การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร่วมกับสารผสมเพิ่มในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบต้นทุนต่ำ

นายธีรวัฒน์ ศุภวัชโรบล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร่วมกับสารผสมเพิ่มในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบต้นทุนต่ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

(ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์)
กรรมการ

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)
กรรมการ

(รศ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ธีรวัฒน์ ศุภวัชโรบล : การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนร่วมกับสารผสมเพิ่มในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบต้นทุนต่ำ (THE CASE OF PRECAST CONCRETE SLAB BY CONCRETE FROM FLYASH & ADMIXTURE LOW COST SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เถ้าลอยแทนปูนซีเมนต์บางส่วนร่วมกับสารผสมเพิ่ม (Admixture) ในแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงแบบท้องเรียบที่มีต้นทุนต่ำ เถ้าลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหิน ซึ่งเถ้าลอยเป็นผลพลอยได้ (By product)จากการเผาถ่านหิน สารผสมเพิ่มในการศึกษา ได้แก่ Sikament F6 มีคุณสมบัติเป็น Superplasticizer จัดเป็นน้ำยาผสมคอนกรีตชนิดลดน้ำอย่างมาก สำหรับคอนกรีตที่ต้องการเน้นกำลังอัดช่วงต้น มีมาตรฐานเทียบเท่า ASTM C494-81 ประเภท F โดยการศึกษามีอัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ เช่น ร้อยละของการแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ เท่ากับร้อยละ 17.5 เป็นต้น ทำการผสมตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 นำมาทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C 39 – 83 Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเลขที่ มอก.213-2552 ที่อายุบ่ม 1 และ 28 วัน ผลการทดสอบจะถูกเปรียบเทียบกับผลทดสอบของตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่เถ้าลอยและสารผสมเพิ่มและทำการวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุของตัวอย่างที่ผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเลขที่ มอก.576-2546 ผลการทดสอบกำลังอัดที่ 28 วันแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ตามสัดส่วนที่ต้องการได้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์บางส่วนนั้นสามารถลดต้นทุนและเวลาในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงแบบท้องเรียบได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

TEERAWAT SUPAWATCHAROBON : THE CASE OF PRECAST CONCRETE SLAB BY CONCRETE FROM FLY ASH & ADMIXTURE LOW COST SYSTEM. ADVISOR : PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D.

This research aims to investigate the feasibility of using fly ash and admixture to replace cement for concrete used in low cost precast concrete slab production. Fly ash is by product from electric power supply industry by coal combustion. Admixture in this study is Sikament F6 which has Superplasticizer for high early strength concrete followed ASTM C494-81 type F. cement is replaced by fly ash 17.5 percent of cement followed ACI 211.1-91. Concrete sample is tested followed ASTM C 39 – 83 Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens and TIS. 213 - 2552 Standard for Ready Mixed Concrete at 1 and 28 days. The result of concrete mixed with fly ash compare with conventional concrete and analyze materials cost of concrete sample followed TIS. 576 – 2546 “Precast Prestressed Concrete Slab for Concrete Floor Systems”. Test results show that 28-day strength of fly ash replacement cement passed the specified requirement of TIS standard. It indicates that fly ash can partially replace cement and it will help reducing cost and time of precast pre-stressed concrete slab productions.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Construction and Infrastructure Management Student’s Signature_____

Academic Year 2017 Advisor’s Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการสอบโครงงานวิจัย ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ กรรมการสอบโครงงานวิจัย ซึ่งได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการให้คำปรึกษา ให้คำสอน ข้อชี้แนะ คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำการศึกษาวิจัยในทุกขั้นตอนตลอดมา และได้เสียสละเวลาอันมีค่าใน การให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขอบคุณห้างหุ้นส่วนจำกัดบ้านเพชรก่อสร้าง ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัยครั้งนี้ ขอบคุณคุณศิวา ซิงห์จากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่คอยให้คำปรึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการผสมคอนกรีตและขอกราบขอบพระคุณบิดา – มารดา ผู้ให้กำเนิดของผู้วิจัย ที่ได้ให้การอุปการะเลี้ยงดูส่งเสียให้ได้รับการศึกษาตลอดมา ได้อบรมสั่งสอนแนวคิดและการปฏิบัติตนทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ได้ รวมถึงหลายๆกำลังใจจากญาติพี่น้อง และครอบครัวที่เป็นกำลังใจอย่างยิ่ง รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ทุกท่านที่มิได้เอ่ยนามถึง ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นสถาบันการศึกษาที่เปิดสอนหลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ทำให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสเข้ามาศึกษาจนสำเร็จได้ในวันนี้

ธีรวัฒน์ ศุภวัชโรบล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฉ
สารบัญรูปภาพ ..... ญ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 3
1.3 ขอบเขตการศึกษา 3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 บทนำ 5
2.2 เถ้าลอย 5
2.3 ปูนซีเมนต์ 7
2.3.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ 9
2.4 มวลรวม 11
2.4.1 ประเภทของมวลรวม 12
2.4.2 การแบ่งขนาดเม็ดของมวลรวม 12
2.5 สารผสมเพิ่ม 13
2.5.1 สารเร่งการก่อตัว 13
2.5.2 สารหน่วงการก่อตัว 13
2.5.3 สารลดปริมาณน้ำ 13
2.5.4 สารป้องกันน้ำ 14
2.5.5 สารกระจายกักฟองอากาศ 14
2.6 น้ำ 15
2.7 ลวดเหล็กแรงดึงสูง 16
2.7.1 หลักการในการออกแบบส่วนผสม 16

2.7.2 กำลังรับแรงอัด 17
2.7.3 ความสามารถในการเท 17
2.7.4 ความทนทาน 18
2.8 วิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต 18
2.8.1 มาตรฐานการออกแบบคอนกรีต 18
2.8.2 การออกแบบตามมาตรฐานอเมริกา 20
2.9 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต 26
2.9.1 รูปทรงกระบอก 26
2.9.2 รูปทรงลูกบาศก์ 26
2.10 การผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ 31
2.10.1 การออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง 31
2.10.2 สิ่งสำคัญในระบบพื้นคอนกรีตอัดแรง 32
2.10.3 ระบบพื้นอัดแรง 32
2.10.4 กระบวนการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ 33
3 วิธีดำเนินการศึกษา 34
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ 34
3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ 34
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ 39
4.1 ผลการทดสอบกำลังอัด 40
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น 42
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 54
5.1 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด 54
5.2 คุณสมบัติทางด้านกายภาพ 54
5.3 อิทธิพลของอายุการบ่ม 54
5.4 ต้นทุนการผลิตเปรียบเทียบต้นทุนเฉพาะค่าวัสดุและระยะเวลาในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ 54
5.5 ข้อเสนอแนะ 55
เอกสารอ้างอิง 56
ภาคผนวก ก ตารางแสดงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสำหรับผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ 59
ประวัติผู้เขียน 80

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ปริมาณของสารอนินทรีย์ในน้ำผสมคอนกรีต 15

2.2 ปริมาณคลอไรด์ ซัลเฟส และค่า pH ของน้ำทะเลอ่าวไทย (โดยประมาณ) 15

2.3 เกณฑ์ทดสอบน้ำสำหรับผสมคอนกรีตตาม ASTM C 94 16

2.4 คุณสมบัติเพิ่มเติมของน้ำผสมคอนกรีตกรณีที่เป็นน้ำล้างโม่ 16

2.5 การวัดความสามารถเทได้ควรกำหนดวิธีที่เหมาะสม 17

2.6 ค่าคงที่ k 18

2.7 กำลังอัดเฉลี่ยที่ต้องการผลิต 19

2.8 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเมื่อตัวอย่างน้อยกว่า 30 ค่า 19

2.9 ส่วนเผื่อเมื่อไม่มีผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 20

2.10 ค่าความยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทต่าง ๆ 22

2.11 ขนาดโตสุดของวัสดุผสมสำหรับงานก่อสร้างประเภทต่าง ๆ 22

2.12 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่าความยุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ 23

2.13 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้ใช้ได้สำหรับคอนกรีตใน สภาวะเปิดเผยรุนแรง 23

2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต 24

2.15 ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต 24

2.16 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณ 25

2.17 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต 31

2.18 ข้อกำหนดทั่วไปของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ 33

3.1 การวิเคราะห์หาสัดส่วนคละและความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ 35

3.2 สัดส่วนส่วนผสมการผลิตคอนกรีตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ 37

4.1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก 39

4.2 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด 40

4.3 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix2 44

4.4 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix3 44

4.5 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix4 45
4.6 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix5 46
4.7 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix6 46
4.8 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix7 47
4.9 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix8 47
4.10 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix9 48
4.11 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix10 48
4.12 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix11 49
4.13 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix12 49
4.14 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix13 50
4.15 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix14 50
4.16 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix15 51
4.17 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix16 51
ก.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix1 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 60
ก.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix2 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 60
ก.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix3 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 61
ก.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix4 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 61

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix5 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 62
ก.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix6 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 62
ก.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix7 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 63
ก.8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix8 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 63
ก.9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix9 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 64
ก.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix10 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 64
ก.11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix11 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 65
ก.12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix12 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 65
ก.13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix13 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 66
ก.14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix14 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 66
ก.15 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix15 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 67
ก.16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix16 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 67
ก.17 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix17 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 68
ก.18 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix18 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 68
ก.19 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix19 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน 69
ก.20 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix1 ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน 69
ก.21 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix1 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 70
ก.22 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix2 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 70
ก.23 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix3 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 71
ก.24 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix4 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 71
ก.25 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix5 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 72
ก.26 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix6 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 72
ก.27 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix7 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 73
ก.28 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix8 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 73
ก.29 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix9 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 74
ก.30 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix10 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 74
ก.31 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix11 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 75
ก.32 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix12 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 76
ก.33 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix13 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 76
ก.34 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix14 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 76

ก.35 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix15 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 77
ก.36 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix16 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 77
ก.37 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix17 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 78
ก.38 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix18 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 78
ก.39 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix19 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน 79

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

1.1 แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ 2

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 17

2.2 แผนภาพการหาสัดส่วนคอนกรีต 21

2.3 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต 27

2.4 ลักษณะการบ่มคอนกรีต 29

2.5 ลักษณะการแตกเป็นรูปกรวยคู่โดยเกิดจากการถูกเฉือนในระนาบที่เอียงกับแรงกด 30

2.6 ลักษณะการอัดแรงระบบ Pre-Stressed Concrete 32

3.1 การร่อนซีเมนต์ก่อนนำไปผสมคอนกรีต 35

3.2 การร่อนผ่านตะแกรงของมวลรวมหยาบ 35

3.3 การวิเคราะห์หาสัดส่วนคละและความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด 36

4.1 กำลังรับแรงอัดของแต่ละอัตราส่วนผสม 19 ส่วนผสมที่ระยะบ่ม 1 และ 28 วัน 42

4.2 การตัดลวดเหล็กและถอดแบบออกจากชิ้นงานของ Mix16 ที่ระยะบ่ม 1 วัน 52

4.3 ความหนาแน่นและความละเอียดของผิวตามเหลี่ยมมุมระหว่าง แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบปัจจุบัน (ซ้าย) เทียบกับแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (ขวา) 52

4.4 การเปรียบเทียบกำลังการผลิตระหว่างอัตราส่วนที่ 1 และ อัตราส่วนที่ 16 ความยาวชิ้นงาน 3 เมตรที่ระยะเวลาในการผลิต 30 วัน 53

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

งานก่อสร้างพื้นอาคารทั่วไปนิยมใช้แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบอัดแรงนิยม แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบมีหลายแบบตามแต่ละประเภทการใช้งาน แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงที่นิยมใช้ ได้แก่ แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบ U คว่ำ แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบคานตัว T และแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบกลวง แต่แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน การใช้แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบในการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (ที่มีสองชั้นขึ้นไป) ตัวอย่างเช่น งานก่อสร้างบ้านเดี่ยว อาคารพาณิชย์ อพาร์ทเม้นต์ อาคารสำนักงาน รวมถึงอาคารอื่นๆ อีกมากมาย

แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ (Prestressed Concrete Slab) เป็นแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีความกว้าง 35 เซนติเมตร ความหนา 5 เซนติเมตร และความยาวตั้งแต่ 0.5 – 5 เมตร ตามระยะการใช้งาน โดยใช้ลวดอัดแรง PC Wire (Prestressed Concrete Wire) ขนาดเส้นศูนย์กลาง ø 4 มิลลิเมตร ชนิดรับแรงดึงสูง สามารถรับแรงดึงสูงสุด 17,600 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ดึงด้วยแรงดึง 70 % ของแรงดึงสูงสุดก่อนการเทคอนกรีต สามารถรับน้ำหนักจรได้ 200 – 500 กิโลกรัม/ตารางเมตร (ตามจำนวนเส้นลวดและความยาวของแผ่น) รูป 1.1 แสดงผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่นิยมใช้ในการก่อสร้างงานระบบพื้น แม้ว่าปัจจุบันความต้องการในการใช้แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบมีมากแต่คู่แข่งทางการตลาดก็มีมากเช่นกัน จึงส่งผลให้ต้นทุนและกำลังในการผลิตสวนทางกับราคาจำหน่ายสินค้า เพื่อลดผลกระทบของราคาจำหน่ายสินค้าในปัจจุบัน อุตสาหกรรมคอนกรีตในประเทศไทยจึงมีการนำวัสดุทางเลือก (Alternative Materials) หรือวัสดุปอซโซลานที่เป็นผลพลอยได้ (By product) เช่น เถ้าลอย ซึ่งได้จากอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้า และสารผสมเพิ่ม (Admixture) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนค่าวัสดุ ระยะเวลาในการผลิต และเพื่อปรับปรุงส่วนผสมบางประการให้ดีขึ้นนอกจากนี้การใช้วัสดุทางเลือกมาแทนที่ของปูนซีเมนต์จะช่วยลดการเกิดช่องว่างในคอนกรีตหรือรูตามดด้วยเช่นกัน แต่เนื่องจากวัสดุปอซโซลานไม่ได้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานด้วยตัวเอง จึงนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น เมื่อใช้เถ้าลอยแทนปูนซีเมนต์บางส่วนจะทำให้กำลังรับแรงอัดของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบนั้นลดลง ในขณะที่แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

นี้ต้องมีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 350 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร (Cylinder) ที่อายุบ่ม 28 วัน (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเลขที่ มอก.213-2552) งานวิจัยนี้จะนำเถ้าลอยมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและเติมสารผสมเพิ่มเข้าไป เพื่อให้สามารถตัดลวดอัดแรงและถอดชิ้นงานออกจากแบบหล่อชิ้นงานได้ที่กำลังอัด 180 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรที่ระยะเวลา 1 วัน(มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเลขที่ มอก.576-2546) หลังจากเทคอนกรีตโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชิ้นงาน

รูปที่ 1.1 แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการประยุกต์ใช้เถ้าลอยลิกไนต์และสารผสมเพิ่ม มาใช้ในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนการผลิตและระยะเวลาที่สามารถถอดแบบออกจากชิ้นงานได้และท้ายสุดจะนำเสนอสัดส่วนระหว่างซีเมนต์ เถ้าลอย และสารผสมเพิ่มที่มีต้นทุนทางเศรษฐกิจต่ำสุด ก่อนทำการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบได้การศึกษาการใช้ส่วนผสมปกติคือ ปูนซีเมนต์ ทราย หิน 3/4 นิ้ว และน้ำ ในอัตราส่วน 400 กิโลกรัม : 770 กิโลกรัม : 1010 กิโลกรัม : 185 กิโลกรัม มีต้นทุนค่าวัสดุปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ + ทราย + หิน 3/4 นิ้ว เท่ากับ 750 + 300 + 353 + 93 = 1,496 บาท/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเมื่อนำไปใช้ในการผลิตจะจำหน่ายในราคา 1,600 บาท/ลูกบาศก์เมตร มีกำไรค่าวัสดุอยู่ที่ 104 บาท/ลูกบาศก์เมตร โดยยังไม่รวมค่าแรงในการผลิต 272 บาท/ลูกบาศก์เมตร และระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตอยู่ที่ 3 วัน จึงจะสามารถตัดลวดอัดแรงและเก็บขึ้นจากแบบหล่อชิ้นงานได้ อีกทั้งยังมีต้นทุนอื่นๆที่ประกอบด้วยค่าขนส่ง ค่าน้ำมัน ค่าเครื่องจักร ค่าไฟฟ้า เมื่อรวมต้นทุนทั้งหมดแล้วทำให้เหลือกำไรน้อยและใช้เวลาในการผลิตนาน จึงได้คิดนำเอาเถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนและเติมสารผสมเพิ่มเข้าไปเพื่อช่วยลดระยะเวลาในการผลิตและไม่

ทำให้กำลังอัดลดลงจากเดิม อีกทั้งยังลดต้นทุนค่าวัสดุ และระยะเวลาในการผลิตแต่ได้ผลิตภัณฑ์ในจำนวนที่มากขึ้น เมื่อนำผลการวิจัยครั้งนี้ไปใช้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าลอยและสารผสมเพิ่มเพื่อเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์, เถ้าลอย, ทราย, หิน 3/4 นิ้ว, น้ำ และสารผสมเพิ่มที่เหมาะสม สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์และประเมินต้นทุนการผลิตและระยะเวลาในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ รวมทั้งสถานที่ ใช้ที่ ห้างหุ้นส่วนจำกัดบ้านเพชรก่อสร้าง เลขที่ 78/1 หมู่ 4 ตำบลบ้านเพชร อำเภอบำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ

1.3.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่

1.3.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

1.3.2.2 ทราย จากบ่อทราย ตำบลโคกสูง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ตามมาตรฐาน ASTM. C136 ส่วนคละต้องเป็นไปตาม ASTM C33

1.3.2.3 หิน 3/4 นิ้ว จากโรงโม่หิน อำเภอนาโสม จังหวัดลพบุรี ตามมาตรฐาน ASTM C131 และ ส่วนคละต้องเป็นไปตาม ASTM C33

1.3.2.4 น้ำ จากประปาส่วนภูมิภาค

1.3.2.5 เถ้าลอย จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตามมาตรฐาน ASTM C 618 – 84

1.3.2.6 สารผสมเพิ่ม จากบริษัทซิก้า(ประเทศไทย)จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM C 494 – 81

