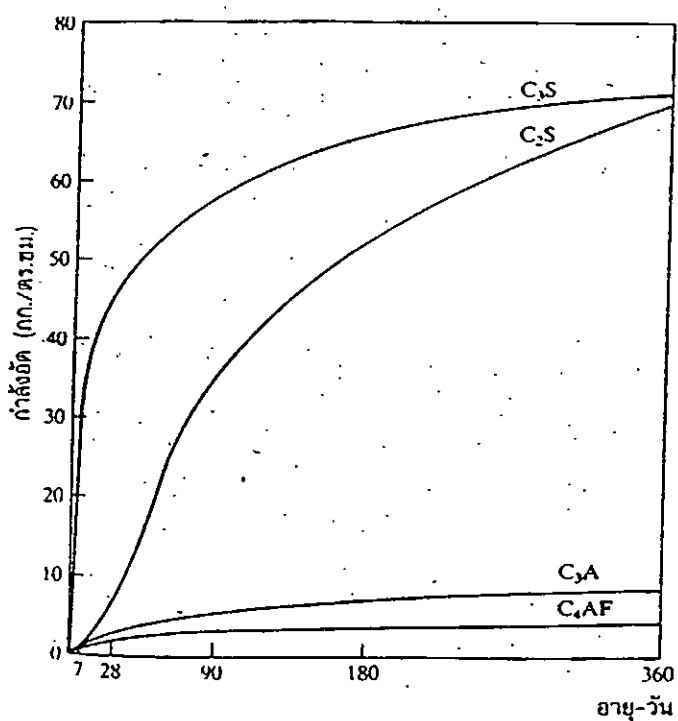
ในทางวิชาการได้มีการปรับปรุงค้นคว้าเกี่ยวกับ กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์เสมอมา ได้มีการจำกัดขีดขั้นลักษณะคุณภาพ เช่น จำกัดส่วนผสมทางเคมี คุณสมบัติเกี่ยวกับเวลาแข็งตัว ความไม่เปลี่ยนแปลงไปในทางเสื่อมคุณภาพ ตลอดจนการจำกัดขีดต่ำของกำลังปูนซีเมนต์ทั้งแรงคึงและแรงกด (พงศ์พันธ์ วรสุนทรโรสถ. 2535 : 82)

ตาราง 9 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (จั่วพลูย สรรพบุตร. 2539 : 11)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF



ภาพประกอบ 5 รูปร่างลักษณะของ C_3S ซึ่งเป็นรูปผลึก รูปหกเหลี่ยม และ C_2S เป็นเม็ดกลมสีดำ (จ้ชวาลย์ เศรษฐรูปตร. 2539 : 12)



ภาพประกอบ 6 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ (จ้ชวาลย์ เศรษฐรูปตร. 2539 : 203)

ตาราง 10 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีต (อุคมวิทย์ กาญจนวงศ์. 2537 : 203)

วัสดุ	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	กำลังรับแรงดึง (กก./ตร.ซม.)	โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)	ส.ป.ส.การขยายตัว ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
คอนกรีต	2,300-2,400	30	2.5×10^5	10

2.2 สารปอซโซลาน คือ สารที่มีซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อมีความชื้น แล้วเกิดตัวเชื่อมประสานคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นและทนทานต่อสารเคมีมากขึ้น เราอาจใช้ปอซโซลาน ในรูปของสารผสมเพิ่ม ในรูปของปูนซีเมนต์ผสม นอกจากการเพิ่มความสามารถ ในการใช้งานของคอนกรีตแล้ว ยังช่วยลดปริมาณ และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน วัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกา ใต้แก่ ขี้เถ้าภูเขาไฟ และหิน ทัพท์ (tuft) พุมิไซด์ (pumicite) โอพาลีน (opaline) ชาร์ท (chert) ดินเหนียว และหินชอล์ด (shale) โดยนำมาบดให้ละเอียดและเผา แต่ ขี้เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นขี้เถ้าอนินทรีย์ที่เหลือจากการเผาถ่านหิน วัสดุนี้เป็นที่นิยมมากเพราะมีลักษณะเป็นผงละเอียดอยู่แล้ว

การใช้สารปอซโซลาน มักจะมีผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำ ในระยะแรก แต่กำลังจะสูงเมื่อ คอนกรีตมีอายุมากขึ้น และจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุมากกว่า 28 วัน (จักรวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539 : 61) สารปอซโซลานที่กล่าวถึงในการทดสอบของงานวิจัยในครั้งนี้ มีดังนี้

2.2.1 ขี้เถ้าแกลบ เป็นสารปอซโซลานที่ได้จากการเผาแกลบที่อุณหภูมิ 600 - 800 องศาเซลเซียส มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้ เกิดเป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) ขี้เถ้าแกลบที่จะนำมาใช้ ต้องผ่านการบดที่ระยะเวลา 0 15 45 และ 75 นาที ด้วยเครื่องบดขี้เถ้าแกลบ ซึ่ง

มีค่าความละเอียดของซีเมนต์แกลบดังตาราง 11 ทั้งนี้เพื่อหาความละเอียดของซีเมนต์แกลบที่เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยา

ตาราง 11 ค่าความละเอียดของซีเมนต์แกลบ (สมชาย ปิ่นนุช และคณะ. 2538 : 11)

เวลาที่ใช้ในการบด ซีเมนต์แกลบ (นาที)	ผลการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรง ขนาด #325 (ค่าร้อยละ)
0	27.00
15	91.42
45	93.30
75	99.07

ซีเมนต์แกลบที่ผ่านการบดแล้วจะนำมาผสมกับสารลดน้ำพิเศษ และสารเพิ่มการกระจายตัวในน้ำ ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคซีเมนต์แกลบในน้ำ นอกจากนี้อนุภาคซีเมนต์แกลบจะดูดซึมสารลดน้ำพิเศษทำให้ความต้องการน้ำของซีเมนต์แกลบลดลง

ซีเมนต์แกลบ (ash) การศึกษาเปรียบเทียบการแยกสารในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับสารที่มีอยู่ในซีเมนต์แกลบ สารที่ผสมกันเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซีเมนต์แกลบคล้ายคลึงกัน ผิดกันแต่ปริมาณเท่านั้น ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีปูนขาว (lime) เหลืออยู่ซึ่งเมื่อคิดคำนวณให้หินปูนทำปฏิกิริยากับซิลิกา เป็นแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) หรือเป็นผลึกเกลือ (complex salt) CaSiO_3 , $\text{Al}_2(\text{SiO}_2)_3$ ยังมีหินปูนเหลืออีกเกือบ ร้อยละ 40 ส่วนซีเมนต์แกลบนั้นมีปริมาณ SiO_2 เป็นส่วนมาก ซึ่งเมื่อนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาผสมกับซีเมนต์แกลบ แล้วจะมีปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) เกิดขึ้นและได้แคลเซียมซิลิเกต ปฏิกิริยานี้จะค่อยเป็นค่อยไปนอกจากนี้อาจทำปฏิกิริยาเป็นเกลือเชิงซ้อนตัวอื่น ๆ ได้ อีกเช่น เหล็กออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น ซีเมนต์แกลบมีลักษณะพรุนซึ่งดีกว่าทราย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับหินปูนจึงน่าจะดีกว่าทรายที่บด ละเอียดเท่ากันและผสมลงไปปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย

ตาราง 12 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าแกลบ
(กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2523 : 23; อ้างอิงมาจาก Rice Products Utilization Vol.1
1974 : 6)

องค์ประกอบทางเคมี	ส่วนผสมตัวอย่าง	
	ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าแกลบ
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	21.60	94.5
อลูมินัมไดออกไซด์ (Al_2O_3)	4.60	traces
เฟอร์ริกไดออกไซด์ (Fe_2O_3)	2.80	traces
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	62.80	0.23
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	3.20	0.23
ซัลเฟต (sulphate)	2.10	1.13
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (ignition loss)	1.50	-
กากที่ไม่ละลายในน้ำ (insoluble residue)	0.10	-
แคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระ (Free CaO)	1.20	-
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.41	0.78
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.24	0.10
ผลรวมสารประกอบระหว่างคาร์บอเนตไดออกไซด์กับ		
ไฮโดรคาร์บอเนต (Total Alkalites $\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$)	0.57	-

ขี้เถ้าแกลบ ที่จะนำมาทดลองครั้งนี้เป็นขี้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ ใน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งมีโรงงานเผาอิฐ 5 อำเภอ

- 1.อำเภอพระนครศรีอยุธยา จำนวน 1 โรง
- 2.อำเภอบางบาล จำนวน 15 โรง
- 3.อำเภอบางปะหัน จำนวน 3 โรง
- 4.อำเภอมหาราช จำนวน 2 โรง
- 5.อำเภอบางปะอิน จำนวน 1 โรง

รวมทั้งสิ้น มีโรงงานเผาอิฐ จำนวน 22 โรง (ทำเนียบโรงงานอุตสาหกรรม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา, 2538) จะมีปริมาณแกลบที่เหลือทิ้งอยู่เป็นจำนวนมาก ผู้วิจัย จึงนำขี้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ อำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ของนายสว่าง ธรรมเจริญ ซึ่งได้รับรางวัลการผลิดิฐดีเด่นในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ได้กล่าวว่าเมื่อนำ ก้อนอิฐที่ยังไม่ได้ ผ่านการเผา มาตั้งเรียงโดยมีช่องว่างระหว่างก้อนอิฐ แล้วนำแกลบมากลบ ให้จนมิดก้อนอิฐที่เรียงไว้แล้วจุดไฟเผา ทุกเช้าจะนำแกลบมาเติมจนครบ 7 วัน อิฐจึงจะสุก จากกรรมวิธีนี้จะทำให้มีขี้เถ้าแกลบเป็นจำนวนมาก เมื่อเหลือจากการผสมดินเหนียวในการทำอิฐ ก็จะนำขี้เถ้าแกลบดังกล่าวไปทิ้งที่ริมแม่น้ำน้อย ผู้วิจัยเห็นว่าการนำขี้เถ้าแกลบที่ เหลือทิ้ง จากโรงงานเผาอิฐมาทำให้เกิดประโยชน์ในงานคอนกรีตกำลังสูงในการก่อสร้างต่อไป

2.2.2 เถ้าลอยลิกไนต์ (lignite fly ash) เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหิน แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 75 ไมครอน สามารถผ่านได้ร้อยละ 70 - 80 ทั้งนี้ตาม มาตรฐาน ASTM C618 เถ้าถ่านหินที่ใช้ผสมในคอนกรีตประกอบด้วยเถ้าถ่านหิน Class F และ Class C เถ้าถ่านหิน Class F เป็นผลผลิตที่ได้จากการเผาถ่านหินแข็งหรือถ่านที่เป็น พวก ถ่านหินบิทูมินัส (bituminous coal) หรือ ลิกไนต์

เถ้าถ่านหินเป็นของแข็งเม็ดกลมที่มีความละเอียดสูง ซึ่งลอยตัวขึ้นมาพร้อมกับ อากาศร้อนที่เกิดจากการเผาถ่านหิน ที่บดละเอียดในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และถูกจับ ด้วยเครื่องดักจับ (precipitator) หลังจากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังถังเก็บ ถ่านหินที่นำมาใช้เป็น เชื้อเพลิงนี้ประกอบด้วย สารประกอบคาร์บอนและแร่ธาตุอื่น ๆ เช่น คินดาน คินเหนียว

ซิลิไซด์ และ คาร์บอนเนต เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิในเตาเผา คุณสมบัติของสารประกอบต่าง ๆ ในถ่านหินจะเปลี่ยนแปลงไปทั้งทางด้านกายภาพ และทางด้านเคมี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเตาเผา รวมทั้งวิธีการทำให้เย็นลง ถ่านหินที่ได้จากการเผาเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก (ชูโชค ศิวะคุณากร. 2536 : 8) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยา แล้วพัฒนากำลังให้สูงขึ้น กำหนดให้ซิลเฟอร์ไครออกไซด์ไม่เกิน ร้อยละ 5 เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการขยายตัวของคอนกรีตมาก กำหนดให้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และ แอคะไลไม่เกิน ร้อยละ 1.5 เพื่อป้องกันการขยายตัวเนื่องจากทำปฏิกิริยากับซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (reactive silica) จากมวลรวมและ กำหนดการสูญเสียเนื่องจากการเผาไม่เกิน ร้อยละ 12 และ 6 สำหรับซีเมนต์ล้อยจากถ่านหินแอนทราไซด์และถ่านหินลิกไนต์ตามลำดับ การสูญเสียเนื่องจากการเผาสูงแสดงว่าซีเมนต์ล้อยมีส่วนประกอบของคาร์บอนสูง ทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น (วิจิต พิทยาธาราธร. 2538 : 17 ; อ้างอิง Lane and Best, 1982 ; Brink and Halstead. 1956)

ตาราง 13 แสดงองค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปของถ่านหิน Class F และ Class C (ชูโชค ศิวะคุณากร. 2536 : 9)

องค์ประกอบทางเคมี	ถ่านหิน Class F (ร้อยละ)	ถ่านหิน Class C (ร้อยละ)
SO ₃ (max)	5.1	5.0
Na ₂ O (max)	1.5	1.5
[SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃] (min)	70.0	50.0
Moisture content (max)	3.0	3.0
Loss on ignition (max)	6.0	6.0

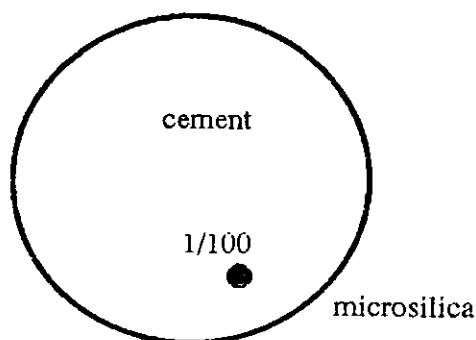
2.2.3 ซิลิกาฟูม หรือ ไมโครซิลิกา เป็นผลผลิตที่ได้จากการผลิตโลหะ โดยได้จากการผลิตเฟอร์โรซิลิคอน (ferro silicon) ในขบวนการผลิตโดยการนำวัตถุดิบ ได้แก่ หินควอตซ์ ถ่าน และเหล็ก เมาจะเกิดการหลอมรวมกันเป็นของเหลวและจะทำให้เกิดก๊าซ

ของซิลิกอนโมโนออกไซด์ลอยตัวขึ้น ก๊าซนี้จะถูกทำให้เย็นตัวโดยระบบCooling System และตกสู่ถังเก็บก๊าซที่ถูกทำให้เย็นตัวนี้ คือ ซิลิกาฟูม

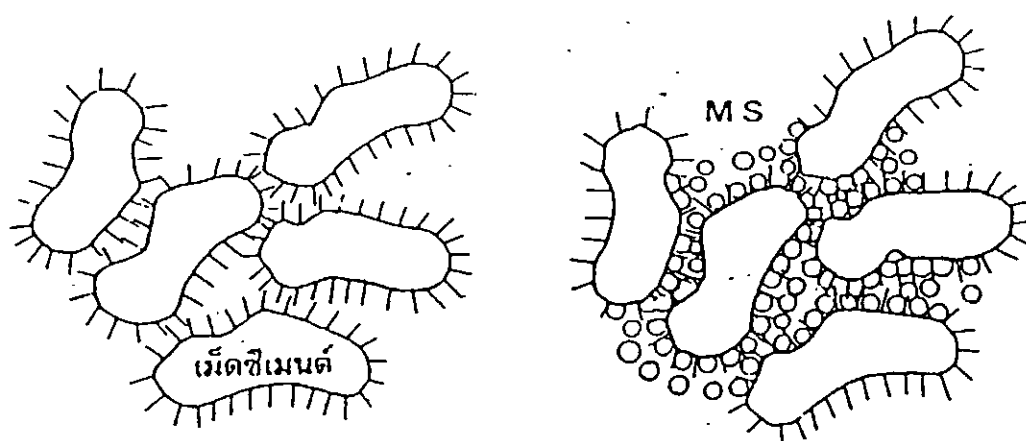
ในการนำซิลิกาฟูม มาใช้ในงานคอนกรีต เริ่มมาจากกลุ่มประเทศสแกนดิเนเวีย ซึ่งได้ทำการทดลองตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1950 - 1955 โดยทดสอบที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งนอร์เวย์ (Norwegian Institute of Technology) เมือง Trondheim ประเทศนอร์เวย์ และได้เริ่มใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มประเทศสแกนดิเนเวีย ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1975

นอกจากกลุ่มประเทศสแกนดิเนเวียแล้ว ประเทศแคนาดาได้นำ ซิลิกาฟูม มาทดสอบ และเริ่มใช้ในคอนกรีตผสมเสร็จในปี ค.ศ.1981 หลังจากปีนั้นเป็นต้นมา ในประเทศต่าง ๆ ได้มีการทดสอบและวิจัยเกี่ยวกับ ซิลิกาฟูม มาอย่างต่อเนื่อง และความรู้ในเรื่องนี้ได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่วนประกอบของซิลิกาฟูมแสดงไว้ในตาราง 14

ซิลิกาฟูมขนาดประมาณ 0.1 ไมครอน (micron) เล็กกว่าเม็ดปูนซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า เนื่องจากซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กมาก ๆ จึงทำให้คอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูม ซึ่งซิลิกาฟูมจะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์ จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จะเข้าไปแทรกซึมไปอุดช่องว่างของคอนกรีต ซึ่งจะเป็นผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงและมีความทนทานสูง (วิฑิต พิทยธารารชร. 2538 : 18 - 19)



ภาพประกอบ 7 ขนาดของซิลิกาฟูม เทียบกับปูนซีเมนต์ (สุดา เถลิงพงษ์. 2537 : 18)



ภาพประกอบ 8 การแทรกตัวของอนุภาคของซิลิกาฟุ่ม ระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์ (สุดา เกลิงพงษ์. 2537 : 19)

ตาราง 14 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จี๊ด้าเกลบ ซิลิกาฟุ่ม และ จี๊ด้าลอยแม่เมาะ (บุรณัฏฐ นัฏฐวีระ และคนอื่น. 2537 : 109 - 122)

ส่วนประกอบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ร้อยละ)	จี๊ด้าเกลบ (ร้อยละ)	ซิลิกาฟุ่ม (ร้อยละ)	จี๊ด้าลอยแม่เมาะ (ร้อยละ)
CaO	63.8	0.5	0.2	33.0
SiO ₂	20.0	89.9	92.0	15.1
Al ₂ O ₃	5.4	0.5	0.7	7.0
Fe ₂ O ₃	2.9	1.9	1.2	19.4
MgO	1.5	0.2	0.2	14.0
SO ₃	2.6	1.5	—	2.3
Na ₂ O	0.3	0.1	1.2	1.1
K ₂ O	0.5	0.5	1.9	1.1
การสูญเสียเนื่องจาก การเผา	2.7	4.7	—	3.4

จากตาราง 14 จะเห็นได้ว่าทั้งซิลิกาฟูมและซีเถ้าเกลบมีส่วนประกอบเป็นซิลิกาไดออกไซด์อยู่มาก ซึ่งซิลิกาฟูมและซีเถ้าเกลบมีขนาดเล็กจะช่วยให้อุดช่องว่างระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์ (microfiller effect) ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงขึ้น เป็นผลดีทางด้านกำลังและความทนทานและยังช่วยลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 20 - 25 ทั้งยังไม่เกิดประโยชน์ต่อเนื้อคอนกรีต กลับทำให้เกิดปฏิกิริยากับซัลเฟตเกิดเป็นขี้ขี้และแคลเซียมซัลฟออะลูมินา ก่อให้เกิดการขยายตัวทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้น ดังนั้นเมื่อซิลิกาไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดตัวเชื่อมประสาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตขึ้นอีก ยังเป็นผลดีด้านกำลังของคอนกรีต

2.3 วัสดุผสมหรือมวลรวม (aggregates) วัสดุผสมที่นิยมใช้กับงานปูนคอนกรีตจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.3.1 วัสดุผสมละเอียด (fine aggregates) หมายถึง วัสดุผสมที่ส่วนใหญ่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 (ช่องขนาด 4.76 มิลลิเมตร) จะต้องไม่เล็กเกินไปจนกลายเป็นฝุ่น เนื่องจากไม่เหมาะต่อการนำมาทำคอนกรีต วัสดุผสมละเอียดในที่นี้ได้แก่ ทรายซึ่งมีทั้งทรายธรรมชาติ และทรายที่ทำขึ้น ทรายที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในประเทศไทยเป็นทรายธรรมชาติซึ่งมาจากแหล่งต่างๆ กัน

ขนาดของทราย ทรายตามความหมายทั่ว ๆ ไป หมายถึงเม็ดแร่เล็ก ๆ ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ $1/16$ ถึง 2 มิลลิเมตรเท่านั้นถ้าเล็กกว่านี้ลงไปเรียกว่าตม (silt) ถ้าโตกว่าขนาดดังกล่าวก็เรียกว่า กรวด (gravel) แร่ธาตุที่ประกอบเป็นทรายนั้นส่วนมากเป็นควอร์ตซ์หรือไมกา (พงศ์พันธุ์ วรศุนทรโรสถ. 2535 : 77)

ตาราง 15 ขนาดของทราย ในลักษณะงานต่างๆ (อรรถน์ ประภาพิทยากร. 2531:250)

ทราย	ขนาด (มม.)	ที่ใช้งาน
ละเอียด	0.5 - 1.5	ปูนฉาบ
ปานกลาง	1 - 3	ปูนก่อ
หยาบ	2 - 4.5	คอนกรีต

ชนิดของทรายที่นิยมใช้ในงานก่อสร้าง

1. ทรายหยาบ เป็นทรายเม็ดใหญ่ มีเหลี่ยม แฉ่ มุมแข็งแรง ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่ต้านกำลังมาก เช่น รากฐาน โครงสร้างอาคาร ฯลฯ
2. ทรายกลาง เป็นทรายที่มีขนาดปานกลางใช้สำหรับปูนก่อ เช่น ก่อกำแพงอิฐ ฯลฯ
3. ทรายละเอียด เป็นทรายที่มีขนาดละเอียดมากใช้สำหรับผสมปูนฉาบ ทำบัวประกอบลวดลาย ฯลฯ

คุณสมบัติของทราย การที่เรานำทรายมาใช้ในการก่อสร้าง เช่น ผสมคอนกรีต หรือผสมทำปูนฉาบนั้นมีเหตุผลหลายประการดังต่อไปนี้

1. ทรายสามารถแทรกเข้าไปอุดช่องว่างของหินในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตแน่น
2. ช่วยบรรเทาการยืดหดและแตกร้าวในปูนฉาบถ้าปูนฉาบใส่ปูนซีเมนต์มากเกินไปจะแตกร้าว ต้องเพิ่มทรายเข้าไปเพื่อให้มีทางขยายตัว
3. ช่วยเพิ่มปริมาณของส่วนผสม ทำให้ราคาของคอนกรีตหรือปูนฉาบหรือปูนก่อถูกลง เพราะทรายเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายทั่วไปและราคาถูก (พงศ์พันธ์ วรสุนทโรสถ. 2535 : 78)

โดยทั่วไปแบ่งทรายออกเป็น 4 ชนิดคือ

1. ทรายบก พบบนบกห่างจากทะเลและไม่มีความเค็มติดอยู่
2. ทรายแม่น้ำ ลำธาร พบตามแม่น้ำ ลำธาร
3. ทรายทะเล พบตามชายทะเล หรือบนบกห่างทะเล แต่มีความเค็มอยู่
4. ทรายที่เกิดจากการย่อยเป็นก้อนเล็ก ๆ

ทรายทั้ง 4 ชนิด จะใช้ทำคอนกรีตในลักษณะและคุณสมบัติต่าง ๆ กัน สำหรับทรายที่ใช้ในการผสมคอนกรีตไม่ควรนำทรายจากทะเลมาใช้ เพราะเกลือแร่ที่ติดอยู่กับทรายจะดูดความชื้น ทำให้คอนกรีตหรือผนังปูนฉาบมีความชื้นอยู่เสมอ นอกจากนั้น ในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก ถ้านำทรายประเภทนี้ไปใช้จะทำให้เหล็กเป็นสนิมได้ง่าย

แหล่งทรายในประเทศไทย ทรายที่ใช้ในการก่อสร้างทั่ว ๆ ไปมีทั้งทรายบกที่ขุดบนพื้นดินและทรายแม่น้ำ เม็ดทรายบกละเอียดกว่าทรายแม่น้ำแต่สกปรกกว่าทรายหยาบส่วนมากใช้ผสม คอนกรีตและปูนก่อมาจากจังหวัดอ่างทอง ราชบุรี และตำบลบ้านแป้ง จังหวัดสิงห์บุรี แต่ทรายที่อ่างทองคุณภาพไม่ค่อยดีนักในการใช้ผสมคอนกรีต ส่วนทรายราชบุรีนับว่าใช้ได้ซึ่งขุดมาจากแม่น้ำราชบุรี ทรายบ้านแป้งเป็นทรายที่ดีแต่ขาดอนุภาคที่ละเอียดไปบ้าง ส่วนทรายละเอียดที่ใช้ในการฉาบปูนนั้นมาจากตำบลบางพูด จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

น้ำหนักของทราย น้ำหนักของทรายในขณะที่ยังแห้งและขณะที่เปียกจะต่างกันเนื่องจากขณะที่เปียกจะมีน้ำผสมอยู่ด้วย น้ำหนักที่ต่างกันจะเป็นดังนี้

ทรายเมื่อแห้ง หนักประมาณ 1,400-1,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ทรายเมื่อเปียก หนักประมาณ 1,800-2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (พงศพัณ วรสุนทรโรตถ. 2535 : 79)

2.3.2 วัสดุผสมหยาบ (coarse aggregates) หมายถึง วัสดุผสมที่ส่วนใหญ่จะค้างอยู่บนตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 และอาจมีบางส่วนที่ละเอียดกว่าผสมอยู่บ้างแต่จะต้องไม่เกินปริมาณที่กำหนด วัสดุผสมชนิดนี้ได้แก่หินย่อยหรือกรวด (gravel) หรือวัสดุผสมชนิดอื่นที่ เหมาะสมแทนก็ได้หินที่เหมาะสมต่อการทำคอนกรีตมากที่สุด จะต้องคม แกร่งแข็ง มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ มีผิวขรุขระ ยึดเหนี่ยวตัวดี และทนทานต่อการสึกหรอได้ดี หินที่นำมาใช้จะต้องสะอาด ไม่มีเศษวัชพืชหรือสิ่งอื่นใดเจือปนและจะต้องมีขนาดคละกัน กล่าวคือจะต้องมีขนาดของก้อนลดหลั่นกัน ก้อนใหญ่สุดมักจะมีขนาดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร (ประณต กุลประสูตร.2537 : 34)

การผลิตวัสดุผสม การผลิตวัสดุผสมหยาบ (หิน) หินที่นำมาผสมคอนกรีต ต้องแข็งแรงทนทาน ตามมาตรฐาน ASTM C33 คุณสมบัติของหินที่นำมาผสมคอนกรีตได้กำหนดไว้ดังนี้

- ความแข็งแรง(abrasion resistance) ทดสอบมาตรฐาน ASTM C131 ซึ่งค่าความสึกหรอต้องไม่เกิน ร้อยละ 50

-ความคงทนทดสอบจากวิธี Soundness ทดสอบมาตรฐาน ASTM C88 ค่าความสูญเสียต้องไม่เกิน ร้อยละ 18 (ทดสอบด้วยการใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต)

หินย่อยที่ใช้ในการก่อสร้าง หินย่อยที่ใช้ในการก่อสร้างเช่น ผสมคอนกรีต ทำถนน ส่วนมากระเบิดเอามาจากภูเขาแล้วมาบดด้วยเครื่องย่อยหิน

หินย่อยที่ออกมา ยังเป็นหินย่อยขนาดเดียวกันอยู่ ถ้าต้องการใช้หินย่อยไปทำงานตามมาตรฐานและตามงานประเภทใด ก็สามารถจะเปิดประตูหินได้กองตามอัตราส่วนผสมลงในสายพานลำเลียงในอุโมงค์นั้นได้

ตาราง 16 ขนาดมาตรฐานของหิน (อรรถน์ ประภาพิทยากร และคนอื่น. 2531 : 249)

เบอร์หิน	ขนาดนิ้ว	ลักษณะการใช้งาน
0	หินฝุ่น - หินย่อย	ราดยางมะตอย อีฐบล็อก
1	3/4 - 1	โรยผิวหน้าถนน หล่อพื้นเพื่อปูกระเบื้อง
2	1 - 2	พื้น คาน เสา
3	2 - 3	ทำฐานรากตัวอาคาร
4	3 - 4	ฐานรากของอาคารที่รับแรงได้มากกว่าหินเบอร์ 3
ใหญ่พิเศษ	4 ขึ้นไป	ทำเขื่อนกันตลิ่งพัง พื้นฐานของถนน

หมายเหตุ ที่ขนาดยังใช้เป็นนิ้วอยู่ เพราะเครื่องบดและตะแกรงยังใช้เป็นนิ้ว แต่ขนาดตะแกรงได้แปลงเป็นมาตราเมตริกตามระบบมาตรฐานแล้ว

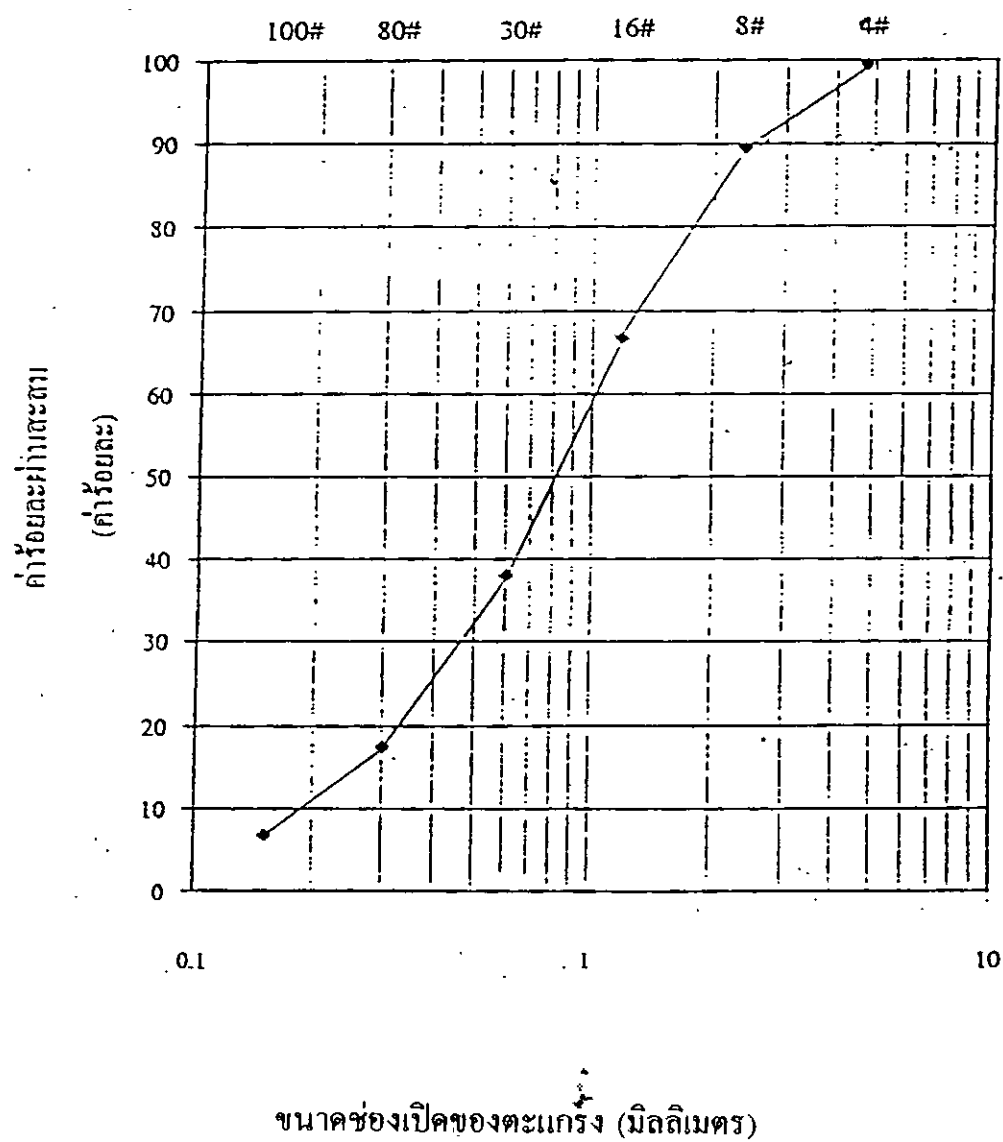
หินเกล็ดเรียกขนาดโดยกำหนดเป็นหมายเลข ขนาดหมายเลขที่เลขสูงจะเป็นหินขนาดเล็ก ขนาดที่เลขต่ำจะเป็นขนาดหินที่ใหญ่ ซึ่งในประเทศไทยขนาดหินเกล็ดที่ใช้กันอยู่ในวงการทำหินขัดมี 6 ขนาดดังแสดงในตาราง 16

ตาราง 17 ขนาดที่เรียกเป็นหมายเลขของหินเกล็ด (พงศ์พันธุ์ วรสุนทรโรสด.2535 : 63-75)

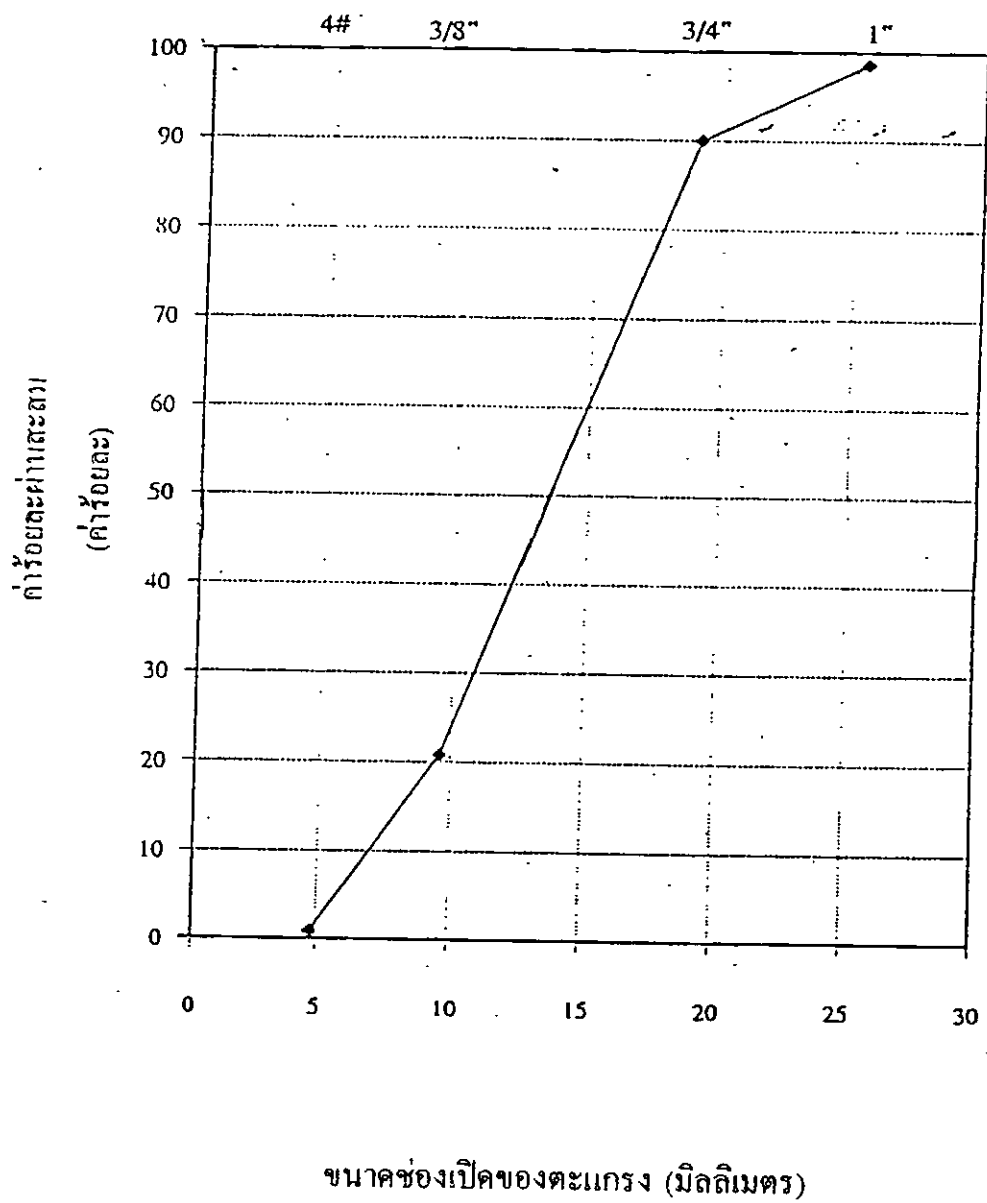
ขนาดที่เรียกเป็นหมายเลขหรือเบอร์	ขนาดเป็นนิ้ว	ขนาดเป็นมิลลิเมตร
4 1/2	1/16	1.58
4	1/8	3.17
3 1/2	1/4	6.35
3	3/8	9.52
2	5/8	15.87
1	3/4	19.05

การเก็บรักษาวัสดุผสม ในการเก็บรักษาวัสดุผสมไม่ว่าจะเป็นทราย กรวดหรือ หินย่อยก็ตาม ควรที่จะกองเก็บไว้บนที่สะอาด หากมีความจำเป็นที่จะต้องกองบนพื้นดินก็จะต้องกองบนพื้นดินที่แข็งและอยู่ในระดับสูงพอสมควร ทั้งนี้เพื่อป้องกันพื้นที่เปียกแฉะ นอกจากนั้นจะต้องไม่ทิ้งเศษผงหรือสิ่งโสโครกต่าง ๆ ลงบนกองวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ทรายย่อย น้ำตาล น้ำหวาน เนื่องจากน้ำตาลหรือน้ำหวาน เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์แล้ว จะทำให้คอนกรีตไม่แข็งตัว เป็นผลทำให้คอนกรีตเกิดการเสียหายได้

ห้ามใช้ทรายบริเวณผิวดินหรือที่มีดินอื่นปะปนอยู่และทุกครั้งก่อนที่จะนำหินย่อยหรือกรวดไปใช้งานจะต้องล้างน้ำก่อนเสมอ (ประณต กุลประสูตร. 2537 : 35)



ภาพประกอบ 9 แสดงแผนภาพขนาดกะของทรายผ่านขนาดตะแกรงมาตรฐาน
(สมชาย ปิ่นนุช และคนอื่น . 2538 : 10)



ภาพประกอบ 10 แสดงแผนภาพขนาดกละของหินผ่านขนาดตะแกรงมาตรฐาน
(สมชาย ปิ่นนุช และคนอื่น. 2538 : 9)

ตาราง 18 ขนาดคละของมวลรวม (สมชาย ปิ่นนุช และคนอื่น ๆ. 2538 : 8)

หิน			ทราย		
ขนาดตะแกรง เบอร์ (นิ้ว)	ค่าร้อยละ ข้างสะสม	ค่าร้อยละ ผ่านสะสม	ขนาดตะแกรง เบอร์ (นิ้ว)	ค่าร้อยละ ข้างสะสม	ค่าร้อยละ ผ่านสะสม
1	1.32	98.68	4#	0.58	99.42
3/4	9.96	90.04	8#	10.51	89.49
3/8	79.04	20.96	16#	33.09	66.91
4#	99.08	0.98	30#	61.81	38.19
ถาดรอง			60#	82.63	17.37
			100#	93.31	6.69
			ถาดรอง		

ตาราง 19 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม (สมชาย ปิ่นนุช และคนอื่น ๆ. 2538 : 8)

คุณสมบัติทางกายภาพ	หิน	ทราย
ความถ่วงจำเพาะที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง	2.74	2.48
ปริมาณการดูดซึมน้ำคิดเป็นร้อยละ	0.95	0.98
ปริมาณความชื้นคิดเป็นร้อยละ	2.11	2.31
โมดูลัสความละเอียด	7.89	2.82

2.4 น้ำ น้ำสำหรับผสมคอนกรีต น้ำที่หลักของน้ำที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีต มีดังต่อไปนี้คือ

2.4.1. ทำให้ปูนซีเมนต์และวัสดุผสมมีความชื้น และส่วนผสมของคอนกรีตมีความชื้นเหลวพอดี สะดวกต่อการเท และการเขย่าให้เข้าแบบตามต้องการ

2.4.1. ทำให้วัสดุผสมอันได้แก่ หินย่อยหรือกรวดและทรายที่แห้งให้เปียก เพื่อให้ปูนซีเมนต์เกาะยึดโดยรอบและสามารถแข็งตัวได้อันจะเป็นผลทำให้วัสดุผสมเหล่านี้ยึดติดแน่นเข้าด้วยกัน

2.4.3. ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์ ทำให้คุณสมบัติจับตัวเกาะแน่นกับวัสดุผสม อันจะเป็นผลทำให้วัสดุผสมเหล่านี้เกาะตัวเป็นก้อนวัสดุที่แข็งแรง

จะเห็นได้ว่า น้ำไม่เพียงแต่จะช่วยให้ส่วนผสมของคอนกรีต มีความชื้นเหลวพอดี ซึ่งทำให้สะดวกต่อการทำงานเท่านั้น แต่น้ำยังช่วยทำให้วัสดุผสมยึดแน่นเข้าด้วยกัน อันจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง ดังนั้นการเลือกใช้น้ำที่มีคุณภาพดีในปริมาณที่เหมาะสมก็จะช่วยให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีด้วย

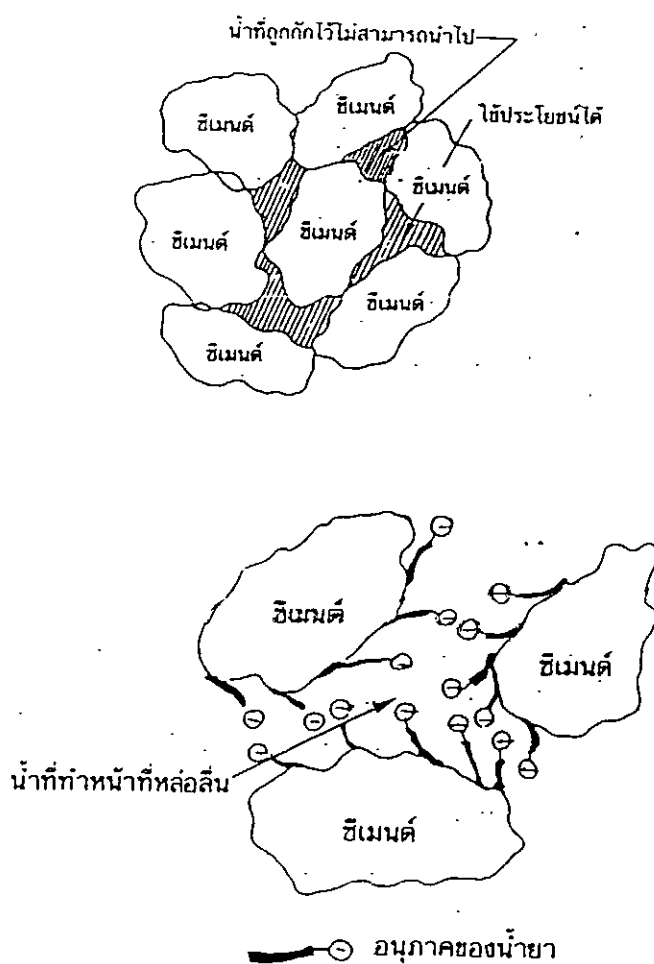
น้ำสำหรับบ่มคอนกรีต สำหรับน้ำที่ใช้บ่มคอนกรีตก็เช่นกัน จะต้องเป็นน้ำที่สะอาดปราศจากฝุ่น น้ำตาล โซเดียม ฟอสเฟต บอแรก กรดแทนนิก และสารอินทรีย์อื่น ๆ ปะปนอยู่ เพราะสิ่งเหล่านี้จะมีผลทำให้คอนกรีตแข็งตัวช้าลงหรือการเกิดกำลังลดลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกลือของแร่เหล็กและกรดแทนนิกซึ่งทำให้เกิดรอยเปื้อนและสีที่ล้างออกก่อนข้างยาก และถ้าใช้น้ำที่มีสารเหล่านี้ปะปนอยู่บ่มคอนกรีตนานๆ น้ำที่มีส่วนผสมของสารดังกล่าวก็จะซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ด้วย

น้ำสำหรับล้างวัสดุผสม สำหรับน้ำที่ใช้ล้างวัสดุผสมนั้น ความสะอาดอาจจะเป็นรองจากน้ำที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีตและน้ำที่ใช้สำหรับบ่มคอนกรีตก็ได้

2.5 สารลดน้ำพิเศษ หรือ การลดปริมาณน้ำ (water reducing agent) สารชนิดนี้จะช่วยลดปริมาณของน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตลงได้ เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่า ๆ กัน เมื่อเทียบกับคอนกรีตแบบธรรมดาหรืออาจกล่าวได้ว่าสารชนิดนี้จะช่วยเพิ่มความเหลว และเพิ่มการยุบตัวของคอนกรีตนั่นเอง ซึ่งในการลดปริมาณน้ำนั้นก็จะมีผลทำให้คอนกรีตมีกำลังเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้นการลดการแยกตัวและการสูญเสียน้ำ ยังจะช่วยเพิ่มความแน่น

และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมได้อีกด้วย (ประณต กุลประสูตร. 2537 : 39 - 44) และไม่มีผลกระทบต่อปริมาณฟองอากาศ หรือเวลาก่อตัวของคอนกรีต คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ตามที่ต้องการ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน น้ำ ต่อ ปูนซีเมนต์ นั่นคือ สามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงได้ (จ้ชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539 : 54)

สารชนิดนี้เป็นสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่ทำจากกรดหรือเกลือลิกโนซัลโฟนิคซึ่งเป็น ผลพลอยได้มาจากอุตสาหกรรมทำเยื่อไม้ (ประณต กุลประสูตร. 2537 : 39,44)



ภาพประกอบ 11 ลักษณะการทำงานของสารลดน้ำพิเศษ (จ้ชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539 : 56)

3. คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีต

การทดสอบคุณภาพของคอนกรีต ทำได้โดยการทดสอบในเรื่องกำลังต้านทานต่าง ๆ ของคอนกรีตที่เกิดขึ้น ว่าเป็นไปได้น้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับมาตรฐาน ASTM หรือมาตรฐานอุตสาหกรรม (อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์, 2537 : 11)

การตรวจสอบหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง คือ การหาค่าน้ำหนักในหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ระดับความชื้นระดับหนึ่งระดับใด ในการหาความหนาแน่นของคอนกรีต จะต้องชั่งน้ำหนักและวัดปริมาตรออกมา แล้วนำมาคำนวณหาหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งจากสูตร

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวล (กรัม)}}{\text{ปริมาตร (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)}} \times 10^6$$

(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

(กระทรวงอุตสาหกรรม มอก. 2532 : 15)

การทดสอบกำลังรับแรงอัด นำแท่งตัวอย่างวางกึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด เปิดเครื่องทดสอบโดยการทดสอบนี้ต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ อัตราที่ใช้คือ 1.4 - 3.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที กดก่อนตัวอย่างจนแตก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ นำค่าน้ำหนักและพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่ากำลังอัดประลัยตามมาตรฐาน ASTM C39

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แบบหล่อรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร แผ่นฐานเรียบยึดติดกับตัวแบบด้วยสลักเกลียว รอยต่อในแบบจะต้องสนิท ให้น้ำในส่วนผสมรั่วออกได้
2. เครื่องสั่นคอนกรีตชนิดจุ่ม เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 25 มิลลิเมตร ความถี่ 10,000 ครั้งต่อนาที

3. เหล็กกระทง เส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 600 มิลลิเมตร ปลายเหล็กกระทงเป็นครึ่งวงกลม

4. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต ที่มีกำลังอัดตามความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานเพิ่มอัตราการกดได้อย่างสม่ำเสมอในช่วง 1.4 - 3.4 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที แรงอัดที่เหมาะสมควรมีค่าเท่ากับ 140 กิโลกรัมต่อนาที แทนที่ใช้คอนกรีตตัวอย่างต้องมีฐานเป็นรูปครึ่งวงกลม ตัวแทนอัดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับหรือให้สูงกว่าแท่งทดสอบคอนกรีตเล็กน้อย

5. เวอร์เนียคาลิเปอร์ วัดได้ไม่น้อยกว่า 200 มิลลิเมตร ละเอียด 0.1 มิลลิเมตร

6. เครื่องชั่ง ชั่งได้ไม่น้อยกว่า 20 กิโลกรัม ละเอียด 1 กรัม

วิธีทดสอบ

1. ทำความสะอาดพื้นผิวของแท่งกดเครื่องทดสอบ
2. วางแท่งตัวอย่างทดสอบ โดยวางให้ตรงแนวศูนย์กลางของแท่นกด แท่นบนและแท่นล่าง
3. เดินเครื่องทดสอบ โดยควบคุมน้ำหนักที่กดอย่างสม่ำเสมอ อัตราที่ใช้ 1.4 - 3.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที
4. ทำการกดจนกระทั่งแท่งคอนกรีตตัวอย่าง วิบัติ พร้อมบันทึกค่าแรงสูงสุดไว้
5. นำค่าน้ำหนัก และพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่ากำลังอัดประลัย

$$\text{กำลังอัดประลัยของคอนกรีต} = \frac{\text{น้ำหนักกดประลัย}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง}}$$

หน่วยทั่วไป

1. กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2)
2. นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2)

การทดสอบกำลังรับแรงดึง เพื่อหาลำกำลังรับแรงดึงของแท่งคอนกรีต กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวของเนื้อคอนกรีตเป็นส่วนใหญ่ จึงมีลักษณะเปราะ กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จะมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10 ของกำลังอัดประลัย จากการทดสอบจะพบอีกว่า เมื่อคอนกรีตรับกำลังอัดได้สูงแล้วค่ากำลังรับแรงดึงสัมพัทธ์จะยิ่งต่ำลง

เครื่องมือทดสอบและอุปกรณ์ทดสอบ

1. เครื่องทดสอบแรงอัดของคอนกรีต ที่มีกำลังอัดตามความเหมาะสมกับสภาพการใช้งาน สามารถเพิ่มอัตราการกดได้อย่างสม่ำเสมอ ควรอยู่ในช่วง 1.4 - 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที และลักษณะอื่นเหมือนกับเครื่องทดสอบในบททดสอบการรับกำลังอัดของคอนกรีต
2. แบบหล่อรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร
3. เหล็กกระทุ้ง หรือเครื่องสั่นคอนกรีตชนิดจุ่ม
4. เวอร์เนียคาลิเปอร์ ขนาดวัดได้ไม่น้อยกว่า 200 มิลลิเมตร ละเอียด 0.1 มิลลิเมตร
5. เครื่องชั่ง ชั่งได้ไม่น้อยกว่า 20 กิโลกรัม ละเอียด 1 กรัม
6. แผ่นเหล็ก เพื่อให้ให้น้ำหนักกดกระจายทั่วผิวข้างทดสอบความหนา เมื่อใส่แล้วไม่น้อยกว่า 22.5 มิลลิเมตร ขนาดแผ่นเหล็กให้เหมาะสมกับเครื่องทดสอบ และแท่งทดสอบมีลักษณะเหมือนกับในบททดสอบการหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกเพื่อการรับกำลังอัด

การทดสอบนี้ใช้แท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน ให้แกนตามยาวอยู่ในแนวนอน เปิดเครื่องทดสอบแรงอัด แท่งตัวอย่างจะแตกในแนวตั้งตามเส้นผ่าศูนย์กลาง จึงสามารถคำนวณกำลังต้านทานแรงดึงบนระนาบแตกราวนี้นี้ได้ดังนี้

สมการ

$$f_s = \frac{2P}{\pi dL}$$

f_s = กำลังคืบแบบผ่าซีก

P = น้ำหนักกดสูงสุด (กิโลกรัม)

L = ความยาวของแท่งตัวอย่างทรงกระบอก (เซนติเมตร)

d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (เซนติเมตร)

การทดสอบค่าการยุบตัว เพื่อหาความสามารถไหลได้ หรือความสามารถในการ
แตกจนกริดสลดลงแบบมาตรฐาน ASTM C143

อุปกรณ์

1. โคนรูปทรงกรวยตัด เส้นผ่าศูนย์กลางด้านบน 10 เซนติเมตร และด้านล่าง 20 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร มีหูจับและแผ่นเหล็กยื่นออกมาให้เท้าเหยียบ 2 ข้าง
2. เหล็กกระทุ้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 60 เซนติเมตร ปลายกลมมน
3. แผ่นเหล็กสำหรับรอง
4. ช้อนตัก เกรียงเหล็ก ตลับเมตร หรือไม้ยัด

วิธีทดสอบ

1. นำอุปกรณ์จุ่มน้ำให้เปียก
2. วางแผ่นเหล็กลงกับพื้นราบ นำโคนขึ้นวางใช้เท้าเหยียบปลายทั้ง 2 ข้าง
3. ใช้ช้อนตักคอนกรีตใส่ลงในโคน โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นให้มีปริมาณเท่า ๆ กัน ชั้นที่ 1 ใส่คอนกรีตในโคนสูง ประมาณ 6 - 7 เซนติเมตร กระทุ้งด้วยเหล็ก 25 ครั้ง ต้องกระทุ้งให้ทั่วพื้นที่ ใส่คอนกรีตครั้งที่ 2 จนได้ส่วนสูงประมาณ 15 เซนติเมตร กระทุ้งทะลถึงคอนกรีตชั้นที่ 1 เพียงเล็กน้อย ใส่คอนกรีตชั้นที่ 3 จนเต็มกระทุ้งให้ทะลุ

คอนกรีตชั้นที่ 2 เพียงเล็กน้อยปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ รวมทั้งทำความสะอาดบริเวณ โคนและแผ่นเหล็กรอง

4. คึงโคนขึ้นตรง ๆ ไม่หมุน

5. วางโคนลงข้าง ๆ คอนกรีตแล้ววัดค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ค่าการยุบตัว คือ ค่าระยะที่คอนกรีตยุบตัวจากเดิม โดยวัดที่จุดกึ่งกลางของ คอนกรีตที่ยุบตัวลง ในการวัดให้ละเอียดถึง 0.5 เซนติเมตร

รูปแบบของการยุบตัวของคอนกรีต โดยทั่วไปมี 3 แบบคือ

1. การยุบตัวแบบถูกต้องเป็นการยุบตัวของคอนกรีตภายใต้น้ำหนักของตัวคอนกรีต

2. การยุบตัวแบบเฉือน เป็นการยุบตัวที่เกิดจากการเลื่อนไหลของคอนกรีตส่วน บนในลักษณะเฉือนลงไปด้านล่าง

3. การยุบตัวแบบล้ม เป็นการยุบตัวที่เกิดจากคอนกรีตมีความเหลวมาก

ค่าความคลาดเคลื่อนในค่าการยุบตัว

มาตรฐานทั่วไป กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อน ในค่ายุบตัว มีค่า ± 2.5 เซนติเมตร เช่น ถ้าต้องการยุบตัว 7.5 เซนติเมตร ค่าที่ยอมรับได้คือ 7.5 ± 2.5 เซนติเมตร หรือ 5 - 10 เซนติเมตร