1.3.3 ขนาดของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีความกว้าง 35 เซนติเมตร หนา 5 เซนติเมตร ความยาวตั้งแต่ 0.5 – 5 เมตร ตามระยะการใช้งาน โดยใช้เหล็กลวดอัดแรง PC Wire (Prestressed Concrete Wire) ขนาดของเส้นศูนย์กลางเหล็กลวด ø 4 มิลลิเมตรมีกำลังอัดไม่ต่ำกว่า 350 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

(Cylinder) (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเลขที่ มอก.576-2546), มอก.213-2552 และ มาตรฐาน ASTM C 39 – 83 Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

1.3.4 ใช้อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์, เถ้าลอย, ทราย, หิน 3/4 นิ้ว, น้ำ และ สารผสมเพิ่ม ที่เหมาะสมและต้นทุนต่ำ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและสารผสมเพิ่ม รวมทั้งทดสอบกำลังอัดคอนกรีตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ 213-2552

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ทราบถึงความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าลอยและสารผสมเพิ่มเพื่อเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

1.4.2 ทราบอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์, เถ้าลอย, ทราย, หิน 3/4 นิ้ว, น้ำ และ สารผสมเพิ่ม ที่เหมาะสม สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ ตามมาตรฐาน มอก.213-2552 และมีต้นทุนต่ำ

1.4.3 ได้อัตราส่วนผสมใหม่ไปผลิตและจำหน่ายเพื่อการแข่งขันในตลาดได้สำเร็จรวมทั้งยังสามารถลดระยะเวลาในการผลิตเพื่อให้ได้สินค้าในปริมาณที่มากกว่าเดิมแต่ได้คุณภาพเท่าเดิม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ (Prestressed Concrete Slab) เป็นแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงรูปสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีความกว้าง 35 เซนติเมตร ความหนา 5 เซนติเมตร และความยาวตั้งแต่ 0.5 – 5 เมตร โดยการใช้วัสดุในการผลิตได้แก่ ซีเมนต์ น้ำ ทราย หิน เถ้าลอย และสารผสมเพิ่ม นำมาผสมกันในสัดส่วนที่เหมาะสมจากนั้นทำการเทใส่แบบหล่อที่มีเหล็กลวดอัดแรงดึงรออยู่แล้วนำมาบ่มทิ้งไว้ 1 วันก่อนทำการตัดลวดและเก็บขึ้นจากแบบหล่อ การใช้แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบในการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (ที่มีสองชั้นขึ้นไป) ตัวอย่างเช่น งานก่อสร้างบ้านเดี่ยว อาคารพาณิชย์ อพาร์ทเม้นต์ อาคารสำนักงาน รวมถึงอาคารอื่นๆ อีกมากมาย คุณสมบัติอื่นๆ ของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง เช่น ผิวเรียบทำให้ไม่จำเป็นต้องฉาบปูนหรือติดตั้งฝ้าเพดาน ช่วงยาวสามารถใช้งานในความยาวต่างๆได้ สะดวกและประหยัด เนื่องจากไม่ต้องใช้ค้ำยันชั่วคราวในการก่อสร้าง จึงประหยัดทั้งเวลาและแรงงาน (ยกเว้นความหนา 6 ซม.)

วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสม คอนกรีตได้แก่ ปูนซีเมนต์, เถ้าลอย, ทราย, หิน 3/4 นิ้ว, น้ำ และสารผสมเพิ่ม ซึ่งเถ้าลอยเป็นเถ้าลอยที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ตามมาตรฐาน ASTM C 618 – 84 และ มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบสำหรับงานผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C33 – 68

ปูนซีเมนต์สำหรับผสมคอนกรีต ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (Type 1) สำหรับงานโครงสร้างจะทำให้แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบมีความแข็งแกร่ง ทนทานการกัดกร่อนของน้ำได้ดี การใช้ปูนซีเมนต์ผสม (ปูนก่อฉาบ) คุณภาพจะต่ำกว่าทำให้ต้องใช้ปริมาณปูนมากขึ้นเพื่อให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ต้นทุนสูงขึ้น

2.2 เถ้าลอย (Pulverized Fuel Ash)

เถ้าลอยเป็นของแข็งเม็ดกลมมีความละเอียด ซึ่งลอยขึ้นมาพร้อมกับอากาศที่ร้อน ที่เกิดจากการเผาไหม้ของถานหินที่บดละเอียด (Pulverized Coal) ในโรงงานผลตกระแสไฟฟ้า และ จะถูกจับด้วยเครื่องดักจับ (Precipitator) หลังจากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังถังเก็บ ซึ่งถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลงนี้ประกอบไปด้วย สารประกอบคาร์บอนและแร่ธาตุอื่นๆ เช่น ดินดาน ดินเหนียว ซัลไฟด์ และคาร์บอเนต เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงในเตาเผา คุณสมบัติของสาร ประกอบต่าง ๆ ในถานหินจะ

เปลี่ยนไป ทั้งทางด้านกายภาพและด้านเคมี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเตาเผารวมทั้งวิธีการที่ทำให้เย็นตัวของเถ้าลอย ซึ่งเถ้าลอยนี้ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิกา และอะลูมินา

ประโยชน์ของเถ้าลอย

1. ช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต
2. ลดการเยิ้ม (Bleeding) และแนวโน้มการแยกตัวของคอนกรีต
3. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นช้า ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาจะลดลง
4. เพิ่มความทนทานของคอนกรีตที่อายุบ่มมากกว่า 28 วัน
5. เพิ่มความทนทานของคอนกรีต ด้วยเหตุผล 2 ประการคือ ปริมาณน้ำที่ใช้จะลดลงเมื่อต้องการความสามารถเทได้ที่เท่ากันและปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยกับ $Ca(OH)_2$ ทำให้ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตลดลง

เถ้าลอย หรือ ฟลายแอช (fly ash) คือ ขี้เถ้าที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินหรือลิกไนต์มีขนาดเล็กและละเอียดมาก ประกอบด้วยสารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยจะปลิวปนไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควันของโรงผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งถ้ามีปริมาณเถ้าปลิวมาก ในชั้นบรรยากาศ ก็อาจก่อให้เกิดปัญหามลภาวะของอากาศได้ จึงได้มีการศึกษาวิจัยโดยการติดตั้งเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกก๊าซร้อนและเถ้าปลิวกลับมาใช้ใหม่ เช่นการนำเอาเถ้าปลิวมาใช้เป็นส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ ในกระบวนการผลิตคอนกรีต เป็นต้น

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร (2528) พบว่า กำลังอัดระยะต้นของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิด แต่เมื่อนานไปกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยจะดีขึ้น เพราะเกิด ปฏิกิริยาปอซโซลานแล้ว และการใช้เถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมที่พอเหมาะ จะต้องผสมไม่เกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

เมธี เวชารัตนา (2535) ได้ทำการศึกษาเถ้าลอย 2 ชนิด คือ Hadson และ Mercar ซึ่งทั้งสองชนิดมีขนาดต่างกันแต่ใช้ส่วนผสมเดียวกัน ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ เป็นจำนวนร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก เท่ากัน พบว่าในช่วงแรกกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และ ส่วนผสมที่มี เถ้าลอยขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่สามารถรับน้ำหนักได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีเถ้าลอยขนาดใหญ่กว่าเป็นส่วนผสม ในทุกอายุของคอนกรีต

กฤต โง้วสุวรรณ, 2550 ได้รายงานการวิจัยการพัฒนาผลิตแผ่นพื้นสำเร็จรูปโดยใช้คอนกรีตผสมมือและเหล็กเสริมทั่วไป โดยงานวิจัยนี้ใช้เหล็กเสริมทั่วไปแทนการใช้เหล็กลวดอัดแรง สามารถรับน้ำหนัก (Load Test) 300 กิโลกรัม/ตารางเมตร ค้างน้ำหนักไว้ 24 ชั่วโมง วัดค่าการแอ่น

ตัวที่เกิดขึ้นได้ 1.2 เซนติเมตร น้อยกว่าค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ ซึ่งต้องไม่เกิน ($L^2/20000d$) = 1.6 เซนติเมตร (มอก.576-2546)

สำเร็จ สารมาคม, 2556 ได้รายงานการวิจัยการประยุกต์ใช้เถ้าลอยในการผลิตบล็อกประสาน โดยศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตบล็อกประสานที่ใช้ในงานโครงสร้างไม่รับแรงแบกทาน รวมทั้งทั้งนำเสนออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสม กำลังอัดของบล็อกประสานในงานโครงสร้างไม่รับแรงแบกทานต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อดินที่ใช้ในการศึกษานี้เท่ากับ 1:6 และ 1:8 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กันในทางปฏิบัติ

ศราวุธ ปฏิญญาศักดิ์, 2560 ได้รายงานการวิจัยการพัฒนาคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักโดยมีส่วนผสมเพิ่มของเถ้าลอย และทราย โดยศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนวัสดุในการผลิตคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก รวมทั้งนำเสนออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยที่กำลังอัดของคอนกรีตบล็อก คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ต้องมีค่ามากกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามมาตรฐาน มอก.58-2533 ซึ่งอัตราส่วนผสมเดิมในการผลิตจำหน่ายก่อนทำการศึกษาวิจัยการศึกษาระหว่าง ปูนซีเมนต์:ทราย:หินฝุ่นคือ เท่ากับ 1 : 2 : 6 ซึ่งใช้ทรายเข้ามาแทนที่หินฝุ่นบางส่วนเพื่อลดต้นทุนและการยึดเกาะ และเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตและจำหน่าย

ปรารถนา แสงบุญเรือง และพงษ์พัฒน์ มากาศ, 2554 ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของอิฐมวลเบาโดยใช้เศษอิฐมวลเบามาแทนที่มวลรวมหยาบ ซึ่งเป็นส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งใช้เศษอิฐมวลเบาขนาด 3/4, 1/2และ 3/8 นิ้ว แทนที่หิน ร้อยละ 0, 20, 40 และ 60 และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 โดยทำการคัดเลือกสัดส่วนผสมที่ดีที่สุดจากการพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ คือ กำลังอัด โดยให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน จะต้องมีค่ามากกว่า 300 ksc. (ใช้ทำแผ่นคอนกรีตปูพื้น อิฐบล็อก เป็นต้น) สรุปได้ว่าที่ร้อยละ 40 ขนาด 3/8” ของคอนกรีตที่มีการบ่ม เป็นสัดส่วนของการผสมคอนกรีตที่เหมาะสม

2.3 ปูนซีเมนต์ (Cement)

เป็นสารเคมีหรือวัสดุเซรามิกส์ที่เกิดจากการทาปฏิกิริยาทางเคมีเกิด การรวมตัวกันระหว่างอนุภาคเกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่พบคือปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) หรือซีเมนต์อาจหมายถึงสารที่สามารถยึดหรือประสานของแข็งให้เกิดเป็น ชิ้นเดียวกันกลุ่มของวัสดุที่มีสมบัติเหมือนซีเมนต์ที่สำคัญ มี 3 กลุ่มคือ ปูนซีเมนต์ ปูน - ปลาสเตอร์ และปูนขาว (อนันตภักดิ์ โชติมงคล, 2538, หน้า 55) โดยปูนซีเมนต์เป็นกลุ่มที่ สำคัญมากในการนาไปใช้งานด้านการ

ก่อสร้างที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานปูนซีเมนต์ที่ใช้งานทั่วไปได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเกิดจากการเผาส่วนผสมจากวัตถุดิบต่าง ๆ ได้แก่ หินปูน (limestone) หรือหินปูนขาว (marl) กับดินเหนียว (clay) หรือดินดาน(shale) ในสัดส่วนที่ถูกต้องเหมาะสม อาจมีการเติมแร่เหล็ก (iron ore) หรือยิปซัม (gypsum) ตามความจาเป็นเพื่อปรับปรุงให้มีสมบัติตามความต้องการ เมื่อนำปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุผสม คละจำพวกหินย่อย กรวด หรือทรายหยาบ และน้ำ ในสัดส่วนที่เหมาะสมจะเป็นคอนกรีต ซึ่ง เมื่อแข็งตัวแล้วจะมีความแข็งและความทนทานคล้ายหิน จึงนิยมนำไปใช้ในงานก่อสร้าง ประเภทต่าง ๆ หรือเมื่อผสมกับทรายและปูนขาวก็จะเป็นปูนก่อหรือปูนฉาบที่ใช้กับงานก่ออิฐ หรือก่อคอนกรีตบล็อก (cement block) ซึ่งซีเมนต์จะมีสภาพเป็นก้อนแข็งภายในเวลา 2 – 3 ชั่วโมงหลังผสมกับน้ำ การแข็งตัวนี้จะค่อยๆเป็นไปเรื่อยๆ จนซีเมนต์แข็งเหมือนหินระยะแรกที่ซีเมนต์เริ่มแข็งตัวเรียกว่าระยะก่อตัว (setting) และซีเมนต์จะค่อยๆ เปลี่ยนไปจนแข็งตัว (hardwork) ซีเมนต์ที่มีคุณภาพดีจะมีการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรไม่มากนักเมื่อแข็งตัว ซีเมนต์ที่แข็งตัวอยู่ในน้ำจะมีการขยายตัวเล็กน้อย ในทางตรงข้ามหากปล่อยให้ซีเมนต์แข็งตัวในที่แห้ง จะหดตัว การหดตัวนี้จะทาให้เกิดแรงเค้นดึงในคอนกรีตซึ่งอาจทาให้คอนกรีตร้าว ในกรณีที่ใช้ ส่วนผสมที่ไม่เหมาะสมหรือในงานที่มีพื้นที่กว้างใหญ่เกินไปจะสังเกตได้จากการทำพื้นคอนกรีตเช่น ถนนคอนกรีต มักจะแบ่งเป็นช่วง ๆ และรอยต่อระหว่างช่วงจะอัดด้วยยางมะตอย เพื่อป้องกันการหดตัวและขยายตัวของคอนกรีตนั่นเอง ความแตกต่างของซีเมนต์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนในการผสม ส่วนสีของซีเมนต์ ขึ้นอยู่กับปริมาณของแร่เหล็ก (Fe_2O_3) ที่ใช้ในส่วนผสม ซีเมนต์ที่มีแร่เหล็กผสมอยู่มากจะมีสี เข้ม ถามีน้อยจะมีสีอ่อน ทั้งนี้จากกรรมวิธีการผลิตอาจจะทาให้ สีของซีเมนต์เปลี่ยนไปไดบ้าง เล็กน้อย แร่เหล็กในซีเมนต์ส่วนมากเป็นส่วนผสมที่อยู่ในวัตถุดิบไม่ได้จงใจใส่ลงไปเพื่อให้มีสี ยกเว้นซีเมนต์ชนิดที่ตองการเน้นสีเป็นพิเศษ เช่น พวกไอรอนออร์ซีเมนต์ (iron ore cement) เป็นซีเมนต์ที่ใช้แร่เหล็กแทนบางส่วนของดินประมาณ ร้อยละ 8 ทาให้เกิดเป็นสีน้าตาล และ ซีเมนต์บางชนิดที่ตองการสมบัติเป็นพิเศษ เช่นเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของสารเคมีเป็นต้นแต่โดยภาพรวมแล้วซีเมนต์ที่ดีจะต้องมีสมบัติดังนี้ (เฉลียว โพธิพิรุฬห์, ม.ป.ป., หน้า 33 – 34)

ในปี ค.ศ. 1824 (พ.ศ. 2367) โจเซฟแอสปดิน (Joseph Aspdin) ได้ รับสิทธิบัตรสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ (improve cement) โดยการเผาส่วนผสมของหินปูนและดินเหนียว แล้วนำมาบดให้เป็นผงละเอียด โจเซฟ เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) เพราะปูนซีเมนต์ชนิดนี้เมื่อแข็งตัวแล้วสีจะเป็นสีเหลืองปนเทามีลักษณะคล้ายก้อนหินที่พบใน เหมืองต่าง ๆ บนเกาะเล็ก ๆ ของเมืองปอร์ตแลนด์ (Portland) ประเทศอังกฤษ ดังนั้นนาย โจเซฟ แอสปดิน จึงเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเป็นบิดาของอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ต – แลนด์และปูนซีเมนต์ชนิดนี้เองที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบัน

ปีค.ศ. 1905 (พ.ศ. 2447) มีการจัดตั้งสมาคมควบคุมคุณภาพขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing Material, ASTM) และได้มีการวิวัฒนาการด้านการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จนถึงปัจจุบัน โดยอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ของไทยได้เริ่มก่อตั้ง ขึ้นครั้งแรกเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2456 โดยพระราชดำริและพระราชประสงค์ของพระบาทสมเด็จพระมงกุฎเกล้าเจ้าอยู่หัว ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้เจ้าพระยายมราช (ปั้น สุขุม) เป็นผู้ดำเนินการจัดตั้งโรงงานขึ้นที่บางซื่อ ซึ่งเป็นที่มาของบริษัทปนซีเมนต์ไทย จำกัด ปัจจุบัน โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทยมีอยู่หลายแห่ง เช่นที่อำเภอท่าหลวงและอำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ที่อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่อำเภอตาคลี จังหวัดนครสวรรค์ ที่อำเภอชะอำ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เป็นต้น

2.3.1 ประเภทของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์แบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 3 ประเภท ได้แก่ ปูนซีเมนต์ธรรมชาติ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ชนิดอื่นๆ โดยปูนซีเมนต์แต่ละชนิดมีลักษณะสมบัติ และความเหมาะสมต่อการใช้งานตามรายละเอียดดังต่อไปนี้ (ประณต กุลประสูตร, 2536, หน้า 27 – 30; สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์, ม.ป.ป., หน้า 9 – 20; Banerjea, 1980, pp. 2 – 7)

2.3.1.1 ปูนซีเมนต์ธรรมชาติ

ปูนซีเมนต์ธรรมชาติเป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการเผาซีเมนต์ธรรมชาติหรือหินซีเมนต์ (cement rock) โดยตรง ผลิตโดยนำหินปูนซีเมนต์ไปเผาให้ใกล้ถึงจุดหลอม (sintering) และ นำไปบดให้ละเอียด ซีเมนต์ชนิดนี้สามารถแข็งตัวได้เร็วมากโดยเฉพาะในน้ำ จึงไม่เหมาะที่จะใช้ทำงานคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่เหมาะที่จะใช้ทำงานคอนกรีตล้วน เช่น สร้างทำนบ ฐานราก เป็นต้น ซีเมนต์ชนิดนี้เดิมมีการผลิตกันในประเทศสหรัฐอเมริกา แต่ในปัจจุบันไม่นิยมผลิตจะมีบ้างที่เป็นอุตสาหกรรมขนาดย่อมเท่านั้นเนื่อง จากไม่คอยนิยมใช้เพราะมีสมบัติไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับสมบัติของหินซีเมนต์

2.3.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นซีเมนต์ที่ใช้กันแพร่หลายมาก ที่มีชื่อเรียกเช่นนี้เพราะทาขึ้น ได้ก่อน ณ เมืองปอร์ตแลนด์ ประเทศอังกฤษ ซีเมนต์ชนิดนี้มีสารประกอบรวมกันอยู่หลายชนิด แต่มีสารประกอบพื้นฐาน 4 ชนิดคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate, $3CaO . SiO_2$) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_3S, ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate, $2CaO . SiO_2$) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_2S, ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (tricalcium aluminate, $3CaO . Al_2O_3$) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_3A, เตตระแคลเซียมเฟอร์โรอะลูมิเนต (tetracalcium ferro aluminate, $4CaO . Al_2O_3 .Fe_2O_3$) แทนด้วยสัญลักษณ์ C_4AF

สัญลักษณ์ที่ใช้แทนสารประกอบดังกล่าวนี้ถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคมซีเมนต์ (Cement Association) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ผลิตมีสองสีคือสีเทาและสีขาว สีเทาเกิดจากสารพวกเหล็ก และแมงกานีสออกไซด์ ถ้ามีสารทั้งสองชนิดนี้มากจะมีสีเข้ม สำหรับสีขาวหรือซีเมนต์ขาว (white Portland cement) จะมีเหล็กออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 0.5 และแมงกานีสออกไซด์น้อย- กว่าร้อยละ 0.02 จำนวนร้อยละของสารประกอบแต่ละชนิดที่เป็นสารประกอบพื้นฐานนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามแต่ชนิดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่จำแนกตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM) เป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์รหัส ซี – 150 (C – 150 Portland cement) ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้เป็นปูนซีเมนต์ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปมากที่สุดในปัจจุบัน จำแนกออกได้ เป็น 5 ประเภทคือ
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Type – 1 normal Portland cement) หรือ standard Portland cement หรือ ordinary Portland cement หรือ OPC) จัดเป็นปูนซีเมนต์มาตรฐานที่เหมาะสำหรับงานก่อสร้างทั่วไปที่ไม่ต้องการสมบัติ พิเศษนอกเหนือไปกว่าธรรมดา ส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้กับงานคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น งานก่อสร้าง คานคอนกรีต ทางเท้า ถนนอาคาร สะพาน ถังน้ำ บ่อน้ำ ท่อระบายน้ำ และอื่นๆ ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ไม่เหมาะกับงานที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟตจากดินหรือน้ำและไม่ทนทานต่อปฏิกิริยาเคมี
3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Type – II modified Portland cement หรือ moderate heat Portland cement หรือ MHPC) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ดัดแปลงให้มีความต้านทานต่อซัลเฟตปานกลาง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างปูน – ซีเมนต์กับน้ำจะต่ำกว่าและเพิ่มได้ช้ากว่าประเภทแรกดังนั้นจึงสามารถช่วยลดอุณหภมิของคอนกรีตในอากาศร้อนได้ดี ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะสมกับการใช้งานที่เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น ตอม่อขนาดใหญ่ สะพานเทียบเรือ เขื่อน หรือกาแพงกันดินในบริเวณที่สัมผัสน้ำเค็มเป็นครั้งคราว
4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดแรงสูงเร็ว (Type – III high – early strength Portland cement หรือ rapid hardening Portland cement หรือ RHC หรือ HESC) ปูน–ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้เนื้อปูนจะบดละเอียดกว่าปูนซีเมนต์แบบธรรมดาเป็นผลทำให้ แข็งตัวและรับแรงได้เร็วกว่า

แบบธรรมดาแต่จะต้องบ่มให้ดี โดยปกติจะสามารถรับแรงได้เมื่อคอนกรีตมีอายุเพียงประมาณ 1 ถึง 3 วัน จึงนิยมนาไปใช้กับงานเร่งด่วนที่ต้องทำแข่งกับเวลา หรือในกรณี ที่ต้องการถอดหรือรื้อแบบเร็วกว่าปกติ นอกจากนั้นยังนิยมนำไปใช้กับงานที่ จำเป็นต้องทำในช่วงอากาศหนาวเย็นเนื่องจากคอนกรีตจะแข็งตัวก่อนที่น้ำซึ่งใช้ผสมจะแข็งตัวเสียก่อนและขณะเกิดปฏิกิริยาจะมีความร้อนสูง (heat of hydration) เพราะความร้อนนี้เองจึง ไม่เหมาะสมกับการก่อสร้างที่มีขนาดใหญ่ (mass concrete)

5. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดความร้อนต่ำ (Type – IV low – heat Portland cement หรือ LHC) จัดเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เหมาะกับงานซึ่งต้องการควบคุมทั้งปริมาณและอัตราความร้อนให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดการเกิดกำลัง (Strength) ของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะเป็นไปอย่างช้าๆ จึงนิยมนาไปใช้กับงานขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนกั้นน้ำ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตถ้ามากเกินไปจะเป็นอันตรายอย่างมากกับ ตัวเขื่อนเนื่องจากจะให้เกิดการแตกหรือร้าวได้ แต่ในระยะยาวความแข็งของคอนกรีตจะมีเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาและทนทานต่อสารเคมีมากกว่า
6. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้านทานซัลเฟตได้สูง (Type – V Sulphateresistance Portland cement หรือ SRC) จัดเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีสมบัติในการตาน- ทานซัลเฟตได้สูงจึงเหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างในบริเวณที่มีการสัมผัสกับซัลเฟตที่เข้มข้น เช่น ในบริเวณดินหรือน้าที่มีความเป็นด่างสูง ระยะเวลาในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ประเภทนี้ จะช้ากว่าประเภทอื่น ๆ ในการผสมไม่ควรใช้น้ำที่มีสารแคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride, $CaCl_2$) หรือเกลือเพราะจะทำให้คอนกรีตไม่ทนต่อซัลเฟต

2.4 มวลรวม (Aggregate)

มวลรวม คือ วัสดุที่ใช้สำหรับผสมกับซีเมนต์เพสต์ทำให้ผลผลิตที่ได้ออกมาเป็น คอนกรีต มวลรวมที่ใช้มากที่สุดคือ หิน และ ทรายคอนกรีตทั่วไปจะมีหินและทรายผสมอยู่ประมาณ 70%-

80% ของปริมาตรคอนกรีต คุณภาพหินและทรายที่ใช้ต้องพิจารณาอย่างพิถีพิถันเนื่องจากจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเป็นอย่างมาก

2.4.1 ประเภทของมวลรวม

แบ่งตามแหล่งกำเนิด จากธรรมชาติ (Natural Mineral Aggregate) เกิดจากขบวนการกัดกร่อนและเสียดสีตามธรรมชาติ ได้แก่ หินย่อย (Crushed Stone) กรวดแม่น้ำ (Pebble) และทราย (Sand) ที่มนุษย์ทำขึ้น (Artificial Aggregate) ได้แก่ ดินเหนียวเผา (Burnt Clay)

แบ่งตามหน่วยน้ำหนัก มวลรวมน้ำหนักเบา (Light Weight Agg.) มวลรวมน้ำหนักปกติ (Normal Weight Agg.) มวลรวมน้ำหนักมาก (Heavy Weight Agg.) มวลรวมน้ำหนักเบา (Light Weight Agg.)

ความหนาแน่น 300 - 1,100 กก/ม3 ที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น Diatomite, Pumice, Scoria, Volcanic Cinder, Tuff มีการเผาวัสดุธรรมชาติ จนขยายตัวเนื่องจากก๊าซที่ดันออกมา เช่น การเผาดินเหนียว (clay), ดินดาน (shale) , หินชนวน

2.4.1.1 มวลรวมน้ำหนักปกติ (Normal Weight Aggregate)

ใช้ในการผลิตคอนกรีตสำหรับอาคารคอนกรีตทั่วไป ความหนาแน่น 1,500 – 1,800 กก/ม^3 และความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.5 - 2.8 ได้แก่ หินปูน หินแกรนิต หินทราย ทรายบก ทรายแม่น้ำ

2.4.1.2 มวลรวมน้ำหนักมาก (Heavy Weight Aggregate)

ใช้ในการผลิตคอนกรีตสำหรับอาคารป้องกันการแพร่กระจายกัมมันตภาพรังสี เช่น เตาปฏิกรณ์ปรมาณู ใช้หินธรรมชาติและความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 4 ขึ้นไป เช่น Barite, Hematite, Magnetite, Limonite

ความหนาแน่น 2,400 - 3,100 กก/ม^3

2.4.2 การแบ่งขนาดเม็ดของมวลรวม

2.4.2.1 มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

นิยมใช้ทั่วไปมีขนาด 10 มม. (3/8 นิ้ว) ถึง 25 มม. (1 นิ้ว) ส่วนใหญ่เป็นหินย่อย (Crushed Stone) ที่ได้จากการระเบิดภูเขาหิน แล้วนำไปย่อยให้เล็กลงตามขนาดที่ต้องการ

2.4.2.2 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

ขนาดเม็ดเล็กกว่า 4.75 มม. แต่มีขนาดใหญ่กว่า 0.074 มม. ที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ ทรายแม่น้ำ ทรายบก หรือทรายเหมืองที่ผ่านการล้างสะอาดแล้ววัสดุที่มีขนาดเม็ดเล็กกว่า 0.074 มม. ที่อาจจะปนอยู่ในทราย

แบ่งเป็น 2 ชนิด เช่น ดินตะกอน หรือ หินฝุ่น (Silt) ขนาดเม็ด 0.074 มม. - 0.002 มม. ดินเหนียว (Clay) ขนาดเม็ดเล็กกว่า 0.002 มม.

2.5 สารผสมเพิ่ม (Admixture)

สารผสมเพิ่ม หมายถึง สารเคมีอื่นๆ นอกเหนือไปจาก ปูนซีเมนต์ วัสดุมวลรวม และน้ำที่ใช้เติมลงในส่วนผสมของคอนกรีต ด้วยจุดประสงค์เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต สารผสมเพิ่มจะให้ผลแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ขนาด รูปร่าง และส่วนขนาดคละของวัสดุมวลรวม น้ำ และอุณหภูมิ ดังนั้น การใช้สารผสมเพิ่ม จึงควรได้ทราบถึงข้อมูล ตลอดจนข้อแนะนำในการใช้ของบริษัทผู้ผลิตโดยละเอียด นอกจากนี้สารผสมเพิ่มจะให้ผลดีต่อเมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม สารผสมเพิ่มที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่

2.5.1 สารเร่งการก่อตัว (Accelerators)

สารเร่งการก่อตัว จะทำให้คอนกรีตก่อตัว และแข็งตัวเร็วขึ้นกว่าปกติ นอกจากนี้ผลพลอยได้ของการใช้สารเร่งการก่อตัว คือ จะทำให้คอนกรีตมีกำลังในระยะแรกสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยทั่วไปแล้ว สารเร่งการก่อตัวจะใช้เมื่อต้องการเร่งเวลาในการถอดแบบหล่อ หรือเมื่อต้องการให้คอนกรีตรับแรงได้เร็วกว่าปกติ เช่น การทำเสาเข็มธรรมดา และเสาคอนกรีตอัดแรง ใช้อุดรูรั่วในเนื้อคอนกรีตสารที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งการก่อตัวคือ แคลเซี่ยมคลอไรด์ และโซเดี่ยมซิลิเกต เป็นต้น

2.5.2 สารหน่วงการก่อตัว (Retarders)

สารหน่วงการก่อตัว มีคุณสมบัติช่วยให้คอนกรีตก่อตัวช้ากว่าธรรมดา (เกินกว่า 1 ½ ชั่วโมง) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ ในกรณีที่ต้องเสียเวลาเคลื่อนย้ายคอนกรีตที่ผสมแล้วไปยังจุดเทที่อยู่ไกลๆ หรือในกรณีที่ต้องใช้เวลาในการเคลื่อนย้าย และการเทนานๆ ข้อเสียของการใช้สารหน่วงการก่อตัว คือจะทำให้กำลังคอนกรีตลดต่ำไปในช่วง 3 วันแรก แต่ผลพลอยได้คือ ช่วยลดปริมาณน้ำได้ประมาณ 5 – 15 % ซึ่งเป็นผลทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงในระยะเวลาหลัง และมีกำลังเท่ากับหรือสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาเมื่อ อายุ 28 วัน สารชนิดนี้ได้แก่ แคลเซียม หรือยิบซัม ซึ่งบริษัทผู้ผลิตปูนซีเมนต์ทั้งหลายก็ได้ใช้ปนอยู่แล้วในปูนซีเมนต์ที่ผลิต

2.5.3 สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing Admixture)

สารลดปริมาณน้ำ ช่วยลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในส่วนผสมคอนกรีต แต่ยังได้ความข้นเหลวเทียบเท่ากับคอนกรีตธรรมดา เมื่อใช้น้ำในส่วนผสมคอนกรีตน้อยลง (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยลง) จะมีผลในการเพิ่มกำลังของคอนกรีตสารชนิดนี้เป็นสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่ทำมาจากเกลือลิกโนซัลโพนิค (Lignosulfonic acid) หรือเกลือ และสารประกอบของกรดไฮดรอกซี่ คาร์บอซี

ลิค (Hydroxycarboxylic Acid) หรือสารประกอบโพลีเมอร์บางชนิด เช่น โพลิเมอร์ ไฮดรอกซีเลต (Hydroxylated Polymers)

2.5.4 สารป้องกันน้ำ (Waterproofing)

สารป้องกันน้ำจะทำให้คอนกรีตทึบน้ำ กันน้ำไม่ให้น้ำซึมผ่านได้ สารป้องกันน้ำจะเข้าไปแทรกอุดรูเล็กๆ ในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตทึบน้ำ ถ้าสามารถออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้พอดี และสามารถผสมคอนกรีตได้ตามที่ออกแบบ เมื่อนำคอนกรีตไปหล่อแล้วคอนกรีตจะแน่นทึบกันน้ำ แต่ในกรณีไม่สามารถทำได้ก็จำเป็นต้องใช้สารชนิดนี้ช่วย สารป้องกันน้ำมักจะใช้กับคอนกรีตที่ต้องกันไม่น้ำซึมผ่านได้ เช่น โครงสร้างที่กั้นน้ำห้องใต้ดิน อุโมงค์ สระน้ำ หลังคา พื้นห้องน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้สารป้องกันน้ำยังสามารถนำมาใช้กับมอร์ต้า (ปูน+ทราย+น้ำ) ที่ใช้โบกกำแพง หรือเทพื้นเพื่อกันมิให้ความชื้นซึมเข้าไปได้ และป้องกันราชื้น สารชนิดนี้เป็นพวกอัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkaline Silicates) เช่น โซเดียมซิลิเกต หรืออลูมิเนียม และสังกะสีซัลเฟต (Zinc Sulphates)

2.5.5 สารกระจายกักฟองอากาศ (Air-Entraining Admixtures)

สารกระจายกักฟองอากาศจะช่วยให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ มองด้วยตาเปล่าไม่เห็น แผ่ปนอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีต โดยฟองเหล่านี้จะไม่ทะลุถึงกันได้ ในคอนกรีต 1 ลบ.ม. อาจมีฟองอากาศเล็ก ๆ นี้ ประมาณ 3 – 6 % ของเนื้อคอนกรีตทั้งหมดโดยปริมาตร การที่ในเนื้อคอนกรีตมีฟองอากาศขนาดเล็กๆ เหล่านี้ จะช่วยทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้มากขึ้น แม้ว่าจะมีปริมาณน้ำน้อยก็ตาม เพราะฟองอากาศเหล่านี้จะช่วยทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นแทนน้ำ นอกจากนี้ช่วยมิให้น้ำในคอนกรีตแข็งเป็นน้ำแข็ง ก่อนที่คอนกรีตจะก่อตัว ซึ่งเป็นประโยชน์ในการหล่อคอนกรีตในฤดูหนาว หรือในเมืองที่มีอากาศหนาวเย็นมากสารกระจายกักฟองอากาศยังช่วยลดการแยกตัว การสูญเสียน้ำ ไม่รั่วซึม รวมทั้งเพิ่มความต้านทานซัลเฟตด้วย ข้อเสียของการใช้สารนี้ก็คือทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลง เนื่องจากคอนกรีตมีรูพรุนมาก และในการใช้เครื่องเขย่าคอนกรีตเพื่อทำให้คอนกรีตแน่นตัว ต้องระวังให้มากกว่าเดิมเพราะถ้าเขย่ามากแล้ว จะทำให้จำนวนฟองอากาศลดน้อยลงไปเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์ สารกระจายกักฟองอากาศมีหลายชนิดซึ่งอาจทำมาจากยางไม้ ไขมัน น้ำมันสัตว์ – พืช นอกจากการใช้สารเคมีกระจายกักฟอกอากาศมาผสมในคอนกรีตแล้ว ปัจจุบันยังมีคอนกรีตกระจายกักฟองอากาศ ซึ่งผลิตขึ้นโดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดกระจายกักฟองอากาศ (Air Enrraining Cement) ซึ่งให้คุณสมบัติเช่นเดียวกันกับการเติมสารดังได้กล่าวมาแล้ว

2.6 น้ำ (Water)

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญยิ่งในการทำคอนกรีต น้ำในที่นี้อาจแบ่งได้ออกเป็น น้ำสำหรับผสมคอนกรีตให้มีความข้นเหลวทำงานง่าย น้ำสำหรับบ่มคอนกรีตให้แข็งตัว และมีกำลังรับแรงได้ตามต้องการ น้ำสำหรับล้างวัสดุผสมที่จะใช้ผสมคอนกรีตให้สะอาด น้ำสำหรับผสมคอนกรีต (Mixing water) น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ต้องสะอาด มีความขุ่นไม่เกิน 2,000 ppm. (ส่วนในล้าน) ปราศจากกรด ด่าง น้ำมันและสารอินทรีย์อื่น ๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีตหรือเหล็กเสริม โดยปกติน้ำประปาและน้ำจืดตามธรรมชาติส่วนใหญ่ซึ่งไม่มีส่วนผสมของน้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรมถือว่ามีคุณภาพดีพอสำหรับงานคอนกรีต ในกรณีที่สงสัยให้ทำแท่งทดสอบโดยใช้น้ำที่สงสัยและเปรียบเทียบกำลังอัดแท่งทดสอบที่ทำจากน้ำที่มีคุณภาพดี หน้าที่ของน้ำสำหรับงานคอนกรีต มี 3 ประการ คือ