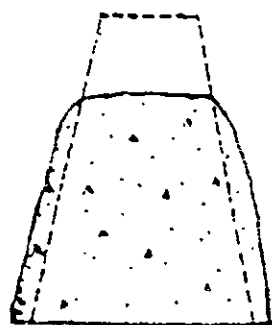
ค่าการยุบตัวสำหรับงานชนิดต่าง ๆ และงานพิเศษอยู่ในตาราง 20 - 21

ตาราง 20 ค่าการยุบตัวสำหรับงานก่อสร้างชนิดต่างๆ (จ้ชวลย์ เศรษฐบุตร. 2539 : 71)

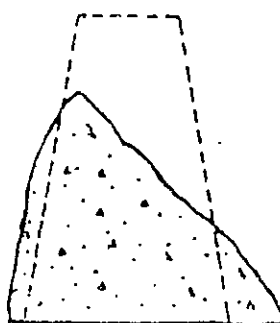
ชนิดของงานก่อสร้าง	ค่าการยุบตัว (ซม.)
ฐานราก	7.5 ± 2.5
แผ่นพื้น กาน ผนัง คสล	10.0 ± 2.5
เสา	10.0 ± 2.5
ค้ำยัน คสล. และผนังบาง ๆ	10.0 ± 2.5

ตาราง 21 ค่าการยุบตัวสำหรับงานพิเศษบางประเภท (จัสวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539 : 71)

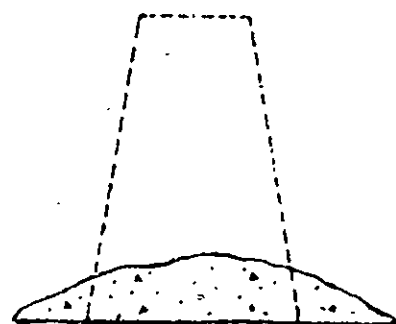
ชนิดของงานก่อสร้าง	ค่ายุบตัว (ชม.)
ถนน, สนามบิน	5.0 ± 2.5
งานที่ใช้คอนกรีตปั๊ม	10.0 ± 2.5
เสาเข็มเจาะระบบแห้ง	10.0 ± 2.5
งานเทคอนกรีตได้น้ำ (tremie)	มากกว่า 15
งานคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น	มากกว่า 15



การยุบตัวแบบถูกต้อง
(True Slump)



ยุบตัวแบบเฉือน
(Shear Slump)



ยุบตัวแบบล้ม
(Collapse Slump)

ภาพประกอบ 12 รูปแบบการยุบตัว (อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์. 2537 : 216)

การทดสอบความทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น เพื่อทดสอบหาระยะและลักษณะการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นในเนื้อคอนกรีต โดยการฉีกแผ่นสารเคมีเพื่อตรวจสอบในเนื้อคอนกรีตที่ผ่าซีก สารเคมีที่ใช้คือ สารละลายฟีนอล์ฟทาเลอินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก การตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยา สังเกตดูจากการเปลี่ยนสีของสารเคมีที่ฉีกแผ่น ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาจะไม่เกิดการเปลี่ยนสี จะเห็นเป็นเนื้อคอนกรีตธรรมดา ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูบานเย็น บริเวณการเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ที่ขอบนอกของแท่งคอนกรีต

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการนำเถ้าแกลบมาผสมกับปูนซีเมนต์ หรือใช้ในการทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตวัสดุใหม่ ๆ โดยการนำเถ้าแกลบทำปฏิกิริยากับปูนขาว เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกต มีความแข็งแรงทนทานต่อการผุพังทางเคมี และการชะของน้ำได้ดี โดยใช้เถ้าแกลบที่บดละเอียด 3 ส่วน ผสมกับปูนขาว 2 ส่วน โดยน้ำหนัก จะได้ปูนซีเมนต์ปอซโซลานา ที่มีคุณภาพดีเมื่อใช้เถ้าแกลบสีขาวปนเทา แต่ถ้าใช้เถ้าแกลบดำจะมีคุณภาพรองลงมา และยังสามารถรับแรงกดได้ดีเมื่อทิ้งไว้นาน จะรับแรงกดได้เพิ่มมากขึ้น โดยการนำปูนซีเมนต์ปอซโซลานา 1 ส่วน ผสมทราย 3 ส่วน และน้ำ 0.7 ส่วน โดยน้ำหนัก จะสามารถผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐบล็อก อิฐมอญ ที่มีคุณภาพดีและราคาถูก (อนุจิต กิจสวัสดิ์, 2522 : สรุป) แต่ในอัตราส่วนปูนขาวต่อเถ้าแกลบที่เหมาะสม คือ 1 ต่อ 2 สามารถให้กำลังอัดสูงสุด โดยการใช้เครื่องบดจะทำให้มอร์ต้ามีคุณภาพดีกว่าแบบวิธีผสมธรรมดาแต่ในจำนวนปูนขาวทั้ง 4 ชนิด มีปูนขาวชนิด C แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 74 เป็นปูนขาวที่ทำปฏิกิริยากับเถ้าแกลบได้ดีที่สุด (บุรณัทร นัทรวิระ และคนอื่น, 2537ข : 117) ในการทำวัสดุแผ่นทดแทนไม้จากวัตถุดิบเถ้าแกลบ ปูนขาว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และใยมะพร้าว หรือ ใยผักตบชวา ในสัดส่วนที่เหมาะสม โดยการลดปูนซีเมนต์ลงและสามารถนำมาสร้างวัสดุใหม่ที่ได้เกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ของวัสดุแผ่นทดแทนไม้ (วิวัฒน์ คลังวิจิตร, 2535 : 75)

ในการทดลองทำปูนซีเมนต์จากเถ้าแกลบ โดยการนำเถ้าแกลบ บดผ่านตะแกรงเบอร์ 352 ผสมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 30 ต่อ 70 ทิ้งไว้ 28 วัน ได้กำลังอัดของมอร์ต้า 267.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และถ้าใช้อัตราส่วน 40 ต่อ 60 ทิ้งไว้ 7 วัน

ได้กำลังอัดของมอร์ต้า 237.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วัชรระ ทองเจริญ และคณะ. 2529 : 479 - 482) ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าแกลบด้วยซีเถ้าแกลบลดละเอียคนาน 75 นาที ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุผง และใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณร้อยละ 1.43 โดยน้ำหนักของวัสดุผง ทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตอยู่ในเกณฑ์ดี รวมทั้งมีความทนทานต่อสภาพกรดและด่าง (สมชาย ปิ่นนุช และคนอื่น. 2538 : 76) แต่ซีเถ้าแกลบนำมาใช้ผลิตและพัฒนาคอนกรีตกำลังสูง โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ด้วยปริมาณเถ้าแกลบร้อยละ 30 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 3 ด้วยปริมาณซีเถ้าแกลบร้อยละ 20 ในการผสมที่เหมาะสมของซีเถ้าแกลบ ทราช หินปูน น้ำ ซีเมนต์ และสารผสมเพิ่ม สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังสูงมากได้ (บุรณัตร นัตรวีระ และคนอื่น. 2537 : สรุป) คอนกรีตซีเถ้าแกลบจะมีกำลังอัดสูงเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุผง และจะมีกำลังรับน้ำหนักสูงขึ้นอีก เมื่อมีการแทนที่ด้วยซีเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงขึ้น (บุรณัตร นัตรวีระ. 2538 : 15) ในการศึกษาทดลองนำเถ้าลอยลิกไนต์ มาผสมกับปูนขาวในอัตราส่วน 1 ต่อ 0.05 จะทำให้ค่ากำลังต้านแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 58 - 2516 คือไม่น้อยกว่า 20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2536 : 40 - 55) คอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะสามารถใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 35 ในสัดส่วนผสมมอร์ต้า 1 ต่อ 2.75 หรือ 1 ต่อ 3.5 สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงสุด และสามารถพัฒนาอัตราส่วนกำลังค้ำต่อกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา (บุรณัตร นัตรวีระ และพิชัย นิมิตรยงสกุล. 2537 : 32-37) คอนกรีตที่มีซิลิกาฟูม มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดระยะต้นในช่วง 3 และ 7 วันมากกว่าส่วนผสมซีเมนต์ล้วน เนื่องจากไมโครซิลิกามีความละเอียดและว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาส่วนซีเถ้าแกลบจะทำให้กำลังรับแรงอัดระยะต้นลดลง แต่เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงทำให้กำลังรับแรงอัดระยะปลายดีขึ้น (วิฑิต ทิพยธารารชร. 2538 : สรุป)

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยต้องการจะศึกษาการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากท้องถิ่น มาประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ต่อสภาพเศรษฐกิจของท้องถิ่น โดยการนำเถ้าแกลบที่เผาจากโรงงานเผาอิฐ ในอำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และการนำเถ้าลอยลิกไนต์ จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มาทำการศึกษาวิจัยค้นคว้า เพราะในการทำวิจัยส่วนมากจะเป็นเถ้าแกลบจากโรงสีข้าว และนำมาเผาเองตามอุณหภูมิที่ควบคุม

เมื่อนำซีเมนต์จากโรงงานเผาอิฐ และเถ้าลอยลิกไนต์มาทำการวิจัยในครั้งนี้ โดยนำมาผสมในการทำคอนกรีตกำลังสูงนั้น เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่หาได้ง่ายจากท้องถิ่น และมีอยู่จำนวนมากภายในประเทศ และยังสามารถทดสอบหาปริมาณซีเมนต์เถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับ หิน ทราย น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ โดยให้มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ในด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ด้านกำลังรับแรงอัด ด้านกำลังรับแรงดึง ด้านค่าการยุบตัว และด้านการทนทาน ต่อปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน ให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตควบคุม

ตาราง 22 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์
ซีเมนต์ออลิกไนต์ และไมโอสาร์ลดน้ำพิเศษ (บุรณัทร นัทรวิระ และคนอื่นๆ. 2537 :
112)

		กำลังรับแรงอัด(กก./ซม. ²)			
OPC:RHA:FA		3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
100	0 : 0	138	200	273	285
80	20 : 0	140	204	341	363
80	0 : 20	104	173	274	300
60	40 : 0	78	125	267	327
60	20 : 20	132	182	284	339
60	0 : 40	58	70	210	257
40	60 : 0	31	71	211	279
40	40 : 20	70	126	222	287
40	20 : 40	68	129	251	311
40	0 : 60	38	49	123	249

หมายเหตุ 1. ทรายต่อสารปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.75

2. ค่าการไหลแผ่น $100 \pm$ ร้อยละ 5

3. OPC : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

RHA : จี๊ดเกิ้ล

FA : จี๋ถ้ำลอบขลิกไนต์

บทที่ 8

วิธีดำเนินการทดลอง

การทดลองครั้งนี้ เพื่อให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซีเมนต์เกรดหรือเกรดยลิกไนต์ ทราช หิน น้ำ สารลดน้ำพิเศษ และ ซิลิกาฟูม การทดลองครั้งนี้ได้กำหนดรายละเอียดตามขั้นตอนในการดำเนินการศึกษาดังนี้

1. ประชากรที่ใช้ในการทดลอง
2. วัสดุผสมที่ใช้ในการทดลอง
3. จัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
4. ลำดับขั้นการทดลอง
5. การเปรียบเทียบและสรุปผลการทดลอง
6. การวิเคราะห์และอภิปรายผล
7. สถานที่และระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง

1. ประชากรที่ใช้ในการทดลอง

ประชากร ได้แก่คอนกรีตกำลังสูงที่ได้จากการผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซีเมนต์เกรดหรือเกรดยลิกไนต์ จะมีค่ารวมเท่ากับ 100 ในอัตราส่วนผสมนี้ ซีเมนต์เกรดต้องไม่เกินร้อยละ 30 หิน ทราช น้ำ สัดส่วนคงที่ ส่วนสารลดน้ำพิเศษ ร้อยละ 1.25 ของน้ำหนักวัสดุผง จำนวน 11 สูตร สูตรละ 27 แท่ง

2. วัสดุผสมที่ใช้ในงานทดลอง

วัสดุผสมที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ประกอบด้วย

- 2.1 ปูนซีเมนต์ ในการทดลองครั้งนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบธรรมดาประเภทที่ 1 ตราช้างบรรจุถุงขนาด 50 กิโลกรัม
- 2.2 ซีเมนต์กลบ ใช้ซีเมนต์กลบที่ได้จากโรงงานเผาอิฐ ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มาบดละเอียดด้วยเครื่องบดใช้เวลา 75 นาที และผ่านตะแกรงร่อนขนาด 325 เมช
- 2.3 แก้วลอยลิกไนต์ ใช้ซีเมนต์ลอยจากโรงงานผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีความละเอียด 3,700 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.90 (บุรฉัตร ถัสวีระ. 2537 : 110)
- 2.4 ซิลิกาฟูม ใช้ซิลิกาฟูมชนิดผง ที่มีขายตามร้านเคมีภัณฑ์ทั่วไป
- 2.5 สารลดน้ำพิเศษ ใช้น้ำยาประเภทซัลโฟเนต แนนพาทาลีน พอร์มัลดีไฮด์ คอนเดนเสต ซึ่งคุณสมบัติของสารลดน้ำพิเศษคือทำให้อนุภาคปูนซีเมนต์ต่าง ๆ ที่ตกค้างอยู่ ซึ่งมีประจุต่างกัน ในซีเมนต์เฟส
- 2.6 ทรายกลาง เป็นทรายน้ำจืด แข็ง มีแ่งคม ปราศจากอินทรีย์วัตถุเจือปน ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 4
- 2.7 หิน เป็นหินที่นำมาข่อยเพื่อใช้ในการงานก่อสร้าง ในงานคอนกรีต จะใช้หินขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 1/2 นิ้ว
- 2.8 น้ำ ใช้น้ำประปาที่มีใช้ตามบ้านทั่วไป

3. จัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ประกอบด้วย

- 3.1 เครื่องชั่ง อ่านได้ละเอียด 0.1 กรัม
- 3.2 หม้อบดหรือเครื่องบดซีเมนต์
- 3.3 ตะแกรงร่อนขนาด 325 เมช
- 3.4 ถังมือยาง

3.5 กระบอกตวงน้ำ 500 - 1,000 มิลลิเมตร

3.6 เกรียงเหล็กแบน

3.7 แท่งกระทุ้ง

3.8 แบบพิมพ์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร

3.9 ถังน้ำ

3.10 พลั่ว

3.11 เครื่องผสมคอนกรีต

3.12 นาฬิกาจับเวลา

3.13 เวอร์เนีย ขนาดวัดระยะได้ 8 - 10 นิ้ว

เครื่องทดสอบที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้คือ

3.14 เครื่องทดสอบหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง

3.15 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.16 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึง

3.17 เครื่องทดสอบค่าการยุบตัว

3.18 การทดสอบการทนทานต่อปฏิกิริยาการบอเนชัน

4. ลำดับขั้นการทดลอง

การทดลองครั้งนี้จะเตรียมสูตรส่วนผสมในการทดลองเป็น 2 กลุ่ม

กลุ่มที่ 1 เป็นคอนกรีตควบคุมที่มีส่วนผสมของคอนกรีต ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 หิน ทราย น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ ในสูตรที่ 1 และปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซิลิกาฟูม หิน ทราย น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ ในสูตรที่ 2 ดังแสดงไว้ในตาราง 23

ทุกส่วนผสมนี้มีอัตราส่วนน้ำทั้งหมดต่อวัสดุผง เท่ากับ 0.33 และมีอัตราส่วนผสมของมวลรวมหยาบ (หิน) และมวลรวมละเอียด (ทราย) เท่ากัน คือใช้หินและทรายเท่ากับ 1140 กิโลกรัม และ 699 กิโลกรัม ตามลำดับ

การทำคอนกรีตตัวอย่าง

ตัวอย่างการคำนวณ คอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนน้ำทั้งหมดต่อวัสดุผง (W/C) 0.33 ปริมาณสารลดน้ำร้อยละ 1.25 ของวัสดุผง

ความหนาแน่นของสารลดน้ำพิเศษ	เท่ากับ 1.20	กิโลกรัมต่อลิตร
ความหนาแน่นของปูนซีเมนต์	เท่ากับ 3.15	กิโลกรัมต่อลิตร
การออกแบบโดยปริมาตร สำหรับคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร		
ปริมาตรปูนซีเมนต์ 450/3.15	เท่ากับ 142.86	ลิตร
ปริมาตรน้ำ 450 X 0.33	เท่ากับ 149.00	ลิตร
ปริมาตรสารลดน้ำ 5.63/1.20	เท่ากับ 4.69	ลิตร
ปริมาตรมวลรวม 1000-142.86-149.00-4.69	เท่ากับ 703.45	ลิตร
ปริมาตรทรายต่อมวลรวม	เท่ากับ 0.4	
ค่าความถ่วงจำเพาะของทราย	เท่ากับ 2.48	
ค่าความถ่วงจำเพาะของหิน	เท่ากับ 2.70	
ดังนั้น ปริมาณของทราย $0.4 \times 703.45 \times 2.48$	เท่ากับ 699	กิโลกรัม
ปริมาณของหิน $703.45 - 281.351 \times 2.7$	เท่ากับ 1140	กิโลกรัม
ปริมาณของน้ำ สุทธิ $149 - 5.63$	เท่ากับ 143.37	กิโลกรัม
ปริมาณสารลดน้ำ 0.0125×450	เท่ากับ 5.63	กิโลกรัม
รวมปริมาตรคอนกรีต	เท่ากับ 1000.00	ลิตร

ส่วนผสมของคอนกรีตตัวอย่างแสดงในตาราง 23

ชุดการทดลองกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 นี้ จะถูกบ่มไว้ในระยะเวลาที่ต่างกัน คือ 7, 14 และ 28 วัน แล้วนำไปทดสอบทางกลศาสตร์ด้านกำลังรับแรงอัด ด้านกำลังรับแรงดึง ด้านค่าการยุบตัว ด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนแอตชั่น ของคอนกรีตใน ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุคอนกรีต กองวิจัยและทดลอง กรมชลประทาน

การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตกำลังสูง ตามลำดับขั้นตอนต่อไปนี

4.1 เตรียมวัสดุผสม

4.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

4.1.2 ขี้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ผ่านการบดละเอียด ที่ระยะเวลา 75 นาที ด้วยเครื่องบดขี้เถ้าแกลบ จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จังหวัดปทุมธานี ในการเตรียมขี้เถ้าแกลบ โดยการชั่งขี้เถ้าแกลบและน้ำอย่างละเท่ากัน ใส่สารลดน้ำพิเศษ ร้อยละ 3 ของขี้เถ้าแกลบ คนจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วใส่สารเตตระโซเดียมไคฟอสเฟต [tatra - sodium diphosphate ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$)] ร้อยละ 0.2 ของขี้เถ้าแกลบผสมน้ำและสารลดน้ำพิเศษ เมื่อคนเสร็จเรียบร้อยปิดฝาเก็บส่วนผสมไว้ให้แน่น ไม่ให้ระเหยออกก่อนจะนำไปผสมคอนกรีต และจะได้ขี้เถ้าแกลบชนิดปรับปรุงใหม่มาใช้ในการทำคอนกรีตตัวอย่าง

4.1.3 ถ้ำลอบลึกในด จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

4.1.4 สารลดน้ำพิเศษ ใช้ประเภทซิลิโพนต์ แนนทาลีน พอร์มัลดีไฮด์ คอนเดนเสด

4.1.5 ซิลิกาฟูม ผงซิลิกาอนที่บดละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ 100 เท่า มีขายตามร้านเคมีภัณฑ์ทั่วไป

4.1.6 ทราบ ใช้ทราบแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 4

4.1.7 หิน ใช้หินขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกิน 1/2 นิ้ว

4.1.8 น้ำ ใช้น้ำประปาตามบ้านทั่วไป

4.2 ปฏิบัติการทดลองทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ดังนี้

การทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ด้านต่าง ๆ ของคอนกรีตตามมาตรฐานของการทดสอบที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดไว้

4.2.1 การทดสอบหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง มาตรฐาน ASTM C1992

1. เครื่องชั่ง ที่ชั่งได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม
2. ไมโครมิเตอร์ ที่วัดได้ละเอียดถึง 0.5 มิลลิเมตร

วิธีทดสอบ

1. ชั่งแท่งตัวอย่างให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.1 กรัม
2. วัดขนาดของถึงทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30

เซนติเมตร

วิธีคำนวณ

หาค่าหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งจากสูตร

$$\text{ค่าความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)} = \frac{\text{มวล (กรัม)}}{\text{ปริมาตร (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)}} \times 10^6$$

4.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด มาตรฐานที่ใช้สำหรับตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก

วิธีการเตรียมตัวอย่าง

นำแท่งตัวอย่างที่ต้องการทดสอบออกจากอ่างบ่มคอนกรีต ผึ่งแดดเพื่อให้คอนกรีตมีความชื้นในสภาพปกติ วัดขนาดของตัวอย่างโดยวัดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยให้ค่าเฉลี่ยทำการเคลื่อนแท่งตัวอย่างคอนกรีตด้วยก้ามตะกั่วเพื่อให้ผิวเรียบและการรับแรงสม่ำเสมอ

วิธีทดสอบ

นำแท่งตัวอย่าง วางกึ่งกลางของแท่งทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งทดสอบ เปิดเครื่องทดสอบโดยในการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ อัตราที่ใช้คือ 1.4 - 3.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที กดแท่งตัวอย่างจนแตก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ น้ำหนัก และพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่ากำลังอัดประลัย

$$\text{กำลังอัดประลัยของคอนกรีต} = \frac{\text{น้ำหนักกดประลัย}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง}}$$

4.2.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึง การทดสอบนี้ใช้แท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานวางให้แกนตามยาวอยู่ในแนวนอนเครื่องทดสอบแรงอัดก้อนตัวอย่างแตกในแนวตั้งตามเส้นผ่านศูนย์กลางจึงสามารถคำนวณกำลังต้านทานแรงดึงบนระนาบแตกได้ว่าได้ตามสมการ

$$f_s = \frac{2P}{\pi dL}$$

f_s = กำลังดึงแบบผ่าซีก

P = น้ำหนักกดสูงสุด (กิโลกรัม)

L = ความยาวของก้อนตัวอย่างทรงกระบอก (เซนติเมตร)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (เซนติเมตร)

การทดสอบกำลังรับแรงดึงเตรียมตัวอย่างเหมือนการทดสอบกำลังรับแรงอัด

4.2.4 การทดสอบค่าการยุบตัวคือ ค่าระยะที่คอนกรีตยุบตัวจากเดิม โดยวัดที่จุดกึ่งกลางของคอนกรีตที่ยุบตัว ในการวัดให้วัดละเอียดถึง 0.5 เซนติเมตร

รูปแบบการขุดตัวของคอนกรีต

1. การขุดตัวแบบถูกต้องเป็นการขุดตัวของคอนกรีต ภายใต้น้ำหนักของตัวคอนกรีต
2. การขุดตัวแบบเฉือน เป็นการขุดตัวที่เกิดจากการเลื่อนไถลของคอนกรีต ส่วนบนในลักษณะเฉือนลงไปด้านข้าง
3. การขุดตัวแบบล้ม เป็นการขุดตัวที่เกิดจากคอนกรีตมีความเหลวมาก

4.2.5 การทดสอบการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น เป็นการทดสอบหาระยะ และ ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นในเนื้อคอนกรีต โดยการฉีดพ่นสารเคมีเพื่อตรวจสอบในมอร์ต้าที่ผ่าซีก

วิธีทดสอบ

นำแท่งตัวอย่าง วางกึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด เปิดเครื่องทดสอบโดยในการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ อัตราที่ใช้คือ 1.4 - 3.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที กดแท่งตัวอย่างให้มีรอยร้าวแล้วจึงฉีดพ่นสารเคมี คือสารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์ ตรวจสอบจากการเปลี่ยนสีของสารเคมีที่ฉีดพ่น ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนจะไม่เกิดการเปลี่ยนสี จะเห็นเป็นเนื้อคอนกรีตธรรมดา ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูบานเย็น

4.3 สรุปผลการทดลอง

ตาราง 24 เปรียบเทียบและสรุปคุณสมบัติทางกลศาสตร์ ของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์แกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ หิน ทราย น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ เทียบกับคอนกรีตควบคุม (สูตรที่ 1 และ 2)

สูตร ที่	หน่วยน้ำหนัก ในสภาพแห้ง (กก./ลบ.ม.)	กำลังรับ แรงอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังรับ แรงดึง (กก./ตร.ซม.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	การทนทานต่อ ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น (มม.)
1	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X
3	.	.	.	.	.
4	.	.	.	.	.
5	.	.	.	.	.
6	.	.	.	.	.
7	.	.	.	.	.
8	.	.	.	.	.
9	.	.	.	.	.
10	.	.	.	.	.
11	.	.	.	.	.

5. การเปรียบเทียบและสรุปผลทดลอง

นำผลการทดสอบ แท่งทดลองของอัตราส่วนผสมสูตรคอนกรีตกำลังสูง โดยการนำซีเมนต์แกลบ หรือเถ้าลอยลิกไนต์ มาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีตกำลังสูงจำนวน 11 สูตร เพื่อนำไปเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่เหมาะสม ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ด้านกำลังรับแรงอัด ด้านกำลังรับแรงดึง ด้านค่าการยุบตัว ด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตกำลังสูง ตามมาตรฐานคอนกรีตควบคุม (สูตรที่ 1 และ 2)

6. การวิเคราะห์และอภิปรายผล

นำแท่งคอนกรีตที่ได้จากการทดลองมาทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ด้านต่าง ๆ กับคอนกรีตกำลังสูง แล้วนำผลมาเปรียบเทียบดูความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนต่างๆ ที่นำมาทดสอบหาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ด้านกำลังรับแรงอัด ด้านกำลังรับแรงดึง ด้านค่าการยุบตัว ด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตกำลังสูง

ผลสรุปที่ได้จากการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการของหน่วยงาน ที่มีมาตรฐานในการทดสอบโดยจะแสดงผลเปรียบเทียบด้วยตาราง 24

7. สถานที่และระยะเวลาที่ทำการทดลอง

สถานที่ทำการทดลอง ในการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้เตรียมวัสดุผสมต่าง ๆ และแบบพิมพ์ที่กองวิจัยและทดลอง กรมชลประทาน และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จังหวัดปทุมธานี

สถานที่ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต ที่กองวิจัยและทดลอง กรมชลประทาน

เริ่มจากเดือนกันยายน พ.ศ.2539 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2539

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองแต่งตั้งอย่างตามกระบวนการที่กำหนดให้ และทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ ในด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ด้านกำลังรับแรงอัด ด้านกำลังรับแรงดึง ด้านค่าการยุบตัว ด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์เถ้าลอย เถ้าลอยลิกไนต์ หิน ทราย น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ จากสูตรทดลองที่มีอัตราส่วนผสมต่างกัน จำนวน 11 สูตร โดยทดสอบและตรวจสอบตามวิธีการทดสอบเกณฑ์มาตรฐานของสูตรคอนกรีตควบคุมแล้ว ทำการวิเคราะห์ข้อมูลในรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางดังกล่าว คือ

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีตกำลังสูง

ในด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ด้านกำลังรับแรงอัด ด้านกำลังรับแรงดึง ด้านค่าการยุบตัว ด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น

การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสม ของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์เถ้าลอย และเถ้าลอยลิกไนต์ กับสารลดน้ำพิเศษ เป็นการทดลองผลิตและทดสอบคุณสมบัติตามวิธีการทดสอบคุณสมบัติตามเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม จำนวน 2 สูตร และจากสูตรทดลองที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน จำนวน 9 สูตร ปรากฏผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีตกำลังสูง ตามตาราง 25

ตารางที่ 25 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลศาสตร์ในด้านต่าง ๆ ของคอนกรีต-
กำลังสูงที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และ
สารลดน้ำพิเศษ เทียบกับคอนกรีตควบคุม (สูตรที่ 1 และ 2)

สูตร ที่	หน่วยน้ำหนัก ในสภาพแห้ง (กก./ลบ.ม.)	กำลังรับ แรงอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังรับ แรงดึง (กก./ตร.ซม.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	การทนทานต่อ ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น (มม.)
1	2542.2	557.76	52.65	12.1	1.2
2	2555.4	582.30	54.29	15.1	1.4
3 *	2439.8	554.93	51.48	12.1	1.7
4 **	2495.1	559.65	50.81	13.0	2.4
5	2441.4	429.79	38.69	13.7	2.3
6 *	2512.6	554.74	53.50	14.5	3.3
7	2485.1	431.30	37.65	13.0	3.5
8	2428.5	354.85	30.76	9.5	3.6
9 *	2414.7	549.26	47.56	10.0	3.8
10	2426.0	391.66	30.90	11.0	4.2
11	2432.6	363.91	29.06	12.7	4.7

* คุณสมบัติที่ดี

** คุณสมบัติที่ดีที่สุด

จากตาราง 25 สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีตกำลังสูง ที่
มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ หิน ทราย น้ำ และ
สารลดน้ำพิเศษ ในด้านต่าง ๆ ดังนี้ (ดูจากภาคผนวก ก. ข. ประกอบ)

ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ข้อมูลจากตารางแสดงว่าหน่วยน้ำหนักของทุกสูตร อัตราส่วนผสมสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานซึ่งอยู่ในช่วง ที่มีเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตทั่วไป คือ 2,300 - 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แสดงว่ามีคุณสมบัติด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตทั่วไป แต่ต่ำกว่าเกณฑ์ของคอนกรีตควบคุม จากตาราง 25 คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุผสม มีค่าหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งสูงกว่าคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน เนื่องจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดและความหนาแน่นสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซิลิกาฟูม ในปริมาณมากทำให้หน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งของคอนกรีตสูงขึ้น คือมีค่า 2,555.4 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนสูตรที่ผสมเถ้าลอยอีกในร้อยละ 10 กับซีเถ้าเกลบร้อยละ 10 จะมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตทั่วไปสูงถึง 2,512.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ด้านกำลังรับแรงอัด ข้อมูลจากตารางแสดงว่า สูตรที่ใช้ทดลองมีคุณสมบัติเท่ากับหรือมากกว่าสูตรคอนกรีตควบคุม ส่วนสูตรที่ผ่านเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม คือ สูตรที่ 4 ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัด 559.65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสูตรที่มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตกำลังสูงทั่วไป คือ มีค่าไม่น้อยกว่า 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คือสูตรที่ 3 , 6 และ 9 มีค่าอยู่ในระหว่าง 554.93 , 554.74 และ 549.26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ของคอนกรีตกำลังสูงทั่วไปคือ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนสูตรที่ 5 , 7 , 8 , 10 และ 11 ไม่สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้ดี เท่ากับสูตรอัตราส่วนผสมของคอนกรีตควบคุม และไม่อยู่ในเกณฑ์ของคอนกรีตกำลังสูงทั่วไป

ด้านกำลังรับแรงดึง ข้อมูลจากตารางแสดงว่า คอนกรีตควบคุมทั้งสองสูตร จะมีกำลังรับแรงดึงเท่ากับร้อยละ 8 - 10 ของกำลังรับแรงอัด ซึ่งเป็นคุณสมบัติของคอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังรับแรงดึงประมาณร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัด สูตรที่ผ่านเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม คือ สูตรที่ 6 อยู่ในระหว่าง 9.64 ของกำลังรับแรงอัด ณ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงดึง 53.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตควบคุมคือ 52.65 - 54.29 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนสูตรที่ 3 , 4 , 5 , 7 , 8 , 9 และ 11 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตทั่วไป คือมีกำลังรับแรงดึงอยู่

ประมาณร้อยละ 8 - 9 ของกำลังรับแรงอัด แต่คอนกรีตที่มีปริมาณของซีเมนต์และเถ้าลอยมากเท่าใด จะทำให้กำลังรับแรงดึงต่ำลงและทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำลงด้วย

ด้านค่าการยุบตัว ข้อมูลจากตารางแสดงว่า สูตรที่ผ่านเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม คือสูตรที่ 3, 4, 5, 6, 7 และ 11 คือค่ายุบตัว 12.1 , 13.0, 13.7 , 14.5, 13.0 และ 12.7 เซนติเมตร ส่วนสูตรอื่นมีค่ายุบตัวต่ำกว่าเนื่องจาก ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีเมนต์เถ้าลอยในปริมาณมากขึ้น ทำให้มีการดูดซึมน้ำจากคอนกรีตสดมาก จะทำให้คอนกรีตเสียค่าการยุบตัวรวดเร็วขึ้น ส่วนคอนกรีตกำลังสูงที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยเล็กน้อยในปริมาณมากขึ้นจะลื่นไหลดี และไม่ดูดน้ำมาก ทำให้มีค่ายุบตัวมากกว่าคอนกรีตที่ผสมซีเมนต์เถ้าลอย

การทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น ข้อมูลจากตารางแสดงว่า ทุกสูตรสูงกว่าเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม คือ ตั้งแต่ 1.2 - 1.4 มิลลิเมตร แต่ในคอนกรีตที่ผสมซีเมนต์เถ้าลอยและเถ้าลอยเล็กน้อยในปริมาณมากขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นสูงขึ้นตามไปด้วย แต่คอนกรีตที่ผสมซีเมนต์เถ้าลอย จะเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นต่ำกว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเล็กน้อย

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง พบว่า สูตรอัตราส่วนผสมที่ 4 มีค่าต่อหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง 2,495.1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม ด้านกำลังรับแรงอัดมีค่า 559.65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อยู่ในเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม ด้านกำลังรับแรงดึงมีค่า 50.81 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงเท่ากับร้อยละ 9.08 ของกำลังรับแรงอัด มีค่าอยู่ในเกณฑ์ของคอนกรีตควบคุม ด้านค่าการยุบตัว 13.0 เซนติเมตร มีค่าอยู่ในเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม ส่วนการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นสูงกว่าเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม คือมีค่า 2.4 มิลลิเมตร ส่วนสูตรที่ 3 , 6 และ 9 มีหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง 2,439.8 , 2,512.6 และ 2,414.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม ในด้านกำลังรับแรงอัดมีค่า 554.93 , 554.74 และ 549.26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย ในด้านกำลังรับแรงดึงมีค่า 51.48 , 53.50 , 47.56 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สูตรที่ 6 อยู่ในเกณฑ์

คอนกรีตควบคุม และมีค่ากำลังรับแรงดึงร้อยละ 9.64 ของกำลังรับแรงอัด ส่วนสูตรที่ 3 และ 9 มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม และมีค่ากำลังรับแรงดึงร้อยละ 9.28 และ 8.66 ของกำลังรับแรงอัด ในด้านค่าการยุบตัว 12.1, 14.5 และ 10.0 เซนติเมตร สูตรที่ 3 และ 6 อยู่ในเกณฑ์ของคอนกรีตควบคุม แต่สูตรที่ 9 ต่ำกว่าเกณฑ์ของคอนกรีตควบคุม และด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาการบอเนชั่น มีค่า 1.7 , 3.3 และ 3.8 มิลลิเมตร สูงกว่าคอนกรีตควบคุม ดังนั้นสูตรที่ 3 , 4 , 6 และ 9 จึงเป็นอัตราส่วนผสมที่สามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตกำลังสูงได้ต่อไป

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสม ของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซี๊เถ้าแกลบ และเถ้าลอยลิกไนต์ กับสารลดน้ำพิเศษ ได้ดำเนินการดังต่อไปนี้

ความมุ่งหมายของการวิจัย

เพื่อการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซี๊เถ้าแกลบ และเถ้าลอยลิกไนต์ กับสารลดน้ำพิเศษ โดยให้มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ด้านกำลังรับแรงอัด ด้านกำลังรับแรงดึง ด้านค่าการยุบตัว และด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น ของคอนกรีตกำลังสูง โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ควบคุม

ประชากร

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการทดลองหาอัตราส่วนของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของซี๊เถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ กับ ทราย หิน น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ ร้อยละ 1.25 ของวัสดุผง สัดส่วนทดลองมี 11 สูตร ขนาดแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร สูตรละ 27 แท่ง ดังแสดงในตาราง 25

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง คือ การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีดีแกลบ และเถ้าลอย-ลิกไนต์ กับสารลดน้ำพิเศษ ดังนั้น เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยจึงใช้เครื่องมือผสมปูน และเครื่องมือผสมตามสัดส่วนกำหนดไว้ ในตาราง 23 แบบพิมพ์ที่ใช้ในการทำคอนกรีตทดลองครั้งนี้ใช้แบบพิมพ์รูปทรงกระบอก โดยใช้เครื่องจี้คอนกรีตแล้วปาดหน้าให้เรียบ

การดำเนินการวิจัย

การทดลองคอนกรีตกำลังสูง ตามอัตราส่วนที่กำหนดมีขั้นตอนดังนี้

1. ผู้วิจัยนำส่วนผสมทั้งหมดในแต่ละสูตร มาปฏิบัติการด้วยเครื่องมือผสมของฝอยคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง กองงานวิจัยคอนกรีต กรมชลประทาน นำส่วนผสมในแต่ละสูตรมาใส่ในเครื่องผสมปูน เพื่อให้ส่วนผสมคลุกเคล้ากันให้เป็นเนื้อเดียวกัน
2. ขั้นตอนต่อไป เทส่วนผสมที่ผสมจากข้อ 1 ลงในแบบพิมพ์รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ที่เตรียมไว้จำนวน 27 อัน
3. ใส่ส่วนผสมเพียง 1 ใน 3 ส่วน ของความสูงของแบบ นำเครื่องจี้คอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตแน่น เติมอีก 1 ส่วน เมื่อจี้คอนกรีตแล้วจึงเติมส่วนที่เหลือให้เต็มแบบ แล้วใช้เครื่องจี้คอนกรีตให้แน่นอีกครั้ง แล้วจึงใช้เกรียงปาดหน้าแท่งตัวอย่างให้เรียบ
4. เมื่อเริ่มปฏิบัติสูตรต่อไป ก็จะดำเนินการปฏิบัติเหมือนกับ ข้อ 1 - 3 ทั้ง 11 สูตร
5. จากนั้นนำแท่งตัวอย่างทั้ง 11 สูตร มาบ่มโดยการแช่น้ำ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน และนำแท่งตัวอย่างมาทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ ในด้านต่าง ๆ ที่กำหนดไว้
6. นำแท่งตัวอย่าง เข้าห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของแท่งตัวอย่างทั้ง 9 สูตร เพื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของแท่งคอนกรีตควบคุม จำนวน 2 สูตร

7. สรุปผล การทดลองคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีตกำลังสูง

การวิเคราะห์ข้อมูล

นำแท่งตัวอย่างของคอนกรีตกำลังสูง จากสูตรในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ กัน และนำมาทดสอบหาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ในด้านต่างๆ ด้วยเครื่องมือทดสอบของฝ่ายคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง กองงานวิจัยคอนกรีต กรมชลประทาน แล้วนำผลมาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสูตรอัตราส่วนต่าง ๆ ที่นำมาทดสอบหาคุณสมบัติต่าง ๆ อันได้แก่ ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ด้านกำลังรับแรงอัด ด้านกำลังรับแรงดึง ด้านค่าการยุบตัว การหดตัว และด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน

สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ระหว่างอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเฝ้าเกลบ และเถ้าลอย-ลิกไนต์ กับสารลดน้ำพิเศษ พบว่า

ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง สูตรอัตราส่วนผสมส่วนทุกสูตรตั้งแต่สูตรที่ 3 - 11 มีค่าต่ำกว่าสูตรคอนกรีตควบคุม คือมีค่า 2,432.6 - 2,512.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตทั่วไป คือมีค่าระหว่าง 2,300 - 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ด้านกำลังรับแรงอัด ของอัตราส่วนผสมสูตรที่ 4 มีค่าอยู่ในเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม ซึ่งมีค่า 557.76 และ 582.30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนสูตรที่ 4 มีค่า 559.65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนสูตรที่ 3 , 6 , 9 มีค่าตามเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตกำลังสูงทั่วไป คือ มีค่าสูงกว่า 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนสูตร 5 ; 7 , 8 , 10 , 11 ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตกำลังสูงทั่วไป

ด้านกำลังรับแรงดึง ของอัตราส่วนผสมสูตรที่ 6 สามารถรับแรงดึงได้ 53.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่ากำลังรับแรงดึงร้อยละ 9.64 ของกำลังรับแรงอัด เป็นสูตรที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตควบคุม ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงร้อยละ 9.31 - 9.44 ของกำลังรับแรงอัด จากการทดสอบความต้านทานในด้านรับแรงดึงจะสามารถช่วยในการควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตจากผลกระทบต่างๆ ในการผสมซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ เมื่อกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงดึงต่อกำลังรับแรงอัดจะต่ำลง

ด้านค่าการยุบตัว ของสูตรอัตราส่วนผสมที่ 3 , 4 , 5 , 6 , 7 , 11 คือ มีค่ายุบตัว 12.1, 13.0, 13.7, 14.5, 13.0, 12.7 เซนติเมตร เมื่อใส่สารลดน้ำพิเศษร้อยละ 1.25 ทำให้คอนกรีตสามารถมีความหนืดค่อนข้างสูง ทำให้ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น แต่การบรรจุเข้าแบบหล่อค่อนข้างยาก และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ มีค่ายุบตัวดีมาก เถ้าลอยลิกไนต์ไม่ดูดซึมน้ำมากเท่ากับซีเมนต์เถ้ากลบ จึงเป็นสูตรที่อยู่ในเกณฑ์ของคอนกรีตควบคุม ซึ่งมีค่ายุบตัวในช่วง 12.1 - 15.1 เซนติเมตร ส่วนคอนกรีตที่มีซีเมนต์เถ้ากลบและเถ้าลอยลิกไนต์รวมกันในปริมาณมากขึ้นจะมีค่ายุบตัวน้อย จะทำให้การทำงานคอนกรีตกำลังสูงยากมากขึ้น ส่วนสูตรอัตราส่วนผสมที่ 8 , 9 , 10, มีค่ายุบตัว 9.5 - 11 เซนติเมตร เป็นสูตรที่อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม

ด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น ของสูตรอัตราส่วนผสมที่ 3 - 11 ทุกสูตรของสูตรทดลอง จะเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นสูงกว่าสูตรคอนกรีตควบคุม คือ มีค่า 1.7 - 4.7 มิลลิเมตร เนื่องจากส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมซีเมนต์เถ้ากลบ และเถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณสูงขึ้น จะเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นมากขึ้น

สรุปผล สูตรที่มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการทำคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์เถ้ากลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ คือสูตรที่ 4 เพราะเป็นสูตรที่ใช้อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 10 เป็นสูตรที่ได้ตามเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม ส่วนสูตรที่ 3 , 6 และ 9 เป็นสูตรที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตกำลังสูงทั่วไป ผู้วิจัยได้นำสูตรที่มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด คือ สูตรที่ 4 ไปทดสอบซ้ำอีกครั้ง สรุปผลการทดสอบดังตาราง 26

ตาราง 26 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลศาสตร์ ของคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์แกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ หิน ทราย น้ำ และ สารลดน้ำพิเศษ สูตรที่ 4

สูตร ที่	หน่วยน้ำหนัก ในสภาพแห้ง (กก./ลบ.ม.)	กำลังรับ แรงอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังรับ แรงดึง (กก./ตร.ซม.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	การทนทานต่อ ปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น (มม.)
4	2495.1	559.65	50.81	13.0	2.4

อภิปรายผล

ในการทดสอบ คุณสมบัติด้านกลศาสตร์ของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์แกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ มีผลดังนี้

ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง จากผลการทดลองพบว่า มีค่าไม่เท่ากัน โดยสูตรที่ใช้ซีเมนต์แกลบผสม จะมีหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งน้อยกว่าสูตรที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสม แต่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม ตั้งแต่สูตรที่ 3 - 11 มีหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง 2,414.7 - 2,512.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่อยู่ในเกณฑ์ของคุณสมบัติของคอนกรีตทั่วไป คือ 2,300 - 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แสดงว่า คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยซีเมนต์แกลบในปริมาณมาก มีความหนาแน่นน้อยกว่า เพราะซีเมนต์แกลบมีความหนาแน่นต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณมาก จะมีความหนาแน่นมากกว่าคอนกรีตที่ผสมซีเมนต์แกลบในปริมาณมาก

ด้านกำลังรับแรงอัด มีค่าไม่เท่ากัน สูตรที่ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 90 ซีเมนต์เถ้าลอยลิกไนต์ ร้อยละ 10 สูตรอัตราส่วนผสมที่ 4 อยู่ในเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม สามารถรับกำลังแรงอัด ณ 28 วัน ได้ 559.65 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สูตรอัตราส่วนที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 90 ซีเมนต์แกลบ ร้อยละ 10 สูตรอัตราส่วนผสมที่ 3 มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์เล็กน้อย สามารถรับกำลังแรงอัด ณ 28 วัน ได้

554.93 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสูตรที่ใช้ชี้ได้ว่ากล้ามเนื้อและกล้ามเนื้อในสัตว์ร่วมกัน สูตรที่ 6 และ 9 ได้ 554.74 และ 549.26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์ของคอนกรีตกำลังสูงทั่วไป คือมีค่ามากกว่า 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการทดลองแสดงว่า คอนกรีตที่ผสมกล้ามเนื้อสัตว์ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเกิดตัวเชื่อมประสานกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำในระยะแรก แต่จะมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น และจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปที่อายุมากกว่า 28 วัน (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539 : 61) คอนกรีตที่มีส่วนผสมที่ใช้ชี้ได้ว่ากล้ามเนื้อสัตว์ให้กำลังรับแรงอัดระยะต้นสูงกว่าส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้กล้ามเนื้อสัตว์ แต่ผลของการเกิดปฏิกิริยาทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นที่อายุมากขึ้นของส่วนผสมที่มีกล้ามเนื้อสัตว์ เช่น สูตรที่ 3 มีส่วนผสมชี้ได้ว่ากล้ามเนื้อสัตว์ ร้อยละ 10 ณ 7 วัน มีกำลังรับแรงอัด 382.03 และ 14 วัน มีกำลังรับแรงอัด 427.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่สูตรที่ 4 มีส่วนผสมกล้ามเนื้อสัตว์ ร้อยละ 10 ณ 7 วัน มีกำลังรับแรงอัด 372.22 และ 14 วัน มีกำลังรับแรงอัด 428.46 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ด้านกำลังรับแรงดึง คุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตจะมีกำลังรับแรงดึงประมาณ ร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัด สูตรที่ 6 สามารถรับกำลังแรงดึงได้สูงกว่าเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม ณ 28 วัน คือ 53.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่ากำลังรับแรงดึงร้อยละ 9.64 ของกำลังรับแรงอัด แต่สูตรที่มีส่วนผสมชี้ได้ว่ากล้ามเนื้อสัตว์ในปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์มาก ๆ จะทำให้กำลังรับแรงดึงต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัด จากการทดสอบด้านกำลังรับแรงดึง แสดงว่าคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของชี้ได้ว่ากล้ามเนื้อสัตว์ และกล้ามเนื้อสัตว์ ในร้อยละ 30 และใส่สารลดน้ำพิเศษ ร้อยละ 1.25 จะมีกำลังรับแรงดึงไม่ต่างกันมาก แต่คอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของชี้ได้ว่ากล้ามเนื้อสัตว์และกล้ามเนื้อสัตว์ ที่มีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำ จะทำให้กำลังรับแรงดึงต่ำลงด้วย ในส่วนผสมที่มีชี้ได้ว่ากล้ามเนื้อสัตว์ ร้อยละ 30 ณ 28 วัน คือมีค่ากำลังรับแรงดึงร้อยละ 8.67 ของกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดึงจะลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของชี้ได้ว่ากล้ามเนื้อสัตว์ ซึ่งจะลดลงตามกำลังรับแรงอัด ในส่วนผสมที่มีกล้ามเนื้อสัตว์ ร้อยละ 30 ณ 28 วัน คือมีค่ากำลังรับแรงดึงร้อยละ 7.99 ของกำลังรับแรงอัดจะมีค่าไม่ต่างกันมาก (ชัชชัย ไชยเสนา. 2535 : 41)

ด้านค่าการยุบตัว มีค่าไม่เท่ากัน สูตรที่ผสมซีเมนต์เก่าและเถ้าลอยลิกไนต์ ของอัตราส่วนร้อยละ 10 ในสูตรอัตราส่วนผสมที่ 3 , 4 , 5 , 6 , 7 และ 11 มีค่ายุบตัวอยู่ในเกณฑ์ของสูตรคอนกรีตควบคุม ได้ระหว่าง 12.1 และ 14.5 เซนติเมตร แต่สูตรที่ผสม เถ้าลอยลิกไนต์ปริมาณมากขึ้น จะสูญเสียการยุบตัวเร็วขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยลิกไนต์ไม่ต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงทำให้สูญเสียค่าการยุบตัวในคอนกรีตตัวอย่างรวดเร็ว และคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เก่าและเถ้าลอยลิกไนต์สูง จะทำให้คอนกรีตหดตัวมาก ใช้เครื่องจักรเขย่าคอนกรีตได้ยากขึ้น เนื่องจากซีเมนต์เก่าและเถ้าลอยลิกไนต์ต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์-ปอร์ตแลนด์ ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดต่ำลง และทำให้มีความพรุนมากขึ้น

ด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาการบอเนชัน มีค่าไม่เท่ากัน สูตรของคอนกรีตควบคุมมีค่าต่ำกว่าทุกสูตร เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมซีเมนต์เก่าและเถ้าลอยลิกไนต์ จะเกิดปฏิกิริยาการบอเนชันสูงกว่าสูตรคอนกรีตควบคุม ซึ่งสูตรคอนกรีตควบคุมมีค่า 1.2 และ 1.4 มิลลิเมตร และสูตรใดที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณสูงก็จะยังเกิดปฏิกิริยาการบอเนชันมากขึ้นกว่าผสมซีเมนต์เก่าและเถ้าลอยลิกไนต์ เช่นสูตรที่ 11 มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 30 ณ 28 วัน จะเกิดปฏิกิริยาการบอเนชัน 4.7 มิลลิเมตร มากกว่าสูตรที่ 8 ซึ่งมีค่าส่วนผสมของซีเมนต์เก่าและเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 30 เท่ากัน ณ 28 วันจะเกิดปฏิกิริยาการบอเนชัน 3.6 มิลลิเมตร แสดงว่า ยิ่งจำนวนคอนกรีตมากวันเท่าใดก็จะเกิดปฏิกิริยาการบอเนชันมากตามไปด้วย แต่จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาการบอเนชันมากขึ้น เมื่อมีเถ้าลอยลิกไนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 ทำให้เกิดปฏิกิริยาการบอเนชันมากขึ้น เนื่องจากคอนกรีตทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ดังสมการปฏิกิริยาเคมีคือ ปูนขาวที่มีอยู่ในเนื้อ → แคลเซียมคาร์บอเนต คอนกรีต + ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ + น้ำ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ จากปฏิกิริยานี้จะก่อให้เกิดการลดลงของปริมาณของเนื้อพาสต์ในคอนกรีต จะทำให้เกิดการหดตัว และก่อให้เกิดปัญหาความคงทนของคอนกรีต จึงใช้วัสดุปอซโซลานที่มีองค์ประกอบหลักจำพวกซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา ที่สามารถจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปูนซีเมนต์เมื่อนำมาทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำหรือความชื้น รวมทั้งสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์) ในสภาพอุณหภูมิที่ปกติจะได้สารประกอบที่ช่วยเพิ่มกำลังและคงทนในคอนกรีต (C_3S , S_2 , H_3)

ซึ่งมีค่ากำลังใกล้เคียงกับซิลิกาฟูมจากต่างประเทศได้ และสารจำพวกปอซโซลานีมีความจำเป็นอย่างมากในงานคอนกรีต (บุรณัตร ฉัตรวีระ. 2539 : 29, 35)

ข้อเสนอแนะ

1. การพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมกับขี้เถ้าแกลบ หรือเถ้าลอยลิกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ ที่เป็นการเพิ่มเติมจากกระบวนการวิจัยอาจทำได้โดย

1.1 ควรลดน้ำลงในการผสมขี้เถ้าแกลบจะทำให้คอนกรีตไม่เป็นรูพรุน

1.2 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจากการวิจัยครั้งนี้ เหมาะที่จะนำไปใช้ในท้องถิ่น ที่มีวัสดุอยู่เพื่อเป็นการประหยัด และนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

1.3 ควรทดสอบหลังการหล่อต่อไปอีก 60 วัน และ 90 วัน เพื่อให้ได้เกณฑ์มาตรฐานในด้านคุณสมบัติทางกลศาสตร์ ในด้านกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

1.4 ควรศึกษาการผุพังของคอนกรีตและความต้านทานสารเคมี เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ได้ในงานก่อสร้างที่มีสารเคมีต่าง ๆ และควรทดสอบด้านการหดตัวของคอนกรีตเพื่อการแตกร้าวของคอนกรีต

2. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

ควรศึกษาการใช้วัสดุเหลือทิ้งอย่างอื่นนอกเหนือจากขี้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ และเถ้าลอยลิกไนต์ เช่น เปลือกถั่วลิสง ขี้เลื่อยจากโรงเลื่อยไม้ และศึกษาวิธีการใหม่ ๆ เพิ่มเติม เพื่อทดแทนการใช้สารลดน้ำพิเศษได้โดยจะทำให้คอนกรีตมีราคาต่ำลง เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำคอนกรีตกำลังสูงต่อไป

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- "การทำซีเมนต์จากเถ้าแกลบ," ใน รายงานกิจกรรมวิทยาศาสตร์บริการ. 38 : 32-35;
กรุงเทพฯ : ศุภสภา ลาดพร้าว, 2523.
- ัชชาวลย์ เศรษฐบุตร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : ม.ป.ท. , 2539.
- ชูโชค ศิวะคุณากร. การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงด้วยการผสมเถ้าถ่านหิน. วิทยานิพนธ์
วศ.ม. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, 2536. อัดสำเนา.
- ชนะ เชนันทรรัตน์ และคนอื่น ๆ. การศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ และความคงทนของ
มอร์ต้าผสมเถ้าลอยแม่เมาะ. ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2538. อัดสำเนา.
- ธวัชชัย ไชยเสนา. การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูง ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ต-
แลนด์ผสมเถ้าลอย เถ้าลอยและสารลดน้ำพิเศษ. วิทยานิพนธ์ วศ.ม.
ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น , 2535. อัดสำเนา.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิมิตรยงสกุล. การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอชโซเลนใน
คอนกรีตกำลังสูง. ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, 2530.
- _____. "การประยุกต์ใช้เถ้าลอยในคอนกรีตกำลังสูง," ใน รายงานการประชุมวิชาการ
ทางวิศวกรรม. 117-130; กรุงเทพฯ : 2537.
- _____. "การผลิตเถ้าลอยที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาและการประยุกต์ใช้ในบล็อกซีเมนต์,"
วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 4 (2) : 119-137 ;
กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ธันวาคม 2537.
- _____. "การออกแบบคอนกรีตผสมเถ้าลอย จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ," วารสารวิชาการอุดม-
ศึกษา. 4 (1) : 32-51 ; 2537.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และคนอื่น ๆ. "คอนกรีตผสมเถ้าลอย." วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัย
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 4 (1) : 42-49 ; มิถุนายน 2538.
- _____. "ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอย และสารลดน้ำพิเศษ," วารสารเทคโนโลยีสุร-
นาารี. 1 (2) : 109 - 122 ; 2537.
- _____. "ความคงทนของคอนกรีต," วารสาร CPAC NEWS. 1 (1) ; 2539

- ประณต กุลประสูตร. เทคนิคงานปูน - คอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : อัมรินทร์-พริ้นติ้ง แอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน), 2536.
- พงศ์พัน วรสุนทรโรสด. วัสดุก่อสร้าง. กรุงเทพฯ : เอช-เอน การพิมพ์, 2535.
- พิภพ สุนทรสมัย. ช่างปูนก่อสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2536.
- พิภพ สุนทรสมัย. ปฏิบัติการและควบคุมงานคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพฯ : บริษัทที.พี. พรินท์ จำกัด, 2536.
- วัชระ ทองเจริญ และคนอื่น ๆ. "การผลิตและการทดสอบคุณสมบัติบางประการของซีเมนต์แกลบ," วารสารสงขลานครินทร์. 8 : 4 ; 2529.
- วิทยาศาสตร์, กรม. "การศึกษาทดลองการทำปูนซีเมนต์แกลบไลต์," ใน รายงานกิจกรรมกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 51 : 40 - 63 ; 2536.
- วิทยาศาสตร์, กระทรวง. ปูนซีเมนต์โปะโซลนา. กรุงเทพฯ : กระทรวงวิทยาศาสตร์, 2529.
- วิฑิต พิทยธาร. การศึกษาคูณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงผสมไมโครซิลิกา ซีเมนต์ลอยและสารลดน้ำพิเศษ. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2538. อัดสำเนา.
- วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : ป.สัมพันธ์พาณิชย์, 2529.
- วิวัฒน์ คลังวิจิตร. การทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการทำวัสดุแผ่นทดแทนไม้จากวัสดุปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แกลบ ปูนขาวและใยมะพร้าวหรือใยผักตบชวา. ปรียญานิพนธ์ กศ.ม. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร, 2535. อัดสำเนา.
- สนั่น เจริญเผ่า และวินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเสริมเหล็ก. (ฉบับแก้ไขเพิ่มเติม) พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- สมชาย ปิ่นนุช และคนอื่น ๆ. คุณสมบัติพิเศษของคอนกรีตซีเมนต์แกลบสมัยใหม่. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2538. อัดสำเนา.

- สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และคนอื่น ๆ. "คอนกรีตคุณภาพสูง," วารสารวิศวกรรมสาร. 4 (8) : 1 - 6 ; 2536.
- สร้อยดาว วินิจนันทรรัตน์. "เถ้าลอยลิกไนต์กับงานด้านสิ่งแวดล้อม," วารสารวิทยาศาสตร์. 49 (3) : 185 - 188 ; 2538.
- สุดา เถลิงพงษ์. ผลกระทบของมวลรวมหยาบต่อคอนกรีตกำลังสูงในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ชนบุรี , 2537. อัดสำเนา.
- อนุจิต กิจสวัสดิ์. การทำซีเมนต์จากเถ้าแกลบ. กรุงเทพฯ : กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2522.
- อรรถน์ ประภาพิทยากร และคนอื่น ๆ. ที่สุดของวัสดุช่าง. กรุงเทพฯ : โอ.เอส.พริ้นท์-ฟาย, 2531.
- อรุณ ชัยเสรี. คู่มือการตรวจสอบคอนกรีตของสมาคมคอนกรีตอเมริกัน. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2535.
- อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์. ปฏิบัติงานทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : สยามสปอร์ต ซินดิเคท, 2537.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. ทำเนียบโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดพระนครศรีอยุธยา. พระนครศรีอยุธยา : สำนักงานอุตสาหกรรม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา, 2538.
- ASTM Standard. Annau Book of ASTM Standard Volume 4 section 4.01 , 4.02 and 4.05 Easton, USA. 1986.
- Sok, Khom. Creep and Shrinkage of High - Strength Concrete containing Mae - Moh Fly Ash. Bangkok : Asian Institute of Technology School of Civil Engineering , 1996.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ตอน ก.

ตาราง 27 การเปรียบเทียบผลการทดลองด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ของคอนกรีต
กำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์เกรด 400 ซีเมนต์เกรด 300 และ
สารลดน้ำพิเศษ

ตัวอย่างที่	กิโลกรัมต่อตารางลูกบาศก์เมตร					
	2400	2450	2500	2550	2600	2650
1	% % % % % % % % % % % % % % % %					
2	% % % % % % % % % % % % % % % %					
3	GGGGGGGGGGGGGGGG					
4	GGGGGGGGGGGGGGGGGG					
5	GGGGGGGGGGGGGGGGGG					
6	GGGGGGGGGGGGGGGGGGGG					
7	GGGGGGGGGGGGGGGGGGGG					
8	GGGGGGGGGGGGGGGGGG					
9	GGGGGGGG					
10	GGGGGGGGGGGGGGGGGG					
11	GGGGGGGGGGGGGGGGGG					

% % % % % %

ค่าเกณฑ์จากสูตรคอนกรีตควบคุม

GGGGGG

ค่าจากการทดสอบแท่งตัวอย่างของคอนกรีตกำลังสูง

ตาราง 31 การเปรียบเทียบผลการทดสอบด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ ณ 28 วัน

ตัวอย่างที่	มิลลิเมตร									
ใช้ทดสอบ	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
1	% % % % % %									
2	% % % % % % %									
3	G G G G G G G G G G									
4	G G G G G G G G G G G G									
5	G G G G G G G G G G G G									
6	G G G G G G G G G G G G G G G G									
7	G G G G G G G G G G G G G G G G G G									
8	G G G G G G G G G G G G G G G G G G G G									
9	G G									
10	G G									
11	G G									

% % % % % %

ค่าเกณฑ์จากสูตรคอนกรีตควบคุม

G G G G G G

ค่าจากการทดสอบแท่งตัวอย่างของคอนกรีตกำลังสูง

ภาคผนวก

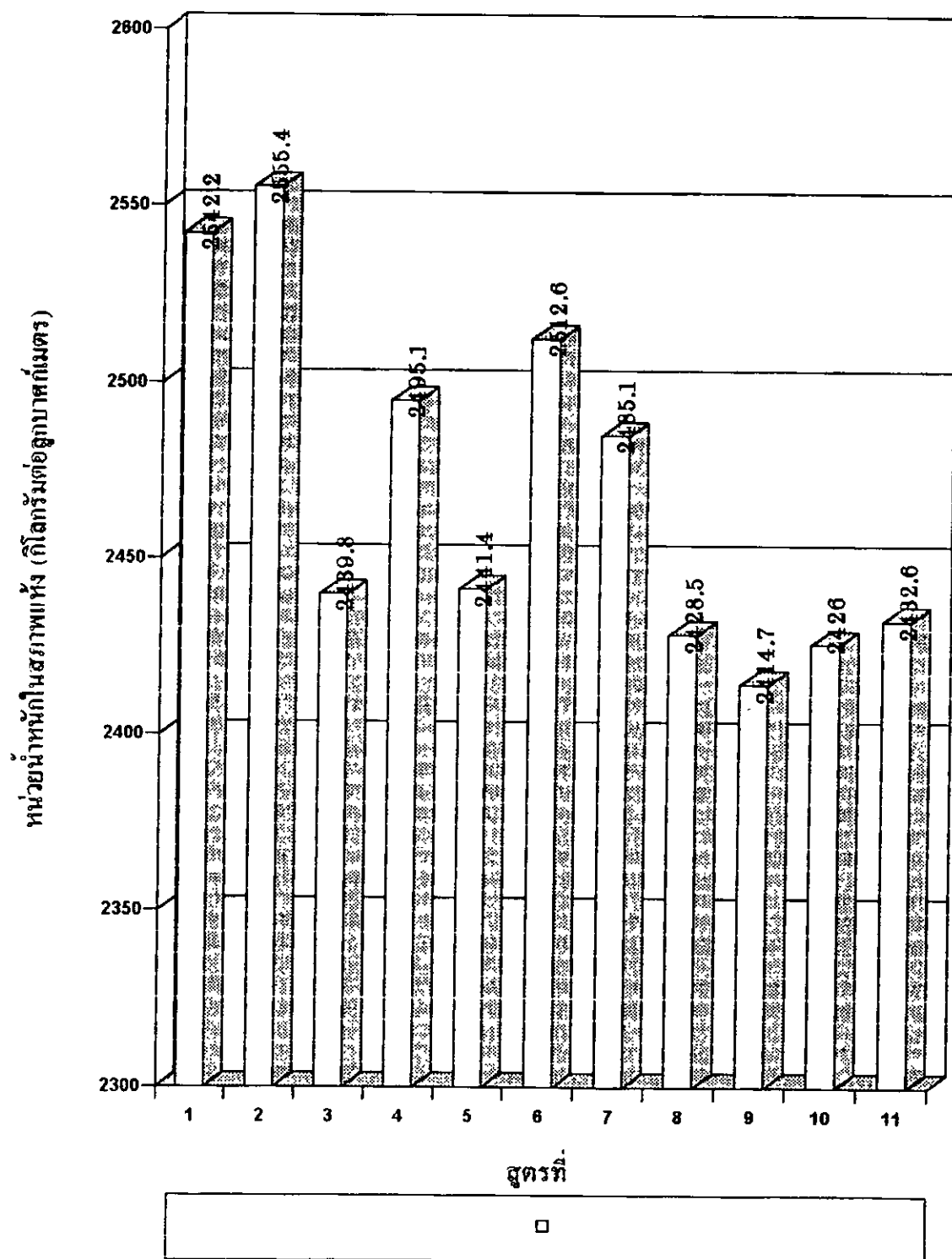
ตอน ข.

ตาราง 32 แสดงค่าหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง ในแต่ละแท่งตัวอย่าง

คูหที่	แท่งตัวอย่างที่	ข้อมูลจริง	เฉลี่ย
1	1	13,860	13,483.3
	2	13,340	
	3	13,250	
2	1	13,740	13,553.3
	2	13,120	
	3	13,800	
3	1	13,080	12,940.0
	2	12,800	
	3	12,940	
4	1	13,100	13,233.3
	2	13,000	
	3	13,600	
5	1	12,660	12,946.7
	2	12,680	
	3	13,500	
6	1	13,400	13,326.7
	2	13,330	
	3	13,250	
7	1	13,540	13,180.0
	2	13,000	
	3	13,000	
8	1	12,700	12,880.0
	2	13,340	
	3	12,640	
9	1	12,800	12,806.7
	2	12,800	
	3	12,820	
10	1	12,800	12,866.7
	2	12,860	
	3	12,940	
11	1	13,600	13,640.0
	2	13,700	
	3	13,620	

ตาราง 33 แสดงค่าของผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้งของคอนกรีตกำลังสูง
ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์เกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และ
สารลดน้ำพิเศษ

สูตรที่	ค่าหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
1	2542.2
2	2555.4
3	2439.8
4	2495.1
5	2441.4
6	2512.6
7	2485.1
8	2428.5
9	2414.7
10	2426.0
11	2432.6



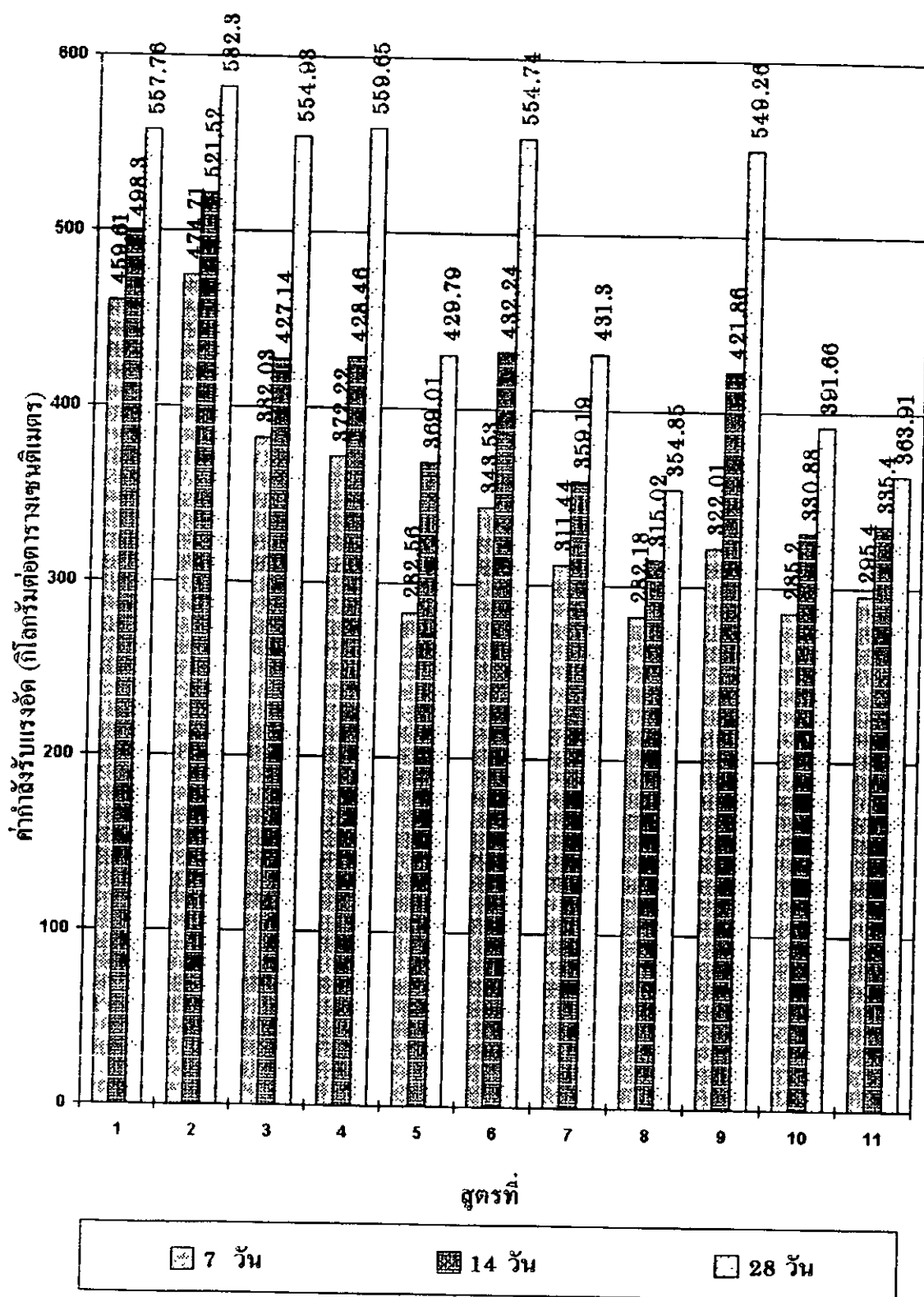
ภาพประกอบ 13 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ด้านหน่วยน้ำหนักในสภาพแห้ง
ของคอนกรีตกำลังสูง

ตาราง 34 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกำลังสูงในแต่ละแท่งตัวอย่าง

สูตร ที่	แท่งตัวอย่าง ที่	7 วัน		14 วัน		24 วัน	
		ข้อมูลจริง	เฉลี่ย	ข้อมูลจริง	เฉลี่ย	ข้อมูลจริง	เฉลี่ย
1	1	83,000		90,000		98,000	
	2	82,500	81,166.7	88,000	88,000.0	99,000	98,500.0
	3	78,000		86,000		98,500	
2	1	82,500		84,200		98,000	
	2	85,500	83,833.3	85,000	84,400.0	105,000	102,833.3
	3	83,500		84,000		105,500	
3	1	72,000		76,500		98,000	
	2	65,000	67,466.7	75,300	75,433.3	97,000	98,000.0
	3	65,400		74,500		99,000	
4	1	65,000		76,000		98,500	
	2	65,200	65,733.3	76,000	75,666.7	99,000	98,833.3
	3	67,000		75,000		99,000	
5	1	51,000		68,000		58,700	
	2	48,600	49,900.0	67,500	65,166.7	60,200	60,133.33
	3	50,100		60,000		61,500	
6	1	66,000		72,000		97,500	
	2	60,000	60,666.7	78,500	76,333.3	98,400	97,966.7
	3	56,000		78,500		98,000	
7	1	58,000		55,000		75,000	
	2	50,000	55,000.0	52,500	54,700.0	77,000	76,166.7
	3	57,000		56,600		76,500	
8	1	47,300		48,700		53,000	
	2	59,200	49,833.3	53,200	55,633.3	70,000	62,666.7
	3	43,000		65,000		65,000	
9	1	55,000		74,500		97,500	
	2	58,400	56,866.7	73,000	74,500.0	96,500	97,000.0
	3	57,200		76,000		97,000	
10	1	54,000		60,100		70,000	
	2	53,100	50,366.7	53,700	58,433.3	69,000	69,166.7
	3	44,000		61,500		68,500	
11	1	52,000		51,000		68,300	
	2	53,000	52,166.7	53,400	52,266.7	71,000	64,266.7
	3	51,000		52,400		53,500	

ตาราง 35 แสดงค่าของผลการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ

สูตร ที่	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
1	459.61	498.30	557.76
2	474.71	521.52	582.30
3	382.03	427.14	554.93
4	372.22	428.46	559.65
5	282.56	369.01	429.79
6	343.53	432.24	554.74
7	311.44	359.19	431.30
8	282.18	315.02	354.85
9	322.01	421.86	549.26
10	285.20	330.88	391.66
11	295.40	335.40	363.91



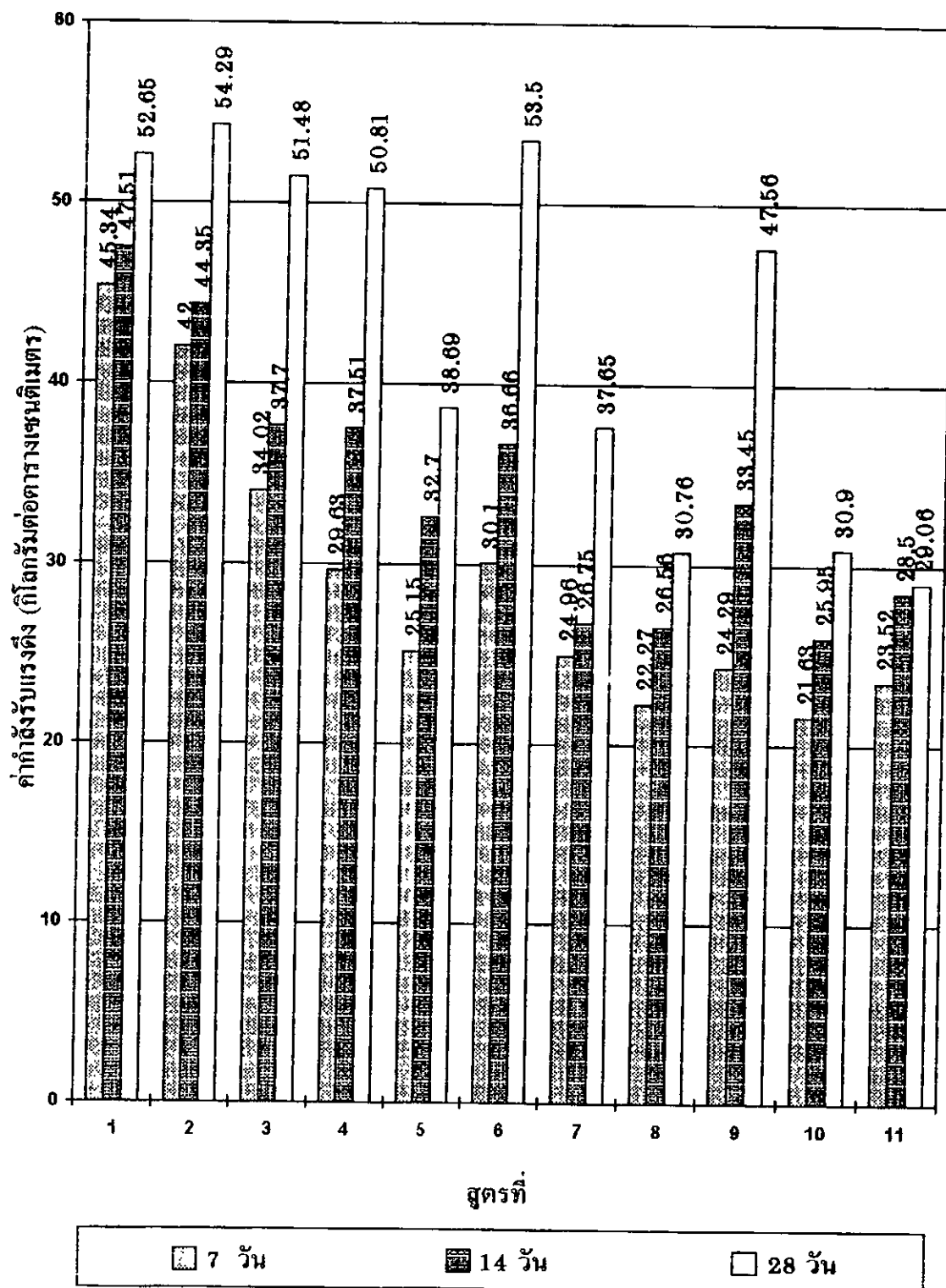
ภาพประกอบ 14 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกำลังสูง

ตาราง 36 แสดงค่าด้านกำลังรับแรงดึง ในแต่ละแท่งตัวอย่าง

สูตร ที่	แท่งตัวอย่าง ที่	7 วัน		14 วัน		24 วัน	
		ข้อมูลจริง	เฉลี่ย	ข้อมูลจริง	เฉลี่ย	ข้อมูลจริง	เฉลี่ย
1	1	32,100		33,600		37,300	
	2	32,000	45.34	33,600	47.51	37,100	52.65
	3	32,000		33,600		37,200	
2	1	30,000		31,300		54.29	
	2	29,300	42.00	31,300	44.35	38,300	54.29
	3	29,700		31,400		38,700	
3	1	24,100		26,400		35,700	
	2	24,000	34.02	26,500	37.70	36,700	51.48
	3	24,000		27,000		36,700	
4	1	20,900		26,300		36,200	
	2	20,900	29.63	26,200	37.51	35,800	50.81
	3	21,000		27,000		35,700	
5	1	18,000		23,100		27,400	
	2	17,500	25.15	23,200	32.70	27,300	38.69
	3	17,800		23,000		27,300	
6	1	21,300		25,300		37,800	
	2	21,300	30.10	25,200	36.66	37,800	53.50
	3	21,200		27,200		37,800	
7	1	17,700		18,900		27,000	
	2	17,500	24.96	18,900	26.75	25,400	37.65
	3	17,700		18,900		26,400	
8	1	15,200		19,000		21,700	
	2	16,000	22.27	18,300	26.56	21,700	30.76
	3	16,000		19,000		21,800	
9	1	17,100		23,500		33,400	
	2	17,400	24.29	23,400	33.45	33,800	47.56
	3	17,000		24,000		33,600	
10	1	15,000		18,500		22,000	
	2	15,300	21.63	18,000	25.95	22,000	30.90
	3	15,500		18,500		21,500	
11	1	17,000		19,700		20,800	
	2	16,300	23.52	21,000	28.50	21,000	29.06
	3	16,500		19,700		19,800	

ตาราง 37 แสดงค่าของผลการทดสอบด้านกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ

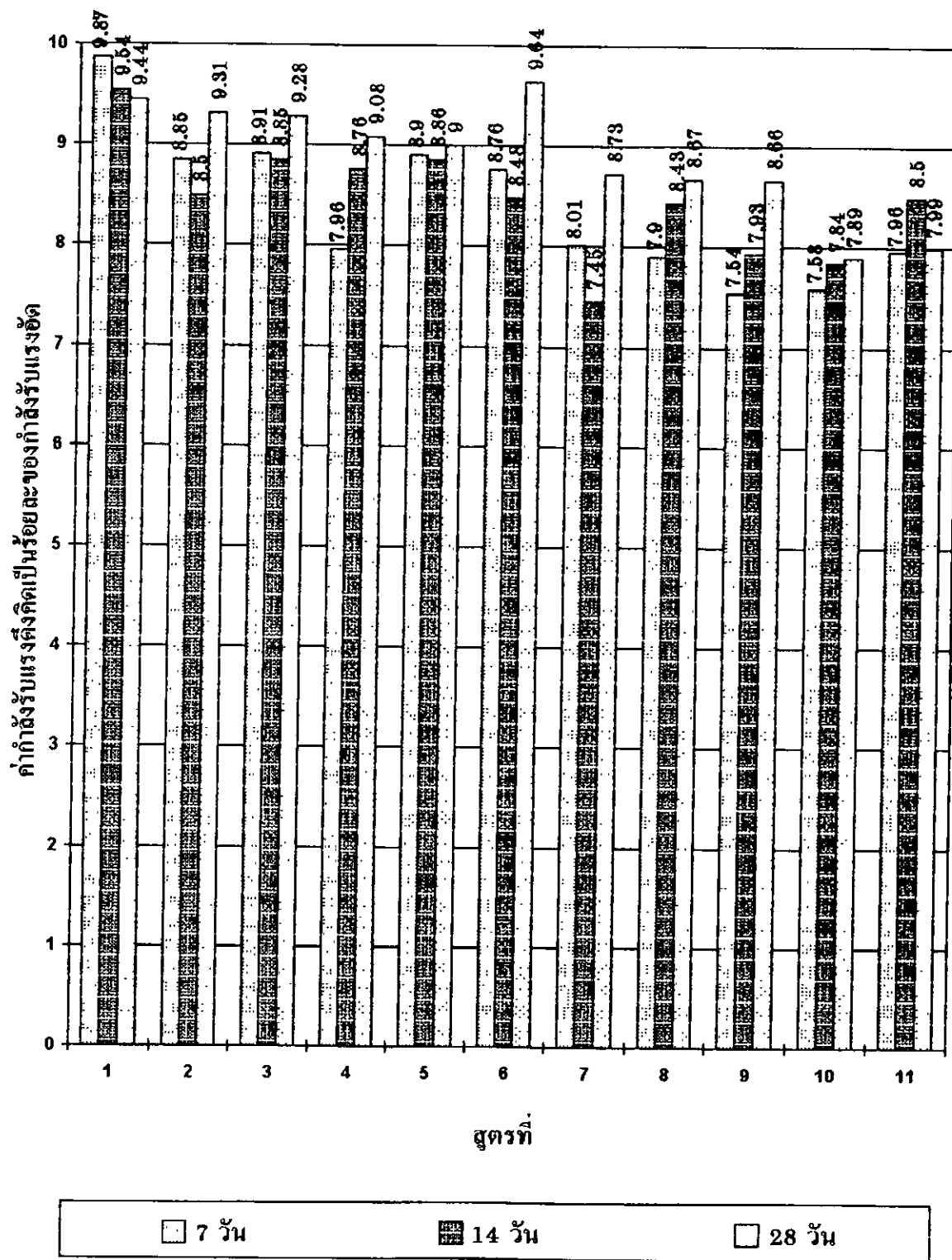
สูตร ที่	ค่ากำลังรับแรงดึง (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
1	45.34	47.51	52.65
2	42.00	44.35	54.29
3	34.02	37.70	51.48
4	29.63	37.51	50.81
5	25.15	32.70	38.69
6	30.10	36.66	53.50
7	24.96	26.75	37.65
8	22.27	26.56	30.76
9	24.29	33.45	47.56
10	21.63	25.95	30.90
11	23.52	28.50	29.06



ภาพประกอบ 15 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ด้านกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตกำลังสูง

ตาราง 38 แสดงค่าของผลการทดสอบค้ำกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตโดยคิดเป็นร้อยละ
ของค้ำกำลังรับแรงอัด