1. ใช้ล้างวัสดุมวลรวมต่างๆ
2. ใช้ผสมทำคอนกรีต
3. ใช้บ่มคอนกรีต

หน้าที่หลักของน้ำในฐานะที่ใช้ผสมทำคอนกรีตยังแบ่งได้อีก 2 ประการ

1. ก่อให้เกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชั่นกับปูนซีเมนต์
2. ทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้ เคลือบ หิน ทราย ให้เปียกเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์จะสามารถเข้าเกาะได้โดยรอบ

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของสารอนินทรีย์ในน้ำผสมคอนกรีต

สารอนินทรีย์	ปริมาณสูงสุด (ส่วนในล้าน)
คลอไรด์	500
ซัลเฟต	1000
อัลคาไลคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต	1000

ตารางที่ 2.2 ปริมาณคลอไรด์ ซัลเฟส และค่า pH ของน้ำทะเลอ่าวไทย (โดยประมาณ)

เกลือ	ส่วนต่อล้าน
คลอไรด์	18000
ซัลเฟต	2500
pH	8.0

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์ทดสอบน้ำสำหรับผสมคอนกรีตตาม ASTM C 94

คุณสมบัติเปรียบเทียบกับส่วนควบคุม	**เกณฑ์**	**วิธีการทดสอบ**
กำลังอัดที่อายุ 7 วัน (ร้อยละ)	ไม่ต่ำกว่า 90	ASTM C109
การก่อตัว (ชั่วโมง,นาที)	เร็วขึ้นไม่เกิน 1 ชั่วโมง และช้าไม่เกิน 1 ชั่วโมง 30 นาที	ASTM C191

หมายเหตุ ส่วนผสมควบคุมใช้น้ำสะอาดหรือน้ำกลั่น

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติเพิ่มเติมของน้ำผสมคอนกรีตกรณีที่เป็นน้ำล้างโม่

ชนิดของสารเคมี	**จำนวนไม่เกิน**	**วิธีการทดสอบ**
คามเข้มข้นของคลอไรด์ (ส่วนในล้าน) -สำหรับคอนกรีตอัดแรงหรือพื้นสะพาน -คอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสความชื้น หรือมีอลูมิเนียมหรือโลหะฝังอยู่	500* 1000*	ASTM D 512
ซัลเฟตในรูป SO_2 (ส่วนในล้าน)	3000	ASTM D 516
อัลคาไลในรูป (NA2O+0.658K2O) (ส่วนในล้าน)	600	-
สารแขวนลอยทั้งหมด (ส่วนในล้าน)	50000	AASHTO T26

2.7 ลวดเหล็กแรงดึงสูง (PC Wire)

มาตรฐานลวดเหล็กที่ใช้ในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 และ 5 มิลลิเมตร และจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเลขที่ มอก. 95-2540

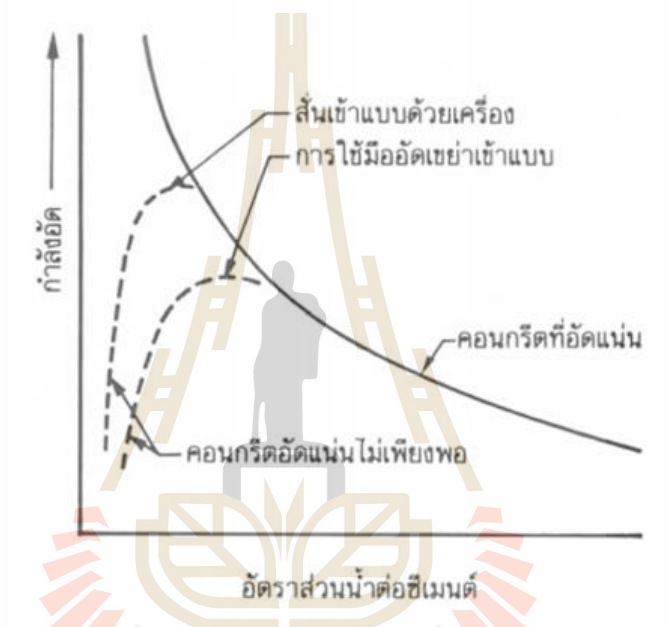
การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต (Concrete Mixed Design)

2.7.1 หลักการในการออกแบบส่วนผสม

2.7.1.1 เพื่อเลือกวัสดุผสมคอนกรีตที่เหมาะสม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต ให้เป็นไปตามข้อกำหนดและวัตถุประสงค์การใช้งาน

2.7.1.2 คำนวณหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุผสม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนดและการใช้งานที่ต้องการทั้งในสภาพคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

2.7.2 กำลังรับแรงอัด ค่ากำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (water-cement ratio) โดยกำลังอัดจะเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ดังรูปที่ 6.1 โดย ถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์มาก ? กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะต่ำ ถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ ? กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะสูง ในการผสมคอนกรีตถ้าสามารถรักษาอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ให้คงที่แล้ว แม้ส่วนผสมอื่นจะเปลี่ยนแปลงไปบ้าง กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

2.7.3 ความสามารถในการเทได้ ความสามารถเทได้ของคอนกรีตมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณน้ำในส่วนผสม ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ความสามารถเทได้ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.5 การวัดความสามารถเทได้ควรกำหนดวิธีที่เหมาะสม

ประเภทของคอนกรีต	วิธีการวัดความสามารถเทได้
1) คอนกรีตแข็งหรือกระด้างมาก 2) คอนกรีตทั่วๆไป 3) คอนกรีตเหลวมาก	-วัดโดยหาค่าเวลา Vebe (Vebe Test) -วัดค่ายุบตัว (Slump Test) -วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของคอนกรีตที่แผ่กระจายออก (Flow Test)

คอนกรีตสดควรมีความข้นเหลวพอเหมาะที่จะเทเข้าแบบได้สะดวก ถ้าคอนกรีตเหลวเกินไป จะทำให้เกิดการแยกตัวขณะลำเลียงและเท และทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลง ไม่ทนทานและมีโอกาสแตกร้าวง่าย

2.7.4 ความทนทาน คอนกรีตที่ใช้งานในสภาพปกติโดยทั่วไป จะมีความทนทานอยู่ในเกณฑ์ที่หน้าพอใจ แต่ถ้าคอนกรีตอยู่ในในสภาวะที่เกิดการกัดกร่อนรุนแรง เช่น โครงสร้างในน้ำทะเลความทนทานจะลดลง อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์มีผลต่อความทนทานของคอนกรีต ดังนั้นจึงมีการกำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมกับคอนกรีตที่สภาวะต่างๆ

2.8 วิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

2.8.1 มาตรฐานการออกแบบคอนกรีต ในการออกแบบจะต้องออกแบบคอนกรีตให้มีกำลังอัดมากกว่ากำลังอัดของงานที่กำหนดไว้ ดังสมการ

F_{cr} = $f_c' + k_s$

F_{cr} = กำลังอัดเฉลี่ยที่ผู้ผลิตคอนกรีตต้องการผลิต

F_c' = กำลังอัดที่กำหนดไว้ในแบบ

k_s = ส่วนเผื่อซึ่งประกอบด้วย

k = ค่าคงที่ดังตารางที่ 2

s = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัด จากก้อนตัวอย่าง 30 ค่า หรือมากกว่า

ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่ k

ค่าร้อยละของกำลังที่ต่ำกว่า f_c'	ค่า k
20	0.842
10	1.282
5	1.645
2.5	1.960
2	2.054
1	2.326
0	3.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตัวอย่างการออกแบบ ถ้าในข้อกำหนดให้ใช้คอนกรีตกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ (f_c') 240 กก./ตร.ซม. โดยคอนกรีตที่ผลิตทั่วไปมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) 40 กก./ตร.ซม. ผู้ผลิตต้องผลิตคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดดังนี้

ตารางที่ 2.7 กำลังอัดเฉลี่ยที่ต้องการผลิต

ค่าร้อยละของกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่ต่ำกว่า f_c'	**ส่วนเผื่อ k_s (กก./ตร.ซม.)**	**กำลังอัดเฉลี่ยที่ต้องการผลิต (กก./ตร.ซม.)**
20	0.842 x 40 = 34	240 + 34 = 274
10	1.282 x 40 = 51	240 + 51 = 291
5	1.645 x 40 = 66	240 + 66 = 306
2.5	1.960 x 40 = 78	240 + 78 = 318
2	2.054 x 40 = 82	240 + 82 = 322
1	2.326 x 40 = 93	240 + 93 = 333
0	3.000 x 40 = 120	240 + 120 = 360

จากตาราง จะพบว่า ถ้ากำหนดให้ค่าร้อยละของกำลังอัดของก้อนตัวอย่างที่ผลิตต่ำกว่า f_c' น้อยลงเรื่อย ๆ ผู้ผลิตต้องออกแบบให้มี Margin (ส่วนเผื่อ) เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามมาตรฐานทั่วไปที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมคอนกรีต ผู้ผลิตจะต้องออกแบบให้โอกาสที่กำลังอัดเฉลี่ยต่ำกว่ากำลังอัดที่ออกแบบไม่เกิน 5% ในตัวอย่างนี้ผู้ผลิตต้องผลิตคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 306 กก./ตร.ซม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจำเป็นต้องหาจากแท่งตัวอย่าง อย่างน้อย 30 ก้อน จึงจะให้ความเชื่อถือทางสถิติได้เพียงพอ แต่ถ้าการทดสอบน้อยกว่า 30 ก้อน ก็อนุโลมได้โดยใช้ตัวคูณดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.8 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเมื่อตัวอย่างน้อยกว่า 30 ค่า

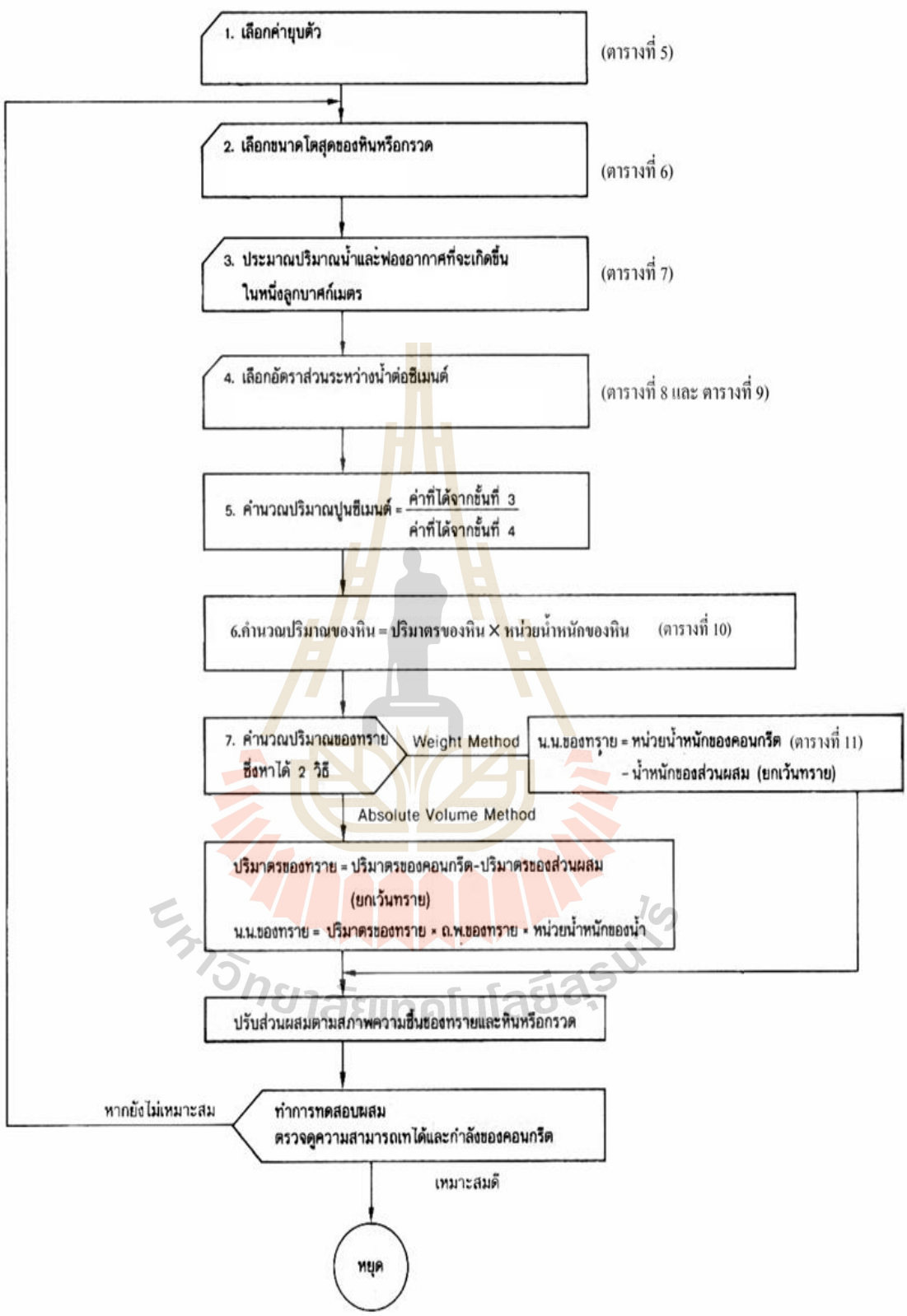
จำนวนตัวอย่าง	**ตัวคูณสำหรับค่าเบี่ยงเบนตามมาตรฐาน**
น้อยกว่า	ใช้ตารางที่ 2.8.5
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 หรือ มากกว่า	1.00

ในกรณีที่ไม่มีผลการทดลองหรือผลการทดลองน้อยกว่า 15 ค่า กำลังอัดของคอนกรีตที่จะต้องผลิต ต้องสูงกว่ากำลังอัดที่กำหนด ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ส่วนเผื่อเมื่อไม่มีผลทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ค่ากำลังอัดที่กำหนด (f_c')	**กำลังอัดที่ต้องเพิ่ม**
น้อยกว่า	ใช้ตารางที่ 2.8.5
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 หรือ มากกว่า	1.00

2.8.2 การออกแบบตามมาตรฐานอเมริกา (ACI 211.3R-97) ในการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตธรรมดา (Normal Weight Concrete) ตามมาตรฐานของอเมริกานี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ออกแบบต้องทราบคุณสมบัติต่าง ๆ กล่าวคือ ปูนซีเมนต์ ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 แต่สามารถใช้ค่าสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป มวลรวม ขนาดคละ ควรมีส่วนคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 ความถ่วงจำเพาะ ทราย ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 128 หิน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 127 ความชื้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 70 และ ASTM C 566 ความละเอียดของทราย ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 125 หน่วยน้ำหนักของมวลรวม ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 29 เมื่อทราบคุณสมบัติต่าง ๆ ดังกล่าวแล้ว จึงหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตตามขั้นตอนที่แสดงในแผนภาพรูปที่ 2



รูปที่ 2.2 แผนภาพการหาสัดส่วนคอนกรีต

(http://mixdesign.cmtc.ac.th/project10/index.html)

ตารางที่ 2.10 ค่าความยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทต่าง ๆ

ประเภทงาน	ค่าความยุบตัว (ซม.)	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
-งานฐานราก กำแพง คอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
-งานฐานรากคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก งานก่อสร้างใต้น้ำ	8.0	2.0
-งานพื้น คาน และผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
-งานเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	10.0	2.0
-งานพื้นถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก	8.0	2.0
-งานคอนกรีตขนาดใหญ่	5.0	2.0

ตารางที่ 2.11 ขนาดโตสุดของวัสดุผสมสำหรับงานก่อสร้างประเภทต่าง ๆ

ขนาดความหนาของโครงสร้าง (ซม.)	ขนาดโตสุดของวัสดุผสม							
	คาน ผนัง และเสา คสล.		ผนังคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก		พื้นถนน คสล. รับน้ำหนักมาก		พื้นคอนกรีตรับน้ำหนักน้อย	
	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.	นิ้ว	มม.
5.0-15.0	½- ¾	12.5-20	¾	20	¾-1	20.25	¾-1 ½	20-40
15.0-30.0	¾-1 ½	20.40	1 ½	40	1 ½	40	1 ½-3	40-75
30.0-75.0	1 ½-3	40-75	3	75	1 ½-3	40-70	3	75
มากกว่า 75.0	1 ½-3	40-75	6	150	1 ½-3	40-75	3-6	75-15

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.12 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่าความยุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ

ค่าความยุบตัว (ซม.)	**ปริมาณน้ำเป็นลิตรต่อคอนกรีต 1 ลบ.ม. สำหรับวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ**							
	3/8” (10 มม.)	½” (12.5 มม.)	¾” (20 มม.)	1” (25 มม.)	1 ½” (40 มม.)	2” (50 มม.)	3” (75 มม.)	6” (150 มม.)
คอนกรีตที่ไม่มีสารกระจายกักฟองอากาศ (Non Air Entraining Concrete)								
3-5	205	200	185	180	160	155	145	125
8-10	225	215	200	195	175	170	160	140
15-18	240	230	210	205	185	180	170	-
ปริมาณฟองอากาศ (%) โดยปริมาตร	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
คอนกรีตที่มีสารกระจายกักฟองอากาศ (Air Entraining Concrete)								
3-5	180	175	165	160	145	140	135	120
8-10	200	190	180	175	160	155	150	135
15-18	215	205	190	185	170	165	160	-
ปริมาณฟองอากาศ (%) โดยปริมาตร	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

ตารางที่ 2.13 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้ใช้ได้สำหรับคอนกรีตในสภาวะเปิดเผยรุนแรง

ชนิดของโครงสร้าง	โครงสร้างที่เปียกตลอดเวลา หรือ มีการเยือกแข็งและการละลายของน้ำ สลับกันบ่อย ๆ (เฉพาะคอนกรีต กระจายกักฟองอากาศเท่านั้น)	โครงสร้างในน้ำทะเล หรือสัมผัสกับซัลเฟต
โครงสร้างบาง ๆ ที่มีเหล็กหุ้มบางกว่า 3 ซม. โครงสร้างอื่นๆ ทั้งหมด	0.45	0.40*
	0.50	0.45*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)	**อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนัก**	
	คอนกรีตไม่กระจาย กักฟองอากาศ	**คอนกรีตกระจาย กักฟองอากาศ**
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

หมายเหตุ ค่าที่ใช้จากตารางนี้ ทำการทดลองจากแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน Ø 15 x 30 ซม. ถ้าแท่งตัวอย่างเป็นแบบลูกบาศก์ ค่ากำลังอัดประลัยจะสูงกว่าค่าในตารางประมาณ 20%

ตารางที่ 2.15 ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต

ขนาดโตสุดของหิน	**ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต สำหรับค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายต่าง ๆ กัน**			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8” (10 มม.)	0.50	0.48	0.46	0.44
½” (12.5 มม.)	0.59	0.57	0.55	0.53
¾” (20 มม.)	0.66	0.64	0.62	0.60
1” (25 มม.)	0.71	0.69	0.67	0.65
1 ½”(40 มม.)	0.76	0.74	0.72	0.70
2” (50 มม.)	0.78	0.76	0.74	0.72
3” (75 มม.)	0.81	0.79	0.77	0.75
6” (150 มม.)	0.87	0.85	0.83	0.81

หมายเหตุ ค่าที่กำหนดให้ เป็นค่าสำหรับงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่ว ๆ ไป สำหรับงานคอนกรีตที่ทำได้ง่ายกว่า เช่น ถนน พื้น เป็นต้น อาจเพิ่มค่าเหล่านี้ขึ้นได้อีก 10 เปอร์เซ็นต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.16 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณ

ขนาดโตสุดของหิน	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)	
	คอนกรีตที่ไม่ใช้สารกระจายกักฟองอากาศ	คอนกรีตที่ใช้สารกระจายกักฟองอากาศ
3/8” (10 มม.)	2,285	2,190
½” (12.5 มม.)	2,315	2,235
¾” (20 มม.)	2,355	2,280
1” (25 มม.)	2,375	2,315
1 ½” (40 มม.)	2,420	2,355
2” (50 มม.)	2,445	2,375
3” (75 มม.)	2,465	2,400
6” (150 มม.)	2,505	2,435

ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนในการออกแบบ

ขั้นตอนในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต สามารถสรุปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ (1)

รวบรวมความต้องการของผู้ออกแบบหรือผู้รับเหมา เช่น
- กำลังอัด
- ค่ายุบตัว
- ขนาดใหญ่สุดของหินที่จะใช้
- ใส่น้ำยาผสมคอนกรีตหรือไม่

ขั้นตอนที่ (2)

1) หาปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อให้ได้ค่ายุบตัวตามต้องการ
2) หาค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดตามต้องการ จากกราฟอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และค่ากำลังอัด รูปที่ 11.9
3) หาค่าน้ำหนักซีเมนต์ = ปริมาณน้ำ/ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ขั้นตอนที่ (3)

ปริมาตรซีเมนต์ = น้ำหนักปูนซีเมนต์ / ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์

ขั้นตอนที่ (4)

ปริมาตรทราย = (380 หรือ 400) – ปริมาตรปูนซีเมนต์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ (5)

น้ำหนักทราย = ปริมาตรทราย x ความถ่วงจำเพาะของทราย

ขั้นตอนที่ (6)

ปริมาตรหิน = 1000 – ปริมาตรซีเมนต์ – ปริมาตรน้ำ** - ปริมาตรทราย

ขั้นตอนที่ (7)

น้ำหนักหิน = ปริมาตรหิน x ความถ่วงจำเพาะของหิน

ขั้นตอนที่ (8)

หาปริมาตรน้ำยาที่ใช้

* คอนกรีต 1 ลบ.ม. มีปริมาตร 1000 ลิตร

** ปริมาตรน้ำ = น้ำหนักน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.9 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

ก้อนตัวอย่างมาตรฐานที่ทำเพื่อทดสอบกำลังอัดที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายมี 2 รูปทรงคือ

2.9.1 รูปทรงกระบอก เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอเมริกา ขนาดที่ใช้คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

2.9.2 รูปทรงลูกบาศก์ เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษขนาดที่ใช้คือขนาด 15x15x15 ซม. กำลังอัดของ 2 รูปทรงนี้จะแตกต่างกัน ถึงแม้จะใช้ส่วนผสมของคอนกรีตเดียวกัน โดยกำลังอัดด้วยตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบ

2.9.2.1 แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกดก่อให้เกิด Confining Stress ซึ่งจะมีผลทำให้ค่ากำลังอัดของรูปทรงลูกบาศก์ที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง

2.9.2.2 องค์ประกอบเรื่องความชะรูด กล่าวคือเนื่องจากรูปทรงกระบอกมีความาสูงมากกว่าด้านกว้างทำให้ผลด้าน Confining Stress ลดลงอย่างมาก ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (มาตรฐาน วสท.) ได้ให้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์กับกำลังอัดรูปทรงกระบอก

รูปที่ 2.3 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

2.9.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง

1. คุณสมบัติของวัสดุผสม

ปูนซีเมนต์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมาก ทั้งนี้เพราะว่าปูนซีเมนต์แต่ละประเภท จะห่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้แม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกัน แต่มีความละเอียดแตกต่างกันแล้วอัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตก็จะแตกต่างไปด้วยคือ ถ้าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน

มวลรวม มวลรวมมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์ อย่างไรก็ดีมวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อย ซึ่งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าพวกกรวกที่มีผิวเกลี้ยง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน เพราะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก สำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถเทได้

เท่ากัน ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ จึงมักให้กำลังดีกว่า ส่วนขนาดคละของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตในแง่ที่ว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีส่วนขนาดคละไม่เหมาะสม คือมีส่วนละเอียดมากเกินไปนั้น จะต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีส่วนคละที่ดี เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้เท่ากัน อีกทั้งยังก่อให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวนมากกว่าส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงได้ นอกจากนี้ความสะอาดของมวลรวมก็จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต เช่นกัน

น้ำ น้ำมีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใส และปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ น้ำที่เกลือ คลอไรด์ผสมอยู่ จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะต้นสูง น้ำขุ่นหรือน้ำที่มีสารแขวนลอยปนอยู่ จะทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

2. การทำคอนกรีต

การชั่งตวงส่วนผสม หากใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากอัตราผสมคอนการีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้ อัตราส่วนผสมจะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง โดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเพราะ หากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะลำเลียง หรือเท จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตแน่นตัวหากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะทำให้เกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงได้ หรือหากใช้วิธีทำให้คอนกรีตแน่นตัวที่ไม่เหมาะสม ก็สามารถทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นในเนื้อคอนกรีตได้ ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ

3. การบ่มคอนกรีต

ความชื้น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และนั้นจะค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ถ้ามีความชื้นอยู่ตลอดเวลา แต่ถ้าซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตไม่มีความชื้นอยู่คอนกรีตก็จะไม่มีการเพิ่มกำลังอีกต่อไป ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที

อุณหภูมิ ถ้าหากอุณหภูมิสูงในขณะบ่มก็จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตถูกเร่งให้เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เวลาที่ใช้ในการบ่ม ถ้าหากสามารถบ่มคอนกรีตมีให้ชื้อนอยู่ตลอดเวลาได้ยิ่งนานเท่าใดก็จะยิ่งได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย การที่กำลังอัดไม่เป็นไปตามข้อกำหนด คือได้ค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดนี้ อาจมีสาเหตุมาจากหลายๆ ประการอันได้แก่

1. ใช้สัดส่วนผสมที่ไม่เหมาะสม
2. ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ
3. ควบคุมปริมาณฟองอากาศไม่ดี
4. การผสมไม่ดีพอ
5. มีสารอินทรีย์ต่างๆ มาเกินข้อกำหนด
6. ใช้หินทรายที่สกปรก
7. ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่ไม่มีประสิทธิภาพ
8. ไม่ได้ปรับความชื้นในมวลรวม
9. การอัดแน่นไม่ถูกต้อง
10. การบ่มไม่เพียงพอ
11. การลำเลียงและการทดสอบไม่ถูกต้อง
12. อุณหภูมิผันแปรไป

รูปที่ 2.4 ลักษณะการบ่มคอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างคอนกรีต

ลักษณะการชำรุดแตกหักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่รับแรงอัด มักแตกออกเป็นรูปกรวยคู่ (Shear Failure) โดยมีปลายกรวยอยู่ที่กึ่งกลางของทรงกระบอก ดังรูป 2.1 แสดงลักษณะการแตกเป็นรูปกรวยคู่ โดยเกิดจากการถูกเฉือนในระนาบที่เอียงกับแรงกด อันเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง วัสดุผสมและความเสียดทานภายใน ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่าง อาจเป็นการแตกแบบแยกออก(Spliting Failure)

รูป 2.5 ลักษณะการแตกเป็นรูปกรวยคู่ โดยเกิดจากการถูกเฉือนในระนาบที่เอียงกับแรงกด (https://expeditionworkshed.org/workshed/ordinary-concrete-cylinder-compression-test)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. แบบหล่อแท่งทดสอบ ตามมาตรฐานอังกฤษเป็นแบบหล่อรูปทรงกระบอก มีขนาด 30 x 15 ซม.
2. แท่งกระทุ้ง (Tamping rod) มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร ปลายกลมมนขั้นตอนการทดลอง
    1) ประกอบแบบหล่อเข้าด้วยกัน ขันน๊อตให้ยึดแน่น ใช้ผ้าชุบน้ำมันทาภายในบาง ๆ เพื่อป้องกัน ไม่ให้คอนกรีตติดกับแบบ แล้วนำแบบหล่อนี้ไปวางบนพื้นราบ
    2) เทคอนกรีตที่ผสมแล้ว (ตามส่วนผสมที่คำนวณได้) ใส่ลงในแบบหล่อโดยแบ่งใส่เป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรประมาณ 1/3 ของปริมาตรของแบบหล่อรูปทรงกระบอกกระทุ้งคอนกรีตชั้นละ 25 ครั้ง โดยใช้ด้านปลายมนของเหล็กกระทุ้งให้ทั่วพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตและให้ลึกเลยเข้าไปในคอนกรีตชั้นล่างเล็กน้อย ชั้นบนต้องใส่คอนกรีตให้สูงกว่าขอบแบบตลอดเวลาที่กระทุ้งหลังจากนั้นปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ แล้วปิดด้วยกระจกหรือกระดาษอาบน้ำมันเพื่อป้องกัน

น้ำระเหยทิ้งไว้ 24 ชั่งโมง จึงถอดแบบหล่อออกแล้วนำแท่งคอนกรีตไปบ่มทันที จนถึงเวลาที่ต้องการทดสอบ ปกติใช้เวลา 7 วัน และ 28 วัน

การทดลอง

1. ทำการวัดขนาดของแต่ละด้านของก้อนตัวอย่าง
2. นำก้อนตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักและจดบันทึกค่า
3. นำแท่งทดสอบมาติดตั้งเครื่อง Compressometer แล้วจึงยกไปวางบนแท่นกดสัมผัสหน้าแท่นทดสอบตั้งเกย์ Compressometer ไว้ที่ขีด 0 แล้วจึงเดินเครื่องอย่างสม่ำเสมอในอัตราประมาณ 1.43 – 3.47 กก./ซม.2 วินาที บันทึกค่าต่าง ๆ ไว้เพื่อนำไปพล๊อต Stress-Steain Curve ต่อไปเมื่อกดแท่งทดสอบจนถึง Yeild Point แล้วให้ถอดเครื่อง Compressmeter ออก แล้วค่อย ๆ เพิ่มน้ำหนักจนแตก บันทึกน้ำหนักสูงสุดที่แท่งทดสอบสามารถรับได้ และ Sketch ลักษณะการแตกแท่งทดสอบด้วย

การคำนวณ

1. กำลังอัดวัสดุ P / A

ตาราง 2.17 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

ตัวอย่าง	อายุ (วัน)	ขนาดหน้าตัด (ซม.)	ความสูง (ซม.)	น้ำหนัก (กก.)	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	แรงอัดประลัย (KN.)	น้ำหนักกดสูงสุด (กก.)	หน่วยแรงอัดประลัย (กก./ซม)
1								
2								
3								
4								
5								
6								

2.10 การผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

2.10.1 การออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรง (Engineering Design)

หลักการออกแบบ Pre-Stressed Concrete ระบบคอนกรีตแบบ Pre-Stress Concrete เป็นการอัดแรงเข้าในคอนกรีตโดยลวดเหล็กแรงดึงสูง (PC Wire หรือ PC Strand) ให้ได้ปริมาณแรงที่กำหนด ซึ่งปกติจะดึงแรง 70% ของค่าแรงดึงสูงสุด (Breaking Load) ทำการจับยึดปลายลวด

ทั้ง 2 ด้าน ด้วยลิ่มลวด ซึ่งในขั้นนี้จะเกิดแรงดึงในเส้นลวด (Tension) จากนั้นทำการ หล่อคอนกรีตบนแบบหล่อ เมื่อครบอายุบ่มก็ทำการถ่ายแรงดึงภายในเส้นลวดโดยการปลดลิ่มลวดซึ่งแรงจะถ่ายเข้าไปในคอนกรีตเกิดเป็นแรงอัด (Compression) ภายในคอนกรีตดังรูป 2.2 แสดงลักษณะการอัดแรงระบบ Pre-Stressed Concrete ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ มีคุณสมบัติสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

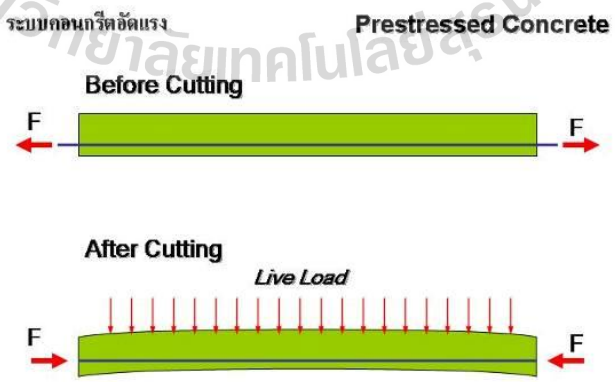
2.10.2 สิ่งสำคัญในระบบพื้นคอนกรีตอัดแรง

1. แรงดึงในเสนลวด
2. ตำแหน่งลวด
3. คุณภาพคอนกรีต
4. อายุบ่ม

2.10.3 ระบบพื้นอัดแรง จะมีอยู่ 2 ระบบดังนี้

2.10.3.1 ระบบ Pre-tension จะเป็นการร้อยลวดเหล็กที่จะดึงลงในท่อจากนั้นจะทำการดึงลวดนั้นตามระยะการยืดของลวดแล้วจึงเทคอนกรีตลงไป เมื่อเทเสร็จพร้อมทั้งบ่มคอนกรีตได้ที่แล้วจึงค่อยตัดลวดเพื่อส่งถ่ายแรงอัดเข้าสู่คอนกรีต

2.10.3.2 ระบบ Post-tension จะเป็นการร้อยลวดเหล็กที่จะดึงลงในท่อก่อนการเทคอนกรีตจากนั้นจึงเทคอนกรีตรอให้คอนกรีตบ่มตัวจนได้ที่แล้วดึงลวดโดยวัดจากระยะค่าการยืดของลวด จากนั้นจึงยึดลวดเอาไว้กับขอบพื้นคาน พอดึงลวดครบทุกด้านแล้วค่อยตัดลวดเพื่อส่งถ่ายแรงอัดเข้าสู่คอนกรีต



รูป 2.6 ลักษณะการอัดแรงระบบ Pre-Stressed Concrete
(บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด)

ตาราง 2.18 ข้อกำหนดทั่วไปของแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

รายการ	Width 30, 60 cm.	Width 120 cm.
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่ 28 วัน CYLINDER CUBE	 ไม่ต่ำกว่า 350 ksc. ไม่ต่ำกว่า 400 ksc.	 ไม่ต่ำกว่า 400 ksc. ไม่ต่ำกว่า 400 ksc.
กำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะถ่ายแรง CYLINDER CUBE	 ไม่ต่ำกว่า 250 ksc. ไม่ต่ำกว่า 300 ksc.	 ไม่ต่ำกว่า 250 ksc. ไม่ต่ำกว่า 300 ksc.
ลวดเหล็กแรงดึงสูง (PC WIRE)	มาตรฐาน มอก.95-2540	-
ลวดเหล็กตีเกลียวแรงดึงสูง (PC STRAND)	มาตรฐาน มอก.420-2540	มาตรฐาน มอก.420-2540
การคำนวณความสามารถในการรับน้ำหนัก บรรทุกปลอดภัย	ACI.318-95	ACI.318-95

2.10.4 กระบวนการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

โดยขั้นตอนของกระบวนการผลิตจะเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 – 7 สวนขั้นตอนที่ 8 - 9 เป็นส่วนของการขนส่งและติดตั้ง

1. Bed Preparing การเตรียมแทนผลิต
2. Stressing การดึงลวด
3. Concrete Mixing การผสมคอนกรีต
4. Casting การหล่อคอนกรีต
5. Curing การบ่ม
6. Cutting การตัด
7. Transporting to Stock การยกย้ายเข้า Stock
8. Delivery การขนส่ง
9. Installation / Testing การติดตั้ง / การทดสอบ

บทที่ 3
วิธีดำเนินการศึกษา

3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

3.1.2 มวลรวมหยาบ

3.1.3 มวลรวมละเอียด

3.1.4 เถ้าลอย

3.1.5 น้ำ

3.1.6 สารผสมเพิ่ม

3.1.7 ลวดเหล็กอัดแรง

3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.1.9 รถบรรทุกคอนกรีต

3.1.10 เครื่องผสมคอนกรีต

3.1.11 เครื่องดึงลวด

3.1.12 เครื่องเขย่าคอนกรีต

3.1.13 เครื่องจี้คอนกรีต

3.1.14 เครื่องกดทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

3.1.15 เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์

3.1.16 อ่างบ่มตัวอย่างคอนกรีต ชุดแบ่งกั้นความยาวของคอนกรีต

3.1.17 ลิ่มลวด

3.1.18 แท่นผลิต

3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ

1. เตรียมวัตถุดิบโดยการร่อนซีเมนต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ให้ได้ปริมาณมากพอที่จะทำงานวิจัยได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.1การร่อนซีเมนต์ก่อนนำไปผสมคอนกรีต

(http://rapidset.blogspot.com/2012/07/blog-post.html)

2. นำมวลรวมหยาบมาเข้ากระบวนการวิเคราะห์ส่วนคละของมวลรวมหยาบ และความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ

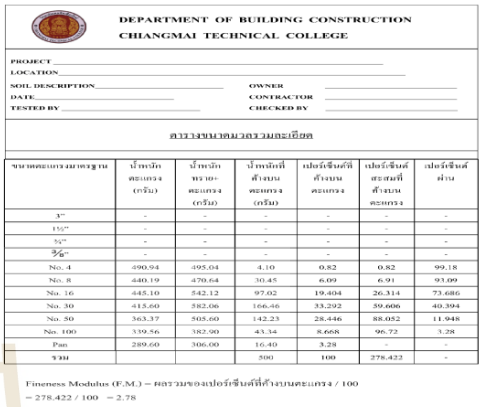
รูปที่ 3.2 การร่อนผ่านตะแกรงของมวลรวมหยาบ

(http://tunjai.com/sumfile/index.php?)