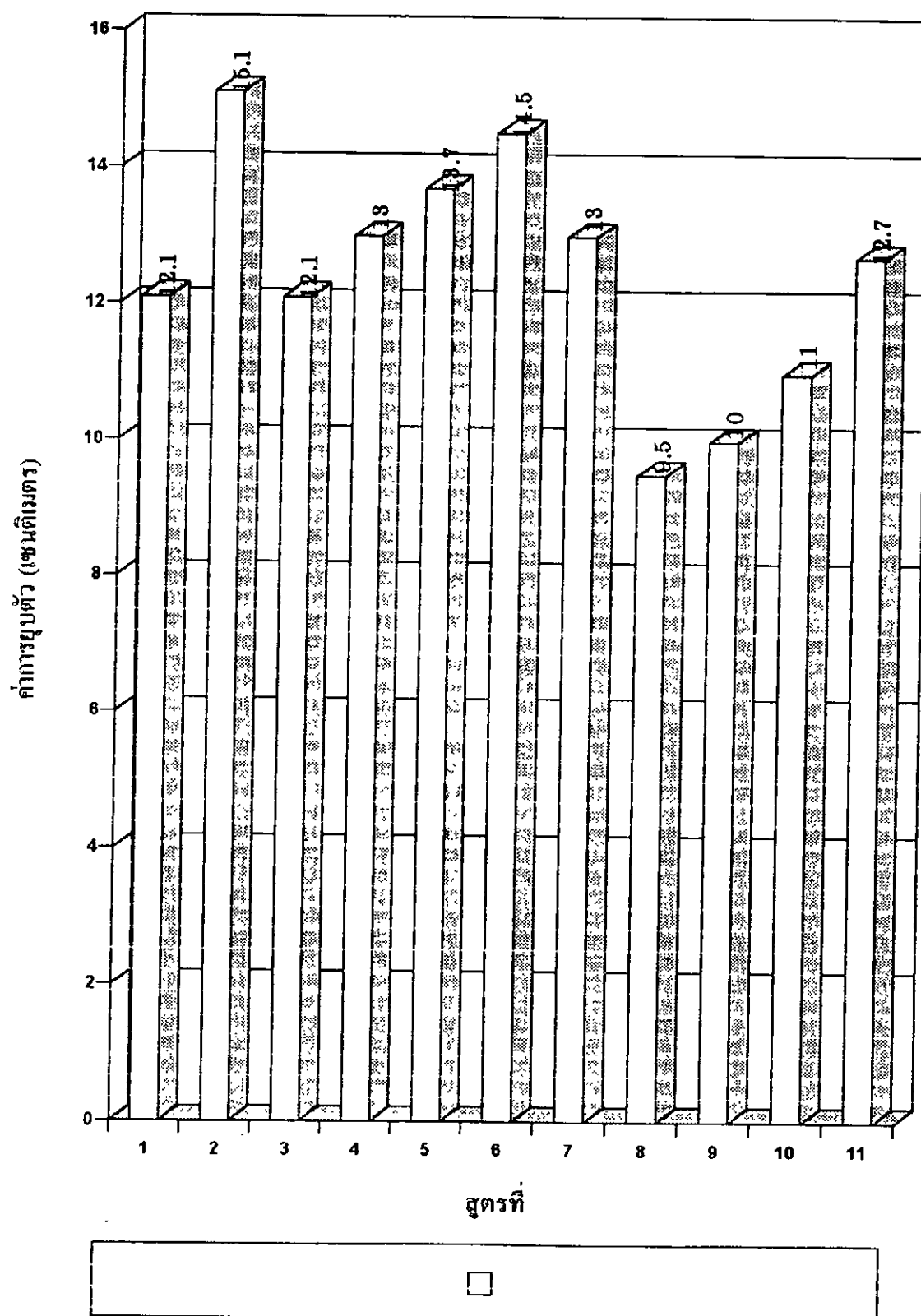
สูตรที่	ค่าค้ำกำลังรับแรงดึงเป็นค่าร้อยละของค้ำกำลังรับแรงอัด		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
1	9.87	9.54	9.44
2	8.85	8.50	9.31
3	8.91	8.85	9.28
4	7.96	8.76	9.08
5	8.90	8.86	9.00
6	8.76	8.48	9.64
7	8.01	7.45	8.73
8	7.90	8.43	8.57
9	7.54	7.93	8.66
10	7.58	7.84	7.89
11	7.96	8.50	7.99



ภาพประกอบ 16 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตกำลังสูงโดยคิดเป็นร้อยละ
ของกำลังรับแรงอัด

ตาราง 39 แสดงค่าของผลการทดสอบด้านค่าการยุบตัวของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิไกไนต์ และสารลดน้ำพิเศษ

สูตรที่	ค่าการยุบตัว (เซนติเมตร)
1	12.1
2	15.1
3	12.1
4	13.0
5	13.7
6	14.5
7	13.0
8	9.5
9	10.0
10	11.0
11	12.7



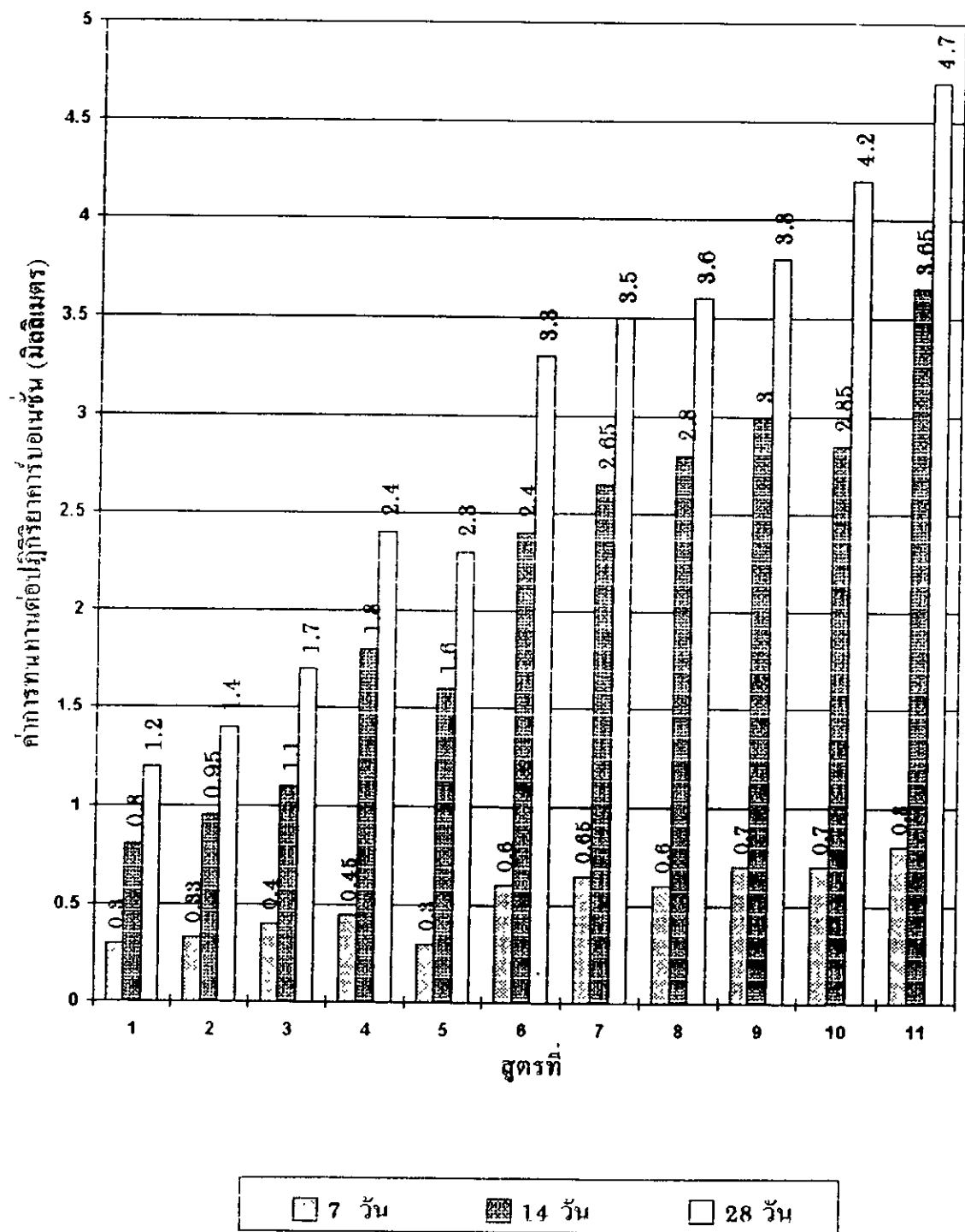
ภาพประกอบ 17 กราฟแสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ด้านการยวบตัวของคอนกรีตกำลังสูง

ตาราง 40 แสดงค่าการทนทานต่อปฏิกิริยาเครียบเนชันในแต่ละแห่งตัวอย่าง

สูตร ที่	แห่งตัวอย่าง ที่	7 วัน		14 วัน		24 วัน	
		ข้อมูลจริง	เฉลี่ย	ข้อมูลจริง	เฉลี่ย	ข้อมูลจริง	เฉลี่ย
1	1	0.28		0.82		1.15	
	2	0.32	0.30	0.80	0.80	1.25	1.20
	3	0.30		0.78		1.20	
2	1	0.35		0.95		1.39	
	2	0.30	0.33	0.99	0.95	1.42	1.40
	3	0.34		0.91		1.39	
3	1	0.39		1.20		1.68	
	2	0.41	0.40	1.05	1.10	1.72	1.70
	3	0.40		1.05		1.70	
4	1	0.44		1.80		2.40	
	2	0.46	0.45	1.75	1.80	2.38	2.40
	3	0.45		1.85		2.42	
5	1	0.28		1.60		2.30	
	2	0.30	0.30	1.62	1.60	2.32	2.30
	3	0.32		1.58		2.28	
6	1	0.61		2.35		3.29	
	2	0.59	0.60	2.35	2.40	3.30	3.30
	3	0.60		2.50		3.31	
7	1	0.66		2.65		3.54	
	2	0.64	0.65	2.67	2.65	3.49	3.50
	3	0.65		2.63		3.47	
8	1	0.58		2.82		3.60	
	2	0.62	0.60	2.78	2.80	3.61	3.60
	3	0.60		2.80		3.59	
9	1	0.70		2.96		3.82	
	2	0.72	0.70	2.95	3.00	3.79	3.80
	3	0.68		3.09		3.79	
10	1	0.69		2.89		4.18	
	2	0.71	0.70	2.84	2.85	4.21	4.20
	3	0.70		2.82		4.21	
11	1	0.78		3.70		4.68	
	2	0.82	0.80	3.65	3.65	4.74	4.70
	3	0.80		3.60		4.68	

ตาราง 41 แสดงค่าของผลการทดสอบ ด้านการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของ
คอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จี้อ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์
และสารลดน้ำพิเศษ

สูตร ที่	การทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น (มิลลิเมตร)		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
1	0.30	0.80	1.2
2	0.33	0.95	1.4
3	0.40	1.10	1.7
4	0.45	1.80	2.4
5	0.30	1.60	2.3
6	0.60	2.40	3.3
7	0.65	2.65	3.5
8	0.60	2.80	3.6
9	0.70	3.00	3.8
10	0.70	2.85	4.2
11	0.80	3.65	4.7



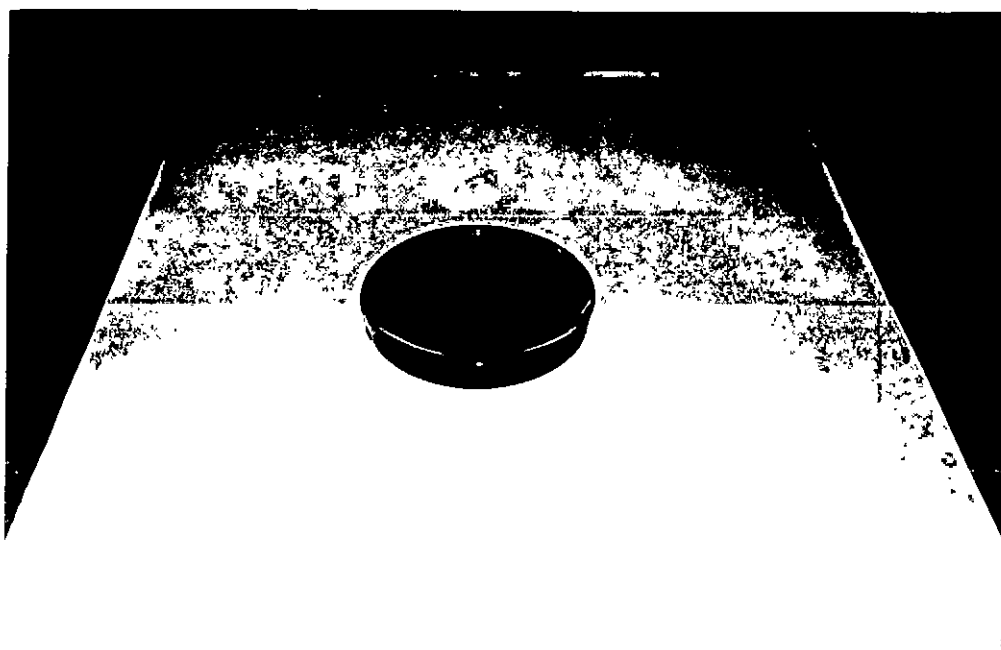
ภาพประกอบ 18 แสดงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ด้านการทนทานต่อปฏิริยาการบ่อนั่น

ภาคผนวก

ตอน ก.



ภาพประกอบ 19 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง



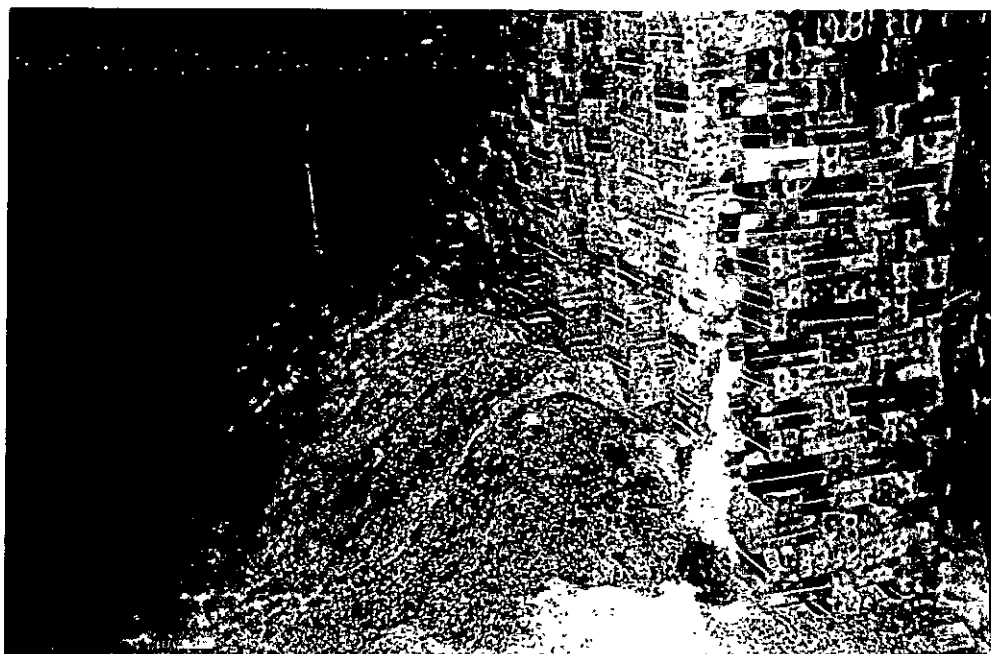
ภาพประกอบ 20 สารลดน้ำพิเศษ(คาเร็กซ์ ซูบเปอร์ 20⁺)



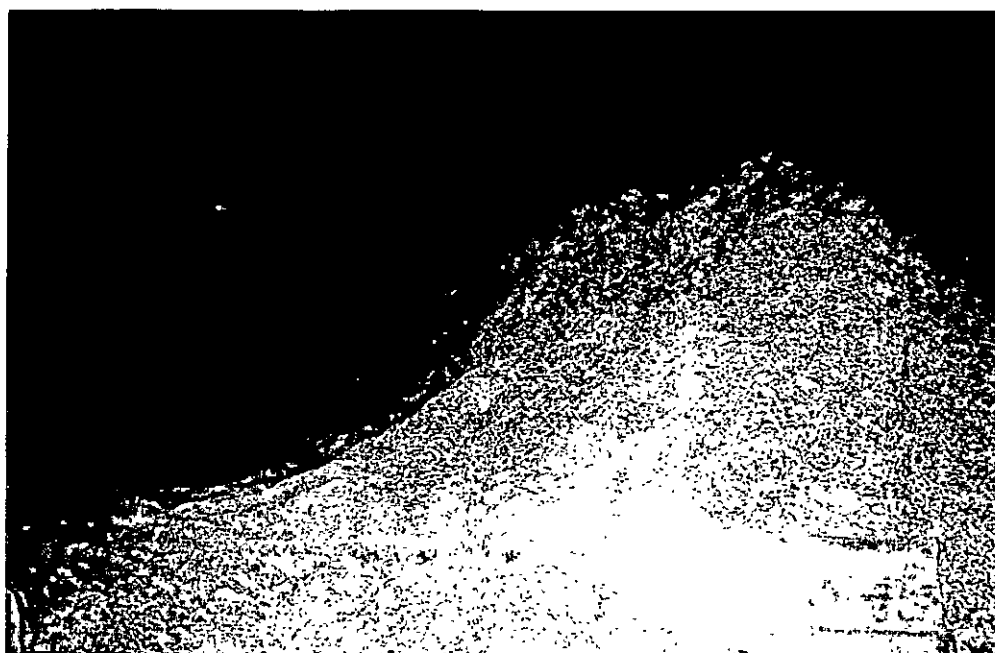
ภาพประกอบ 21 จิลิกาฟุ่มผง



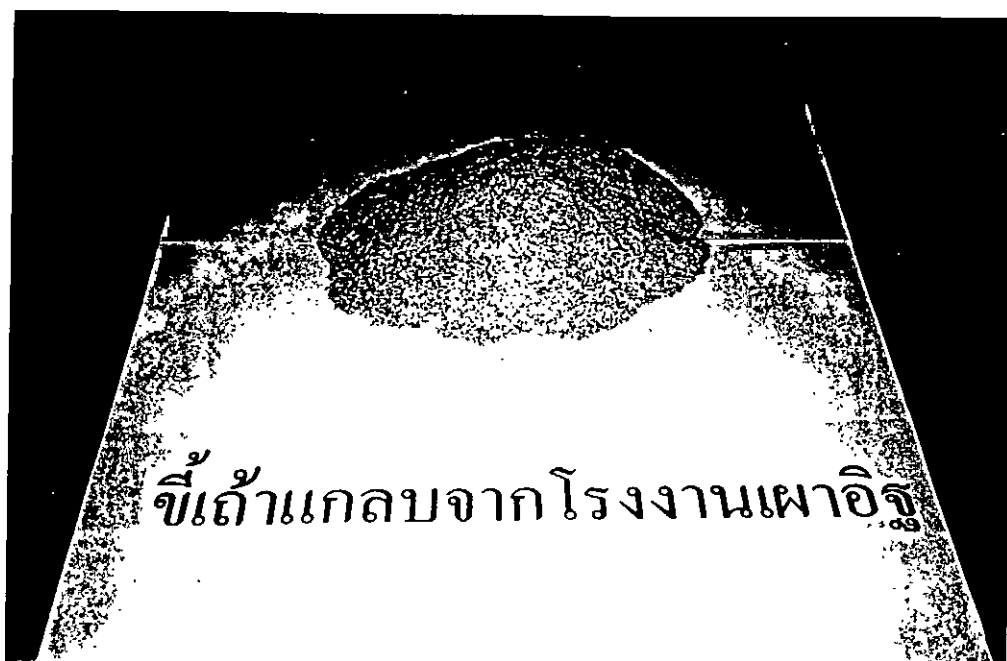
ภาพประกอบ 22 จิลิกาฟุ่มชนิดเหลว



ภาพประกอบ 23 โรงงานเผาอิฐ



ภาพประกอบ 24 ขี้เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ



ภาพประกอบ 25 จี๊ด้าเกลบจากโรงงานเผาอิฐที่ยังไม่บด



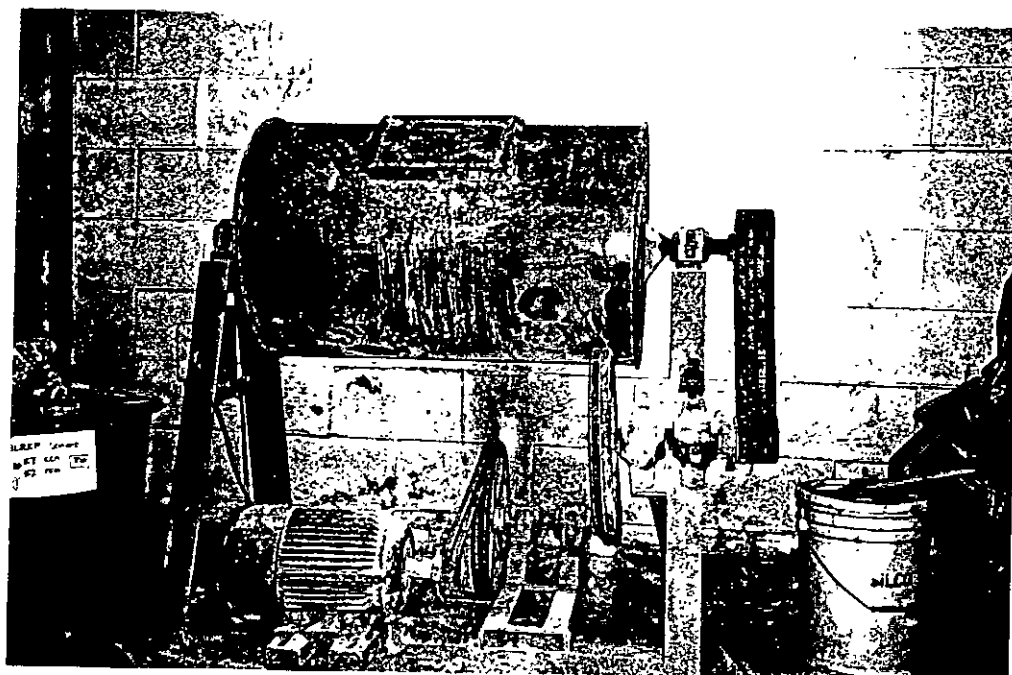
ภาพประกอบ 26 จี๊ด้าเกลบบดแล้ว



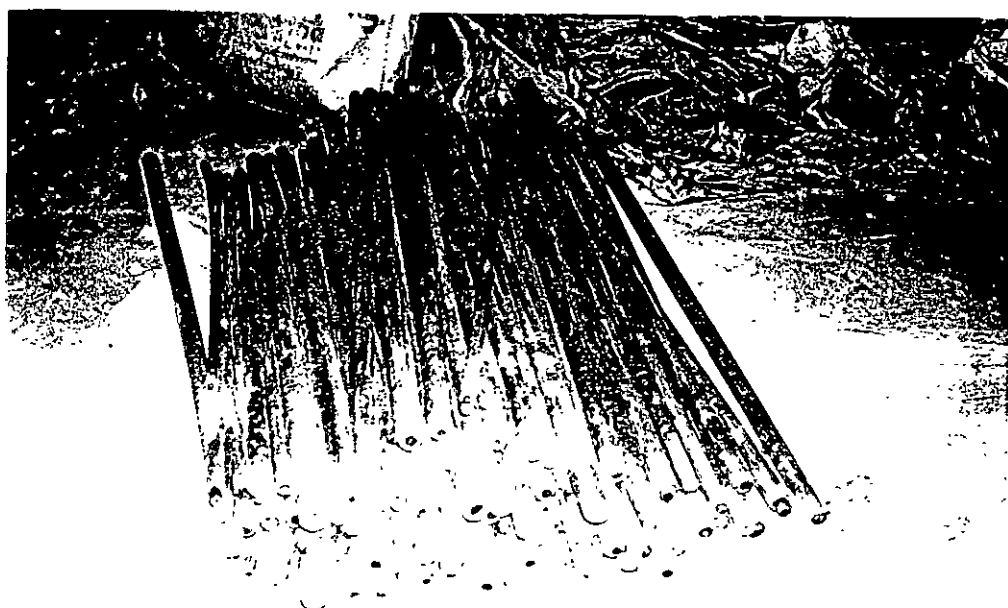
ภาพประกอบ 27 แก้วลอยลิกไนต์



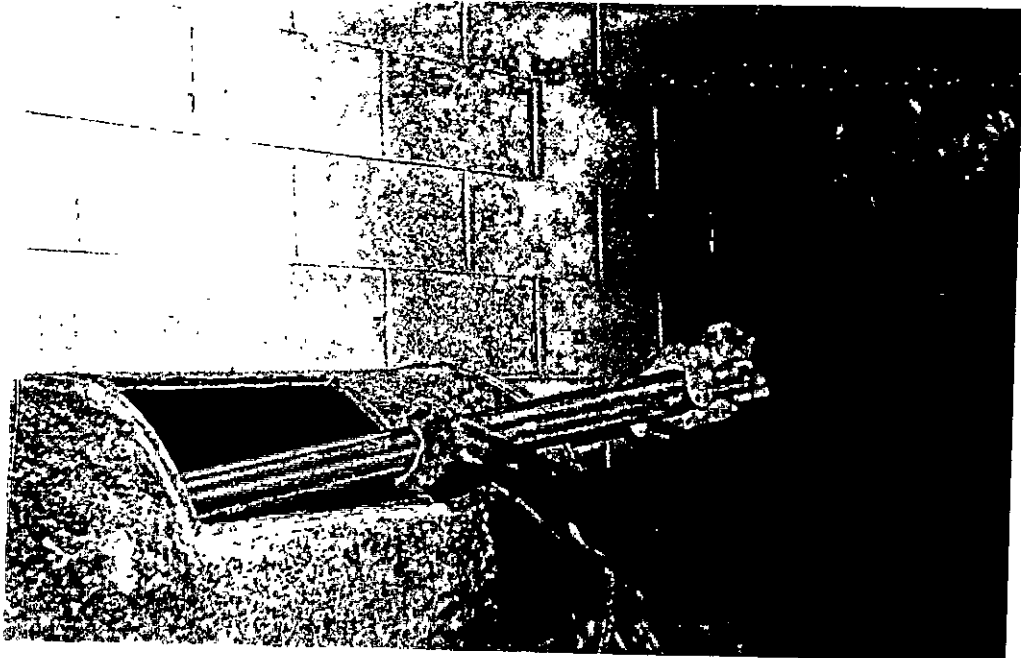
ภาพประกอบ 28 สารเตตระโซเดียมไดฟอสเฟต ($\text{Na}_4 \text{P}_2 \text{O}_7$)



ภาพประกอบ 29 เครื่องบดจี๊ด้าเกลบ



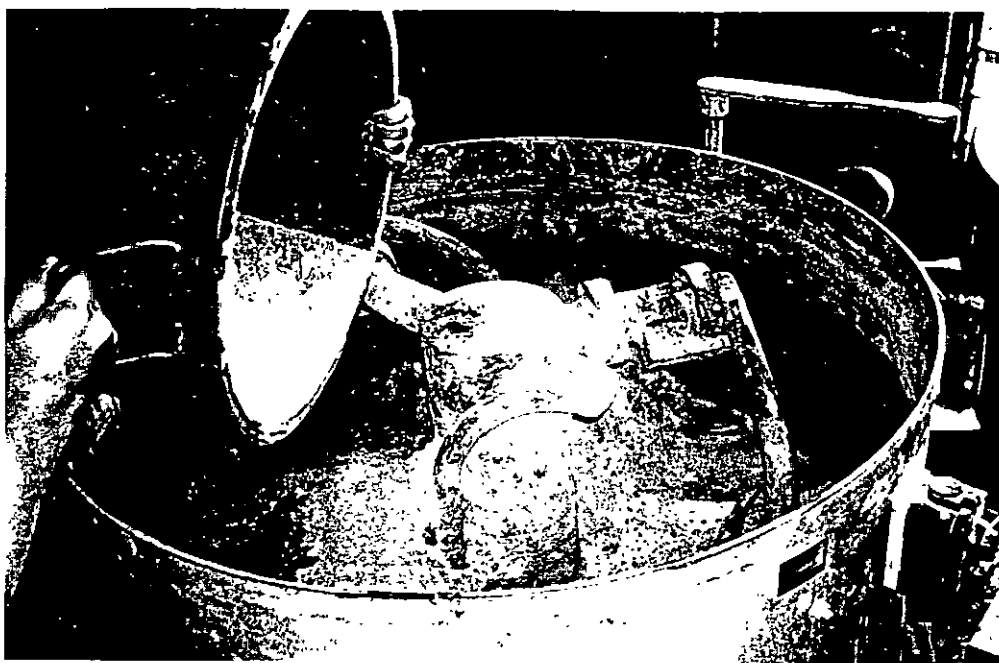
ภาพประกอบ 30 รูปแท่งที่ใช้ไปในเครื่องบดจี๊ด้าเกลบ



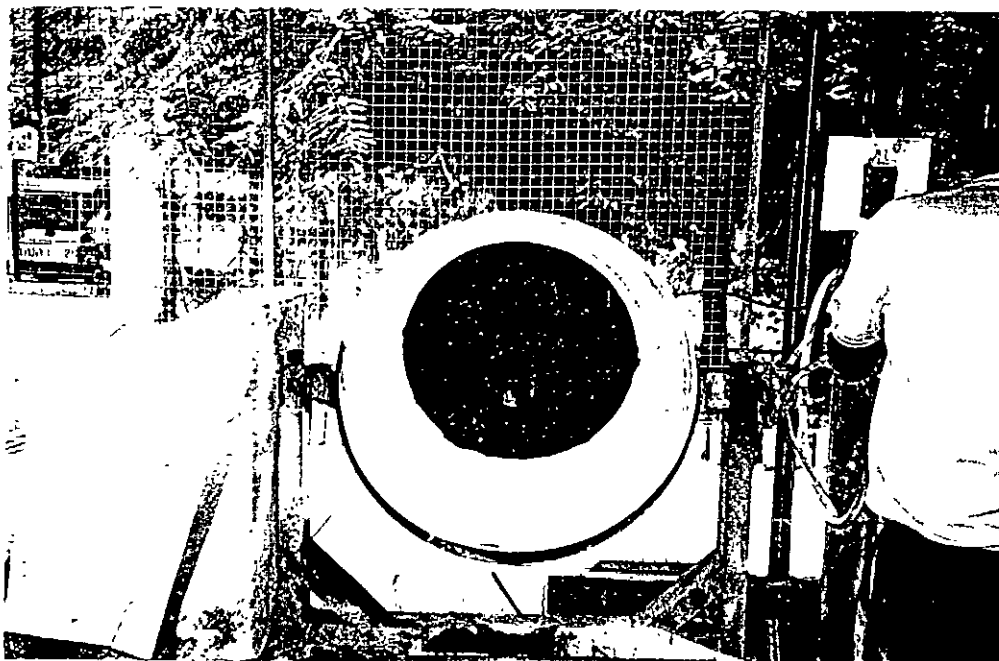
ภาพประกอบ 31 การนำแท่งเหล็กใส่ลงไปในเครื่องบด



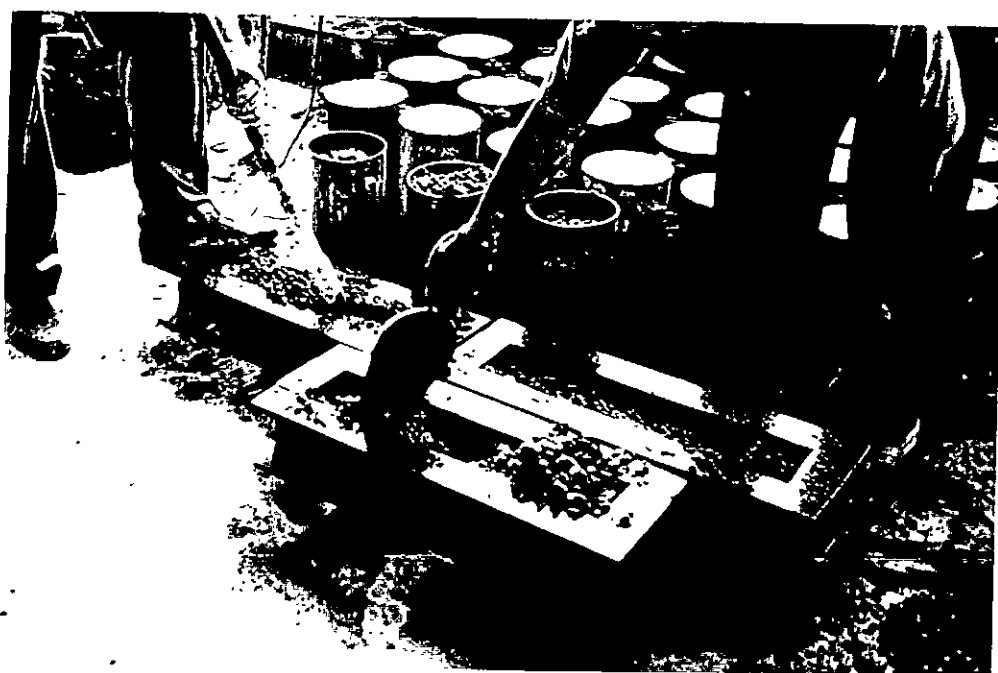
ภาพประกอบ 32 การใส่ซี่เด้าแกลบลงในเครื่องบด



ภาพประกอบ 33 เครื่องผสมคอนกรีตแบบกระทะ



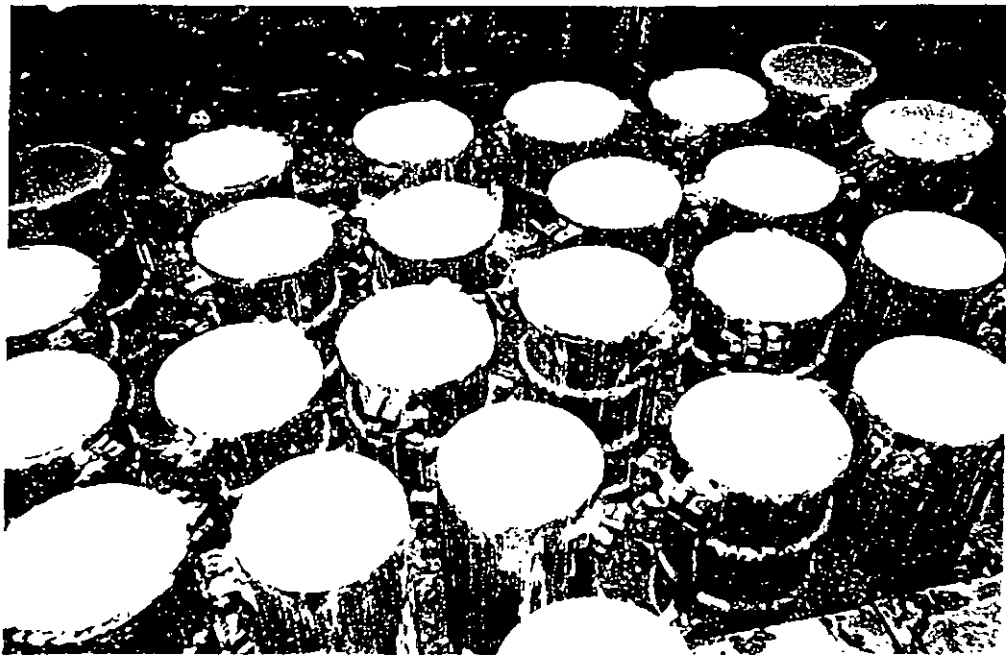
ภาพประกอบ 34 เครื่องผสมปูนคอนกรีตแบบลูกข้าง



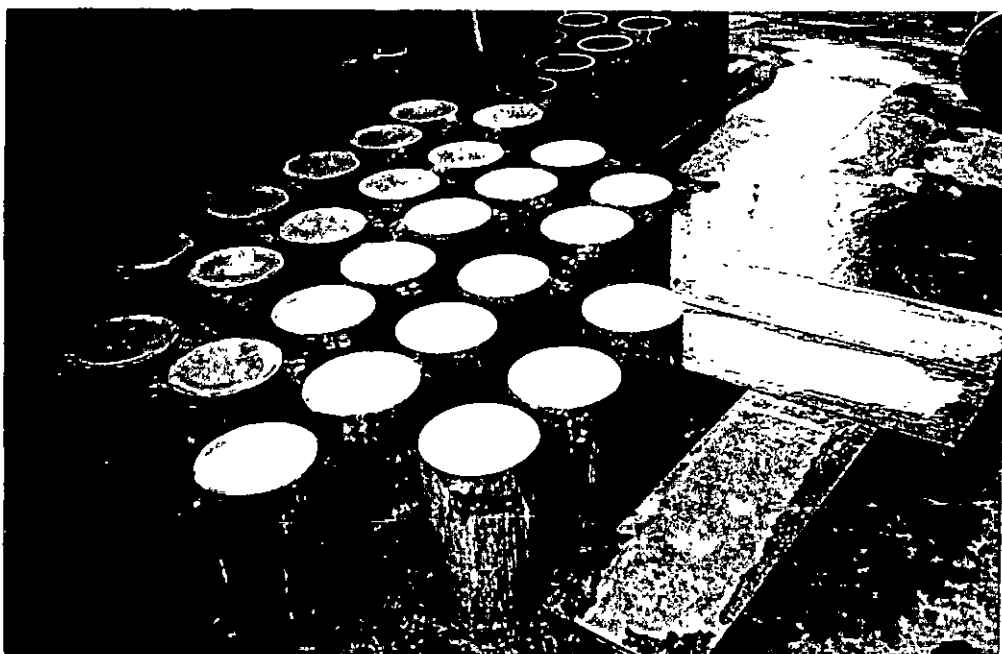
ภาพประกอบ 35 การจีเข้าคอนกรีต



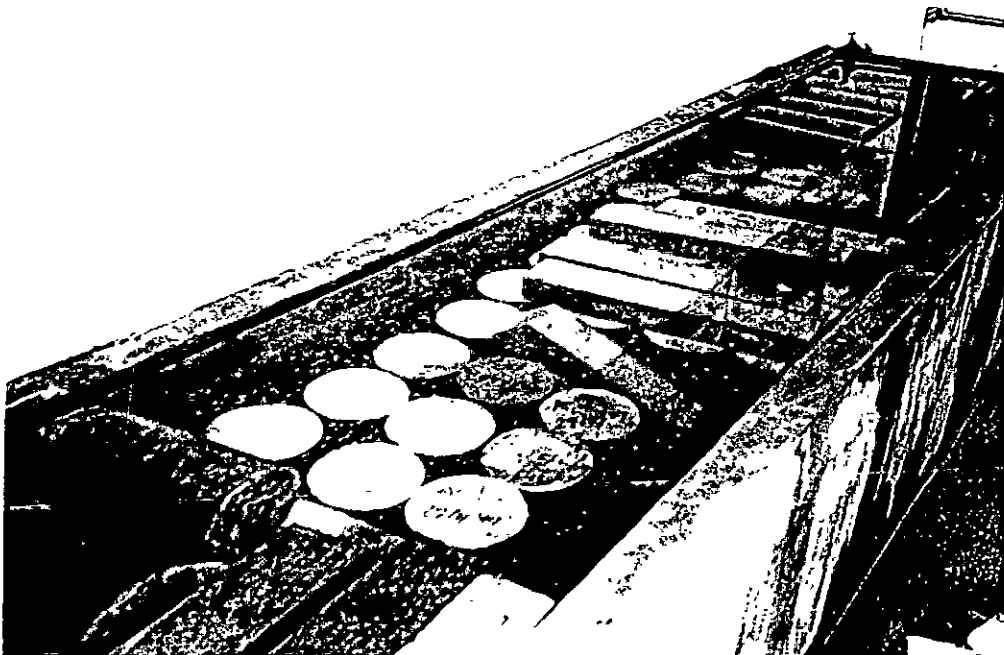
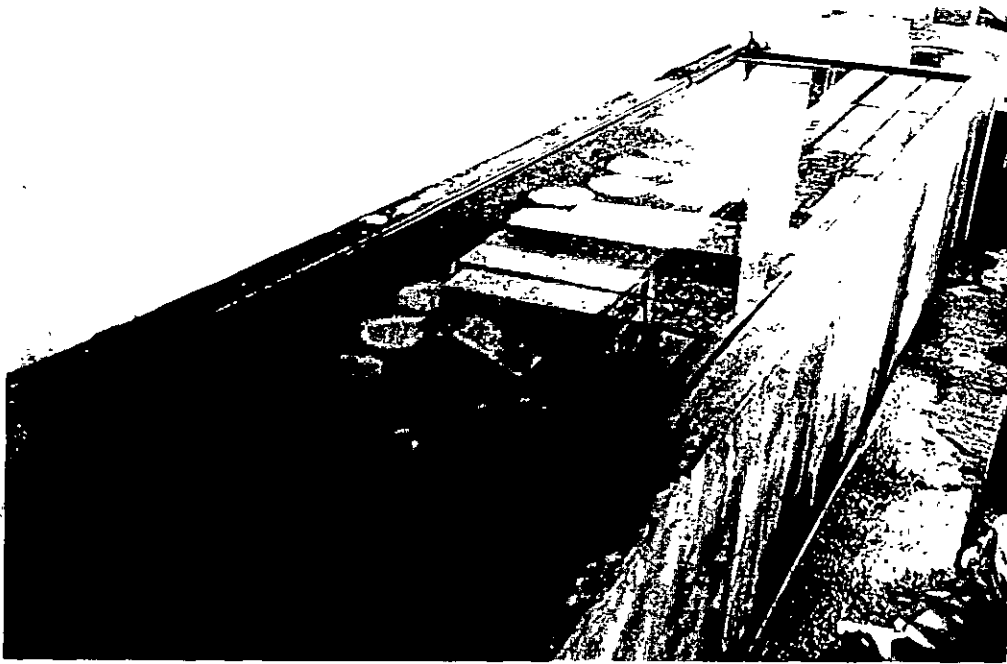
ภาพประกอบ 36 แสดงการตากคอนกรีตใส่แม่พิมพ์



ภาพประกอบ 37 แสดงการปักดกแต่งแท่งตัวอย่างในแม่พิมพ์



ภาพประกอบ 38 เมื่อปักดกแต่งเรียบร้อยแล้ว



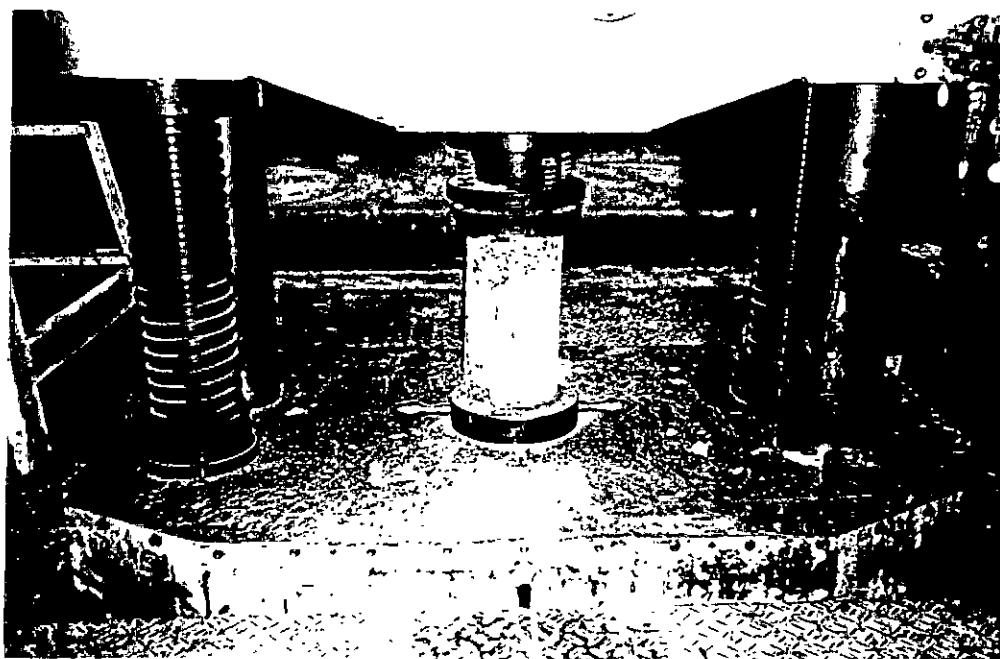
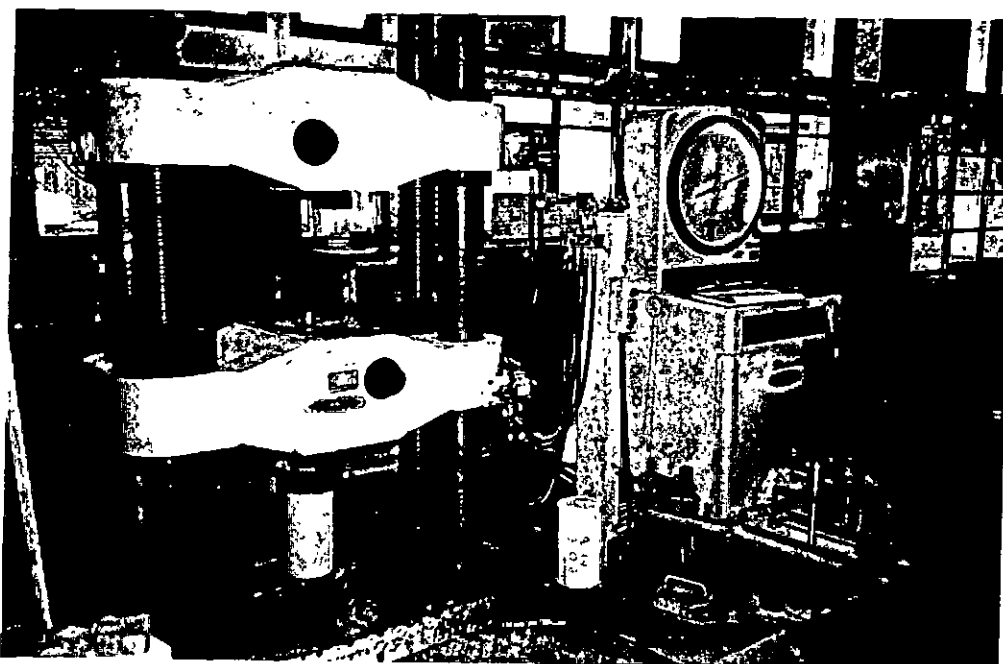
ภาพประกอบ 39 แสดงการบ่มคอนกรีตโดยการแช่น้ำ



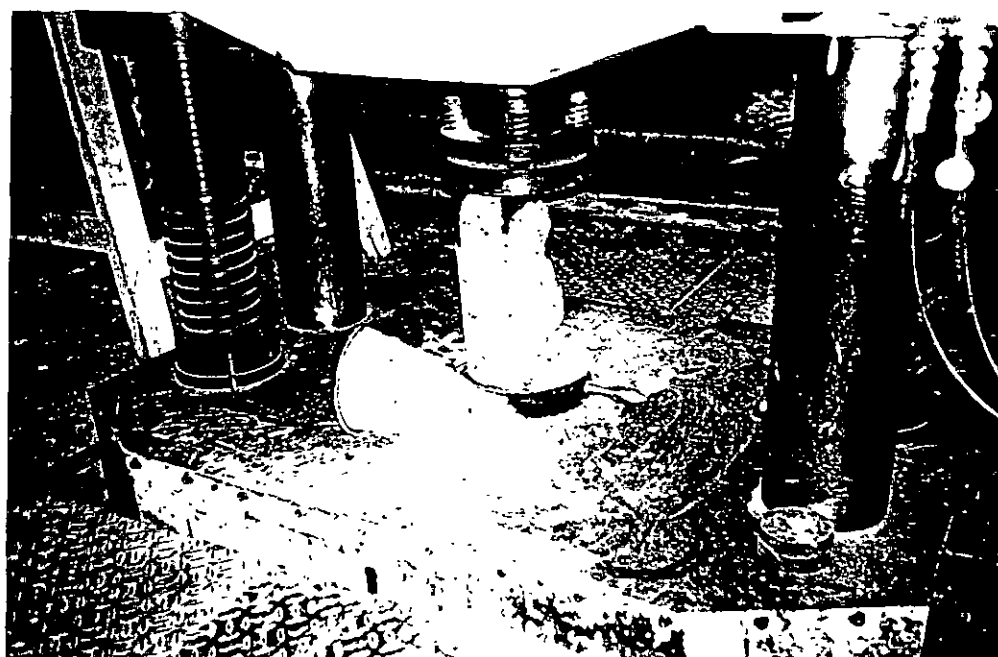
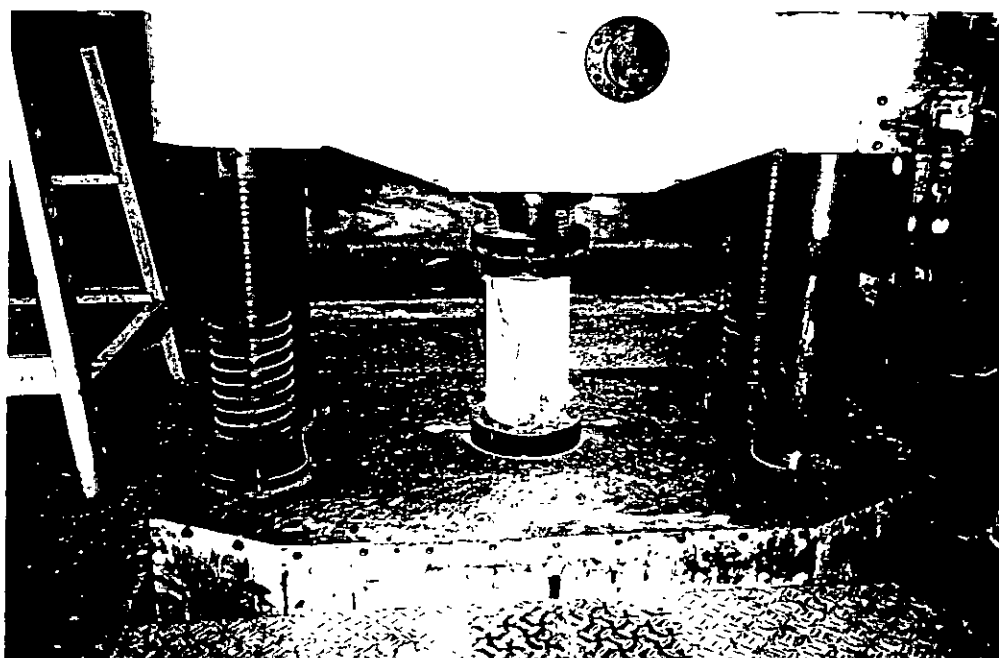
ภาพประกอบ 40 การทดสอบค่าการยุบตัว



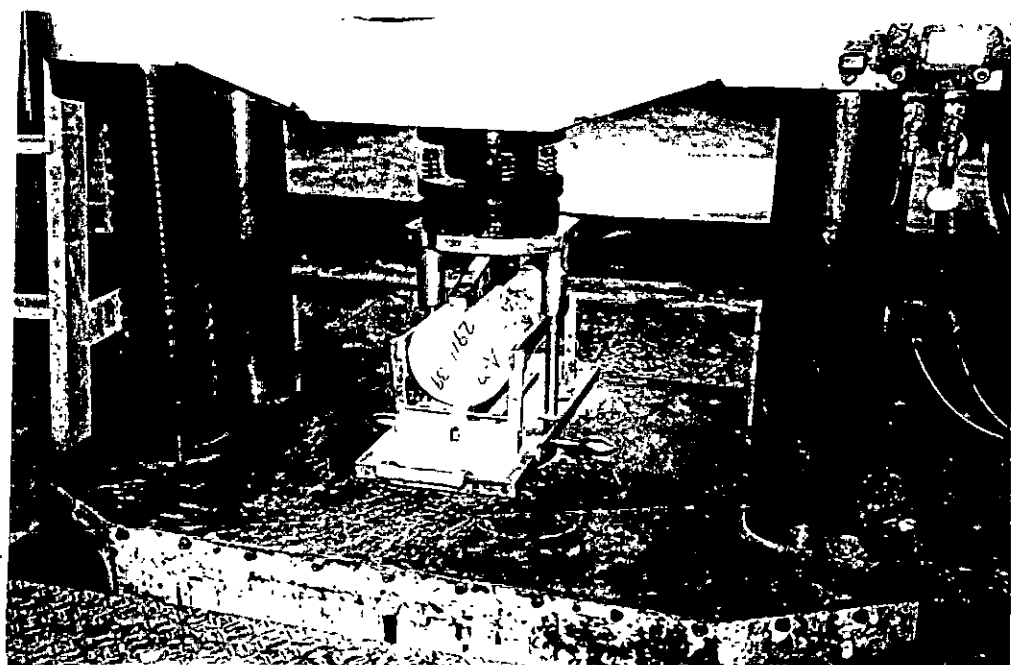
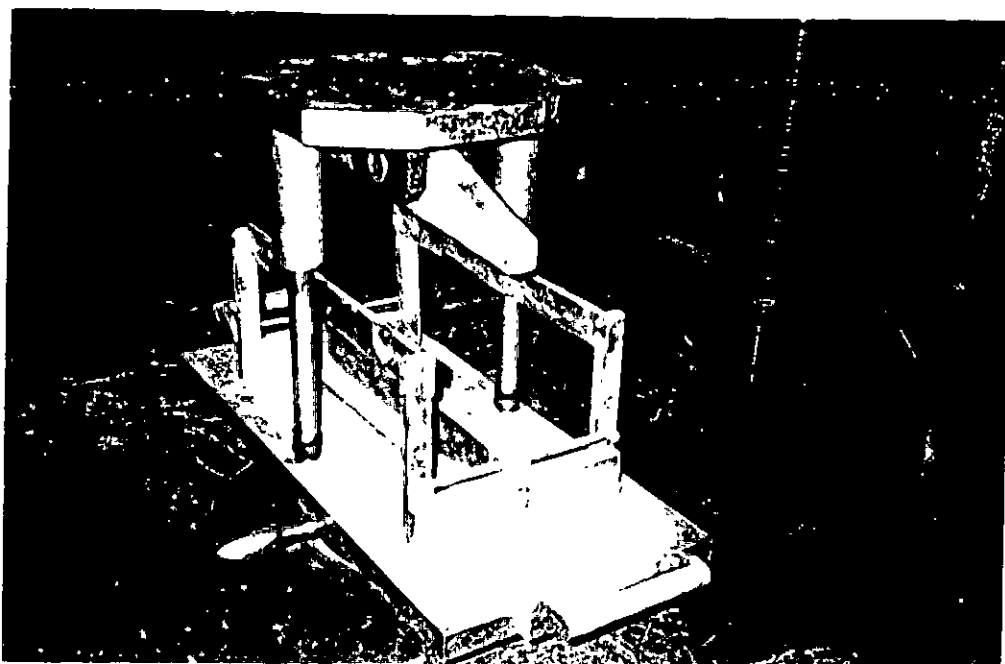
ภาพประกอบ 41 การเคลื่อนผิวคอนกรีตให้เรียบทั้งสองด้าน



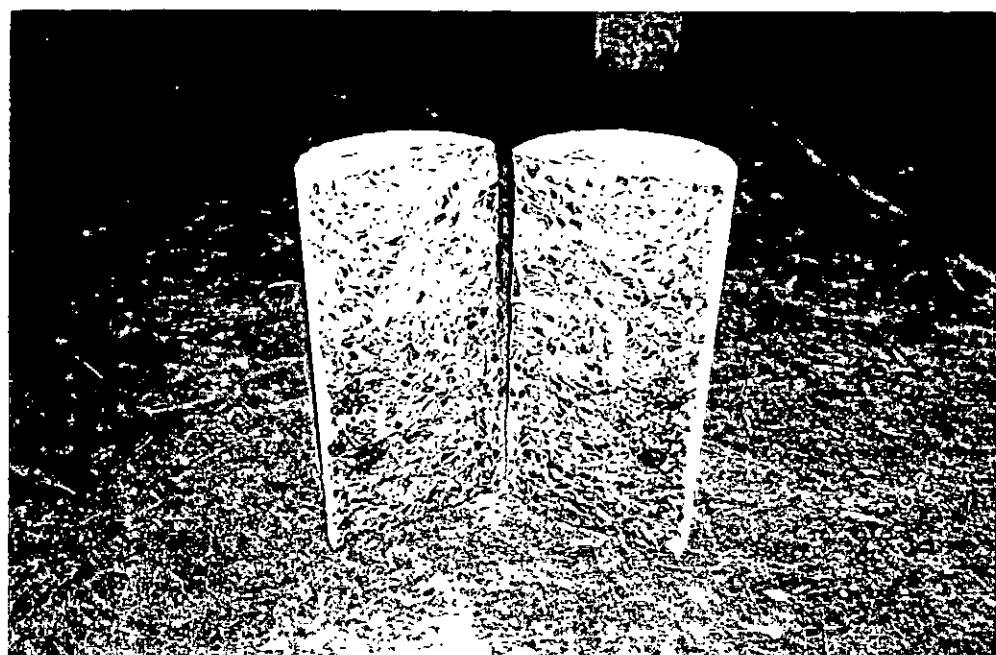
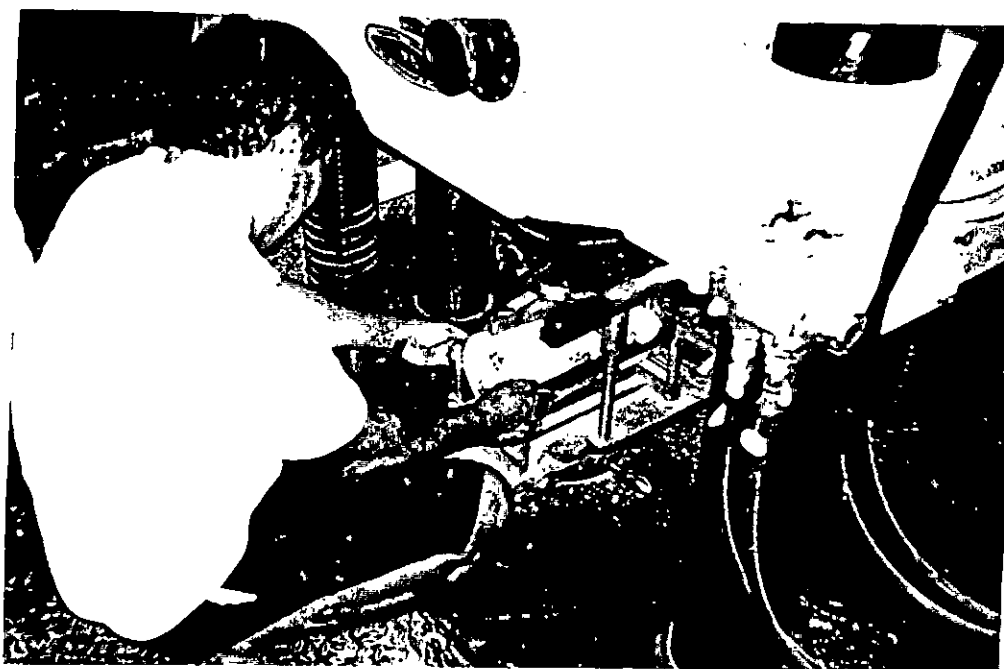
ภาพประกอบ 42 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด



ภาพประกอบ 43 แสดงการทดสอบกำลังรับแรงอัด



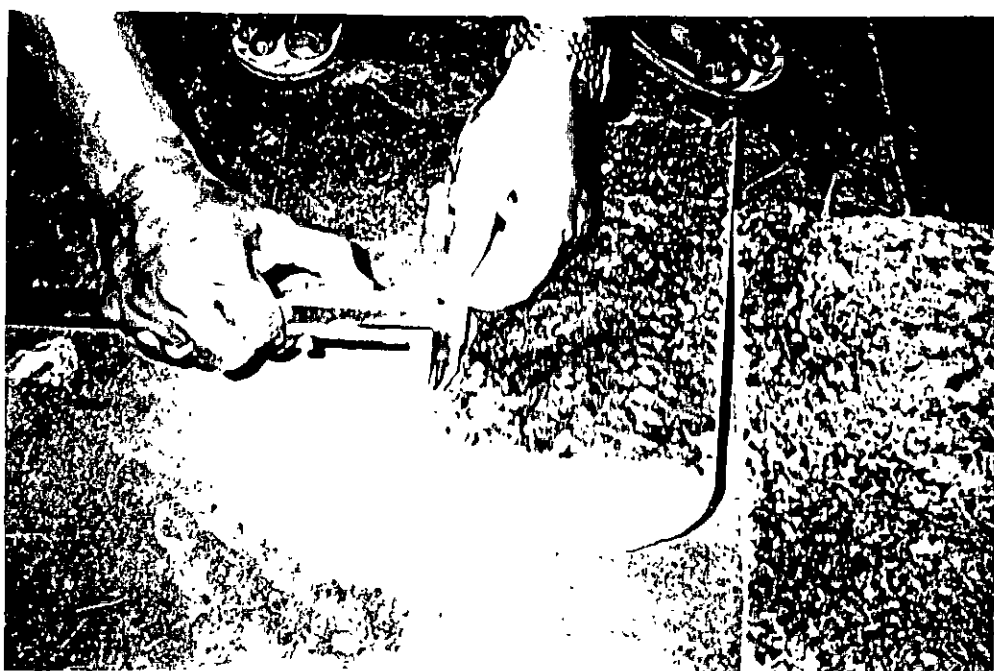
ภาพประกอบ 44 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึง



ภาพประกอบ 45 แสดงการทดสอบกำลังรับแรงดึง

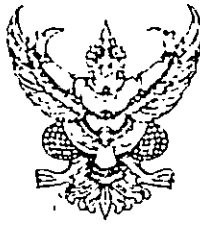


ภาพประกอบ 46 แสดงการทดสอบการทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น โดยการฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์



ภาพประกอบ 47 แสดงการวัดค่าคาร์บอนเนชั่น

ที่หม: 1005(1)/ทอ๑๕



บัณฑิตศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ (บางเขน)
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ถ.แจ้งวัฒนะ บางเขน กรุงเทพฯ 10220

5 สิงหาคม 2539

เรื่อง ขอความอนุเคราะห์ข้อมูล

เรียน ผู้จัดการบริษัทบิลว อาร์ เกรช (ไทยแลนด์) จำกัด

ด้วย นางสาวสุพรรณี มีกุล นิสิตบัณฑิตศึกษา ระดับปริญญาโท หลักสูตรการศึกษา
มหาบัณฑิต (กศ.ม.) วิชาเอกอุตสาหกรรม คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ โดยมี
อาจารย์ประติษฐ์ คุณรัตน์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ขณะนี้กำลังดำเนินการจัดทำ วิทยานิพนธ์ เพื่อสำเร็จ
การศึกษาดำเนินการ

นิสิตผู้มีความประสงค์ขอความอนุเคราะห์ข้อมูล "โฆษณาและตัวอักษร" สากลน้ำดื่ม
ซูเปอร์ 20 " จากหน่วยงานของท่าน เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการจัดทำวิทยานิพนธ์ไว้ก่อน
และใช้ในการศึกษาค้นคว้าในโอกาสต่อไป

บัณฑิตศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ (บางเขน) หวังเป็นอย่างยิ่งว่าท่านจะกรุณาให้ความ
อนุเคราะห์ในครั้งนี้อย่างสะดวก และขอขอบคุณ ณ โอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมนัส มาตย์สิงห์)

รองอธิการบดีบัณฑิตศึกษา

สำนักงานบัณฑิตศึกษา (บางเขน)

โทร. 5211578 5211429

ที่ ทม 1007/ 4430



บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

๒๖ ตุลาคม 2539

เรื่อง ขอความอนุเคราะห์

เรียน คุณสุรพล ช่างลักษณ์

บัณฑิตวิทยาลัย ขอรับรองว่า นางสาวสุพรรณี มีกุศล เป็นนิสิตระดับปริญญาโท
วิชาเอกอุตสาหกรรมศิลป์ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

นิสิตผู้นี้มีความประสงค์จะมาติดต่อขอความสะดวกในการศึกษาค้นคว้า เพื่อทำปริญญานิพนธ์
เรื่อง การทดลองหัตถกรรมส่วนที่: เหมาะสม ของคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ซีเมนต์ถ่วงเบา แก้วลอยสีกัญชง และสารลดน้ำพิเศษ

ทั้งนี้อยู่ในความควบคุมดูแลของ

ผศ.ดร.วิชัย แหวนเพชร

ประธาน

ดร.บุรฉัตร นัตรวิระ

กรรมการ

อ.สุตใจ เหมงาสีพร

กรรมการ

สิ่งที่นิสิตขอความอนุเคราะห์ คือ ขอสารชีลิกาทูม เพื่อนำมาใช้ในการทดลองในการทำคอนกรีต
กำลังสูง ในระหว่างเดือนตุลาคม - พฤศจิกายน 2539 เพื่อเป็นข้อมูลในการทำปริญญานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าท่านจะกรุณาให้ความร่วมมือในครั้งนี้ และขอขอบคุณในความ
ช่วยเหลืออนุเคราะห์ใด ๆ ที่ท่านจะโปรดให้แก่นิสิตผู้นี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(นางสาวศิริยุภา พูลสุวรรณ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย

โทร. 2584119

ที่ ทม 1007/ 4431



บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

15 ตุลาคม 2539

เรื่อง ขอความอนุเคราะห์

เรียน หัวหน้าฝ่ายทดสอบคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

บัณฑิตวิทยาลัย ขอรับรองว่า นางสาวสุพรรณี มีกุศล เป็นนิสิตระดับปริญญาโท
วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

นิสิตผู้ที่มีความประสงค์จะมาติดต่อขอความสะดวกในการศึกษาค้นคว้า เพื่อหาวิทยานิพนธ์
เรื่อง การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสม ของคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ซีเอน์แอลบ เถ้าลอยลิกันท์ และสารลดน้ำพิเศษ

ทั้งนี้อยู่ในความควบคุมดูแลของ

พศ.ดร.วิชัย แหวนเพชร

ประธาน

ดร.ปฐภัทร นัตถวิระ

กรรมการ

อ.สุดาใจ เห่งสำเภา

กรรมการ

สิ่งที่นิสิตฯขอความอนุเคราะห์ คือ ขอใช้เครื่องทดสอบคอนกรีตในด้านกำลังรับแรงอัด, แรงดึง,
การสูญเสียการบวมตัว และความหนาแน่น ในระหว่างเดือนตุลาคม - พฤศจิกายน 2539 เพื่อเป็นข้อมูล
ในการหาวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าท่านจะกรุณาให้ความร่วมมือในครั้งนี้ และขอขอบคุณในความ
ช่วยเหลืออนุเคราะห์ใด ๆ ที่ท่านจะโปรดฯให้แก่ นิสิตผู้นี้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(นางสาวศิริยุภา พูลสุวรรณ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย

โทร. 2584119

ที่ ทม 1007/๔๔ แอ



บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

สุขุมวิท 23 กรุงเทพฯ 10110

14 ตุลาคม 2539

เรื่อง ขอความอนุเคราะห์

เรียน หัวหน้าห้องปฏิบัติการทดลอง สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติ

บัณฑิตวิทยาลัย ขอรับรองว่า นางสาวสุพรรณิ มีกุล เป็นนิสิตระดับปริญญาโท
วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

นิสิตผู้มีความประสงค์จะมาติดต่อขอความสะดวกในการศึกษาค้นคว้า เพื่อทำปริญญาโท
เรื่อง การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสม ของคอนกรีตกำลังสูง ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ซีเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิควิด และสารลดน้ำพิเศษ

ทั้งนี้อยู่ในความควบคุมดูแลของ

ผศ.ดร.วิชัย แหวนเพชร

ประธาน

ดร.บุรฉัตร นัทรวิระ

กรรมการ

อ.สุตฉา เสงี่ยมพร

กรรมการ

สิ่งที่นิสิตขอความอนุเคราะห์ คือ ขอใช้เครื่องบดซีเถ้าแกลบ เพื่อทำการบดซีเถ้าแกลบในการทดลอง
ในระหว่างเดือนตุลาคม - พฤศจิกายน 2539 เพื่อเป็นข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าท่านจะกรุณาให้ความร่วมมือในครั้งนี้ และขอขอบคุณในความ
ช่วยเหลืออนุเคราะห์ต่าง ๆ ที่ท่านจะโปรดให้แก่นิสิตผู้ด้วย

ขอแสดงความนับถือ

(นางสาวศิริบุภา พูลสุวรรณ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย

โทร. 2584119



การทดสอบหาแรงอัดของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง..... ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความขรุขระ (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	แรงอัดสูงสุด		หมายเหตุ
					(กก.)	(กก. / ซม. ²)	
1	A1	$4\frac{3}{4}$	27 / 11 / 39	7	83,000		
2				7	82,500	459.61	
3				7	78,000		
1				14	90,000		
2				14	88,000	498.30	
3				14	86,000		
1				28	98,000		
2				28	99,000	557.76	
3				28	98,500		
1	A2	$5\frac{15}{16}$	28 / 11 / 39	7	82,500		
2				7	85,500	474.71	
3				7	83,500		
1				14	91,300		
2				14	93,000	521.52	
3				14	92,000		
1				28	98,000		
2				28	105,000	582.30	
3				28	105,500		



การทดสอบหาแรงอัดของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง..... ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความขรุขระ (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	แรงอัดสูงสุด		หมายเหตุ
					(กก.)	(กก. / ซม. ²)	
1	A3	4 $\frac{3}{4}$	6 / 12 / 39	7	72,000		
2				7	65,000	382.03	
3				7	65,400		
1				14	76,500		
2				14	75,300	427.14	
3				14	74,500		
1				28	98,000		
2				28	97,000	554.93	
3				28	99,000		
1	A4	5 $\frac{1}{8}$	5 / 12 / 39	7	65,000		
2				7	65,200	372.22	
3				7	67,000		
1				14	76,000		
2				14	76,000	428.46	
3				14	75,000		
1				28	98,500		
2				28	99,000	559.65	
3				28	99,000		

กองวิจัยและทดลอง

กรมชลประทาน



ว.ท. 3 - 01

(มี.ค 2531)

การทดสอบหาแรงอัดของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง..... ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความขรุขระ (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	แรงอัดสูงสุด		หมายเหตุ
					(กก.)	(กก. / ซม. ²)	
1	A5	$5\frac{3}{8}$	17 / 11 / 39	7	51,000		
2				7	48,600	282.56	
3				7	50,100		
1				14	68,000		
2				14	75,000	369.10	
3				14	60,000		
1				28	76,500		
2				28	75,200	429.79	
3				28	76,000		
1	A6	$5\frac{3}{4}$	18 / 11 / 39	7	66,000		
2				7	60,000	343.53	
3				7	56,000		
1				14	72,000		
2				14	78,500	532.24	
3				14	78,500		
1				28	97,500		
2				28	98,400	554.74	
3				28	98,000		



การทดสอบหาแรงอัดของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความขรุขระ (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	แรงอัดสูงสุด		หมายเหตุ
					(กก.)	(กก. / ซม. ²)	
1	A7	5 $\frac{1}{8}$	29 / 11 / 39	7	58,000		
2				7	50,000	311.44	
3				7	57,000		
1				14	71,700		
2				14	53,600	359.19	
3				14	65,000		
1				28	75,000		
2				28	77,000	431.30	
3				28	76,500		
1	A8	3 $\frac{3}{4}$	2 / 12 / 39	7	47,300		
2				7	59,200	282.18	
3				7	43,000		
1				14	48,700		
2				14	53,200	315.02	
3				14	65,000		
1				28	53,000		
2				28	70,000	354.85	
3				28	65,000		



การทดสอบหาแรงอัดของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง..... ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความชุบตัว (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	แรงอัดสูงสุด		หมายเหตุ
					(กก.)	(กก. / ซม. ²)	
1	A9	$3\frac{15}{16}$	4 / 12 / 39	7	55,000		
2				7	58,400	322.01	
3				7	57,200		
1				14	74,500		
2				14	73,000	421.86	
3				14	76,000		
1				28	97,500		
2				28	96,500	549.26	
3				28	97,500		
1	A10	$4\frac{1}{3}$	3 / 12 / 39	7	54,000		
2				7	53,100	285.20	
3				7	44,000		
1				14	60,100		
2				14	53,700	330.88	
3				14	61,500		
1				28	70,000		
2				28	69,000	391.66	
3				28	68,500		



การทดสอบหาแรงอัดของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง..... ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความชุบตัว (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	แรงอัดสูงสุด		หมายเหตุ
					(กก.)	(กก. / ซม. ²)	
1	A11	5	30 / 11 / 39	7	52,000		
2				7	53,000	295.40	
3				7	51,500		
1				14	60,000		
2				14	57,500	335.40	
3				14	60,200		
1				28	68,300		
2				28	71,000	363.91	
3				28	53,500		



การทดสอบหาแรงดึงของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง..... ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความชุบตัว (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	แรงดึงสูงสุด		หมายเหตุ
					(กก.)	(กก. / ซม. ²)	
1	A1	$4\frac{3}{4}$	27 / 11 / 39	7	32,100		
2				7	32,000	45.34	
3				7	32,000		
1				14	33,600		
2				14	33,600	47.51	
3				14	33,600		
1				28	37,300		
2				28	37,100	52.65	
3				28	37,200		
1	A2	$5\frac{15}{16}$	28 / 11 / 39	7	30,000		
2				7	29,300	42.00	
3				7	29,700		
1				14	31,300		
2				14	31,300	44.35	
3				14	31,400		
1				28	38,400		
2				28	38,300	54.29	
3				28	38,200		



การทดสอบหาแรงดึงของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง วัสดุคอนกรีต ๕ 15 x 30 ซม. ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความชุบตัว (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	แรงดึงสูงสุด		หมายเหตุ
					(กก.)	(กก. / ซม. ²)	
1	A3	4 $\frac{3}{4}$	6 / 12 / 39	7	24,100		
2				7	24,000	34.02	
3				7	24,000		
1				14	26,400		
2				14	26,500	37.70	
3				14	27,000		
1				28	35,700		
2				28	36,700	51.48	
3				28	36,700		
1	A4	5 $\frac{1}{8}$	5 / 12 / 39	7	20,900		
2				7	21,000	29.63	
3				7	21,000		
1				14	26,300		
2				14	26,200	37.51	
3				14	27,000		
1				28	36,200		
2				28	35,800	50.81	
3				28	35,700		



การทดสอบหาแรงดึงตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอกบกรีดและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง..... ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความยาวตัว (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	แรงดึงสูงสุด		หมายเหตุ
					(กก.)	(กก. / ซม. ²)	
1	A5	$5\frac{3}{8}$	17 / 11 / 39	7	18,000		
2				7	17,500	25.15	
3				7	17,800		
1				14	23,100		
2				14	23,200	32.70	
3				14	23,000		
1				28	27,400		
2				28	27,300	38.69	
3				28	27,300		
1	A6	$5\frac{3}{4}$	18 / 11 / 39	7	21,300		
2				7	21,300	30.10	
3				7	21,200		
1				14	25,300		
2				14	25,200	36.66	
3				14	27,200		
1				28	37,800		
2				28	37,800	53.50	
3				28	37,800		



การทดสอบหาแรงดึงของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง ทว.กร.บ.อก ๕.1๕ x 3๐ ซม. ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความขรุขระ (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	แรงดึงสูงสุด		หมายเหตุ
					(กก.)	(กก. / ซม. ²)	
1	A7	5 $\frac{1}{8}$	29 / 11 / 39	7	17,700		
2				7	17,500	24.96	
3				7	17,700		
1				14	18,900		
2				14	18,900	26.75	
3				14	18,900		
1				28	27,000		
2				28	25,400	37.65	
3				28	26,400		
1	A8	3 $\frac{3}{4}$	2 / 12 / 39	7	15,200		
2				7	16,000	22.27	
3				7	16,000		
1				14	19,000		
2				14	18,300	26.56	
3				14	19,000		
1				28	21,700		
2				28	21,700	30.76	
3				28	21,800		



การทดสอบหาแรงดึงของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง..... ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความชุบตัว (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	แรงดึงสูงสุด		หมายเหตุ
					(กก.)	(กก. / ซม. ²)	
1	A9	$3\frac{15}{16}$	4 / 12 / 39	7	17,100		
2				7	17,400	24.29	
3				7	17,000		
1				14	23,500		
2				14	23,400	33.45	
3				14	24,000		
1				28	33,400		
2				28	33,800	47.56	
3				28	33,600		
1	A10	$4\frac{1}{3}$	3 / 12 / 39	7	15,000		
2				7	15,800	21.63	
3				7	15,500		
1				14	18,500		
2				14	18,000	25.95	
3				14	18,500		
1				28	22,000		
2				28	22,000	30.90	
3				28	21,500		



การทดสอบหาแรงดึงของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง..... ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความยาวตัว (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	แรงดึงสูงสุด		หมายเหตุ
					(มม.)	(มม.)	
1	All	5	30 / 11 / 39	7	17,000		
2				7	16,350	23.52	
3				7	16,500		
1				14	19,700		
2				14	21,000	28.50	
3				14	19,700		
1				28	20,800		
2				28	21,000	29.06	
3				28	19,800		



การทดสอบหาการทนทานของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง..... ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความชุบตัว (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น		หมายเหตุ
					(มม.)	(มม.)	
1	A3	$4\frac{3}{4}$	6 / 12 / 39	7	0.39		
2				7	0.41	0.40	
3				7	0.40		
1				14	1.20		
2				14	1.05	1.10	
3				14	1.05		
1				28	1.68		
2				28	1.72	1.70	
3				28	1.70		
1	A4	$5\frac{1}{8}$	5 / 12 / 39	7	0.44		
2				7	0.46	0.45	
3				7	0.45		
1				14	1.80		
2				14	1.75	1.80	
3				14	1.85		
1				28	2.40		
2				28	2.38	2.40	
3				28	2.42		



การทดสอบหาการทนทานของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง วัสดุ ปก ๒ 19 X 30 ซม. ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความชุบตัว (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	ปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น		หมายเหตุ
					(มม.)	(มม.)	
1	A5	$5\frac{3}{4}$	17 / 11 / 39	7	0.28		
2				7	0.30	0.30	
3				7	0.32		
1				14	1.60		
2				14	1.62	1.60	
3				14	1.58		
1				28	2.30		
2				28	2.32	2.30	
3				28	2.28		
1	A6	$5\frac{3}{4}$	18 / 11 / 39	7	0.61		
2				7	0.59	0.60	
3				7	0.60		
1				14	2.35		
2				14	2.35	2.40	
3				14	2.50		
1				28	3.29		
2				28	3.30	3.36	
3				28	3.31		



การทดสอบหาการทนทานของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง..... ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความชุบตัว (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น		หมายเหตุ
					(มม.)	(มม.)	
1	A7	$5\frac{1}{8}$	29 / 11 / 39	7	0.66		
2				7	0.64	0.65	
3				7	0.65		
1				14	2.65		
2				14	2.67	2.65	
3				14	2.63		
1				28	3.54		
2				28	3.49	3.50	
3				28	3.47		
1	A8	$3\frac{3}{4}$	2 / 12 / 39	7	0.58		
2				7	0.62	0.60	
3				7	0.60		
1				14	2.82		
2				14	2.78	2.80	
3				14	2.80		
1				28	3.60		
2				28	3.61	3.60	
3				28	3.59		



การทดสอบหาการทนทานของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง ท่อกรงอก ๕ 1๕ x ๓๐ ซม. ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความชุบตัว (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	ปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น		หมายเหตุ
					(มม.)	(มม.)	
1	A9	$3\frac{15}{16}$	4 / 12 / 39	7	0.70		
2				7	0.72	0.70	
3				7	0.68		
1				14	2.96		
2				14	2.95	3.00	
3				14	3.09		
1				28	3.82		
2				28	3.79	3.86	
3				28	3.79		
1	A10	$4\frac{1}{3}$	3 / 12 / 39	7	0.69		
2				7	0.71	0.70	
3				7	0.70		
1				14	2.89		
2				14	2.84	2.85	
3				14	2.82		
1				28	4.18		
2				28	4.21	4.20	
3				28	4.21		



การทดสอบหาการทนทานของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง ท1/ปร.ว.0ก 5 15 ซม. 50 ซม. ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความชุบตัว (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น		หมายเหตุ
					(มม.)	(มม.)	
1	A11	5	30 / 11 / 39	7	0.78		
2				7	0.82	0.80	
3				7	0.80		
1				14	3.70		
2				14	3.65	3.65	
3				14	3.60		
1				28	4.68		
2				28	4.74	4.70	
3				28	4.68		



การทดสอบหาการทนทานของตัวอย่างแท่งคอนกรีต

งานทดลองคอนกรีตและวัสดุก่อสร้าง

ลำดับงานที่..... วันที่.....

โครงการ..... ผู้ทดสอบ.....

ลักษณะตัวอย่าง..... ผู้ตรวจสอบ.....

ลำดับ ตัวอย่าง	หมายเลข ตัวอย่าง	ความขรุขระ (นิ้ว)	วันที่ เก็บตัวอย่าง	อายุ (วัน)	ปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น		หมายเหตุ
					(มม.)	(มม.)	
1	A1	$4\frac{3}{4}$	27 / 11 / 39	7	0.28		
2				7	0.32	0.30	
3				7	0.30		
1				14	0.82		
2				14	0.80	0.80	
3				14	0.75		
1				28	1.15		
2				28	1.25	1.20	
3				28	1.20		
1	A2	$5\frac{15}{16}$	28 / 11 / 39	7	0.35		
2				7	0.30	0.33	
3				7	0.34		
1				14	0.95		
2				14	0.99	0.95	
3				14	0.91		
1				28	1.39		
2				28	1.42	1.40	
3				28	1.39		

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ นางสาวสุพรรณิ มีกุศล
เกิดวันที่ 14 กุมภาพันธ์ พุทธศักราช 2505
สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา
สถานที่อยู่ปัจจุบัน 148/4 หมู่ 9 ตำบลคูคต อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน อาจารย์ 1 ระดับ 4
สถานที่ทำงานปัจจุบัน โรงเรียนสาครสิริวิทยา อำเภอเสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
ประวัติการศึกษา
พ.ศ. 2521 มัธยมศึกษาปีที่ 3 จากโรงเรียนบุญวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา
พ.ศ. 2524 ปวช.(ออกแบบผลิตภัณฑ์) จากวิทยาลัยเทคโนโลยีภาคตะวันออก
ออกเฉียงเหนือ จังหวัดนครราชสีมา
พ.ศ. 2528 ค.บ. (อุตสาหกรรมศิลป์ สาขา เขียนแบบ-ออกแบบก่อสร้าง)
จากวิทยาลัยครูพระนคร กรุงเทพมหานคร
พ.ศ. 2539 กศ.ม (อุตสาหกรรมศึกษา)
จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร
กรุงเทพมหานคร