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์หาสัดส่วนคละและความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ

ตะแกรง	**ขนาดช่องเปิด** (มิลลิเมตร)	**น้ำหนัก** ตะแกรง (กรัม)	**น้ำหนักตะแกรง** +น้ำหนักทราย (กรัม)	**น้ำหนักค้าง** (กรัม)	**ร้อยละค้าง** (%)	**ร้อยละค้าง** สะสม (%)	**ร้อยละผ่าน** สะสม (%)
1		5,310	0	0	0	0	100
$^{3}/_{4}$		5,580	5,630	50	1.25	1.25	98.75
$^{1}/_{2}$		6,000	8,930	2,930	73.25	74.5	26.75
$^{3}/_{8}$		5,740	6,650	910	22.75	97.25	2.75
$^{1}/_{4}$		5,750	5,850	100	2.5	99.75	0.25
ถาดรอง		5,030					
น้ำหนักมวลละเอียด = 4,000 กรัม						272.75	
โมดูลัสความละเอียด = 272.75 / 100 = 2.7							

3. นำมวลรวมละเอียดการวิเคราะห์ส่วนคละของมวลรวมละเอียด (ทราย) และความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด



DEPARTMENT OF BUILDING CONSTRUCTION
CHIANGMAI TECHNICAL COLLEGE

PROJECT
LOCATION
SOIL DESCRIPTION
DATE
TESTED BY
OWNER
CONTRACTOR
CHECKED BY

ตารางขนาดมวลรวมละเอียด

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน	น้ำหนักตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักทราย+ตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ที่ค้างบนตะแกรง	เปอร์เซ็นต์สะสมที่ค้างบนตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ผ่าน
3"	-	-	-	-	-	-
1½"	-	-	-	-	-	-
¾"	-	-	-	-	-	-
⅜"	-	-	-	-	-	-
No. 4	490.94	495.04	4.10	0.82	0.82	99.18
No. 8	440.19	470.64	30.45	6.09	6.91	93.09
No. 16	445.10	542.12	97.02	19.404	26.314	73.686
No. 30	415.60	582.06	166.46	33.292	59.606	40.394
No. 50	363.37	505.60	142.23	28.446	88.052	11.948
No. 100	339.56	382.90	43.34	8.668	96.72	3.28
Pan	289.60	306.00	16.40	3.28	-	-
รวม			500	100	278.422	-

Fineness Modulus (F.M.) = ผลรวมของเปอร์เซ็นต์ที่ค้างบนตะแกรง / 100
= 278.422 / 100 = 2.78

รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์หาสัดส่วนคละและความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด
(http://mixdesign.cmtc.ac.th/project4/index.html)

4. ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจากข้อมูลที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ส่วนคละ ความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่จะนำมาทำการทดสอบ
5. นำวัสดุที่จะใช้ คือปูนซีเมนต์ เถ้าลอย สารผสมเพิ่ม และน้ำ มาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่กำหนด ดังนี้
   - อัตราส่วนเถ้าลอยมาผสมกับปูนซีเมนต์ในสัดส่วน ปูนซีเมนต์ 65% + เถ้าลอย 35% ,ปูนซีเมนต์ 70% + เถ้าลอย 30% ,ปูนซีเมนต์ 75% + เถ้าลอย 25% และปูนซีเมนต์ 80% + เถ้าลอย 20% โดยคลุกเคล้าให้เข้าจนเป็นเนื้อเดียวกัน โดยถือว่าเป็นหนึ่งส่วน
   - อัตราส่วนสารผสมเพิ่ม 1,100 – 1,300 มิลลิลิตร ต่อปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 100 กิโลกรัม

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนส่วนผสมการผลิตคอนกรีตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

ลำดับที่	อัตราส่วนซีเมนต์:มวลรวมหยาบ:มวลรวมละเอียด:เถ้าลอย:น้ำ:สารผสมเพิ่มต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร	จำนวนตัวอย่าง
1	400 : 0 : 1,200 : 750 : 170 : 4,800 kg. (สารเร่งกำลังอัดช่วงปลาย)	6
2	380 : 20 : 1,135 : 745 : 160 : 4.950 kg	6
3	380 : 20 : 1,135 : 745 : 160 : 4.800 kg	6
4	380 : 20 : 1,135 : 745 : 160 : 4.650 kg	6
5	370 : 30 : 1,135 : 745 : 160 : 4.950 kg	6
6	370 : 30 : 1,135 : 745 : 160 : 4.800 kg	6
7	370 : 30 : 1,135 : 745 : 160 : 4.650 kg	6
8	360 : 40 : 1,135 : 750 : 160 : 4.950 kg.	6
9	360 : 40 : 1,135 : 750 : 160 : 4.800 kg.	6
10	360 : 40 : 1,135 : 750 : 160 : 4.650 kg.	6
11	350 : 50 : 1,135 : 755 : 160 : 4.950 kg.	6
12	350 : 50 : 1,135 : 755 : 160 : 4.800 kg.	6
13	350 : 50 : 1,135 : 755 : 160 : 4.650 kg.	6
14	330 : 70 : 1,110 : 785 : 160 : 4.950 kg.	6
15	330 : 70 : 1,110 : 785 : 160 : 4.800 kg.	6
16	330 : 70 : 1,110 : 785 : 160 : 4.650 kg.	6
17	320 : 80 : 1,110 : 785 : 160 : 4.950 kg.	6
18	320 : 80 : 1,110 : 785 : 160 : 4.800 kg.	6
19	320 : 80 : 1,110 : 785 : 160 : 4.650 kg.	6

- จากนั้นนำส่วนผสมดังกล่าวมาผสมกับมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดลงในเครื่องผสมคอนกรีต
- เสร็จแล้วเติมน้ำลงไปในอัตราส่วนที่หาได้จาก Water Cement ratio โดยค่อยๆเติมน้ำลงไปในเครื่องผสมคอนกรีตทีละนิดเพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อนจะทำให้ส่วนผสมคอนกรีตไม่คลุกเคล้าเข้ากัน

- เมื่อส่วนผสมทั้งหมดทำการคลุกเคล้าเข้ากันแล้วก็เติมสารผสมเพิ่มเข้าไปในอัตราส่วน สารผสมเพิ่ม 1,100 – 1,300 มิลลิลิตร ต่อ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 100 กิโลกรัม
- ทำการเตรียมแท่นผลิตเพื่อให้พร้อมต่อการทดสอบโดยอันดับแรก ทำการเก็บสิ่งแปลกปลอมออกจากแท่นผลิตจากนั้น ก็ทำการวางลวดเหล็กอัดแรงลงไปและทำการสอดลวดเหล็กอัดแรงไปที่รูของชุดแบ่งกั้นความยาวของคอนกรีต ทำการดึงลวดอัดแรงโดยจะใช้แรงดึง 70 % ของแรงดึงสูงสุดก่อนการเทคอนกรีต จากนั้นก็ทำการใช้ลิ่มลวดล็อกเพื่อไม่ให้ลวดเหล็กอัดแรงเกิดการดัดกลับ และใส่หูยกทั้งสองด้านก่อนทำการเทคอนกรีต
- เมื่อเตรียมแท่นผลิตเสร็จแล้วก็เทคอนกรีตที่ผสมไว้ลงไปจากนั้นทำการเกลี่ยให้เท่าแบบและใช้เครื่องจี้คอนกรีตและเครื่องสั่นคอนกรีตเพื่อให้คอนกรีตแทรกซึมไปยังตามขอบตามมุมของแบบหล่อแต่จะไม่ทำการจี้และสั่นนานเกินไป
- ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตแบบรูปทรงกระบอกไว้อย่างน้อย 3 - 6 ตัวอย่าง
- ทิ้งให้คอนกรีตก่อตัวเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ซึ่งถ้ากำลังอัดที่ได้ต้องไม่ต่ำกว่า 180 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ต่อตัวอย่าง 3 ตัวอย่างจึงจะไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายเมื่อทำการตัดลวดอัดแรงและถอดชิ้นงานออกจากแบบหล่อชิ้นงานและทำการตรวจสอบกำลังอัดที่ 28 วันเพื่อให้ทราบว่าที่กำลังอัดที่ 28 วันจะมีกำลังอัดของคอนกรีตเท่าไร
- จากนั้นทำการตัดลวดอัดแรงและถอดชิ้นงานออกจากแบบหล่อชิ้นงาน โดยไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสีย

6. นำผลที่ได้มาศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้เถ้าลอยเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์โดยมีสารผสมเพิ่มเป็นตัวเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอย่างรวดเร็ว
7. สรุปผลการศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เถ้าลอยและสารผสมเพิ่มเพื่อเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ
8. สรุปผลการศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ
9. คำนวณต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและสารผสมเพิ่มเปรียบเทียบกับต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์

การศึกษาวิจัยหาส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบโดยใช้เถ้าลอยและสารผสมเพิ่มแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ได้ทำการทดสอบตัวอย่างในอัตราส่วนผสมของเถ้าลอย ปูนซีเมนต์ และสารผสมเพิ่มชนิดเร่งกำลังอัดช่วงต้น โดยเริ่มจากอัตราส่วนเดิมที่ทำการผลิตมาตามปกติก่อนจะทำการศึกษา คือ ใช้หิน ทราย ปูนซีเมนต์ น้ำ และสารผสมชนิดหน่วงกำลังอัดช่วงต้นและเพิ่มกำลังอัดช่วงปลายในอัตราส่วนน้ำหนัก 400:170: 750: 1,200: 4,800 ซึ่งกำหนดให้เป็นตัวอย่างชื่อ Mix 1 เพื่อเป็นการเปรียบเทียบส่วนผสมใหม่กับส่วนผสมเดิมที่ ได้ทำการผลิตมาก่อน แล้วจึงทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและสารผสมเพิ่มชนิดเร่งกำลังอัดช่วงต้นในอัตราส่วนน้ำหนัก 380:20: 4,950 และมีส่วนผสมในอัตราส่วนอื่นๆที่ช่อง Mix2 ไปจนถึง Mix19 ตามลำดับแสดงดังตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ กก.	เถ้าลอย กก.	น้ำ กก.	ทราย กก.	หิน 3/4” กก.	สารผสมเพิ่ม กก.	จำนวนเท่าของสารผสมเพิ่มต่อปูนซีเมนต์
Mix 1	400	0	170	750	1,200	4,800	12
Mix 2	380	20	160	745	1,135	4,950	13.03
Mix 3	380	20	160	745	1,135	4,800	12.63
Mix 4	380	20	160	745	1,135	4,650	12.24
Mix 5	370	30	160	745	1,135	4,950	13.38
Mix 6	370	30	160	745	1,135	4,800	12.97
Mix 7	370	30	160	745	1,135	4,650	12.57
Mix 8	360	40	160	750	1,135	4,950	13.75
Mix 9	360	40	160	750	1,135	4,800	13.33
Mix 10	360	40	160	750	1,135	4,650	12.92
Mix 11	350	50	160	755	1,135	4,950	14.14
Mix 12	350	50	160	755	1,135	4,800	13.71

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ กก.	เถ้าลอย กก.	น้ำ กก.	ทราย กก.	หิน 3/4" กก.	สารผสมเพิ่ม กก.	จำนวนเท่าของสารผสมเพิ่มต่อปูนซีเมนต์
Mix 13	350	50	160	755	1,135	4,650	13.29
Mix 14	330	70	160	785	1,110	4,950	15.00
Mix 15	330	70	160	785	1,110	4,800	14.55
Mix 16	330	70	160	785	1,110	4,650	14.09
Mix 17	320	80	160	785	1,110	4,950	15.47
Mix 18	320	80	160	785	1,110	4,800	15.00
Mix 19	320	80	160	785	1,110	4,650	14.53

4.1 ผลการทดสอบกำลังอัด

จากการดำเนินการทดสอบก้อนตัวอย่างคอนกรีตแบบทรงกระบอกโดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก.213-2552 และ มาตรฐาน ASTM C 39 – 83 Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens ของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุบ่ม 1 วันและ 28 วัน ในแต่ละอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

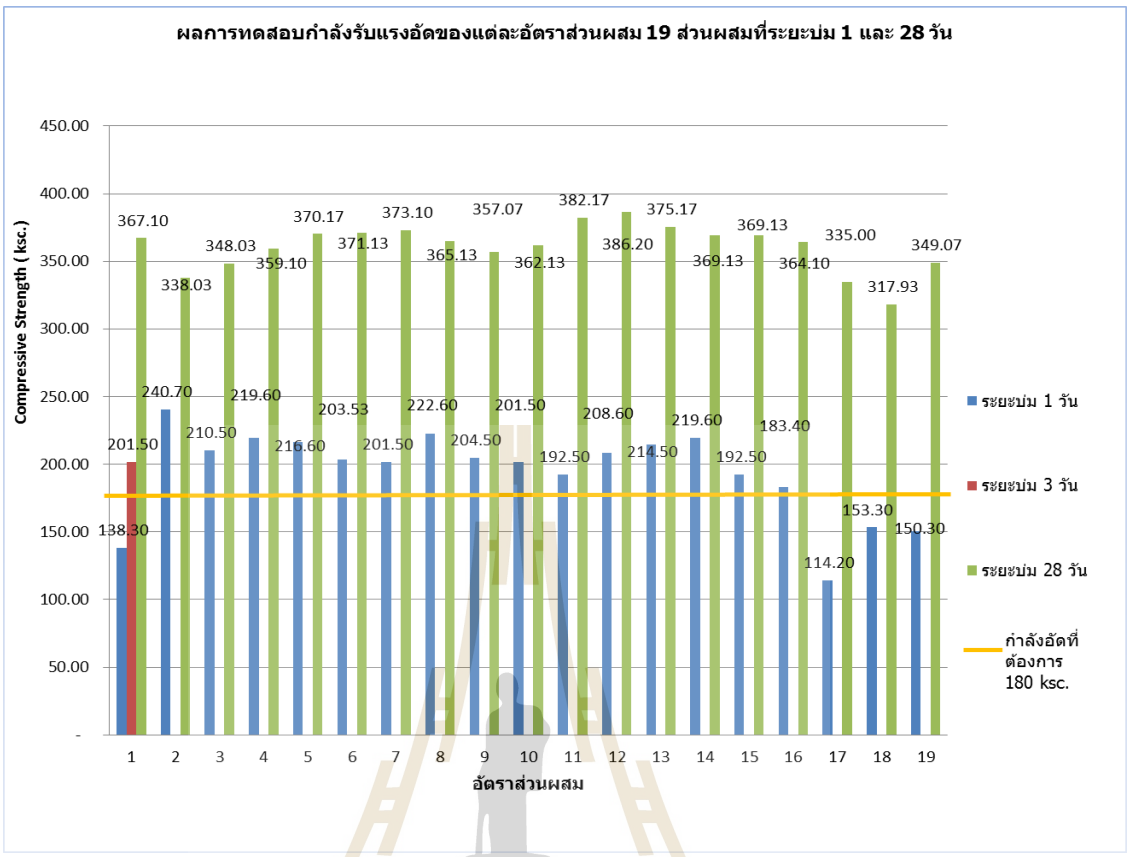
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตัวอย่าง	ระยะบ่ม 1 วัน กก./ตร.ซม.	ระยะบ่ม 3 วัน กก./ตร.ซม.	ระยะบ่ม 28 วัน กก./ตร.ซม.	กำลังอัดที่ต้องการ 1 วัน (ก่อนการตัดลวดอัดแรง) กก./ตร.ซม.
Mix 1	138.3	201.5	367.1	ไม่น้อยกว่า 180
Mix 2	240.7		338.03	
Mix 3	210.5		348.03	
Mix 4	219.6		359.10	
Mix 5	216.6		370.17	
Mix 6	203.53		371.13	

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ระยะบ่ม 1 วัน กก./ตร. ซม.	ระยะบ่ม 3 วัน กก./ตร. ซม.	ระยะบ่ม 28 วัน กก./ตร. ซม.	กำลังอัดที่ต้องการ 1 วัน (ก่อนการตัดลวดอัดแรง) กก./ตร.ซม.
Mix 7	201.5		373.10	
Mix 8	222.6		365.13	
Mix 9	204.5		357.07	
Mix 10	201.5		362.13	
Mix 11	192.5		382.17	
Mix 12	208.6		386.20	
Mix 13	214.5		375.17	
Mix 14	219.6		369.13	
Mix 15	192.5		396.13	ไม่น้อยกว่า 180
Mix 16	183.4		364.10	
Mix 17	114.2		335.00	
Mix 18	153.3		317.93	
Mix 19	150.3		349.07	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.1 กำลังรับแรงอัดของแต่ละอัตราส่วนผสม 19 ส่วนผสมที่ระยะบ่ม 1 และ 28 วัน

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

ในการศึกษาการทดลองนี้จะวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์ทั้งราคาต้นทุนวัสดุและค่าแรงงานในกรณีศึกษาที่มีผลการทดลองค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบที่ผ่านเกณฑ์ 180 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรที่อายุบ่ม 1 วัน และ 350 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรที่อายุบ่ม 28 วันตามมาตรฐาน มอก.213-2552 และ มาตรฐาน ASTM C 39 – 83 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4 ถึงตารางที่ 4.8 โดยมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบที่มีสัดส่วนผสมคอนกรีตโดยสัดส่วนที่ออกแบบการทดลองสามารถผลิตและเก็บชิ้นงานออกจากแบบหล่อชิ้นงานได้ภายใน 1 วัน

วัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตสำหรับแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

- ปูนซีเมนต์ 1,850 บาทต่อตัน (ข้อมูลจากห้างหุ้นส่วนจำกัดบ้านเพชรก่อสร้าง)
- เถ้าลอยจากแม่เมาะ 890 บาทต่อตัน (ข้อมูลจากห้างหุ้นส่วนจำกัดบ้านเพชรก่อสร้าง)
- น้ำประปา 0.1 บาทต่อลิตร (ข้อมูลจากห้างหุ้นส่วนจำกัดบ้านเพชรก่อสร้าง)

- หิน ¾” นิ้ว 350 บาทต่อตัน (ข้อมูลจากห้างหุ้นส่วนจำกัดบ้านเพชรก่อสร้าง)
- ทรายหยาบ 400 บาทต่อตัน (ข้อมูลจากห้างหุ้นส่วนจำกัดบ้านเพชรก่อสร้าง)
- สารผสมเพิ่ม (ชนิดเร่งกำลังอัดช่วงต้น) 25 บาทต่อลิตร (ข้อมูลจากห้างหุ้นส่วนจำกัดบ้านเพชรก่อสร้าง)

ค่าใช้จ่ายอื่นๆ (โดยประมาณ)

- ค่าแรงคนงานและค่าไฟฟ้าคิดราคาเหมารวม 2,750 บาท (ในการผลิตต่อวันต่อครั้ง)
- ค่าดำเนินการผสมคอนกรีต 220 บาท (ในการผลิตต่อลูกบาศก์เมตร)

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบในกรณีที่ใช้คอนกรีต Mix1

- ค่าปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัม x 1.85 บาท/กิโลกรัม = 740 บาท
- ค่าเถ้าลอย 0 กิโลกรัม x 0.89 บาท/กิโลกรัม = 0.0 บาท
- ค่าน้ำประปา 170 ลิตร x 0.1 บาท/ลิตร = 17 บาท
- ค่าหิน ¾” นิ้ว 1,200 กิโลกรัม x 0.35 บาท/กิโลกรัม = 420 บาท
- ค่าทรายหยาบ 785 กิโลกรัม x 0.4 บาท/กิโลกรัม = 314 บาท
- ค่าสารเร่งกำลังอัดช่วงปลาย 4.8 ลิตร x 25 บาท/ลิตร = 120 บาท
- ค่าแรงงานและค่าไฟฟ้า (2,750 x 2) / 5 = 1,110 บาท
- ค่าดำเนินการผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร x 220 บาท = 220 บาท

  รวม = 2,931 บาท

ดังนั้นรวมราคาต่อลูกบาศก์เมตรทั้งหมด = 2,931 บาท

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบในกรณีที่ใช้คอนกรีต Mix16

- ค่าปูนซีเมนต์ 330 กิโลกรัม x 1.85 บาท/กิโลกรัม = 610.5 บาท
- ค่าเถ้าลอย 70 กิโลกรัม x 0.89 บาท/กิโลกรัม = 62.3 บาท
- ค่าน้ำประปา 160 ลิตร x 0.1 บาท/ลิตร = 16 บาท
- ค่าหิน ¾” นิ้ว 1,100 กิโลกรัม x 0.35 บาท/กิโลกรัม = 385 บาท
- ค่าทรายหยาบ 785 กิโลกรัม x 0.4 บาท/กิโลกรัม = 314 บาท
- ค่าสารเร่งกำลังอัดช่วงต้น 4.65 ลิตร x 25 บาท/ลิตร = 116.25
- ค่าแรงงานและค่าไฟฟ้า (2,750 x 2) / 5 = 1,100 บาท
- ค่าดำเนินการผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร x 220 บาท = 220 บาท

รวม = 2,824.05 บาท

ดังนั้นรวมราคาต่อลูกบาศก์เมตรทั้งหมด = 2,824.05 บาท

ราคาต้นทุนระหว่าง Mix1 และ Mix16 ต่างกัน 2,931 – 2,824.05 = 106.95 บาท

หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่ามีต้นทุนลดลง = 106.95 บาท

ตารางที่ 4.3 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix2

วัสดุ และ ดำเนินการ	**คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง**		**คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง**	
ซีเมนต์	400.00	740.00	380.00	703.00
เถ้าลอย	-	-	20.00	17.80
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	745.00	298.00
หิน	1,200.00	420.00	1,135.00	397.25
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	120.00	4,950.00	123.75
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,875.80**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,875.80 = 55.20 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

ตารางที่ 4.4 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix3

วัสดุ และ ดำเนินการ	**คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง**		**คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง**	
ซีเมนต์	400.00	740.00	380.00	703.00
เถ้าลอย	-	-	20.00	17.80
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ทราย	785.00	314.00	745.00	298.00
หิน	1,200.00	420.00	1,135.00	397.25
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	120.00	4,800.00	120.00
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,872.05**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,872.05 = 58.95 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

ตารางที่ 4.5 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix4

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ซีเมนต์	400.00	740.00	380.00	703.00
เถ้าลอย	-	-	20.00	17.80
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	745.00	298.00
หิน	1,200.00	420.00	1,135.00	397.25
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	120.00	4,650.00	116.20
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,868.30**
ผลต่างต้นทุน	**2,931.00 – 2,868.30 = 62.70 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

ตารางที่ 4.6 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix5

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ซีเมนต์	400.00	740.00	370.00	684.50
เถ้าลอย	-	-	30.00	26.70
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	745.00	298.00
หิน	1,200.00	420.00	1,135.00	397.25
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	120.00	4,950.00	123.75
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,866.20**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,866.20, = 64.80 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

ตารางที่ 4.7 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix6

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ซีเมนต์	400.00	740.00	370.00	684.50
เถ้าลอย	-	-	30.00	26.70
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	745.00	298.00
หิน	1,200.00	420.00	1,135.00	397.25
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	120.00	4,800.00	120.00
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,862.45**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,862.45 = 68.55 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.8 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix7

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ซีเมนต์	400.00	740.00	370.00	684.50
เถ้าลอย	-	-	30.00	26.70
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	745.00	298.00
หิน	1,200.00	420.00	1,135.00	397.25
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	1,200.00	4,650.00	1,162.00
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,858.70**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,858.70 = 72.30 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

ตารางที่ 4.9 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix8

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ซีเมนต์	400.00	740.00	360.00	666.00
เถ้าลอย	-	-	40.00	35.60
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	750.00	300.00
หิน	1,200.00	420.00	1,135.00	397.25
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	120.00	4,950.00	123.75
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,858.60**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,858.60 = 72.40 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

ตารางที่ 4.10 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix9

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ซีเมนต์	400.00	740.00	360.00	666.00
เถ้าลอย	-	-	40.00	35.60
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	750.00	300.00
หิน	1,200.00	420.00	1,135.00	397.25
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	120.00	4,800.00	120.00
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,854.85**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,854.85 = 76.15 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

ตารางที่ 4.11 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix10

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ซีเมนต์	400.00	740.00	360.00	666.00
เถ้าลอย	-	-	40.00	35.60
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	750.00	300.00
หิน	1,200.00	420.00	1,135.00	397.25
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	120.00	4,650.00	116.25
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,851.10**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,851.10 = 79.90 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.12 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix11

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์ :เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ซีเมนต์	400.00	740.00	350.00	647.00
เถ้าลอย	-	-	50.00	44.50
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	755.00	302.00
หิน	1,200.00	420.00	1,135.00	397.25
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	120	4,950.00	123.75
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,851.00**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,851.00 = 80.00 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

ตารางที่ 4.13 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix12

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์:เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์:เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ซีเมนต์	400.00	740.00	350.00	647.00
เถ้าลอย	-	-	50.00	44.50
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	755.00	302.00
หิน	1,200.00	420.00	1,135.00	397.25
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	120.00	4,800.00	120.00
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,847.25**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,847.25 = 83.75 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.14 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix13

วัสดุ และ ดำเนินการ	**คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์:เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง**		**คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์:เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง**	
ซีเมนต์	400.00	740.00	350.00	647.00
เถ้าลอย	-	-	50.00	44.50
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	755.00	302.00
หิน	1,200.00	420.00	1,135.00	397.25
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	1,200.00	4,650.00	1,162.00
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,843.50**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,843.50 = 87.50 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

ตารางที่ 4.15 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix14

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์:เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์:เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ซีเมนต์	400.00	740.00	330.00	610.50
เถ้าลอย	-	-	70.00	62.30
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	785.00	314.00
หิน	1,200.00	420.00	1,100.00	385.00
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	1,200.00	4,950.00	1,237.50
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,831.55**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,831.55 = 99.45 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.16 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix15

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์:เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์:เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ซีเมนต์	400.00	740.00	330.00	610.50
เถ้าลอย	-	-	70.00	62.30
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	785.00	314.00
หิน	1,200.00	420.00	1,100.00	385.00
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	120.00	4,800.00	120.00
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,827.80**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,827.80 = 103.20 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

ตารางที่ 4.17 ต้นทุนค่าวัสดุ ค่าแรง และค่าดำเนินการของคอนกรีตอัตราส่วนผสม Mix1 เทียบกับ Mix16

วัสดุ และ ดำเนินการ	คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์:เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง		คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม ซีเมนต์:เถ้าลอย :น้ำ:ทราย:หิน:สารผสมเพิ่ม และ ค่าแรง	
ซีเมนต์	400.00	740.00	330.00	610.50
เถ้าลอย	-	-	70.00	62.30
น้ำ	170.00	17.00	160.00	16.00
ทราย	785.00	314.00	785.00	314.00
หิน	1,200.00	420.00	1,100.00	385.00
สารผสมเพิ่ม	4,800.00	120.00	4,650.00	116.25
ค่าแรง	2.00	1,100.00	2.00	1,100.00
ดำเนินการ	1.00	220.00	1.00	220.00
ต้นทุนรวม		**2,931.00**		**2,824.05**
ผลต่าง ต้นทุน	**2,931.00 – 2,824.05 = 106.95 บาท/ลูกบาศก์เมตร**			

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

(ราคาวัสดุ ณ. เดือนเมษายน 2561 หินขนาด ¾” 350 บาท/ตัน ทรายหยาบ 400 บาท/ตัน ปูนซีเมนต์ 1,850 บาท/ตัน เถ้าลอย 890 บาท/ตัน น้ำ 0.1 บาท/ลิตร และ สารผสมเพิ่ม(ชนิดเร่งกำลังอัดช่วงต้น) 25 บาท/ลิตร

จากการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตอัตราส่วนปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและสารผสมเพิ่ม หรือ Mix16 เป็นอัตราส่วนผสมที่ได้รับการทดสอบกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 180 – 195 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ที่อายุบ่ม 1 วัน ซึ่งมีค่าเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้จึง

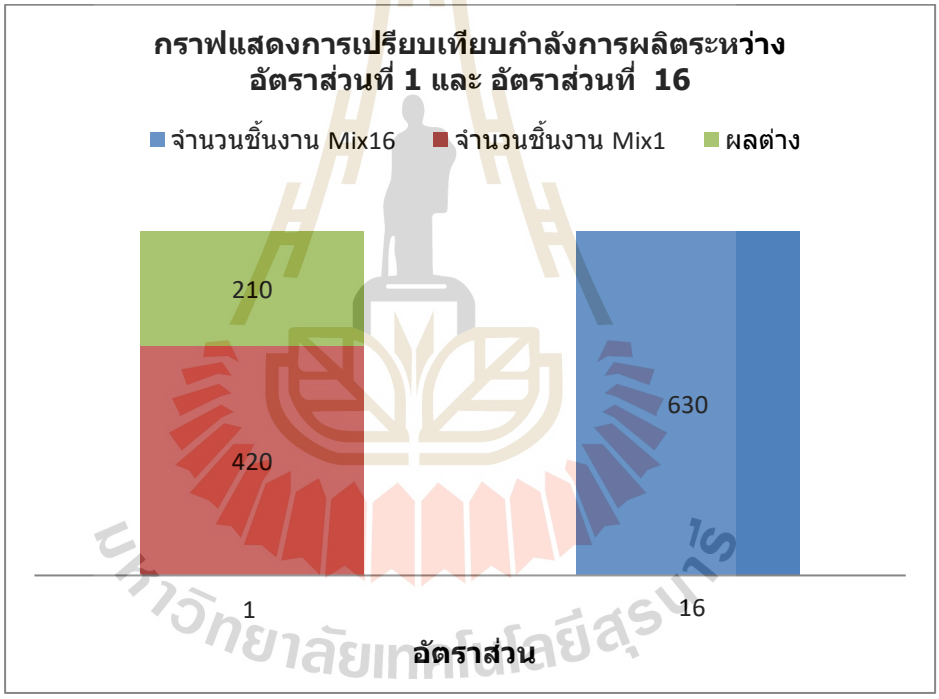
รูปที่ 4.2 การตัดลวดเหล็กและถอดแบบออกจากชิ้นงานของ Mix16 ที่ระยะบ่ม 1 วัน

รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นและความละเอียดของผิวตามเหลี่ยมมุมระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบปัจจุบัน (ซ้าย) เทียบกับแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปมีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (ขวา)

ซึ่งจากรูปภาพที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นได้ว่าสามารถทำการตัดลวดเหล็กและถอดแบบออกจากชิ้นงานได้และยังทำให้มีความแตกต่างระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบปัจจุบัน (ซ้าย) เทียบกับแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปมีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (ขวา) โดยแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปมีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะมีรูพรุนน้อย มีความหนาแน่นและมีผิวที่เนียนกว่าเนื่องจากการแทนที่ของเถ้าลอยในซีเมนต์มากกว่าแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบปัจจุบัน มีต้นทุนค่าวัสดุที่ต่ำกว่าส่วนผสม

เดิมและส่วนผสมอื่นๆ ที่ทำการทดลอง โดยสามารถสรุปราคาต้นทุนของคอนกรีตสำหรับผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

เมื่อลองทำการเปรียบเทียบกำลังการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบระหว่าง Mix1 และ Mix16 โดยกำหนดให้ ระยะเวลาในการผลิต 30 วัน ความยาวของชิ้นงานกำหนดให้เท่ากับ 3 เมตรเท่ากัน, ความยาวของแท่นผลิต, ความกว้างของแท่นผลิต เท่ากันปรากฏว่าระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อครั้งของ Mix1 จะใช้เวลาในการผลิต 3 วันจำนวนชิ้นงานที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 420 แผ่น และ ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อครั้งของ Mix16 จะใช้เวลาในการลิต 2 วันถึงจะทำการตัดลวดพร้อมเก็บชิ้นงานได้ จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้เท่ากับ 630 แผ่น ซึ่งมีผลต่างในการผลิตระหว่างอัตราส่วนเดิมและอัตราส่วนที่ทำการปรับปรุงแล้วอยู่ที่ 210 แผ่นดังรูปภาพที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบกำลังการผลิตระหว่างอัตราส่วนที่ 1 และ อัตราส่วนที่ 16 ความยาวชิ้นงาน 3 เมตรที่ระยะเวลาในการผลิต 30 วัน

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด

จากการศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอยและสารผสมเพิ่มที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมกับคอนกรีตในอัตราส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของ ซีเมนต์ เถ้าลอย หิน ทราย น้ำ และสารผสมเพิ่มโดยผลการวิจัยอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยและสารผสมเพิ่มที่นำไปแทนที่ซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบที่อายุการบ่ม 1 วันจะมีกำลังอัดที่ลดลงตามปริมาณสัดส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ แม้ว่าจะทำการเพิ่มปริมาณของสารผสมเพิ่มที่ใช้ในการเร่งกำลังอัดช่วงต้น อย่างไรก็ตามทุกอัตราส่วนผสมให้กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วันจะได้กำลังอัดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเลขที่ มอก.213-2552 และ มาตรฐาน ASTM C 39 – 83 Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

5.2 คุณสมบัติทางด้านกายภาพ

การใส่เถ้าลอยและสารผสมเพิ่มจะช่วยให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นมากขึ้น มีผิวที่เรียบเนียนตามขอบหรือมุมไม่หลุดร่วงหรือแตกหักเมื่อแกะชิ้นงานออกจากแบบหล่อและเมื่อทำการขนย้ายได้สะดวกกว่าส่วนผสมเดิมที่ยังไม่ได้ทำการปรับส่วนผสมดังรูปภาพที่ 4.1 และ 4.2

5.3 อิทธิพลของอายุการบ่ม

อายุการบ่มที่ระยะเวลา 1 วันถึง 28 วันเป็นระยะเวลาที่เหมาะสม ถึงแม้การนำเถ้าลอยมาผสมกับปูนซีเมนต์จะส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอัดช่วงต้นได้น้อยเพราะเป็นการบ่มตามธรรมชาติ แต่ก็นำสารผสมเพิ่มที่เร่งกำลังอัดช่วงต้นมาใช้ร่วมเพื่อทำให้กำลังอัดที่ต้องการที่อายุการบ่ม 1 วัน จึงสามารถทำการเก็บชิ้นงานขึ้นจากแบบหล่อได้

5.4 ต้นทุนการผลิตเปรียบเทียบต้นทุนเฉพาะค่าวัสดุและระยะเวลาในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

จากการเปรียบเทียบต้นทุนเฉพาะค่าวัสดุในการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบโดยมีการปรับสัดส่วนของคอนกรีตแล้วเปรียบเทียบกับต้นทุนที่ยังไม่มีการปรับสัดส่วน

คอนกรีตพบว่าสามารถการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในเรื่องของค่าวัสดุซึ่งมีผลต่างเท่ากับ 103.20 – 106.95 บาทโดยประมาณและลดระยะเวลาในการผลิตจากเดิมสามารถผลิตได้ 420 แผ่น ในระยะเวลา 30 วัน เมื่อทำการปรับสัดส่วนคอนกรีตใหม่แล้วจะสามารถทำการผลิตได้ 630 แผ่น ในระยะเวลา 30 วัน เท่ากันซึ่งผลต่างของการผลิตอยู่ที่ 210 แผ่นต่อการผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบที่ความยาวของชิ้นงานเท่ากัน

5.5 ข้อเสนอแนะ

จากการที่ได้ทำการศึกษาทดลองผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบโดยการใช้เถ้าลอยและสารผสมเพิ่มร่วมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆมีข้อเสนอแนะในโครงการดังต่อไปนี้

1) อาจทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมโดยทำการปรับลดปริมาณสารผสมเพิ่มลดลงจากเดิม 150 มิลลิลิตร ซึ่งจะสามารถลดต้นทุนได้อีกแต่จะมีความเสี่ยงที่จะทำให้กำลังอัดไม่ได้ตามกำลังอัดที่ต้องการที่อายุการบ่ม 1 วัน ซึ่งอาจจะทำให้ชิ้นงานเกิดการวิบัติเมื่อทำการตัดลวดอัดแรงเพื่อเก็บชิ้นงานขึ้นจากแบบหล่อ และอาจจะส่งผลกระทบต่อกำลังอัดช่วงปลาย เพราะสารผสมเพิ่มชนิดเร่งกำลังอัดช่วงต้นจะมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต
2) ควรหาวัสดุใหม่ที่สามารถใช้แทนเถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์และสารผสมเพิ่มเพื่อลดต้นทุนจากเดิมและพัฒนาคุณภาพต่อไป
3) ควรใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยอยู่ที่ 330 : 70 และอัตราส่วนสารผสมเพิ่มต่อปูนซีเมนต์ (คิดเป็นจำนวนเท่า)อยู่ที่ 14 – 15 เท่า ตามคำแนะนำอัตราส่วนสารผสมเพิ่มต่อปูนซีเมนต์ฉลากข้างถังบรรจุสารผสมเพิ่ม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

การวิเคราะห์หาสัดส่วนคละและความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://tunjai.com/sumfile/index.php? [20 เมษายน 2561].

กฤต โง้วสุวรรณ. (2550). **การพัฒนาผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปโดยใช้คอนกรีตผสมมือและเหล็กเสริมทั่วไป**. คณะสถาปัตยศาสตร์ ผังเมือง และ นฤมิตศิลป์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. ได้จาก : http://rms.msu.ac.th/report/show_researcher.php?action=show_researcher&staff_id=5001596&tab=research_inscholar_data. [2 มีนาคม 2561].

เฉลียว โพธิพิรุฬห์. (2522). **งานปูน – ก่อสร้าง.** ม.ป.ป., หน้า 33 – 34. [15 เมษายน 2561].

บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด. **แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบอัดแรงแบบตัน.** หน้า 2 – 38. สืบค้นจาก: http://cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/b-pc002.pdf. [22 มีนาคม 2561].

ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร. (2528). **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยแม่เมาะ. ขอนแก่น**. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ได้จาก: http://www.resjournal.kku.ac.th/article/1_1_1.pdf. [23 มีนาคม 2561].

ประณต กุลประสูตร. (2536). **งานปูน ซีเมนต์ คอนกรีต**. สืบค้นจาก: เทคนิคงานปูน – คอนกรีต. หน้า 27 – 30. [15 เมษายน 2561].

ปรารถนา แสงบุญเรือง และพงษ์พัฒน์ มากาศ. (2554). **การใช้เศษอิฐมวลเบาเพื่อเป็นมวลรวมหยาบในงานคอนกรีต**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ได้จาก: http://civil.eng.cmu.ac.th/research/in/2554/726 [15 เมษายน 2561].

แผนกวิชาช่างก่อสร้างมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2561). **กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต โดยใช้แท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกตามมาตรฐานอเมริกัน**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://mixdesign.cmtc.ac.th/project10/index.html. [19 เมษายน 2561].

แผนกวิชาช่างก่อสร้างมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2561). **การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://mixdesign.cmtc.ac.th/project8/index.html. [19 เมษายน 2561].

Expedition Workshed. (2553). Ordinary Concrete Cylinder – Compression Test (ออนไลน์). สืบค้นจาก : https://expeditionworkshed.org/workshed/ordinary-concrete-cylinder-compression-test. [20 เมษายน 2561].

แผนกวิชาช่างก่อสร้างมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2561). **การวิเคราะห์หาสัดส่วนคละและความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด.** (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://mixdesign.cmtc.ac.th/project4/index.html. [19 เมษายน 2561].

มาตรฐานเลขที่ มอก.576-2546. (2546). **แผ่นคอนกรีตเสริมอัดแรงหล่อสำเร็จสำหรับระบบพื้นคอนกรีต.** ประกาศในราชกิจจานุเบกษาฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 120 ตอนที่ 87 ง.

มาตรฐานเลขที่ มอก.213-2552. (2553). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ**. ประกาศในราชกิจจานุเบกษาฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 127 ตอนที่ 33 ง.

มาตรฐานเลขที่ มอก.95-2540. (2541). **ลวดเหล็กกล้าสำหรับอัดแรง**. ประกาศในราชกิจจานุเบกษาฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 115 ตอนที่ 23 ง.

มาตรฐานเลขที่ มอก.58/2533. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1619.

มาตรฐาน ASTM C 33: **Specification for Concrete Aggregates**.

มาตรฐาน ASTM C136: **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**.

มาตรฐาน ASTM C131: **Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine**.

มาตรฐาน ASTM C 618 – 84: **Coal Fly Ash & Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Concrete**.

มาตรฐาน ASTM C 39 – 83 **Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.**

ศราวุธ ปฏิญญาศักดิ์. (2560). **การพัฒนาคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักโดยมีส่วนผสมเพิ่มของเถ้าลอย**. โครงงานมหาบัณฑิต สำนักวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สำเร็จ สารมาคม. (2556). **การประยุกต์ใช้เถ้าลอยในการผลิตบล็อกประสาน.** โครงงานมหาบัณฑิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์. (2529). **วัสดุศาสตร์** (ออนไลน์) สืบค้นจาก: http://eoffice.kru.ac.th/tqfsystem/tqf3_report_print.php?id=2308, หน้า 9 – 20. [20 เมษายน 2561].

อนันตภักดิ์ โชติมงคล. (2538). **สถานการณ์แร่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก.** สมาคมเครื่องปั้นดินเผาลำปาง. หน้า 55.

H. N. Banerjea. (1980). **Technology of Portland Cement and Blended Cements**. pp. 2 – 7.

Rapid set cement. (2555). **วิธีการร่อนปูนซีเมนต์.** (ออนไลน์). สืบค้นจาก : http://rapidset.blogspot.com/2012/07/blog-post.html. [20 เมษายน 2561].

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสำหรับผลิตแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปอัดแรงแบบท้องเรียบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix1 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน

อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	400.00	12.8	17	1	138.3	138.30	180
เถ้าลอย	-						
น้ำ	170.00	12.9	17	1	138.3		
ทราย	785.00						
หิน	1,200.00	12.7	17	1	138.3		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix2 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน

อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	380.00	12.7	18	1	204.5	215.57	180
เถ้าลอย	20.00						
น้ำ	160.00	12.8	18	1	240.7		
ทราย	745.00						
หิน	1,135.00	12.7	18	1	201.5		
สารผสมเพิ่ม	4,950.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix3 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	380.00	12.8	18	1	210.5	205.50	180
เถ้าลอย	20.00						
น้ำ	160.00	12.9	18	1	204.5		
ทราย	745.00						
หิน	1,135.00	12.7	18	1	201.5		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix4 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	380.00	12.7	16	1	201.5	222.60	180
เถ้าลอย	20.00						
น้ำ	160.00	12.8	16	1	246.7		
ทราย	745.00						
หิน	1,135.00	12.8	16	1	219.6		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix5 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	370.00	12.9	15	1	228.6	222.60	180
เถ้าลอย	30.00						
น้ำ	160.00	13.0	15	1	216.6		
ทราย	745.00						
หิน	1,135.00	12.9	15	1	222.6		
สารผสมเพิ่ม	4,950.00						

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix6 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	370.00	12.8	17	1	207.5	203.53	180
เถ้าลอย	30.00						
น้ำ	160.00	12.9	17	1	186.5		
ทราย	745.00						
หิน	1,135.00	13.0	17	1	216.6		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix7 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	370.00	12.9	17	1	186.5	195.50	180
เถ้าลอย	30.00						
น้ำ	160.00	12.8	17	1	201.5		
ทราย	745.00						
หิน	1,135.00	12.8	17	1	198.5		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix8 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	360.00	13.0	15	1	240.7	242.67	180
เถ้าลอย	40.00						
น้ำ	160.00	12.6	15	1	222.6		
ทราย	750.00						
หิน	1,135.00	12.4	15	1	264.7		
สารผสมเพิ่ม	4,950.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix9 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	360.00	12.8	17	1	225.6	222.57	180
เถ้าลอย	40.00						
น้ำ	160.00	12.9	17	1	204.5		
ทราย	750.00						
หิน	1,135.00	13.0	17	1	237.6		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix10 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	360.00	13.0	17	1	201.5	224.57	180
เถ้าลอย	40.00						
น้ำ	160.00	13.0	17	1	237.6		
ทราย	750.00						
หิน	1,135.00	13.0	17	1	234.6		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix11 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	350.00	12.7	18	1	198.5	192.50	180
เถ้าลอย	50.00						
น้ำ	160.00	12.8	18	1	192.5		
ทราย	755.00						
หิน	1,135.00	12.8	18	1	186.5		
สารผสมเพิ่ม	4,950.00						

ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix12 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	350.00	12.7	16	1	216.6	208.57	180
เถ้าลอย	50.00						
น้ำ	160.00	12.7	16	1	219.6		
ทราย	755.00						
หิน	1,135.00	12.6	16	1	189.5		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix13 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	350.00	12.9	16	1	204.5	214.53	180
เถ้าลอย	50.00						
น้ำ	160.00	12.9	16	1	210.5		
ทราย	755.00						
หิน	1,135.00	12.7	16	1	228.6		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

ตารางที่ ก.14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix14 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	330.00	13.0	17	1	249.7	219.60	180
เถ้าลอย	70.00						
น้ำ	160.00	13.0	17	1	186.5		
ทราย	785.00						
หิน	1,100.00	12.7	17	1	222.6		
สารผสมเพิ่ม	4,950.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.15 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix15 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	330.00	12.8	19	1	204.5	192.47	180
เถ้าลอย	70.00						
น้ำ	160.00	13.0	19	1	195.5		
ทราย	785.00						
หิน	1,100.00	12.7	19	1	177.4		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

ตารางที่ ก.16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix16 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	330.00	12.8	19	1	186.5	183.47	180
เถ้าลอย	70.00						
น้ำ	160.00	13.0	19	1	192.5		
ทราย	785.00						
หิน	1,100.00	12.7	19	1	171.4		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.17 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix17 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	320.00	12.6	20	1	117.2	114.20	180
เถ้าลอย	80.00						
น้ำ	160.00	12.8	20	1	120.2		
ทราย	785.00						
หิน	1,100.00	12.8	20	1	105.2		
สารผสมเพิ่ม	4,950.00						

ตารางที่ ก.18 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix18 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	320.00	12.7	18	1	147.3	153.30	180
เถ้าลอย	80.00						
น้ำ	160.00	12.8	18	1	156.3		
ทราย	785.00						
หิน	1,100.00	12.6	18	1	156.3		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.19 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix19 ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	320.00	12.6	18	1	141.3	150.33	180
เถ้าลอย	80.00						
น้ำ	160.00	12.4	18	1	144.3		
ทราย	785.00						
หิน	1,100.00	12.7	18	1	165.4		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

ตารางที่ ก.20 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix1 ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	400.00	12.8	17	3	204.5	201.50	180
เถ้าลอย	-						
น้ำ	170.00	12.8	17	3	207.5		
ทราย	785.00						
หิน	1,200.00	12.6	17	3	192.5		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.21 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix1 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	400.00	12.9	17	28	358.1	367.10	350
เถ้าลอย	-						
น้ำ	170.00	13.0	17	28	373.1		
ทราย	785.00						
หิน	1,200.00	13.0	17	28	370.1		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

ตารางที่ ก.22 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix2 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	380.00	12.8	18	28	331	338.03	350
เถ้าลอย	20.00						
น้ำ	160.00	12.6	18	28	328		
ทราย	745.00						
หิน	1,135.00	12.8	18	28	355.5		
สารผสมเพิ่ม	4,950.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.23 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix3 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	380.00	12.5	18	28	355.1	348.03	350
เถ้าลอย	20.00						
น้ำ	160.00	12.9	18	28	346		
ทราย	745.00						
หิน	1,135.00	12.6	18	28	343		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

ตารางที่ ก.24 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix4 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	380.00	12.9	16	28	361.1	359.10	350
เถ้าลอย	20.00						
น้ำ	160.00	12.9	16	28	379.2		
ทราย	745.00						
หิน	1,135.00	13.0	16	28	337		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.25 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix5 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	370.00	12.2	15	28	379.2	**370.17**	350
เถ้าลอย	30.00						
น้ำ	160.00	12.5	15	28	376.2		
ทราย	745.00						
หิน	1,135.00	12.8	15	28	355.1		
สารผสมเพิ่ม	4,950.00						

ตารางที่ ก.26 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix6 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	370.00	12.6	17	28	370.1	**371.13**	350
เถ้าลอย	30.00						
น้ำ	160.00	12.3	17	28	376.2		
ทราย	745.00						
หิน	1,135.00	12.4	17	28	367.1		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.27 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix7 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	370.00	13.1	17	28	373.1	373.1	350
เถ้าลอย	30.00						
น้ำ	160.00	13.0	17	28	373.1		
ทราย	745.00						
หิน	1,135.00	13.0	17	28	373.1		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

ตารางที่ ก.28 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix8 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	360.00	13.1	15	28	361.1	365.13	350
เถ้าลอย	40.00						
น้ำ	160.00	13.0	15	28	355.1		
ทราย	750.00						
หิน	1,135.00	13.1	15	28	379.2		
สารผสมเพิ่ม	4,950.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.29 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix9 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	360.00	13.2	17	28	373.1	357.07	350
เถ้าลอย	40.00						
น้ำ	160.00	13.0	17	28	355.1		
ทราย	750.00						
หิน	1,135.00	12.9	17	28	343.0		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

ตารางที่ ก.30 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix10 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	360.00	12.9	17	28	376.2	362.13	350
เถ้าลอย	40.00						
น้ำ	160.00	13.2	17	28	379.2		
ทราย	750.00						
หิน	1,135.00	13.2	17	28	331.0		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.31 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix11 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	350.00	12.9	18	28	373.1	382.17	350
เถ้าลอย	50.00						
น้ำ	160.00	12.7	18	28	394.2		
ทราย	755.00						
หิน	1,135.00	12.9	18	28	379.2		
สารผสมเพิ่ม	4,950.00						

ตารางที่ ก.32 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix12 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	350.00	12.8	16	28	385.2	386.20	350
เถ้าลอย	50.00						
น้ำ	160.00	12.7	16	28	385.2		
ทราย	755.00						
หิน	1,135.00	12.8	16	28	388.2		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.33 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix13 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	350.00	13.0	16	28	385.2	375.17	350
เถ้าลอย	50.00						
น้ำ	160.00	12.9	16	28	361.1		
ทราย	755.00						
หิน	1,135.00	12.8	16	28	379.2		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

ตารางที่ ก.34 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix14 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	330.00	12.8	17	28	382.2	369.13	350
เถ้าลอย	70.00						
น้ำ	160.00	12.8	17	28	364.1		
ทราย	785.00						
หิน	1,100.00	12.7	17	28	361.1		
สารผสมเพิ่ม	4,950.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.35 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix15 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	330.00	12.9	19	28	376.2	369.13	350
เถ้าลอย	70.00						
น้ำ	160.00	12.7	19	28	364.1		
ทราย	785.00						
หิน	1,100.00	12.7	19	28	367.1		
สารผสมเพิ่ม	4,800.00						

ตารางที่ ก.36 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix16 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	330.00	12.8	19	28	361.1	364.10	350
เถ้าลอย	70.00						
น้ำ	160.00	12.8	19	28	373.1		
ทราย	785.00						
หิน	1,100.00	12.6	19	28	358.1		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.37 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix17 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	320.00	12.7	20	28	331.0	335.00	350
เถ้าลอย	80.00						
น้ำ	160.00	12.6	20	28	315.9		
ทราย	785.00						
หิน	1,100.00	12.9	20	28	358.1		
สารผสมเพิ่ม	4,950.00						

ตารางที่ ก.38 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix18 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	320.00	12.9	18	28	334.0	317.93	350
เถ้าลอย	80.00						
น้ำ	160.00	12.8	18	28	306.9		
ทราย	785.00						
หิน	1,100.00	12.7	18	28	312.9		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.39 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ Mix19 ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนผสมทั้งหมดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อัตราส่วน		น้ำหนัก (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)	ระยะบ่ม (วัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดที่ต้องการ (กก./ตร.ซม.)
ซีเมนต์	320.00	13.0	18	28	343	**349.07**	350
เถ้าลอย	80.00						
น้ำ	160.00	13.0	18	28	355.1		
ทราย	785.00						
หิน	1,100.00	12.9	18	28	349.1		
สารผสมเพิ่ม	4,650.00						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายธีรวัฒน์ ศุภวัชโรบล เกิดวันที่ 12 มกราคม 2536 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เริ่มจากการทำงานด้านวิศวกรรมโยธาในปี 2559 โดยเริ่มต้นจากการเป็นวิศวกรอยู่ที่บริษัท พฤกษาเรียลเอสเตรท จำกัด (มหาชน) ซึ่งงานที่ทำนั้นเกี่ยวกับการตรวจสอบแบบการก่อสร้างก่อนทำการก่อสร้างจริงและทำการแก้ไขแบบก่อสร้างเมื่อหน้างานจริงไม่สามารถทำการก่อสร้างตามแบบได้ จากนั้นก็ย้ายมาทำงานที่ ห้างหุ้นส่วนจำกัดบ้านเพชรก่อสร้าง ได้รับตำแหน่งให้เป็นผู้ควบคุมคุณภาพของคอนกรีตและผลิตภัณฑ์คอนกรีตอัดแรงซึ่งได้คาดหวังว่าประสบการณ์ที่ได้จากการทำงานนั้นจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้สอดคล้องกับงานวิจัยในระดับปริญญาโทได้ จากนั้นได้เข้าศึกษาระดับปริญญาโทในสาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาในปี 2560

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี