การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและซิลิกาฟูมที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดสูง

นายชาตรี อยู่ร่มพฤกษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและซิลิกาฟูมที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดสูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

_____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

_____

(ผศ. ดร.ปรียาพร โกษา)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

_____

(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)
กรรมการ

_____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ชาตรี อยู่ร่มพฤกษ์ : การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและซิลิกาฟูมที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดสูง (A STUDY OF COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE MIXED WITH GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG AND SILICA FUME IN A HIGH ACIDIC ENVIRONMENT) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริยาพร โกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของกำลังอัด และการต้านทานกรดของคอนกรีต โดยใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและซิลิกาฟูม แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I บางส่วนในปริมาณร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการศึกษาพบว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและซิลิกาฟูม มีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุประสาน และแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ดี โดยคอนกรีตตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ให้ค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในช่วงอายุต้น แต่มีแนวโน้มกำลังอัดสูงขึ้นเมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุประสานและสารลดน้ำร้อยละ 0.60 มีค่าการต้านทานกรดได้ดีกว่า คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท I ล้วน ส่วนคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมในปริมาณ ร้อยละ 2-8 ของน้ำหนักวัสดุประสาน และสารลดน้ำ ร้อยละ 0.60 ให้ค่ากำลังอัดที่สูงในช่วงอายุต้น มีค่าต้านทานกรดได้ดีกว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ล้วน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

CHATREE YOUROMPHRUK : A STUDY OF COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE MIXED WITH GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG AND SILICA FUME IN A HIGH ACIDIC ENVIRONMENT. ADVISOR : ASST. PROF. PREEYAPHORN KOSA, Ph.D.

This study aims to investigate a compressive strength of concrete and acid resistance of concrete with ground granulated blast-furnace slag (GBFS) and silica fume at 0-40 % replacement by a weight of Portland cement. The results show that a ground granulated blast-furnace slag and silica fume have a high potential to be used as a replacement material, however the strength of concrete with GBFS is lower than that of Portland cement type I at early age. The strength tends to increase at later age. The concrete mixed with 20 GBFS and a water reducing admixture has superior acidic resistance to Portland cement type I concrete. A concrete mix with silica fume 2-8 % has higher compressive strength and higher acid resistance than concrete with GBFS and Portland cement type I concrete.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Construction and Infrastructure Management Student's Signature_____

Academic Year 2017 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยของกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียาพร โกษา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานที่กรุณาเมตตาให้ความรู้ความเข้าใจชี้แนะแนวทางและช่วยเหลือในการศึกษาและวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำการเขียนโครงงานวิจัยและตรวจทานแก้ไขจนโครงงานเสร็จสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการสอบโครงงาน และ ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์ กรรมการสอบโครงงาน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำเนื้อหาโครงงาน

กราบขอบพระคุณ คณะอาจารย์สาขาวิชา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้การอบรมสั่งสอนและให้ความรู้อย่างดียิ่ง

กราบขอบพระคุณ กองวิเคราะห์และวิจัย สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออุปกรณ์ในการทดสอบวัสดุ ในการทำโครงงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจนเพื่อนนักศึกษา ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือ เป็นอย่างดีเสมอมา จนโครงงานเล่มนี้ เสร็จสมบูรณ์

ชาตรี อยู่ร่มพฤกษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ข

กิตติกรรมประกาศ ค

สารบัญ ง

สารบัญตาราง ฉ

สารบัญรูปภาพ ซ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 2

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 3

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของคอนกรีต 4

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5

2.2.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 7

2.2.3 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์ 7

2.2.4 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 8

2.3 มวลรวมหรือวัสดุผสม 10

2.3.1 ประเภทของมวลรวม 10

2.3.2 คุณสมบัติทั่วไปของมวลรวม 11

2.3.3 การเก็บรักษามวลรวม 12

2.4 วัสดุปอซโซลาน 12

2.5 ตะกรันเตาถลุงเหล็ก 13

2.6 ซิลิกาฟูม 21

2.6.1 องค์ประกอบทางเคมี 21

2.6.2 คุณสมบัติทางกายภาพ 22

2.6.3 การใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีต 23

2.7 น้ำ (Water) 24
2.7.1 น้ำสำหรับผสมคอนกรีต 24
2.7.2 น้ำสำหรับบ่มคอนกรีต 27
2.7.3 น้ำสำหรับล้างวัสดุผสม 27
2.8 สารผสมเพิ่ม 27
2.8.1 สารเคมีผสมคอนกรีต 28
2.8.1.1 สารลดปริมาณน้ำ 29
2.8.1.2 สารยืดเวลาการก่อตัว 32
2.8.1.3 สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว 33
2.8.1.4 สารเคมีผสมคอนกรีตอื่นๆ 34
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 34
3 วิธีดำเนินการศึกษา 41
3.1 แผนการทดสอบ 41
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 41
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ 42
3.4 สัญลักษณ์ของวัสดุที่ใช้ทดสอบ 42
3.5 ส่วนผสมคอนกรีตและวิธีทำตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ 43
3.6 รายละเอียดวิธีการทดสอบ 44
3.6.1 การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม 44
3.6.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต 45
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล 48
4.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 48
4.2 การทดสอบการต้านทานกรดของคอนกรีต 54
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 57
5.1 สรุปผลการวิจัย 57
5.2 ข้อเสนอแนะ 60
เอกสารอ้างอิง 62
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบหาปริมาณสารประกอบในวัสดุ 64
ภาคผนวก ข การทดสอบหาคุณสมบัติวัสดุ 69
ภาคผนวก ค การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต 73
ประวัติผู้เขียน 76

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ 6

2.2 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 7

2.3 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา 16

2.4 ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันและคุณสมบัติทางกายภาพที่กำหนดใน ASTM C989 16

2.5 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุประสาน 22

2.6 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบบด ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 23

2.7 ปริมาณที่ยอมให้ของสารเจือปนในน้ำ 25

2.8 กำลังอัดของคอนกรีตต่ำสุดสำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆกัน 26

3.1 ส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม. โดยน้ำหนัก (W/C = 0.40) 43

3.2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในสภาพบ่มชื้นด้วยน้ำและแช่กรดไฮโดรคลอริก 44

4.1 ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีต 48

4.2 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่าง 51

4.3 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่างเปรียบเทียบกับ คอนกรีต PC 51

4.4 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตตัวอย่าง 54

5.1 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต GBFS เมื่อบ่มชื้นด้วยน้ำ 28 วัน 58

5.2 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต GBFS เมื่อแช่กรด 15 วัน 59

ก.1 ผลการทดสอบหาสารประกอบของไมโครซิลิกา และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 65

ก.2 ผลการทดสอบหาสารประกอบของตะกรันเหล็ก 65

ก.3 ค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต โดยบ่มชื้นด้วยน้ำ ที่อายุ 28 วัน 66

ก.4 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เป็นเวลา 15 วัน 67

ข.1 การทดสอบหาค่าขนาดของทราย 70

ข.2 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของทราย 70

ข.3 การทดสอบหาการดูดซึมน้ำของทราย 71

ข.4 การทดสอบหาขนาดของหิน 71

ข.5 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหิน 71

ข.6 การหาหน่วยน้ำหนักของหิน 72

ค.1 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่ายุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่างๆ 74
ค.2 ปริมาณน้ำและฟองอากาศสำหรับค่าการยุบตัวและขนาดใหญ่สุด ของมวลรวมหยาบ 74
ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัย ของคอนกรีต 75
ค.4 ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต 75

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120, 100 และ 80 ตามมาตรฐาน ASTM C989 ผสมอยู่ร้อยละ 50 เปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน 20

2.2 ผลกระทบเนื่องจากปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของมอร์ต้า 20

2.3 ลักษณะคอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำมากเกินไป 30

3.1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด 46

3.2 ซิลิกาฟูม 46

3.3 การผสมตัวอย่างคอนกรีต 46

3.4 การทดสอบ Slump Test 46

3.5 การบ่มชื้นด้วยน้ำ 47

3.6 การบ่มชื้นด้วยกรด 47

3.7 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีต 47

3.8 การทดสอบกำลังอัด 47

4.1 กราฟแสดงค่ากำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีต 49

4.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่างเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม (PC) 52

4.3 ลักษณะการกัดกร่อนต่อผิวคอนกรีต PC 53

4.4 ลักษณะการกัดกร่อนต่อผิวคอนกรีต GBFS, GBFS-WR และ SF-WR 53

4.5 กราฟแสดงเปอร์เซนต์การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตตัวอย่าง 55

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผลิตภัณฑ์คอนกรีตในประเทศไทยมีคุณภาพสูงและต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถใช้งานได้ในทุกสภาพ การพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีต (ความแข็งแรงและทนทานสูง) ให้เหมาะสมกับประเภทของงานต่างๆ ทำได้โดยการผสมวัสดุผสมเพิ่มเช่น วัสดุปอซโซลาน หรือสารเคมีผสมเพิ่มกับส่วนผสมของคอนกรีตในสัดส่วนที่เหมาะสม อุตสาหกรรมก่อสร้างอาคารส่วนใหญ่ใช้คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุหลัก เนื่องจากคอนกรีตมีความแข็งแรงและทนทานต่อสภาวะแวดล้อมได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น โครงสร้างคอนกรีตบางประเภทอาจจำเป็นต้องใช้คอนกรีตที่มีความแข็งแรงและทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดหรือสารเคมี เช่น โครงสร้างคอนกรีตของบ่อบำบัดน้ำเสีย บ่อสูบน้ำ และท่อระบายน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้อาคารบางประเภทปล่อยของเสีย โดยเฉพาะน้ำเสีย ซึ่งแปรสภาพเป็นกรดโดยกระบวนการทางชีวภาพ หรืออาจปนเปื้อนสารเคมี สภาพความเป็นกรดดังกล่าวก่อให้เกิดผลเสียโดยตรงต่อความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีต โดยเฉพาะที่ผิวสัมผัสกับน้ำเสีย คอนกรีตสภาพความเป็นด่าง (ค่า pH ประมาณ 12.5) สภาพแวดล้อมความเป็นกรด (ค่า PH ต่ำกว่า 6.5) จะทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหาย

การทำคอนกรีตให้มีความหนาแน่นมากขึ้นจะส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดและความคงทนสูงขึ้น (มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น) งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตระบุพบว่าการผสมวัสดุปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสมช่วยให้คอนกรีตมีความหนาแน่นและมีกำลังอัดสูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณกากของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ และประหยัดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต วัสดุปอซโซลานที่หาได้ในประเทศ ได้แก่ ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล็ก และซิลิกาฟูม หรือไมโครซิลิกา

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีสารจำพวกซิลิกา (Silica) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) ปนอยู่ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556) โดย สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ซึ่งทำให้ความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และเป็นการช่วยลดปัญหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม โดยการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground Granulated Blast - Furnace Slag) และซิลิกาฟูม (Silica Fume) ที่เหลือทิ้งให้เกิดประโยชน์และมีมูลค่าทางเศรษฐกิจเพิ่มขึ้นได้เป็นอย่างดี

นอกจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูมแล้ว การใช้สารเคมีผสมเพิ่มทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นและมีกำลังอัดสูงขึ้นอีก ได้แก่ สารลดน้ำ ในการศึกษานี้สารลดน้ำ ชนิด G ผสมกับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและซิลิกาฟูม ในอัตราส่วนร้อยละ 0.60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มาทำการทดสอบหาคุณสมบัติของคอนกรีต เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษากำลังของคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน, คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม ที่บ่มชื้นตัวอย่างคอนกรีตด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน และบ่มชื้นในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ที่ระยะเวลา 15 วัน และ 30 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 หรือ BS 1881-108

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและกำลังของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด

1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและซิลิกาฟูม กับคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเป็นกรด

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาการรับกำลังของคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ตามมาตรฐานอังกฤษ ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.40 (ACI กำหนดว่าคอนกรีตที่จะใช้งานในสภาพที่เป็นกรดต้องมีค่า W/C ไม่น้อยกว่า 0.40 และต้องมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

1.3.2 ศึกษาการรับกำลังของคอนกรีตตัวอย่างในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด โดยการนำคอนกรีตตัวอย่างบ่มชื้นด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน มาแช่ในกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) เข้มข้น 5 % เป็นเวลา 15 วัน และ 30 วัน

1.3.3 ทดสอบการรับกำลังของคอนกรีตตัวอย่าง ในสภาพบ่มชื้นด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 หรือ BS 1881-108

1.3.4 ทดสอบการรับกำลังของคอนกรีตตัวอย่างในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด ในแต่ช่วงเวลาการแช่คอนกรีต ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) ที่ระยะเวลา 15 วัน และ 30 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 หรือ BS 1881-108

1.3.5 การศึกษาโครงงานนี้ใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ตราช้าง ของ บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด

1.3.6 การศึกษาโครงงานนี้ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผลิตโดย ห้างหุ้นส่วนจำกัด กูรูโรงบด และ ซิลิกาฟูม ของบริษัท เอลเคม (ประเทศไทย) จำกัด

1.3.7 สารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ศึกษาเป็นสารลดน้ำ Plastocrete - 907 ของบริษัท ซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด มีคุณสมบัติเทียบเท่ามาตรฐาน ASTM C494-81 Type G

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ทำให้ทราบถึงกำลังของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม ในแต่ละช่วงเวลา

1.4.2 ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพและกำลังอัดของคอนกรีต ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด

1.4.3 ทำให้ทราบส่วนผสมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นกรดสูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดสูง ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารงานวิจัย แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ และแนวทางในการศึกษา โดยมีรายละเอียดตามลำดับหัวข้อดังนี้

2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของคอนกรีต

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.3 วัสดุผสม

2.4 วัสดุปอซโซลาน

2.5 ตะกรันเตาถลุงเหล็ก

2.6 ซิลิกาฟูม

2.7 น้ำ

2.8 สารเคมีผสมเพิ่ม

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของคอนกรีต

คอนกรีตประกอบไปด้วยส่วนผสม 2 ส่วนใหญ่ๆคือ วัสดุประสาน ซึ่งได้แก่ปูนซีเมนต์กับน้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต กับวัสดุผสม ได้แก่ ทราย , หิน หรือกรวด เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็ง มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น ตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น และคอนกรีตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 สภาวะ คือสภาวะที่เป็นของเหลวหรือคอนกรีตสด (Fresh State) และสภาวะที่แข็งตัวแล้ว (Hardened State) ซึ่งแต่ละสภาวะมีคุณสมบัติดังนี้

คอนกรีตสด (Fresh State) คุณสมบัติที่สำคัญและมีผลต่อการใช้งานมากที่สุดในสภาวะนี้คือความสามารถในการทำงาน (Workability) ซึ่งหมายถึงการที่คอนกรีตสดสามารถไหลเข้าแบบหล่อได้ดี ทำให้แน่นตัวได้ง่าย โดยใช้กำลังงานน้อย และคอนกรีตที่หล่อได้ปราศจากรูโพรงต่างๆ ความสามารถในการทำงานขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตซึ่งอยู่ในเทอมของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ กล่าวคือถ้าใช้น้ำมากเกินไปคอนกรีตจะเหลวและเทลงในแบบหล่อง่ายก็จริง แต่กำลังความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลงเนื่องจากเนื้อของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีรูโพรงหรือพรุนมาก จึงควรใช้ปริมาณน้ำให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้เกิดความสามารถในการทำงานในขั้นดี

สำหรับรูปร่างและขนาดคละของวัสดุผสม ถ้าใช้วัสดุผสมที่มีลักษณะเป็นก้อนกลม จะทำให้ได้ความสามารถในการทำงานดีกว่าวัสดุผสมที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุม วัสดุผสมที่มีความลดหลั่นของขนาดคละที่ดีและมีปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม ทำให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่นสม่ำเสมอมีคุณภาพดีและทำงานง่าย ส่วนปริมาณของซีเมนต์ เป็นผลมาจากอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ และถ้าใช้ซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีผลทำให้ได้คอนกรีตที่เทไหลเข้าแบบได้ง่ายกว่า ปริมาณสารกระจายกักฟองอากาศถ้าใช้ในปริมาณที่พอเหมาะคอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ง่ายแต่ถ้าใช้มากเกินไป จะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง อีกทั้งความคงทนก็มิได้เพิ่มขึ้น สารเคมีผสมเพิ่มประเภทลดน้ำและยืดเวลาการก่อตัวเช่นพวก ไฮเดรตไลน์ (Hydrated Line) เบนโทไนท์ (Bentonite) จะช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้ดีขึ้น และช่วยขจัดการเยิ้มที่ผิวหน้าของคอนกรีต

คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Hardened State) ต้องมีกำลังรับแรงตามต้องการ มีเนื้อแน่นและทนทานต่อลมฟ้าอากาศ ทนการกัดกร่อนและตัวทำลายอื่น ๆ ต้องไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือหดตัวมากเกินไปเมื่อถูกความร้อน หรือ ความเย็น

2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปอร์ตแลนต์ซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้จากการเผาส่วนผสมซึ่งประกอบด้วยหินปูน (calcareous) ดินเหนียวประเภท Argillaceous ออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก แล้วนำมาบดเป็นผงละเอียด (ปิติศานต์ กร้ำมาตร, 2553)

2.2.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีหลายประเภทแต่ละประเภทมีสารประกอบสำคัญได้แก่ C_3S , C_2S, C_3A, C_4AF, CaO และ MgO ซึ่งจะมีอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ส่วนประกอบทางเคมีโดยปริมาณของปูนซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.1 ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของอเมริกา (ASTM C150) และของประเทศอังกฤษ (British Standard; B.S.) ซึ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไทย (มอก. 15) ได้แบ่งปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

1) **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1** หรือปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ordinary portland cement) ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดาและใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไป ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนัก และให้ความร้อนปานกลาง

2) **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2** หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (modified cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์ใดที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตปานกลาง

3) **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3** หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (rapid hardening portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสูง เพราะมี C_3S และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ทำงานที่ต้องการถอดแบบเร็ว

4) **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4** หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (low heat portland cement) ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นต่ำมาก เพราะมีปริมาณ C_3S ต่ำ แต่มีปริมาณ C_2S ที่ค่อนข้างสูง ใช้ในงานคอนกรีตหลา เนื่องจากมีคุณสมบัติให้อุณหภูมิต่ำ

5) **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5** หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (sulfate resisting portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีปริมาณ C_3A ต่ำมาก ดังนั้นจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยลง ใช้ในงานคอนกรีตที่สร้างอยู่ในที่มีเกลือหรือสารละลายซัลเฟต และบริเวณที่มีดินเค็ม

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ

ชนิดของปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM	**ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)**						
	C_3S	**C_2S**	**C_3A**	**C_4AF**	**$CaSO_4$**	**CaO**	**MgO**
Type I (Nomal)	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4
Type II (Modified)	45	29	6	12	2.8	0.6	3.0
Type III (High Early Strength)	56	15	12	8	3.9	1.4	2.6
Type IV (Low Heat)	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7
Type V (Sulfate Resistant)	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์หลัก และสารประกอบออกไซด์รอง ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.2 ซึ่งสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีรายละเอียดดังนี้

ก. สารประกอบออกไซด์หลัก (major oxides)

สารประกอบออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกไซด์กลุ่มนี้มีปริมาณรวมกันได้กว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ข. สารประกอบออกไซด์รอง (minor oxides)

สารประกอบออกไซด์รอง ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O) และ (K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (So_3)

นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (insoluble residue)

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์โดยประมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบประเภทออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ชื่อย่อ
แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide)	60.0 – 67.0	CaO
ซิลิกอนออกไซด์ (silicon oxide)	17.0 – 25.0	SiO_2
อลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide)	3.0 – 8.0	Al_2O_3
เฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide)	0.5 – 6.0	Fe_2O_3
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (sulfer trioxide)	1.0 – 3.0	SO_3
แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide)	0.1 – 0.4	MgO
อัลคาไลท์ (alkalies)	0.2 – 1.3	Na_2O
ไททาเนียมออกไซด์ (titanium oxdie)	0.2 – 1.3	K_2O

2.2.3 สารประกอบสำคัญของปูนซีเมนต์

สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีรูปร่างต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการเผาและการเย็นตัวลงของเม็ดปูน

ปริมาณสารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์มีปริมาณมากถึงกว่าร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด ดังนี้

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัด เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิด ความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_3S ถูกกระทบโดยปริมาณยิบซั่ม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 35-55%

2) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง βC_2S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป βC_2S มีคุณสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15-35%

3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเท่าอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิบซั่มลงระหว่างการบดซีเมนต์กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3Aอยู่ในปริมาณ 7-15 %

4) เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณ 5-10%

2.2.4 ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัวของเพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งจะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกัน โดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและแข็งตัวแล้ว

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรต ($3CaO.2SiO_23H_2O$) หรือ CSH และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH_2)$ หรือ CH ดังสมการที่ 2.1

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO_23H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad \text{.....} (2.1)$$

2) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไดแคลเซียมซิลิเกต

ไดแคเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ากว่าไตรแคลเซียมซิลิเกต แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเหมือนกันคือ CSH และ CH ดังสมการที่ 2.2

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad \text{.....} (2.2)$$

3) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ 2.3

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_36H_2O \quad \text{.....} (2.3)$$

เพื่อเป็นการหน่วงให้เกิดปฏิกิริยาข้างต้นให้ช้าลง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงใส่ยิบซั่มเข้าไปในระหว่างการบดเม็ดปูน (clinker) โดยยิบซั่ม ($CaSO4.2H_2O$) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนต ก่อให้เกิดชั้นบางๆของแอทริงไจท์ ($3CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.3lH_2O$) บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการที่ 2.4

$$3CaO.Al_2O_3 + Ca.SO_4.2H_2O \rightarrow CaO.Al_2O_3.Ca.SO_4.3lH_2O \quad \text{.....} (2.4)$$

4) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า และมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงต้น โดยจะทำปฏิกิริยากับยิบซั่ม ดังสมการที่ 2.5

$$4CaO.Al_2O_3Fe_2O_3 + Ca.SO_4.2H_2O \rightarrow CaO.(Al_2O_3)3CaSO_4 \quad \text{.....} (2.5)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เนื่องจากปูนซีเมนต์ C_3S เป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจึงมีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ ซึ่งบางครั้งสามารถเห็นปฏิกิริยาของ C_3A ด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะลดลงเนื่องจากการเกิดชั้นเคลือบของแอทริงไจท์ และจากการที่สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของอิออนแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ ทำให้ปฏิกิริยาลดลง และเพสต์มีสภาพพลาสติกช่วงหนึ่ง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงพอ CH จะตกผลึก และปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ทำให้เกิด CSH เพิ่มมากขึ้น ตามด้วยปฏิกิริยาของ C_3A และ C_4AF ทำให้แอทริงไจท์เปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนต และเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตและซัลโฟเฟอไรท์ แคลเซียมซิลิเกตยังคงทำปฏิกิริยาต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปในโพรงและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะเชื่อมโยงถึงกันและเกิดการยึดเกาะกันขึ้น

2.3 มวลรวมหรือวัสดุผสม

มวลรวมหรือวัสดุผสม (Aggregate) คือวัสดุเฉื่อย อันได้แก่ หิน ทราย กรวด มวลรวมเป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีตเนื่องจากมีปริมาตรร้อยละ 70-80 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด ดังนั้นคุณภาพของมวลรวม จึงมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีตและจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องให้ความสนใจในเรื่องนี้อย่างมาก เนื่องจาก มวลรวมเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นในส่วนผสมของคอนกรีตจึงควรใช้ปริมาณมวลรวมให้พอเหมาะเพื่อที่จะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ประการต่อมาคุณสมบัติของมวลรวม จะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (Durability) และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก (Volume Stability) รวมทั้งมวลรวมยังทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักที่กระทำลงบนคอนกรีตด้วย กำลังคุณสมบัติทางกายภาพอีกหลายประการของมวลรวมมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีตเหลวและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ดังนั้นการเลือกใช้มวลรวมที่เหมาะสม ไม่เพียงแต่เป็นการประหยัด แต่ยังคงช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นด้วย มวลรวมที่ดีซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานสูง ควรมีคุณสมบัติพื้นฐานที่ดีดังนี้คือ ต้องมีความคงทนไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีต และมวลรวมต้องไม่มีสิ่งเจือปน ที่มีผลเสียต่อกำลังและความคงตัวของซีเมนต์เพสต์ (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2537)

2.3.1 ประเภทของมวลรวม

มวลรวมสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

ก. มวลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ (Natural Mineral Aggregate) เกิดจากขบวนการกัดกร่อนและเสียดสีตามธรรมชาติ

ข. มวลรวมที่มนุษย์ทำขึ้น (Artificial Aggregate) เช่น มวลรวมเบาบางประเภทที่ได้จากการเผาดิน เป็นต้น

ถ้าแบ่งมวลรวมตามความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนัก จะแบ่งได้ 3 กลุ่มคือ

1) มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 300-1,100 กก./ลบ.ม.
2) มวลรวมปกติ (Normal Weight Aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 2,400 - 3.000 กก./ลบ.ม.
3) มวลรวมหนัก (Heavyweight Aggregate) มีความหนาแน่นมากกว่า 4,000 กก./ลบ.ม.

ถ้าแบ่งมวลรวมตามขนาดเราสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ได้แก่ หินกรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. ขึ้นไป หรือค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 กลุ่ม
2) มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 ม.ม. หรือ สามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 ม.ม. หรือ ผ่านตะแกรงมาตราฐานเบอร์ 200

ส่วนที่มีขนาดเล็กกว่ามวลรวมละเอียดซึ่งมีอยู่จำนวนน้อยมาก ในส่วนผสมคอนกรีต สามารถแบ่งได้เป็น Silt จะมีขนาดประมาณ 0.07 มม. และClay จะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.02 - 0.06 มม.

2.3.2 คุณสมบัติทั่วไปของมวลรวม

มวลรวมที่ดีเมื่อผสมเป็นคอนกรีตแล้ว จะต้องทำให้คอนกรีตนั้นมีความสามารถเทได้ง่าย แข็งแรงทนทาน และราคาประหยัด นอกจากนี้มวลรวมควรจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ

1) ความแข็งแกร่ง (Strength)

มวลรวมจะต้องมีความสามารถรับแรงกดได้ไม่น้อยกว่ากำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ซึ่งปกติมวลรวมที่ใช้โดยทั่วไปจะมีความสามารถรับแรงกดได้สูงกว่าคอนกรีตมาก คือ จะรับแรงกดได้ 700-3,500 กก/ตร.ซม. ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของมวลรวมที่ใช้

2) ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี (Impact and Abrasion Resistance)

ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทก และการเสียดสีของมวลรวม มักจะถูกใช้เป็นตัวชี้บอกถึงคุณภาพของมวลรวม คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากสำหรับมวลรวมที่ใช้ผสมทำคอนกรีตที่จะต้องถูกกระทำจากการกระแทกหรือเสียดสี เช่น งานผิวถนน พื้นโรงงาน

พื้นสนามบิน เป็นต้น มวลรวมที่ใช้ได้ดี ควรมีความแข็งแรง เนื้อแน่น ปราศจากอนุภาคที่อ่อนนุ่ม หรือเป็นรูพรุนหรือแตกละเอียดได้ง่าย

3) ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Stability)

มวลรวมจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ หรือกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ในบางพื้นที่ที่มวลรวมบางประเภทจะทำปฏิกิริยากับด่าง (Alkalis) ในปูนซีเมนต์ เกิดเป็นวุ้นและขยายตัวก่อให้เกิดรอยร้าวโดยทั่วไปในคอนกรีต ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Alkalis-Aggregate Reaction (AAR)

4) รูปร่างและลักษณะผิว (Particle Shape and Surface Texture)

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดมากกว่าคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว มวลรวมที่มีผิวหยาบ หรือมีรูปร่างแบนและยาว จะต้องการปริมาณซีเมนต์มากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรูปร่างกลมหรือเหลี่ยม ที่ระดับความสามารถได้ (Workability) เดียวกัน

2.3.3 การเก็บรักษามวลรวม

ระหว่างการขนย้ายและกองเก็บมวลรวมไว้รอการใช้งานหรือขนย้ายต่อไปอาจเกิดผลเสียคือการแยกแยะของมวลรวมขนาดต่างๆกัน และการแตกหักของมวลรวมการแยกแยะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของมวลรวมในระนาบเอียง มวลรวมขนาดใหญ่ที่หนักกว่า มักไหลลงไปรวมกันใกล้เชิงระนาบเอียง ส่วนมวลรวมขนาดเล็กกว่าคงติดค้างอยู่ตอนบนของระนาบเอียง นอกจากนี้ควรระมัดระวังการเทมวลรวมเมื่อมีลมแรง เพราะลมสามารถพัดพามวลรวมขนาดเล็กไปได้ไกลกว่าขนาดใหญ่กว่าวิธีการป้องกันที่ดีก็โดยการแยกเก็บมวลรวม

2.4 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (pozzolanicmaterials) คือวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุนั้น อาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) (ปิติศานต์ กร้ำมาตร , 2553) ปอซโซลานมีสองชนิดคือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural pozzolan) และปอซโซลานดัดแปลง (modify pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

1) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) เถ้าภูเขาไฟ (volcanic ash) หินภูมิไซท์ (pumisite) หินโอเพิลเหลือง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

(opaline) หินชั้น (shale) หินเชิร์ต (chert) หินปูน (limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อต้องการนำไปใช้งานจะต้องนำมาบดก่อน

2) ปอซโซลานดัดแปลง (modify pozzolan)

ปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพ โดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อน ซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่ เถ้าลอย(fly ash)ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟูม (silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน อาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $CaOH_2$ แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanicreaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$3CaOH_2+2SiO_2\ 3CaO.2SiO_2.3H_2O \text{ หรือ (CSH)} \qquad \text{.....(2.6)}$$

ในกรณีที่ วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ AI_2O_3 ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$3CaOH_2+2Al_2O_3\ \ 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \text{ หรือ (CAH)} \qquad \text{.....(2.7)}$$

2.5 ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast Furnace Slag)

ตะกรันเตาถลุงเหล็ก(blast-furnace slag) คือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยซิลิเกตและอลูมิโนซิลิเกต ของแคลเซียมและอื่นๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะหลอมละลาย

พร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็ก นอกจากนี้ยังให้คำจำกัดความของเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก (granulated blast-furnace slag) หมายถึงเม็ดวัสดุที่ไม่เป็นผลึก ซึ่งได้จากการทำตะกรันที่หลอมเหลวในเตาถลุงเหล็กให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยการจุ่มลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดเพื่อให้ตะกรันเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556)

ตะกรันเตาถลุงเหล็กนอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาวอิ่มตัว (hydrated lime) ยิปซัม หรือแอนไฮไดรต์ (anhydrite) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกต่างหากในการผสมคอนกรีตมีข้อดีสองประการคือ

1. สามารถบดตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และ
2. สามารถปรับปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้

กระบวนการผลิตตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ในกระบวนการถลุงเหล็ก โรงงานจะใส่สินแร่เหล็กเข้าในเตาถลุงเหล็กรวมทั้งใส่สารที่เป็นฟลักซ์ (flux) ซึ่งได้แก่ หินปูนและหินโดโลไมต์ เพื่อลดอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวลงเพื่อประหยัดพลังงาน การเผาจะใช้ถ่านโค้ก (ถ่านโค้ก คือถ่านหินที่เผาจนหมดควัน) เป็นเชื้อเพลิง หลังจากเผาจนอุณหภูมิสูงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ 2 อย่างเกิดขึ้นในเตาเผาพร้อมกันคือ เหล็กที่หลอมจนเหลวซึ่งตกอยู่ก้นเตา และตะกรันเหลวซึ่งลอยอยู่เหนือเหล็กเหลว การทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ช่วยป้องกันการเกิดผลึกในตะกรันเตาถลุงเหล็ก และทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นเม็ดที่มีขนาดเฉลี่ยเล็กกว่า 4.75 มม. จึงเรียกว่าเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก ในทางตรงกันข้ามถ้าปล่อยให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ออกจากเตาเผาเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ จะทำให้ตะกรันเตาถลุงหล็กอยู่ในรูปที่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ และไม่มีคุณสมบัติทางวัสดุประสาน

กระบวนการทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเพื่อไม่ให้เป็นผลึก ทำได้โดยการฉีดน้ำที่มีความเร็วสูง ไปกระทบกับตะกรันเตาถลุงเหล็กเหลวที่ยังร้อนอยู่ ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อตะกรันเตาถลุงเหล็กประมาณ 10:1 โดยมวล ซึ่งทำให้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นเม็ดและอยู่ในรูปไม่เป็นผลึกสูงมาก ภายหลังที่ได้เม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็กจึงทำ ให้แห้งและบดให้ละเอียดโดยใช้วิธีการเดียวกับการบดเม็ดปูนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ในช่วงก่อนและระหว่างการบดเม็ดตะกรันเตาถลุงเหล็ก จะนำแม่เหล็กมาดูดแร่เหล็กที่ยังติดมาหรือตกค้างอยู่ออกก่อนเพื่อนำแร่เหล็กกลับไปใช้ใหม่ ตะกรันเตาถลุงเหล็กจะบดให้ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ เพราะการทำปฏิกิริยาจะเกิดเร็วขึ้นตามความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่เพิ่มขึ้น

องค์ประกอบทางเคมี

ตะกรันเตาถลุงเหล็กประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก ซึ่งปนมากับสินแร่เหล็ก และยังมีออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งมาจากหินปูนและหินโดโลไมต์ องค์ประกอบหลักนี้รวมกันแล้วมีมากกว่าร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังมีออกไซด์อื่น ๆ ที่ติดมา เช่น SO_3 Fe_2O_3 และ MnO อยู่เล็กน้อย ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา ใน ค.ศ. 1988 แม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ในตารางที่ 1 จะแตกต่างกันมาก แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะแต่ละโรงงานจะพบว่ามีค่าแตกต่างกันไม่มาก การที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีออกไซด์ของแคลเซียมค่อนข้างสูง (มากกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป) จึงทำให้ตะกรันเตาถลุง เหล็กเป็นวัสดุประสานได้ด้วยตัวเองเมื่อผสมกับน้ำ

ข้อกำหนดสำหรับตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ASTM C989 ได้กำหนดตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพคือ ชั้นคุณภาพ 80, 100, และ 120 ซึ่งแต่ละชั้นคุณภาพจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (slag activity index) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มีชั้นคุณภาพสูง จะมีค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันสูง โดยค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันหาได้จาก

ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (ร้อยละ) = [SP/P] x 100

เมื่อ SP = ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กผสมอยู่ร้อยละ 50

P = ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน

ข้อกำหนดที่ต้องการของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดของแต่ละชั้นคุณภาพ ที่แบ่งตาม ASTM C989 ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.4 นอกจากค่าดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน แล้วมาตรฐาน ASTM ยังได้กำหนดคุณสมบัติอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต้องมีปริมาณวัสดุที่ค้างบนตะแกรงขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (No. 325) ไม่เกินร้อยละ 20 ปริมาณฟองอากาศในมอร์ต้าร์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เป็นวัสดุประสานล้วนไม่เกินร้อยละ 12 ปริมาณของกำมะถันจากซัลไฟด์ (sulfide sulfur) ไม่เกินร้อยละ 2.5 และปริมาณของซัลเฟต (SO_3) ไม่เกินร้อยละ 4

ในกรณีที่นำตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมาใช้เป็นส่วนผสมหนึ่งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ASTM C595 ได้แบ่งประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ ออกเป็น 3 ประเภทตามปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่มีอยู่ในส่วนผสมคือ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลงด้วยตะกรัน (slag-modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมไม่เกินร้อยละ 25 และแบ่งออกเป็น Type IS ซึ่งใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป Type IS(MS) สำหรับต้านทานซัลเฟตระดับปานกลาง Type IS(A) สำหรับคอนกรีตที่มีฟองอากาศ และ Type IS(MH) สำหรับคอนกรีตความร้อนปานกลาง
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Portland blast-furnace slag cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมร้อยละ 25 ถึง70 ซึ่งยังแบ่งออกเป็น Type I(SM) ที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป Type I(MS) สำหรับต้านทานซัลเฟตระดับปานกลาง Type I(A) สำหรับคอนกรีตที่มีฟองอากาศ และ Type I(MH) สำหรับคอนกรีตความร้อนปานกลาง
3. ปูนซีเมนต์ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (slag cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จะมีตะกรัน เตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมเท่ากับหรือมากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ ที่ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือใช้ร่วมกับปูนขาวเพื่อใช้ในงานก่ออิฐ หรือฉาบปูน

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ผลิตในอเมริกาและแคนาดา

องค์ประกอบทางเคมี	**ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)**
SiO_2	32-40
Al_2O_3	7-16
CaO	32-45
MgO	5-15
SO_3	0.7-2.2
Fe_2O_3	0.1-1.5
MnO	0.2-1.0

ตารางที่ 2.4 ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันและคุณสมบัติทางกายภาพที่กำหนดใน ASTM C989

อายุและชั้นคุณภาพ	**ค่าต่ำสุดของดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (ร้อยละ)**	
	ค่าเฉลี่ยของผลทดสอบ 5 ตัวอย่างติดต่อกัน	**ผลทดสอบแต่ละตัวอย่าง**
ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันที่อายุ 7 วัน		
- ชั้นคุณภาพ 80	-	-
- ชั้นคุณภาพ 100	75	70
- ชั้นคุณภาพ 120	95	90

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

อายุและชั้นคุณภาพ	ค่าต่ำสุดของดัชนีปฏิกิริยาของตะกรัน (ร้อยละ)	
	ค่าเฉลี่ยของผลทดสอบ 5 ตัวอย่างติดต่อกัน	ผลทดสอบแต่ละตัวอย่าง
ดัชนีปฏิกิริยาของตะกรันที่อายุ 28 วัน		
- ชั้นคุณภาพ 80	75	70
- ชั้นคุณภาพ 100	95	90
- ชั้นคุณภาพ 120	115	110
ความละเอียดของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกิน (ร้อยละ)	-	20
ปริมาณฟองอากาศของมอร์ต้าร์ที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุประสาน (ไม่เกินร้อยละ)	-	12

การทำปฏิกิริยากับน้ำ

เมื่อผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำจะได้ ผลลัพธ์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือได้ C-S-H โดยในกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะได้ C-S-H มาจาก C_3S เป็นส่วนมาก ส่วนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะได้ C-S-H มาจาก C_2S เป็นส่วนใหญ่ และ C-S-H ที่ได้จากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความหนาแน่นสูงกว่ากรณีที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับการแตกตัว และการละลายของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ไม่เป็นผลึก เมื่อสัมผัสกับอิออนของไฮดรอกไซด์ (OH) ซึ่งได้มาจากกระบวนการไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะทำปฏิกิริยาทำให้ได้สาร C-S-H ซึ่งเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คอนกรีต นอกจากนี้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดยังสามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลได้อีกด้วย โดยเฉพาะในกรณีของอัลคาไลไฮดรอกไซด์พบว่า ไฮเดรตของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ได้ มีความแข็งแรงสูงกว่าไฮเดรต ที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์

ปฏิกิริยาของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่

1. องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
2. ความเข้มข้นของด่างอัลคาไลในระหว่างทำปฏิกิริยา
3. ปริมาณที่ไม่เป็นผลึกของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
4. ความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

5. อุณหภูมิในขณะที่ทำปฏิกิริยา

ปัจจัยเหล่านี้มีผลซึ่งกันและกัน จึงเกิดความยุ่งยากในการพิจารณาหาความสัมพันธ์ ซึ่งกันและกัน ดังนั้น ASTM C989 จึงแนะนำว่าควรใช้ค่าดัชนีของตะกรันเป็นดัชนีที่แสดงถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตา ถลุงเหล็กบดละเอียด ควรได้รับการทดสอบก่อนเพื่อให้แน่ใจว่า ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติและคุณภาพตามต้องการ

ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตสด

โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะมีความสามารถในการเทและเขย่าหรือทำให้แน่นได้ง่ายกว่าคอนกรีตธรรมดา การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะยืดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตออกไป ในกรณีที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ เวลาการก่อตัวที่ยืดออกไปจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคอนกรีต ปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปเวลาการก่อตัวจะยืดออกไปราว ½ ถึง 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียสเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา การใช้แคลเซียมคลอไรด์เพื่อเร่งการก่อตัวของคอนกรีตจะสามารถชดเชยผลกระทบของการก่อตัวที่ยืดออกไปได้ดี

การเยิ้มน้ำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด กล่าวคือ ถ้าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะทำให้การเยิ้มน้ำลดลง แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าความละเอียดของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ การเยิ้มน้ำของคอนกรีตจะสูงขึ้น อัตราการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันหรือลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

ผลกระทบของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

การบ่มคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อ ให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพเพราะคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเตา ถลุงเหล็กจะมีปัญหาเรื่องการสูญเสียกำลัง หากหยุดบ่มภายหลังจากหล่อ 3 วันไปแล้ว ซึ่งจะคล้ายกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 และอัตราการสูญเสียกำลังของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสูงกว่าร้อยละ 30 ขึ้นไป มีแนวโน้มที่จะเสี่ยงอันตรายมาก กว่าคอนกรีตธรรมดาในกรณีที่ไม่มีการบ่มที่ดี

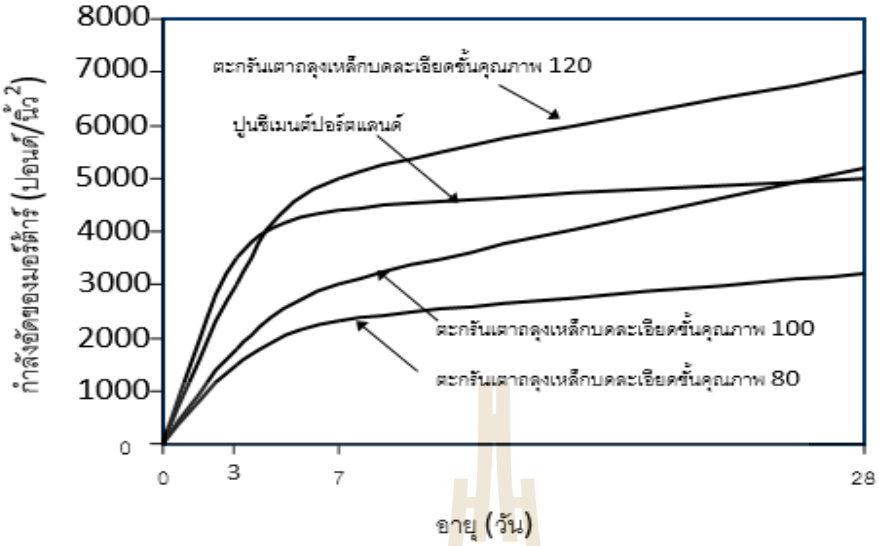
การพัฒนากำลังคอนกรีตของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะขึ้นอยู่กับคุณภาพ กล่าวคือ การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120 จะทำให้กำลัง อัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา

เล็กน้อยในช่วงอายุ 1 ถึง 3 วัน และให้กำลังอัดสูงกว่าเมื่ออายุเกิน 7 วัน ไปแล้ว แต่การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 80 และ 100 จะให้กำลังที่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นส่วนใหญ่ ดังในรูปที่ 2.1

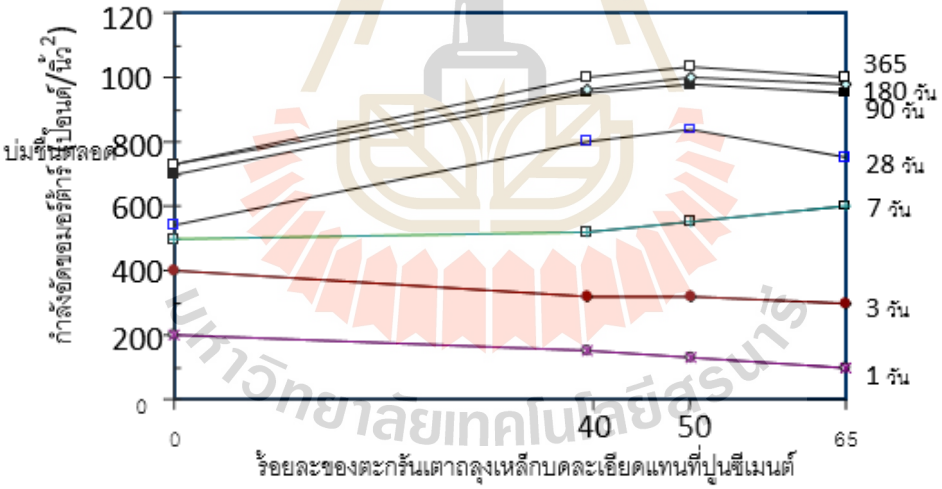
รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ในส่วนผสมของคอนกรีตมีผลต่อกำลังอัดอย่างมาก กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่อายุต่ำกว่า 28 วันจะลดลงเมื่อปริมาณตะกรันถลุงเหล็กบดละเอียดเพิ่มขึ้น แต่หลังจากอายุ 28 วัน การพัฒนากำลังของส่วนผสมที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่สูงจะพัฒนาได้ดีกว่า โดยกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 จะให้กำลังสูงสุด

การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์จะลดอุณหภูมิของคอนกรีตได้ เนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลง และทำให้คอนกรีต ทึบน้ำขึ้นและการซึมผ่านน้ำจะลดลงอย่างมากตามอายุที่เพิ่มขึ้น ยิ่งปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมากจะยิ่งลดการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตได้มากขึ้น เพราะโครงสร้างของโพรงในซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีแนวโน้มทึบน้ำมากกว่ากรณีของซีเมนต์เพสต์ล้วน

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์และซัลเฟตได้ดี การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 50 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมี C_3A ถึงร้อยละ 12 ให้ผลการต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากซัลเฟตเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (C_3A ไม่เกินร้อยละ 5) ซึ่งความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด เนื่องมาจากคอนกรีตมีการซึมผ่านน้ำต่ำ การที่ $Ca(OH)_2$ และอัลคาไล ทำปฏิกิริยากับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดได้เป็น C-S-H จึงเหลืออัลคาไลและ $Ca(OH)_2$ น้อยลงในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟต การใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถลดการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาของอัลคาไลซิลิกา แต่มักต้องใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในประมาณสูงถึงร้อยละ 40 ถึง 65 ของวัสดุประสาน จึงจะสามารถลดปัญหานี้ได้ดี



รูปที่ 2.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดชั้นคุณภาพ 120, 100 และ 80 ตามมาตรฐาน ASTM C989 ผสมอยู่ร้อยละ 50 เปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน(ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556)



รูปที่ 2.2 ผลกระทบเนื่องจากปริมาณตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของมอร์ต้า (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556)

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและการต้านทานสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันของคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด พบว่ามีความสามารถเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป แต่การคืบและการหดตัวมีแนวโน้มว่า คอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะมีค่าสูงกว่าของคอนกรีตธรรมดา ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีสีจางกว่าสี

ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นเมื่อหล่อเป็นคอนกรีตแล้วจึงอาจมีสีออกไปทางเขียวอ่อนได้ นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีของกำมะถันจากซัลไฟด์กับส่วนผสมอื่นๆ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปรับปรุงด้วยตะกรันหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันเตาถลุงเหล็ก Type IS ถือว่าเป็นปูนซีเมนต์เทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C595 ดังนั้นจึงสามารถใช้กับงานทุกประเภทที่ใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ยกเว้นในกรณีที่ต้องการกำลังสูงในช่วงอายุต้นของคอนกรีต นอกจากนี้ยังสามารถใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดผสมกับปูนซีเมนต์ในขณะผสมคอนกรีตก็ได้ โดยปริมาณและอัตราส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดขึ้นอยู่กับชนิดของงานคอนกรีตแต่ละงาน

2.6 ซิลิกาฟูม

ซิลิกาฟูม (silica fume) หรือไมโครซิลิกา (microsilica) หรือซิลิกาฟูมควบแน่น (condended silica fume) เป็นชื่อเรียกวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมททัลและเปอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอร์ด (quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี electric arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ (fume) ของ SiO ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึกและมีรูปร่างกลม ซิลิกาฟูมจะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2556)

เนื่องจากซิลิกาฟูมมีอนุภาคที่เล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาของการใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีตคือส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ความข้นเหลวเท่าเดิมเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟูม ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงมากจึงต้องการปริมาณน้ำในการหล่อลื่นพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงขึ้นด้วย ซิลิกาฟูมจากโรงงานโลหะซิลิกอนและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นซิลิกาฟูมที่มีคุณภาพดีโดยร้อยละ 61 ถึง 98 ประกอบด้วยซิลิกอน ซึ่งร้อยละ 85 ถึง 95 ของซิลิกอนดังกล่าวอยู่ในรูปไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐานซึ่งมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ส่วนซิลิกาฟูมที่ได้จากโรงงานเฟอร์โรซิลิกอน มีคุณภาพต่ำกว่าโดยมีซิลิกอนเพียงประมาณร้อยละ 50 และอยู่ในรูปของผลึกค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟูมเหล่านี้ในงานคอนกรีตไม่ดีนัก

2.6.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟูมคือ SiO ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ ซิลิกาฟูมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมี SiO2 มากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็น

องค์ประกอบของ Al_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O และออกไซด์อื่น ๆ อีกร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของ SiO_2 หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟูมมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และดินขาวเผา จะพบว่ามีองค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมากดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของวัสดุประสาน

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)					
	ปูนซีเมนต์ประเภท 1	เถ้าถ่านหินแม่เมาะ	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟูม	เถ้าแกลบ	ดินขาวเผา
SiO_2	20	48	37	92	90	55
Al_2O_3	5	26	11	0.7	0.5	40
Fe_2O_3	3	10	0.3	1.2	2.0	0.5
CaO	60	5	40	0.2	0.5	-
MgO	1.1	2	7	0.2	0.2	-
SO_3	2.4	0.7	0.3	-	1.5	-
ออกไซด์อื่นๆ	1.5	1.3	2.3	26	-	-
LOI.	2	3	-	-	1.7	-

2.6.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูมที่เห็นชัดเจน คือเป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมากสีเทาเทาดำหรือเทาอมขาว แต่ถ้าเป็นซิลิกาฟูมควบแน่นจะมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของซิลิกาฟูมหลายๆอนุภาคเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟูมมีค่าประมาณ 2.2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 200,000 ถึง 250,000 ซม.^{2}/ก. ซึ่งใช้การทดสอบโดยวิธีดูดซับก๊าซไนโตรเจน (nitrogen absorption test) และถือว่ามีค่าสูงมาก (ขณะที่เถ้าถ่านหินมีค่าประมาณ 3,000 ถึง 7,000 ซม.^{2}/ก. ซึ่งทดสอบโดยวิธีเบลน) ขนาดอนุภาคของซิลิกาฟูมเป็นขนาดที่เล็กมากเพราะมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 150 เท่าเพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร เนื่องจากซิลิกาฟูม มีขนาดเล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย เพื่อแก้ปัญหานี้จึงมีการนำซิลิฟูมมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่าซิลิกาฟูมควบแน่น สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เถ้าแกลบบด และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้แสดงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบบด ตะกรันเตาถลุงเหล็ก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน แม่เมาะ	เถ้าแกลบ บด	ตะกรันเตา ถลุงเหล็ก	ซิลิกาฟูม
ความละเอียดของเบลน ($ซม^2/ก$)	3,400	3,500	8,000	3,500	200,000
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.0	2.2	2.9	2.2
สี	เทา	เทาอ่อนจนถึงเทาเข้มหรือสีน้ำตาล	เทาถึงเทาดำ	เทา	เทาอมขาวจนถึงเทาดำ

หมายเหตุ วิธีเบลนไม่สามารถใช้วัดความละเอียดของซิลิกาฟูมได้แต่ใช้วิธี nitrogen absorption

2.6.3 การใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีต

โดยทั่วไปซิลิกาฟูมจะใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 โดยน้ำหนัก การผลิตปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมมีใช้ในประเทศแคนาดาโดยผสมซิลิกาฟูมในส่วนผสมราวร้อยละ 7 ถึง 8 เนื่องจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงมากจึงมีปัญหาในเรื่องการขนส่งและการใช้งาน พอสมควรเพราะฟุ้งกระจายได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการใช้ซิลิกาฟูมที่ผสมน้ำให้อยู่ในรูปของเหลวข้น อย่างไรก็ตามโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จหลายแห่งยังคงนิยมใช้ซิลิกาฟูมในรูปผงซึ่งอาจเป็นปัญหาเรื่องสุขภาพได้ เพราะมีการฟุ้งกระจายของซิลิกาฟูมได้ง่าย ดังนั้น The American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) ได้ระบุให้ซิลิกาฟูมเป็นวัสดุอันตราย (hazardous material) และไม่ควรมีฝุ่นของซิลิกาฟูมในอากาศมากกว่า 2 มก./ม.^{3} และควรใช้หน้ากากกันฝุ่นสวมป้องกันในขณะทำงาน การใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นแทนซิลิกาฟูมจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้เพราะซิลิกาฟูมควบแน่นมีขนาดใหญ่กว่าซิลิกาฟูมมากและไม่ปลิวลมง่ายนัก

ผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อคอนกรีตสด

เนื่องจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงมาก ซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟูมที่ความข้นเหลวปกติจะต้องการปริมาณน้ำสูงขึ้นและจะทำให้เวลาในการก่อตัวนานขึ้น เมื่อใช้ผสมทำมอร์ต้าร์และคอนกรีต ทำให้ต้องการปริมาณน้ำที่มากขึ้น แนวทางแก้ไขคือการใช้สารลดน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษเข้าช่วยเพื่อไม่ให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตสูงจนเกินไป เพราะการใช้น้ำในส่วนผสมมากจะทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลงตามกฎของ Abrams ปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ให้กำลังรับแรงสูงจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ ส่วนการเยิ้มน้ำในคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูม

พบว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา นอกจากนี้การใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตไม่มีประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิของคอนกรีต เนื่องจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงและทำปฏิกิริยาได้ว่องไว จึงมีความร้อนจากปฏิกิริยาค่อนข้างมาก

ผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ซิลิกาฟูมนิยมใช้เป็นส่วนผสมหนึ่งในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมาก เช่นกำลังอัดเท่ากับ 120 เมกะปาสคาล ที่อายุ 90 วัน โดยการใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ คอนกรีตที่ได้นอกจากจะมีกำลังอัดที่สูงมากแล้วยังมีค่าการซึมน้ำผ่านที่ต่ำมากด้วย เพราะซิลิกาฟูมจะไปอุดโพรงของซีเมนต์เพสต์การใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณที่เหมาะสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต จะมีประสิทธิภาพเหมือนใช้ปูนซีเมนต์ถึง 3 หรือ 4 เท่า เช่นใช้ซิลิกาฟู 1 กิโลกรัม แทนที่ปูนซีเมนต์ 3 หรือ 4 กิโลกรัม ในคอนกรีต แต่ยังคงให้คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่อายุ 7 หรือ 28 วันเท่ากัน กำลังอัดของคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 15, และ 20 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วันค่อนข้างมาก

2.7 น้ำ (Water)

ความสำคัญของน้ำในการทำคอนกรีต แบ่งตามสภาพการใช้งานได้ดังนี้

2.7.1 น้ำสำหรับผสมคอนกรีต (mixing water)

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ต้องสะอาด มีความขุ่นไม่เกิน 2,000 ppm. (ส่วนในล้าน) ปราศจากกรด ด่าง น้ำมันและสารอินทรีย์อื่นๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีตหรือเหล็กเสริม โดยปกติน้ำประปาและน้ำจืดตามธรรมชาติส่วนใหญ่ ซึ่งไม่มีส่วนผสมของน้ำเสีย จากอาคารบ้านเรือนหรือจากโรงงานอุตสาหกรรมถือว่ามีคุณภาพดีพอสำหรับงานคอนกรีต ในกรณีที่สงสัยให้ทำแท่งสดสอบโดยใช้น้ำที่สงสัยและเปรียบเทียบกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาที่ทำจากน้ำที่มีคุณภาพดี หากแท่งทดสอบที่ใช้น้ำที่สงสัยผสมให้กำลังอัดอย่างน้อย 90 เปอร์เซ็นต์ ก็ถือว่าน้ำนั้นมีคุณภาพดีพอ (วินิต ช่อวิเชียร, 2525)

หน้าที่ของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตคือ

2.7.1.1 ทำหน้าที่เคลือบหินและทรายให้เปียกเพื่อปูนซีเมนต์จะเข้าเกาะโดยรอบและแข็งตัวยึดให้ติดกันได้

2.7.1.2 ทำหน้าที่หล่อลื่นในวัสดุทั้ง 3 อย่างนี้ เกิดความเหลว สามารถเทและกระทุ้ง หรือเขย่า เข้าแบบหล่อให้เป็นรูปต่างๆ ได้

2.7.1.3 ทำหน้าที่เข้าผสมกับปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาทางเคมีแล้วเกิดความร้อน ที่เรียกว่า heat of hydration ทำให้ผงซีเมนต์นั้นกลายเป็นวุ้น และเป็นซีเมนต์

เหนียวซึ่งเป็นตัวประสานผิวระหว่างเม็ดของวัสดุผสม เกาะยึดกันแน่นเมื่อแข็งตัว

สารที่เจือปนอยู่ในน้ำ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการก่อตัวและกำลังของคอนกรีตได้แก่ ฝุ่น หรือผง (Silt) น้ำมัน กรด ด่าง เกลือด่าง สารอินทรีย์ต่างๆ น้ำเสียจากอาคารบ้านเรือน และโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น สารต่างๆ เหล่านี้ยอมให้เจือปนอยู่ในน้ำได้ไม่เกินกว่าปริมาณที่กำหนดไว้ใน ตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ปริมาณที่ยอมให้ของสารเจือปนในน้ำ

สารที่เจือปน	**ปริมาณที่ยอมให้สูงสุด (ส่วนต่อล้าน)**
เกลือ	
โซเดียมคาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต	1,000
แคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนต	400
แมกนีเซียมซัลเฟตและคลอไรด์	40,000
โซเดียมคลอไรด์	20,000
โซเดียมซัลเฟต	10,000
กรด	
เกลือของแร่เหล็ก	10,000
ฝุ่นหรือผงหรืออนุภาคลอยตัว	2,000
น้ำทะเล	35,000
น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม	4,000
น้ำโสโครก	400
น้ำตาล	500
ตะไคร่น้ำ	1,000
โปแตสเซียมและโซเดียมไฮดรอกไซด์	0.5-1.0% (โดยน้ำหนักของซีเมนต์
น้ำมัน	2.0% (โดยน้ำหนักของซีเมนต์)

คาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต ถ้ามีโซเดียมคาร์บอเนตผสมอยู่เป็นปริมาณมาก จะทำให้คอนกรีตเข็งตัวเร็วขึ้น หรือถ้ามีโซเดียมและโปแตสเซียมไบคาร์บอเนต เกินกว่า 0.01% จะทำให้กำลังของคอนกรีตลดต่ำลง และระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับจำนวนไบคาร์บอเนต ยอมให้มีคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตผสมอยู่ได้ไม่มากว่า 1,000 ppm. (0.1%)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เกลือของแร่เหล็ก (Iron Salt) ถ้ามีน้อยกว่า 4% หรือ 40,000 ppm. จะไม่ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงแต่อย่างใด

น้ำตาล ถ้ามีน้ำตาลละลายปนอยู่ประมาณ 0.03 - 0.15% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ จะทำให้การก่อตัวช้าลง แต่ถ้ามีปนอยู่มากกว่า 0.20% จะทำให้การก่อตัวกลับเร็วขึ้น ยิ่งถ้ามีมากกว่า 0.25% การก่อตัวก็จะยิ่งเร็วขึ้นมาก และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน จะลดลง

น้ำมัน ในบางครั้งอาจมีน้ำมันปนอยู่ในน้ำ ซึ่งจะทำให้คุณภาพของคอนกรีตเสียไป ถ้าเป็นน้ำมันปิโตรเลียมบริสุทธิ์ โดยไม่มีน้ำมันพืช หรือน้ำมันสัตว์เจือปนอยู่ด้วย อาจจะไม่ทำให้กำลังของคอนกรีตผิดไป แต่อย่างไรก็ดี ถ้ามีน้ำมันปิโตรเลียมผสมอยู่ในน้ำมากกว่า 2% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ คอนกรีตจะมีกำลังลดลงมากกว่า 20%

ตะใคร่น้ำ มีผลเสียอย่างมากต่อกำลัง และการยึดเหนี่ยวของคอนกรีต และทำให้เกิดช่องว่างและรูพรุนในคอนกรีต ยอมให้มีได้ไม่เกินกว่า 1,000 ppm.

ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตขึ้นอยู่กับส่วนผสมและคุณสมบัติของหิน ทรายและซีเมนต์ คอนกรีตจะแข็งแกร่ง ทนทาน มีรูโพรงหรือแน่นทึบก็ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใส่ลงไป ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตโดยมากจะบอกเป็นอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์โดยน้ำหนัก ถ้าใส่น้ำมากเกินไปคุณภาพของคอนกรีตก็จะลดลง เนื่องจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเคมีกับซีเมนต์ระเหยออกไปเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ทำให้เกิดเป็นโพรงช่องว่างในเนื้อคอนกรีต จึงมีกำลังความแข็งแรงในด้านต่างๆ น้อยลง กำลังอัดของคอนกรีตต่ำสุดสำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 กำลังอัดของคอนกรีตต่ำสุดสำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆกัน

อัตราส่วน W/C โดยน้ำหนัก	**กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก 15x30 ซม. เมื่ออายุ 28 วัน (กก. ต่อตาราง ซม.)**	
	คอนกรีตที่ไม่ได้กระจายกักฟองอากาศ	**คอนกรีตกระจายกักฟองอากาศ**
0.35	420	335
0.40	350	280
0.50	280	225
0.60	225	180
0.70	175	140
0.80	140	115

น้ำที่ต้องการใช้จริง ๆ เพื่อผสมกับปูนซีเมนต์ให้แข็งได้นั้น มีปริมาณน้อยกว่าที่ใช้ในการผสมคอนกรีตสำหรับใช้เทเข้าแบบมาก แต่ถ้าจะใช้น้ำเพียงแต่พอความต้องการของปูนซีเมนต์ดังกล่าว คอนกรีตจะแห้งมากเกินไป จนไม่สะดวกในการที่จะเทลงแบบและกระทุ้งให้เป็นรูปได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้น้ำมากเกินกว่าที่ปูนซีเมนต์ต้องการจริงๆ แต่ต้องไม่ลืมว่าถ้าใช้น้ำเพิ่มมากขึ้นเท่าใด กำลังของคอนกรีตก็จะลดลงไปตามลำดับ ดังตารางที่ 2.8 ปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ระหว่างน้ำกับซีเมนต์อย่างเพียงพอและสมบูรณ์ต้องไม่น้อยกว่า 30% ของน้ำหนักของซีเมนต์ ในงานคอนกรีตบางอย่าง เช่น งานคอนกรีตเสริมเหล็กถ้ามีเหล็กเสริมมากจำเป็นต้องผสมคอนกรีตให้เหลวพอที่จะเทให้ลอดเข้าไปในช่องว่างระหว่างเหล็กได้ นั่นคือต้องใส่น้ำมากขึ้น และถ้าจะให้ได้กำลังคอนกรีตเพียงพอกับความต้องการ ก็ต้องเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เข้าไปในส่วนผสมอีก

2.7.2 น้ำสำหรับบ่มคอนกรีต (water for curing concrete)

น้ำที่มีสารเจือปน เช่น ฝุ่น (Silt) น้ำมัน หรือเกลือ ผสมอยู่พอสมควรอาจใช้ในการบ่มคอนกรีตได้ โดยไม่ทำให้เกิดรอยเปื้อนหรือสีบนผิวคอนกรีต น้ำที่มีกรดหรือสารอินทรีย์เจือปนจะต้องได้รับการตรวจสอบก่อนนำไปใช้ และจะต้องระวังสารอินทรีย์พวกกรดแทนนิค (tannic acid) เกลือของแร่เหล็ก เพราะอาจก่อให้เกิดรอยเปื้อนเปรอะบนผิวคอนกรีตได้

2.7.3 น้ำสำหรับล้างวัสดุผสม (washing water)

การใช้น้ำที่มีสารเจือปน เช่นพวก ฝุ่น (Silt) เกลือ และสารอินทรีย์ต่าง ๆ ล้างวัสดุผสมให้สะอาดก่อนที่จะนำมาใช้ผสมทำคอนกรีตนั้น สารเจือปนเหล่านี้จะไปเคลือบอยู่บนผิวของวัสดุผสม และอาจเป็นสาเหตุให้เนื้อคอนกรีตผุกร่อน คอนกรีตแข็งตัวช้า หรือกำลังลดลง ฉะนั้นจึงควรเปลี่ยนน้ำที่ใช้ล้างวัสดุผสมบ่อยๆ เพราะเท่าที่พบเห็น การล้างจะใช้บุ้งกี๋ซึ่งใส่ หิน กรวด ทราย และจุ่มลงไปในถัง จนน้ำในถังนั้นดำเป็นโคลนก็ไม่ค่อยเปลี่ยนน้ำกัน ดังนั้นแทนที่จะทำให้วัสดุนั้นสะอาด ก็กลับสกปรกขึ้นไปอีก ปริมาณของสารเจือปนที่ยอมให้มีอยู่ในน้ำสำหรับล้างวัสดุผสมนั้นไม่แน่นอน ควรใช้วิธีทดลองและเปรียบเทียบโดยใช้น้ำที่มีสารเหล่านี้เจือปน และน้ำสะอาดล้างวัสดุผสมที่จะใช้ผสมทำคอนกรีตแล้วเปรียบเทียบหาผลเสียหายว่าเป็นอย่างไร

2.8 สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีต (Concrete Admixture) หมายถึง สารใดๆ นอกเหนือไปจากน้ำ ปูนซีเมนต์ หิน และทราย ที่ใช้เติมลงไปในส่วนผสมของคอนกรีตไม่ว่าจะก่อนหรือกำลังผสม เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพคอนกรีตขณะยังเหลวอยู่ หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพของวัสดุ สิ่งแวดล้อม และ

สภาพการทำงาน วัตถุประสงค์ทั่วไปของการใช้น้ำยาผสมคอนกรีตก็คือ ปรับปรุงความสามารถเทได้ เร่งหรือหน่วงเวลาการก่อตัว ควบคุมหรือดัดแปลงการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต ปรับปรุงคุณสมบัติด้านการต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน การทนต่อกรดและซัลเฟต เป็นต้น หรือเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง โดยสารผสมเพิ่มมิได้มีส่วนช่วยแก้ไขคอนกรีตที่มีส่วนผสมไม่ดีหรือมีวิธีการปฏิบัติงานที่ไม่ถูกต้อง ในปัจจุบันได้มีการขยายการใช้สารผสมเพิ่มไปทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษ กล่าวคือ ใช้ปูนซีเมนต์ทั่วๆไปผสมกับสารผสมเพิ่มที่เหมาะสม ซึ่งจะปรับปรุงหรือเปลี่ยนคุณสมบัติของคอนกรีตบางประการได้ สารผสมเพิ่มที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นของเหลว แต่บางชนิดเป็นผงซึ่งแตกต่างกันตามวัสดุพื้นฐาน วัสดุเหล่านี้จะต้องไม่ทำลายคุณภาพของคอนกรีตทั้งในระยะสั้นและระยะยาวรวมทั้งต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารที่เป็นส่วนประกอบของซีเมนต์ แร่ธาตุในมวลรวมและต่อเหล็กเสริม ดังนั้นก่อนที่จะใช้น้ำยาผสมคอนกรีตควรมีการศึกษาข้อจำกัดการใช้งาน มีการตรวจสอบคุณภาพและทดสอบประสิทธิภาพรวมทั้งควรใช้งานตามข้อแนะนำของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด มิฉะนั้นอาจจะก่อให้เกิดผลเสียหายได้ (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2537)

สารผสมเพิ่มทั่วๆไปอาจแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 4 กลุ่ม คือ

ก. สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Agent)

ใช้เพื่อเพิ่มความทนทาน กรณีที่คอนกรีตต้องสัมผัสกับสภาพที่เย็นจัด เช่น ในพื้นห้องเย็น หรือในบริเวณที่มีหิมะปกคลุมบางช่วงเวลา และสารผสมเพิ่มนี้ยังปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลว

ข. สารเคมีผสมคอนกรีต (Chemical Admixture)

เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ เติมลงไปในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต เช่นเพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสมควบคุมการก่อตัวและการแข็งตัวหรือปรับปรุงความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตเหลวเป็นต้น

ค. สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture)

คุณสมบัติในการเกาะตัวดีขึ้น และยังสามารถใช้ทดแทนปริมาณปูนซีเมนต์ได้บางส่วนสารผสมเพิ่มอื่นๆ สารผสมเพิ่มอื่นๆ ที่ไม่จัดอยู่ใน 3 ประเภทแรก ซึ่งผลิตขึ้นมาเพื่อใช้งานเฉพาะอย่างเท่านั้น

2.8.1 สารเคมีผสมคอนกรีต (Chemical Admixture)

สารเคมีผสมคอนกรีต คือ สารละลายเคมีชนิดต่างๆ ที่ใส่ผสมลงในคอนกรีตเพื่อเปลี่ยนเวลาการก่อตัวและลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C494 โดยแบ่งสารเคมีผสมเพิ่มเหล่านี้ออกเป็น 7 ประเภท คือ

1. ประเภท A สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing)
2. ประเภท B สารยืดเวลาการก่อตัว (Retarding)
3. ประเภท C สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัว (Accelerating)
4. ประเภท D สารลดปริมาณน้ำและยืดเวลาการก่อตัว (Water Reducing and Retarding)
5. ประเภท E สารลดปริมาณน้ำและเร่งเวลาการก่อตัว (Water Reducing and Accelerating)
6. ประเภท F สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก (Water Reducing-High Rage)
7. ประเภท G สารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและยืดเวลาการก่อตัว (Water reducing-High Range and Retarding)

2.8.1.1 สารลดปริมาณน้ำ

สารลดปริมาณน้ำหรือที่รู้จักในชื่อ Plasticizer หมายถึง สารผสมเพิ่มที่เติมลงในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อลดปริมาณน้ำที่จะต้องใช้ผสม โดยได้ความข้นเหลวตามกำหนด และไม่มีผลกระทบต่อปริมาณฟองอากาศ หรือเวลาการก่อตัวของคอนกรีต การใช้สารลดปริมาณน้ำให้เกิดประโยชน์ทำได้ดังนี้

กรณีที่ 1 ใช้เพื่อช่วยให้งานเทคอนกรีตที่ทำได้ยาก เช่น โครงสร้างที่บางหรือมีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ดี ง่ายต่อการจี้เขย่าเข้าแบบ โดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำและซีเมนต์

กรณีที่ 2 คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ตามที่ต้องการ โดยใช้ปริมาณน้ำลดลงในขณะที่ปริมาณซีเมนต์คงที่ นั่นคืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะลดลง ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตสูงขึ้นการต้านทานการซึมผ่านของน้ำและความคงทนสูงขึ้น หรืออาจจะประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มกำลังอัดโดยไม่สามารถเพิ่มปริมาณซีเมนต์ เพราะจะเกิดปัญหาด้านอุณหภูมิที่สูงขึ้นหรือเกิดการหดตัวทำให้เกิดความแตกร้าว โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น ฐานรากแผ่ เป็นต้น

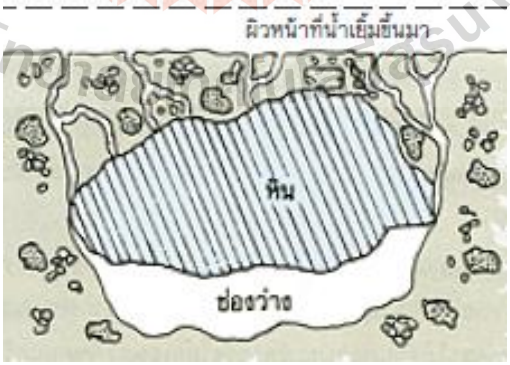
กรณีที่ 3 คอนกรีตจะมีความสามารถเทได้ตามที่ต้องการ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ นั่นคือเราสามารถลดปริมาณซีเมนต์ลงได้ การลดปริมาณน้ำในส่วนผสม เป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับงานคอนกรีตจะพบว่าสารเคมีผสมคอนกรีต 5 ใน 7 ชนิด จะมีคุณสมบัติลดปริมาณน้ำเราควรมาพิจารณาถึงหน้าที่ของน้ำในส่วนผสมคอนกรีตอีกทีเพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้น น้ำเป็นส่วนผสมที่สำคัญมากส่วนหนึ่งในการผลิตคอนกรีต โดยจะทำหน้าที่ 3 อย่างคือ

1. เข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ หรือปฏิกิริยา Hydration
2. ทำหน้าที่เคลือบหินและทรายให้เปียก เพื่อซีเมนต์จะเข้าเกาะและแข็งยึดติดกัน
3. ทำหน้าที่หล่อลื่นให้หิน ทราย ซีเมนต์ อยู่ในสภาพเหลวสามารถไหลเข้าแบบได้ง่าย

น้ำจำนวนพอดีที่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น คือประมาณ 28±1% ของน้ำหนักซีเมนต์ หรืออัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) = 0.28±0.01 แต่คอนกรีตทั่วไปใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากกว่า 0.35 น้ำเกินนี้จะเข้าไปทำหน้าที่ในข้อ 2 และ 3 ทำให้คอนกรีตเหลว ทำงานได้สะดวกขึ้น น้ำส่วนนี้ถูกเรียกว่า “น้ำส่วนเกิน” (Excess Water) น้ำส่วนเกิน ถ้ามีมากเกินไปจะมีผลเสียต่อคอนกรีต คือ

1. เกิดการเยิ้มของน้ำขึ้นมาที่ผิวหน้ามาก (Bleeding)
2. เกิดการแยกตัว
3. กำลังอัดต่ำลง
4. เกิดการหดตัว
5. ทำให้เกิดรูพรุน มีผลทำให้คอนกรีตขาดความทนทาน

ในรูปที่ 2.3 แสดงลักษณะคอนกรีตที่ใช้น้ำมากเกินไป น้ำส่วนหนึ่งจะอยู่ในลักษณะเป็นแอ่งใต้หินและบางส่วนจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าคอนกรีต ซึ่งคือการเยิ้ม (Bleeding) เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแอ่งน้ำดังกล่าว จะกลายเป็นโพรงอากาศทำให้ความทนทานและกำลังอัดคอนกรีตต่ำลง



รูปที่ 2.3 ลักษณะคอนกรีตที่ใช้ปริมาณน้ำมากเกินไป

(ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2537)

สารผสมเพิ่มชนิดนี้ช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีตทั้งนี้เพราะมีคุณสมบัติ ในการช่วยเปลี่ยนคุณสมบัติของผิวต่อระหว่างของแข็งและน้ำในคอนกรีต ปกติอนุภาคซีเมนต์ต่าง ๆ ในคอนกรีตจะมีประจุไฟฟ้าเหลือตกค้างบนผิว ซึ่งอาจเป็นขั้วบวก หรือลบก็ได้ อนุภาคซึ่งมีประจุต่างกันจะดูดรวมกันเป็นกลุ่ม (Flocculate) ซึ่งสามารถดูด น้ำได้จำนวนมากทำให้เหลือน้ำหล่อลื่นคอนกรีตเหลวอยู่น้อย โมเลกุลของสารผสมเพิ่มชนิดนี้ช่วยทำให้ประจุเป็นกลาง หรือทำให้ประจุบนผิวอนุภาคต่าง ๆ กลายเป็นประจุชนิดเดียวกันจึงเกิดแรงผลักดันซึ่งกันและกัน ทำให้แยกตัวกันในเนื้อเพสต์ น้ำที่ผสมไปในคอนกรีตส่วนใหญ่จึงสามารถถูกใช้ลดความหนืดของเพสต์

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงานของสารลดปริมาณน้ำ

1. ชนิดและปริมาณการใช้ของสารลดปริมาณน้ำ
2. ชนิดของซีเมนต์และสารประกอบ
3. ชนิดของมวลรวมและส่วนคละ
4. สัดส่วนผสม
5. อุณหภูมิ

ถ้าใช้สารลดปริมาณน้ำในปริมาณปกติ ปริมาณน้ำที่ลดลงจะอยู่ในช่วง 5-10% อย่างไรก็ตามควรทดสอบในห้องปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง เพื่อหาชนิดและปริมาณของสารผสมเพิ่มที่จะให้บรรลุคุณสมบัติที่เหมาะสม

ผลของสารลดปริมาณน้ำต่อคอนกรีตสด

1. สารลดปริมาณน้ำนี้จะเพิ่มความสามารถเทได้ ถ้าไม่มีการปรับส่วนผสมอื่นๆ โดยปกติจะทำให้คอนกรีตมีค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น 25-50 มม.
2. สารลดปริมาณน้ำที่มีสารประกอบของ Hydroxycarboxylic Acid จะสามารถลดปริมาณน้ำจะมากกว่าสารประกอบของ Lignosulphonate
3. ค่าอัตราการสูญเสียการยุบตัว (Slump Loss) ในช่วงแรกของคอนกรีตที่ใส่สารลดปริมาณน้ำจะมากกว่าคอนกรีตทั่วไป
4. สารลดปริมาณน้ำที่มาจากเกลือของ Hydroxycarboxylic Acid มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดการเยิ้ม (Bleeding) ดังนี้นควรใช้ด้วยความระมัดระวัง โดยเฉพาะกับคอนกรีตที่มีค่ายุบตัวมาก
5. สารลดปริมาณน้ำที่มาจาก (Lignosulphonate) จะลดการเยิ้มเนื่องจากสารประกอบพวกนี้จะก่อให้เกิดฟองอากาศขึ้นเล็กน้อย คืออยู่ในช่วง 1.3%

6. โดยทั่วไปสารลดปริมาณน้ำจะมีผลต่อเวลาการก่อตัวคือจะหน่วงเวลาการก่อตัวเล็กน้อย
7. ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมคอนกรีต สารลดปริมาณน้ำจะไม่มีผลต่อความร้อนจากปฏิกิริยาของคอนกรีต (Heat of Hydration)

ผลของสารลดปริมาณน้ำต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

1. ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน คอนกรีตที่ใส่สารลดปริมาณน้ำจะให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของเม็ดปูนซีเมนต์ในส่วนผสม
2. เนื่องจากสารลดปริมาณน้ำส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง นั่นคือ กำลังอัดที่อายุ 28 วันจะสูงขึ้น ผลทางอ้อมก็คือ กำลังอัดช่วงต้นก็จะเพิ่มขึ้นด้วย
3. การหดตัว (Drying Shrinkage) และ Creep จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความสามารถเทได้และกำลังอัดที่ 28 วันเท่ากัน
4. ผลของการลดปริมาณน้ำในส่วนผสม ทำให้ความทนทานและการกันซึมสูงขึ้น เพราะคอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

2.8.1.2 สารยืดเวลาการก่อตัว

สารยืดเวลาการก่อตัวเป็นสารเคมีที่หน่วงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นซึ่งส่งผล หน่วงการก่อตัวของคอนกรีตด้วยสารผสมเพิ่มชนิดนี้โดยทั่วไปจะใช้ในงานคอนกรีตในเขตร้อน เช่น ในประเทศไทย เป็นต้น เพราะที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดเร็วมาก เวลาการก่อตัวของซีเมนต์จะลดลง นอกจากนี้ยังเหมาะกับงานคอนกรีตประเภทอื่น ๆ อีก เช่น

1. งานโครงสร้างขนาดใหญ่ โดยยืดเวลาการก่อตัวเพื่อป้องกันการเกิด Cold Joint
2. งานเขื่อน โดยลดความร้อนในคอนกรีตเพื่อป้องกันการแตกร้าว
3. งานเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ ซึ่งบางครั้งต้องยืดเวลาการแข็งตัวของคอนกรีตออกไป 6-8 ชั่วโมง

สารผสมเพิ่มชนิดยืดเวลาการก่อตัวแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ตามส่วนประกอบทางเคมี ดังนี้

1. กรด Lignosulphonic และเกลือของ Lignosulphonic
2. กรด Hydroxycarboxylic และเกลือของ Hydroxycarboxylic
3. น้ำตาลและสารประกอบของน้ำตาล

4. เกลืออนินทรีย์

สารเคมีหลาย ๆ ตัวจะเหมือนกับของสารลดปริมาณน้ำ แต่จะใช้ในปริมาณที่มากกว่า มีหลายทฤษฎีที่พยายามอธิบายการทำงานของสารผสมเพิ่มชนิดนี้ แต่ทฤษฎีที่สำคัญสามารถอธิบายเรื่องนี้ได้ดีคือ สารผสมเพิ่มชนิดยืดเวลาการก่อตัวนี้จะถูกดูดซึมไว้บนผิวของอนุภาคซีเมนต์ ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นกับอนุภาคซีเมนต์ลดลง นั่นคือการหน่วงเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

2.8.1.3 สารเร่งเวลาการก่อตัว และแข็งตัว

สารเร่งเวลาการก่อตัวและแข็งตัวเป็นสารที่เร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่งผลเร่งการก่อตัว และการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้น โดยทั่วไปจะใช้สำหรับงานดังต่อไปนี้

1. งานก่อสร้างเร่งด่วน เช่น งานที่ต้องการถอดไม้แบบเร็ว งานซ่อมแซมต่าง ๆ
2. งานหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตในโรงงาน เพื่อจะให้การหมุนเวียนแบบหล่อทำได้อย่างรวดเร็ว
3. งานคอนกรีตในฤดูหนาว สำหรับในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็นจัด

สารผสมเพิ่มชนิดนี้จะแตกต่างจากสารที่ทำให้เกิดการก่อตัวอย่างกะทันหัน (Set Accelerating Admixture) ซึ่งจะก่อตัวภายใน 2 - 3 นาที และเหมาะในงาน Shotcrete สำหรับอุดรูรั่วภายใต้ความดันของน้ำ หรือการซ่อมแซมอย่างกะทันหัน สารเร่งเวลาการก่อตัวส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารเคมีดังนี้

1. Calcium Chloride
2. Calcium Formate
3. Calcium Nitrate

แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเคมีที่ถูกนำมาใช้เร่งการก่อตัวของคอนกรีตอย่างกว้างขวางด้วยเหตุผลที่สำคัญ 2 ประการคือ ราคาไม่แพง และหาได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้พบว่าแคลเซียมคลอไรด์ จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมคอนกรีต ดังนั้นจึงหันมาสนใจสารเคมีอื่นที่ไม่มีเกลือคลอไรด์ (Chloride-Free) อันได้แก่ Calcium Formate และล่าสุดได้มีการพัฒนาสารเร่งการก่อตัวที่มีสารเคมีหลักคือ Calcuim Nitrate ขึ้นใช้อย่างแพร่หลาย สารเร่งเวลาการก่อตัวของคอนกรีตทำหน้าที่เสมือนตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Catalyst) ระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ผลก็คือ จะเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นและกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นในเวลาอันรวดเร็ว

2.8.1.4 สารเคมีผสมคอนกรีตอื่นๆ

1. สารลดปริมาณน้ำและยืดเวลาการก่อตัว

เป็นสารผสมเพิ่มที่ใช้มากที่สุดสำหรับงานคอนกรีตในประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานคอนกรีตผสมเสร็จ

2. สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก

มักเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า “Superplasticizer” สารผสมนี้สามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสมได้ 15 - 30 % ทั้งนี้เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการผลักดัน มีแรงผลักดันมากกว่าสารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำทั่วๆ ไป ในปัจจุบันสารผสมเพิ่มประเภทนี้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในโรงงานผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป เพราะการลดน้ำในปริมาณมาก ๆ ทำให้อัตราน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดในช่วงต้นที่สูงมาก ทำให้สามารถถอดแบบและตัดลวด Pre-Stressed ได้ในเวลารวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้ ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย

3. สารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและยืดเวลาการก่อตัว

เป็นสารผสมเพิ่มที่พัฒนาล่าสุด เหมาะสำหรับงานคอนกรีตผสมเสร็จที่ต้องการคอนกรีตที่เหลวมาก ๆ เช่นในงานฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ หรือ เสา คาน และชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีเหล็กเสริมจำนวนมาก คอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่มนี้จะมีค่ายุบตัวมากกว่า 15 ซม. ทำให้สามารถลื่นไหลเข้าไปในทุกซอกทุกมุมของเหล็กเสริมและไม้แบบ โดยไม่ต้องทำการจี้เขย่าคอนกรีตมากนัก คอนกรีตประเภทนี้มีชื่อเรียกทั่ว ๆ ไปว่า “Flow Concrete”

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมหมาย แสวงกิจ (2538) ได้ศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินในการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีต โดยได้นำเอาเถ้าถ่านหินซึ่งเป็นผลพลอยได้ จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าไปผสมในซีเมนต์มอร์ต้าในปริมาณมาก และศึกษาถึงปริมาณการกัดกร่อน และการพัฒนา กำลังอัดของแท่งซีเมนต์มอร์ต้าที่อยู่ในสภาวะถูกกัดกร่อนจากสารละลายซัลเฟต การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณของเถ้าถ่านหินที่เหมาะสมที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ บางส่วนในส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ต้าสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตที่มีลักษณะการใช้งานและสภาวะการณ์ถูกกัดกร่อนแตกต่างกัน การวิจัยครั้งนี้ใช้สารละลายกรดซัลฟูริก ซึ่งพบมากในธรรมชาติ และมีความสะดวกต่อการจัดเตรียมในห้องทดลองมาทดสอบโดยจะ พิจารณาความสามารถในการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีต จากค่า การสูญเสียน้ำหนักในระหว่าง

กระบวนการกัดกร่อน นอกจากนี้ยัง ได้เปรียบเทียบคุณสมบัติของเถ้าถ่านหินจาก 2 แหล่งคือ เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะและที่นำเข้ามาจากฮ่องกง ในการนำไปใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อต้านทานการกัดกร่อน การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการหล่อแท่งมอร์ต้า รูปลูกบาศก์ มาตรฐานขนาด 50 x 50 x 50 มม. และแช่ลงในสารละลายกรดซัลฟูริก โดยมีปริมาณของเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ บางส่วน ร้อยละ 0, 25, 35, และ 50 ตามลำดับ และแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริก ที่ 30 มล./ล., 70 มล./ล. และ 100 มล./ล. และจะนำขึ้นมาทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก และการรับแรงอัด ตามอายุต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ ผลการศึกษาพบว่า แท่งซีเมนต์มอร์ต้า ที่มีปริมาณของเถ้าถ่านหินที่ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ร้อยละ 50 จะสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าแท่งซีเมนต์มอร์ต้า ที่มีเถ้าถ่านหิน ผสมอยู่ ร้อยละ 35, 25, และไม่มีเถ้าถ่านหินตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน และปรากฏว่าปริมาณการกัดกร่อนจะแปรผันตรงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริก นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าถ่านหินฮ่องกงมีคุณสมบัติในการช่วยต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินแม่เมาะ เมื่อมีตัวแปรต่างๆ เหมือนกัน จากการรวบรวมผลปริมาณการกัดกร่อนและกำลังอัดของแท่ง ตัวอย่างต่าง ๆ ยังพบว่าปริมาณของเถ้าถ่านหินที่เหมาะสม ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในโครงสร้างคอนกรีตทั่ว ๆ ไปในสภาวะที่ถูกกัดกร่อนน้อย ๆ อยู่ที่ร้อยละ 25-35 ส่วนโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะกัดกร่อนสูงขึ้นจะต้องเพิ่มปริมาณของเถ้าถ่านหินให้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 35-50 ซึ่งจะทำให้ค่า กำลังอัดน้อยกว่าค่ากำลังอัดของส่วนผสมปกติประมาณร้อยละ 20-50

สำเริง รักซ้อน และ ทง ลานธารทอง (2556) ได้ศึกษากำลังอัดและการต้านทานกรดของคอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย SCC และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน กับกำลังอัดของคอนกรีต SCC ซึ่งวัสดุปอซโซลานประกอบด้วย FA (เถ้าถ่านหินแยกขนาด), GBTA (เถ้าหนักแยกขนาดบดละเอียด) และ GRHBA (เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด) โดยกำหนดให้คอนกรีต CT คือคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมล้วน สำหรับใช้เปรียบเทียบผลการทดสอบ ที่อายุ 7 วัน กำลังอัดของคอนกรีต SCC มีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีต CT ยกเว้นคอนกรีต 20FA ที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต CT เล็กน้อย นอกจากนั้น ผลการทดสอบยังพบอีกว่า ที่อายุ 28 และ 90 วัน กำลังอัดของ SCC คอนกรีต มีแนวโน้มคล้ายกันกับที่อายุ 7 วัน กล่าวคือกำลังอัดของคอนกรีต SCC มีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีต CT โดยที่อายุ 28 และ 90 วัน คอนกรีต 20FA มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต CT เล็กน้อยเช่นเดียวกับที่อายุ 7 วัน

การใช้ GBTA แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต SCC คอนกรีตของงานวิจัยนี้ ให้ค่ากำลังอัดต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีต CT, FA และGRHBA ในทุกส่วนผสม อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาถึงการ

นำไปใช้ในงานภาคสนามที่ต้องการกำลังอัดอยู่ในช่วง 22-24 MPa หรือประมาณ 220-240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ก็สามารถนำไปผลิตเป็นคอนกรีต SCC ได้เช่นเดียวกัน

คอนกรีต FA มีค่ากำลังอัดสูงสุดตามด้วยคอนกรีต GRHBA และ GBTA ตามลำดับ เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็ก และกลมตันของ FA ช่วยอุดช่องว่างภายในโพรงเพสต์ และอนุภาคที่มีขนาดเล็กเมื่อกระจายตัวในเพสต์ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี การเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วย GBTA และ GRHBA มีแนวโน้มส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีต SCC มีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม การใช้ FA แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของ SCC สูงขึ้น เมื่อเทียบกับวัสดุปอซโซลานอื่น การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุการทดสอบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาการใช้งานจริงในภาคสนาม พบว่าที่อายุ 28 วัน คอนกรีต SCC แทนที่ด้วย FA, GRHBA และ GBTA ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 24-42.5 MPa คอนกรีต SCC แทนที่ด้วย FA, GRHBA และ GBTA ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 22-39.5 MPa ส่วนคอนกรีต SCC แทนที่ด้วย FA, GRHBA และ GBTA ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 19.5-33.5 MPa ดังนั้นสามารถนำส่วนผสมของ SCC ไปใช้ประยุกต์ใช้งานจริงได้เมื่อต้องการกำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 19.5-42.5 MPa หรือประมาณ 195-425 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

ที่อายุ 28 วัน คอนกรีต SCC แทนที่ด้วย GRHBA ในปริมาณร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 21-27 MPa หรือประมาณ 210-270 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ GRHBA ที่มีค่าสูงเนื่องจากขนาดอนุภาคที่ผ่านการบดละเอียดให้เล็กส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้นจึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็วเพิ่มการยึดเกาะระหว่างมวลรวมและเพสต์ จึงทำให้กำลังอัดสูงขึ้น การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต SCC มีแนวโน้มเป็นไปอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานของ GRHBA ที่มีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างต่าง ๆ ในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่น (Mrtha 1987; Chindaprasirt et al 2008, Rukzon and Chindaprasirt 2010)

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ SCC คอนกรีตเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก พบว่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่ออายุทดสอบเพิ่ม เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมสามารถต้านทานกรดได้ดีกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วน การที่คอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนทานต่อการกัดกร่อนจากกรดไม่ดีนัก เนื่องจากมีความเป็นด่างสูง คอนกรีตจึงถูกทำลายจากกรดได้ง่าย ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2553) ผลการทดสอบครั้งนี้มีแนวโน้มว่า GRHBA ต้านทานกรดได้ดี ตามด้วย FA และ GBTA เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีองค์ประกอบทาง

เคมีหลักที่สามารถลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้ต่ำลง ซึ่งการกัดกร่อนจากกรดเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักเนื่องมาจากการกัดกร่อนของกรดน้อยลง

สัญญา ธิรางกูรรัตน์ (2544) ได้ศึกษาการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกต่อคอนกรีตและมอร์ต้าผสมวัสดุปอซโซลาน โดยศึกษาถึงผลกระทบของประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหิน ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหิน และอายุการบ่ม ในส่วนผสมมอร์ต้าต่อการกัดกร่อน เนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริก ที่มีความเข้มข้นต่างกัน และศึกษาถึงผลกระทบของวัสดุปอซโซลานต่อการกัดกร่อน เนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริกในส่วนผสมคอนกรีต ในรูปของน้ำหนักที่สูญเสีย ในส่วนผสมมอร์ต้าใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด, แยกขนาดละเอียดปานกลาง และแยกขนาดละเอียดมาก ในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำหนดให้ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ทุกส่วนผสม จากนั้นนำมอร์ต้าที่บ่มในน้ำจนอายุครบ 28, 42, 56 และ 90 วัน มาทดสอบกำลังอัด และแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก ที่มีค่า pH เท่ากับ 0.5, 2.0 และ 3.5 สำหรับส่วนผสมคอนกรีตทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหิน, เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 2 ชนิด, เถ้าแกลบ และไมโครซิลิกา จากนั้นบ่มคอนกรีต ในน้ำจนอายุครบ 28 วัน นำมาทดสอบกำลังอัดและแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีค่า pH เท่ากับ 1.25 ผลการวิจัยพบว่าเมื่อสารละลายกรดซัลฟูริกมีค่า pH 0.5 มอร์ต้าที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5 ต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่ามอร์ต้าที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 การเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหิน และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด สามารถเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนได้ แต่เมื่อความเข้มข้นของ สารละลายกรดลดลงคือมีค่า pH 2.0 และ 3.5 พบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเถ้าถ่านหิน จะส่งผลให้การกัดกร่อนเพิ่มขึ้น การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหิน และอายุการบ่มของมอร์ต้า พบว่าไม่ส่งผล ต่อการเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก และการทดสอบคอนกรีตพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภที่ 1 ด้วยไมโครซิลิกา ช่วยเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกที่มีค่า pH 1.25 ได้ดีกว่าวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น ๆ

สุภิชาติ เจนจิระปัญญา และ ปิติศานต์ กร้ำมาตร (2557) ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์วัสดุกากอุตสาหกรรมเป็นสารปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 40 และ 50 ของปริมาณปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก โดยวัสดุกากอุตสาหกรรมที่ศึกษาคือเถ้าลอย และ

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตเบื้องต้น และคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต เพื่อสามารถนำวัสดุกากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดปัญหาในการกำจัดทิ้ง ผลการทดลองพบว่า วัสดุกากอุตสหกรรมคือเถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีศักยภาพในการแทนที่ปูนซีเมนต์ คุณสมบัติด้านกำลังยังมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนในช่วงอายุต้น แต่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น เนื่องจากการเกิดของปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่วนการเกิดคาร์บอเนชั่นจะเกิดอย่างรวดเร็วเมื่อผสมวัสดุกากอุตสาหกรรมในส่วนผสม มีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าก้อนตัวอย่างที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ล้วน และมีการขยายตัวที่ต่ำในสารละลายซัลเฟต เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลงและผลจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปริญญา คูณมี (2556) ได้ศึกษาการใช้ตะกรันเหล็กเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติ ตะกรันเหล็กถูกจัดเป็นของเสียอันตรายที่เกิดจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดสูงงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณตะกรันเหล็กที่เหมาะสมมาใช้แทนปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ในการผลิตคอนกรีตที่สามารถรับแรงอัดได้ในช่วง 240-260 kg/cm ^{2} เนื่องจากเป็นการศึกษาเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ใช้ตะกรันเหล็กแทนปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ในสัดส่วนร้อยละ 10 โดยปริมาตรเท่านั้น ผู้วิจัยได้ใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งและใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองพบว่า ในการผลิตคอนกรีต 1 m^{3} สามารถใช้ตะกรันเหล็กแทนส่วนผสมอื่น ๆ ได้ถึง 207 kg ซึ่งใช้ผสมแทน ปูนซีเมนต์ ทราย และหิน เท่ากับ 15.7 kg, 37.4 kg และ 153.9 kg ตามลำดับ โดยใช้เวลาบ่มคอนกรีต ที่ 28 วัน คอนกรีตที่ได้จากส่วนผสมดังกล่าวจะรับกำลังอัดเฉลี่ยได้เท่ากับ 250 kg/cm^{2} ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกรันเหล็กได้ประมาณ 255 บาท และลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตลงได้ร้อยละ 5 ต่อการผลิตคอนกรีต 1 m^{3}

จตุพล ตั้งปกาศิต และนฤชาติ ชูเมือง (2558) ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต คอนกรีตใช้ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 320 กก/ม.^{3} และ 400 กก/ม.^{3} และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใช้เท่ากับ 0.50 ผลการศึกษาพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ล้วน โดยการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานน้อยกว่า มีค่าน้อยกว่าของเมื่อใช้ประมาณวัสดุประสานมากกว่า ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่ามากกว่าของคอนกรีต (OPC) ล้วน

ยกเว้นคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในประมาณน้อย จะให้ค่าการขยายตัวน้อยกว่าของ (OPC) ล้วน โดยการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานน้อยกว่า มีค่ามากกว่าของเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า นอกจากนี้พบว่า การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของคอนกรีต (OPC) ล้วน โดยเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานที่น้อยกว่าส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดน้อยกว่าของเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานที่มากกว่า

เจต นาจารย์ (2558) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดโดยการแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลการศึกษาพบว่าความต้องการน้ำของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่าช้ากว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีแนวโน้มให้ค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน นอกจากนี้พบว่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และสุดท้ายพบว่าคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

สมภพ สุวรรณกริน (2539) ได้ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยได้ศึกษาปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมประกอบด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิก ผลผลิตที่สำคัญจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นคือคัลเซียมไฮดรอกไซด์และคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะให้คัลเซียมไฮดรอกไซด์ให้เกิดเป็นคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เพิ่มขึ้นทำหน้าที่ยึดประสานเนื้อคอนกรีตเพิ่มกำลังของคอนกรีตให้สูงขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นตามอายุโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ด้วยการวัดน้ำหนักภายใต้ความร้อนสูง, (Thermogravimetry Analysis, (TGA)) แล้วนำมาคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเพื่อหาปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากสมการเคมีได้ เพื่อนำไปสู่การอธิบายผลกระทบของซิลิกาฟูมต่อกำลังอัดของคอนกรีตเปรียบเทียบกับของคอนกรีตธรรมดา ในการทดสอบหาปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์โดยวิธี TGA จากหลักการที่ว่าคัลเซียมไฮดรอกไซด์จะสลายตัวทำให้น้ำหนักหายไปที่อุณหภูมิ 450-600

degree C จึงสามารถวัดค่าในส่วนที่หายไปได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูมด้วยการแทนที่ซีเมนต์ประมาณ 5-25% โดยน้ำหนัก โดยยึดส่วนผสมของคอนกรีตมีประมาณซีเมนต์ 500 กก. ลบ.ม. สัดส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียด 0.26-0.32 และปรับแก้คุณสมบัติจากผลกระทบของซิลิกาฟูมให้คงสภาพคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งในสภาพเหลวและคอนกรีตแข็งตัวตามอายุ ผลการทดสอบพบว่าในซีเมนต์เพสต์ธรรมดาคัลเซียมไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามอายุเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น แต่เมื่อผสมซิลิกาฟูมปริมาณคัลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดอัตราการเพิ่มหลังจาก 7 วัน จากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างซิลิกาฟูมกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเริ่มปรากฏผลตั้งแต่อายุยังน้อย แต่ในช่วงแรกอายุ 1-3 วันหากใช้ปริมาณซิลิกาฟูมในประมาณน้อย ๆ 5-10 % จะไม่เห็นผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิก แต่ที่ประมาณเกินกว่า 15% จะเริ่มเห็นผลของคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เพิ่มขึ้น ส่วนอายุเกินกว่า 7 วันปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะปรากฏผลได้แม้ที่ปริมาณซิลิกาฟูมเพียง 5% กำลังอัดของคอนกรีตจะแปรผันตรงกับปริมาณคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโดยสมการความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงโดยมีความเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยด้วยสัมประสิทธิ์การแปรปรวนที่ 0.95 – 1.05 เท่านั้น การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมด้วยปริมาณ 15% จะให้กำลังอัดอายุ 1,3 และ 28 วัน เท่ากับ 55,90 และ 140% ของกำลังอัดคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วัน ในขณะที่คอนกรีตผสมด้วยซิลิกาฟูม 5% พัฒนากำลังที่ 1, 3, และ 28 วัน เท่ากับ 50, 80 และ 110% เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่ 28 วัน อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณซิลิกาฟูมเกินกว่า 5% จะทำให้ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตเหลวลดลงทั้งจากค่าการยุบตัว จึงต้องมีการปรับแต่งให้มีการไหลลื่นดีขึ้นด้วยการเติมปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพิ่ม ดังนั้นการใช้ซิลิกาฟูมให้มีประสิทธิผลทั้งกำลังอัดและความสามารถทำงานด้วยอัตรา 5 % ที่สัดส่วนน้ำต่ออนุภาคละเอียด 0.32 แต่หากจะพิจารณาเพียงเฉพาะกำลังอัดเพียงอย่างเดียวปริมาณซิลิกาฟูมที่มีประสิทธิผลสูงสุดควรยึดถือที่ 15% ผนวกกับการเพิ่มสารลดน้ำพิเศษให้การไหลลื่นดีได้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการศึกษา

บทนี้กล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการเตรียมวัสดุ วิธีการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์และวัสดุผสม การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต และการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนของกรด

3.1 แผนการทดสอบ

แผนการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

3.1.1 การทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของมวลรวม

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณส่วนผสมคอนกรีต สำหรับทำตัวอย่างทดสอบ โดยการทดสอบประกอบด้วย การหาขนาดคละของมวลรวม และหน่วยน้ำหนักของมวล, ค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึม

3.1.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีต ได้แก่ การหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ค่าการยุบตัว กำลังอัดในสภาวะปกติ และในสภาวะแวดล้อมที่มีความเป็นกรด

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ตามมาตราฐาน ASTM C150 ตราช้าง ของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด

3.2.2 วัสดุผสม

3.2.2.1 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำตามมาตรฐาน ASTM C33

3.2.2.2 มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ตามมาตรฐาน ASTM C33 ผลิตจากโรงโม่หิน อำเภอปากช่อง จังหวัด นครราชสีมา ขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว

3.2.3 น้ำผสมคอนกรีต ใช้น้ำประปาซึ่งปราศจากกรดด่าง น้ำมัน และอินทรีย์สาร อื่นๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีต

3.2.4 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ผลิตโดย ห้างหุ้นส่วนจำกัด กูรูโรงบด แสดงในรูปที่ 3.1

3.2.5 ซิลิกาฟูม หรือไมโครซิลิกา ผลิตโดย บริษัท เอลเคม จำกัด แสดงในรูปที่ 3.2

3.2.6 สารลดน้ำชนิด G ร้อยละ 0.60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์)

3.2.7 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 5 ใช้ทดสอบการต้านทานกรดของคอนกรีต

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.1 ตะแกรงร่อนทรายพร้อมเครื่องเขย่าตามมาตรฐาน ASTM C136 ขนาด เบอร์ 4 , 8 , 16, 30, 50 และเบอร์ 100

3.3.2 กรวยหัวตัด (Slump Mold) สำหรับค่าการยุบตัวของคอนกรีตตามมาตรฐานของ ASTM C143 และแท่งเหล็กสำหรับกระทุ้งคอนกรีตให้แน่น ปลายมนมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว ยาว 24 นิ้ว

3.3.3 เครื่องผสมคอนกรีต (Concrete Mixer) ขนาดความจุ 0.50 ลบ.ม.

3.3.4 แบบหล่อชิ้นตัวอย่างคอนกรีต รูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS 1881-108

3.3.5 เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength) ของคอนกรีต

3.3.6 เครื่องร่อนหินตามมาตรฐาน ASTM C136 ขนาดตะแกรง 3/4 ´´, 1/2 ´´, 3/8 ´´ และเบอร์ 4

3.3.7 เครื่องชั่งสำหรับหามวลของวัสดุในน้ำ

3.4 สัญลักษณ์ของวัสดุที่ใช้ทดสอบ

- PC หมายถึง คอนกรีตควบคุม ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน
- WR หมายถึง สารลดน้ำชนิด G ร้อยละ 0.60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
- GBFS หมายถึง ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด
- SF หมายถึง ซิลิกาฟูม หรือ ไมโครซิลิกา
- 20GBFS หมายถึง คอนกรีตแทนที่ด้วย GBFS ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
- 30GBFS หมายถึง คอนกรีตแทนที่ด้วย GBFS ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
- 40GBFS หมายถึง คอนกรีตแทนที่ด้วย GBFS ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
- 20GBFS-WR หมายถึง คอนกรีตผสม WR และ GBFS ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
- 30GBFS-WR หมายถึง คอนกรีตผสม WR และ GBFS ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

- 40GBFS-WR หมายถึง คอนกรีตผสม WR และ GBFS ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
- 2SF – WR หมายถึง คอนกรีตผสม WR และSF ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
- 4SF – WR หมายถึง คอนกรีตผสม WR และSF ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
- 6SF-WR หมายถึง คอนกรีตผสม WR และSF ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
- 8SF-WR หมายถึง คอนกรีตผสม WR และSF ร้อยละ 8 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
-

3.5 ส่วนผสมคอนกรีตและวิธีทำตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ

ส่วนผสมของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณ ตามวิธีของ ACI มีกำลังอัด 425 กก./ลบ.ซม. และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.40 แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของคอนกรีตต่อ 1 ลบ.ม. โดยน้ำหนัก (W/C = 0.40)

ส่วนผสมของคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)							
ตัวอย่าง	**ปูนซีเมนต์**	**ปอซโซลาน**	**หิน**	**ทราย**	**น้ำ**	**สารลดน้ำ**	**ค่ายุบตัว**
PC	488	-	1040	708	145	-	10
20GBFS	390.40	97.60	1040	708	145	-	10
30GBFS	341.60	146.40	1040	708	145	-	10
40GBFS	292.80	195.20	1040	708	145	-	10
20GBFS-WR	390.40	97.60	1040	708	123	2.93	10
30GBFS-WR	341.60	146.40	1040	708	123	2.93	10
40GBFS-WR	292.80	195.20	1040	708	123	2.93	10
2SF-WR	478.24	9.76	1040	708	123	2.93	10
4SF-WR	468.48	19.52	1040	708	123	2.93	10
6SF-WR	458.72	29.28	1040	708	123	2.93	10
8SF-WR	448.96	39.04	1040	708	123	2.93	10

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x15 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS 1881-108 (สำเริง รักซ้อน และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2557) ทำโดยเทคอนกรีตลงในแบบหล่อโดยแบ่งเป็นจำนวน 3 ชั้น ๆ ละ เท่า ๆ กัน แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กขนาด 4 ปอนด์ เนื้อที่หน้าตัด 1 ตารางนิ้ว ปลายมน เป็นจำนวนชั้นละ 35 ครั้ง และชั้นสุดท้ายปาดผิวหน้า

ให้เรียบ เมื่อหล่อตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว ให้ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก แล้วนำไปบ่มตามวิธีการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 จนกระทั่งคอนกรีตมีอายุครบตามกำหนด จึงนำแท่งตัวอย่างไปทดสอบ

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในสภาพบ่มชื้นด้วยน้ำและแช่กรดไฮโดรคลอริก

ชื่อตัวอย่าง	**ระยะเวลาและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ**	
	บ่มชื้น 28 วัน	**แช่กรด 15 วัน**
PC	3	3
20GBFS	3	3
30GBFS	3	3
40GBFS	3	3
20GBFS-WR	3	3
30GBFS-WR	3	3
40GBFS-WR	3	3
2SF-WR	3	3
4SF-WR	3	3
6SF-WR	3	3
8SF-WR	3	3
รวม	33	33

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.6 รายละเอียดวิธีการทดสอบ

3.6.1 การทดสอบคุณสมบัติของมวลรวม

3.6.1.1 ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมน้ำของทราย (Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate) โดยใช้วิธีการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C 128 ผลการทดสอบแสดงไว้ตาม ตารางที่ ข.3

3.6.1.2 ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหิน (Specific Gravity and Absorption of Coase Aggregate) โดยใช้วิธีการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C 127 ผลการทดสอบแสดงไว้ตามตารางที่ ข.5

3.6.1.3 ทดสอบหาขนาด (Gradation) ของทราย (Sieve Analysis of Sand) โดยใช้วิธีการหาขนาดของทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 136 ผลการทดสอบแสดงไว้ตามตารางที่ ข.1

3.6.1.4 ทดสอบหาขนาด (Gradation) ของหิน (Sieve Analysis of Coarse Aggregate) โดยวิธีการทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C 136 ผลการทดสอบแสดงไว้ตามตารางที่ ข.4

3.6.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

3.6.2.1 การทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีตโดยใช้โมลรูปทรงกรวยตัดเส้นผ่าศูนย์กลางบน 10 เซนติเมตร ด้านล่าง 20 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ใส่คอนกรีตลงในโมลโดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นให้มีปริมาตรเท่า ๆ กัน กระทุ้งด้วยเหล็กปลายมนชั้นละ 25 ครั้ง จากนั้นดึงโคนขึ้นตรงแล้ววางโคนลงข้างๆ วัดค่ายุบตัวที่กึ่งกลางของคอนกรีตที่ยุบตัว แสดงในรูปที่ 3.4

3.6.2.2 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 138 วิธีการทดสอบเริ่มจากชั่งน้ำหนักถึงเปล่าบันทึกค่าไว้ เติมน้ำให้เต็มถังแล้วชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาตรถัง ใส่คอนกรีตลงไปในถังเปล่าแบ่งเป็น 3 ชั้นเท่า ๆกัน แต่ละชั้นให้กระทุ้งตามข้อกำหนดที่ขึ้นอยู่กับขนาดถังแล้วใช้ค้อนยางเคาะด้านข้างรอบๆ 10 ถึง 15 ครั้ง ใช้แผ่นเหล็กปาดคอนกรีตให้เรียบแล้วนำไปชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณหาหน่วยน้ำหนักคอนกรีตจากสูตร

หน่วยน้ำหนักคอนกรีต = น้ำหนักของคอนกรีตในถัง / ปริมาตรถัง

3.6.2.3 นำแท่งตัวอย่างคอนกรีต ที่บ่มชื้นด้วยน้ำจนมีอายุได้ 28 วัน ไปทดสอบกำลังอัดประลัย ตามมาตรฐาน ASTM C39 หรือ BS1881-108 ตามรูปที่ 3.8 โดยการทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตแบบละ 3 แท่งตัวอย่างทดสอบ บันทึกค่าที่ได้ และคำนวณหาค่าเฉลี่ยของกำลังอัด

3.6.2.4 การทดสอบการต้านทานกรด ทดสอบโดยนำแท่งตัวอย่างคอนกรีต ที่บ่มชื้นด้วยน้ำจนมีอายุได้ 28 วัน มาทำความสะอาดและเช็ดผิวให้แห้ง ทำการวัดค่าขนาดและน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต แล้วนำไปบ่มชื้นต่อโดยการแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้นร้อยละ 5 เป็นระยะเวลา 15 วัน และ 30 วัน เมื่อได้ระยะเวลาตามที่กำหนดแล้ว ทำการทดสอบการ

เปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต โดยทำความสะอาดและเช็ดผิวตัวอย่างคอนกรีตให้แห้ง วัดค่าขนาดและน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต และนำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบกำลังอัดประลัย ตามมาตรฐาน ASTM C39 หรือ BS1881-108 โดยการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตแบบละ 3 แท่ง ตัวอย่างทดสอบ บันทึกค่าที่ได้ และคำนวณหาค่าเฉลี่ยของกำลังอัด

รูปที่ 3.1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

รูปที่ 3.2 ซิลิกาฟูม

รูปที่ 3.3 การผสมตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 3.4 การทดสอบ Slump Test

รูปที่ 3.5 การบ่มชื้นด้วยน้ำ

รูปที่ 3.6 การบ่มชื้นด้วยกรด

รูปที่ 3.7 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 3.8 การทดสอบกำลังอัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบคอนกรีต และการศึกษาคุณสมบัติของตัวอย่างคอนกรีตที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้ดีที่สุด โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน ซึ่งได้แก่ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และ ซิลิกาฟูม การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตใช้วิธีทดสอบแบบทำลาย โดยออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 425 กก/ตร.ซม. และมีอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C Ratio) เท่ากับ 0.40 โดยความสามารถเทได้วัดจากค่าการยุบตัวของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ 10 เซนติเมตร เมื่อทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตแล้ว นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ผลในด้านของกำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการกัดกร่อนของกรด

4.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตควบคุม (PC) และคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลาน แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีต

Mixed	W/C	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	
		บ่มชื้น 28 วัน	แช่กรด 15 วัน
PC	0.40	577	442
20GBFS	0.40	319	262
30GBFS	0.40	244	181
40GBFS	0.40	184	148
20GBFS-WR	0.40	474	391
30GBFS-WR	0.40	383	284
40GBFS-WR	0.40	286	232
2SF-WR	0.40	747	602
4SF-WR	0.40	725	531
6SF-WR	0.40	690	529
8SF-WR	0.40	654	522

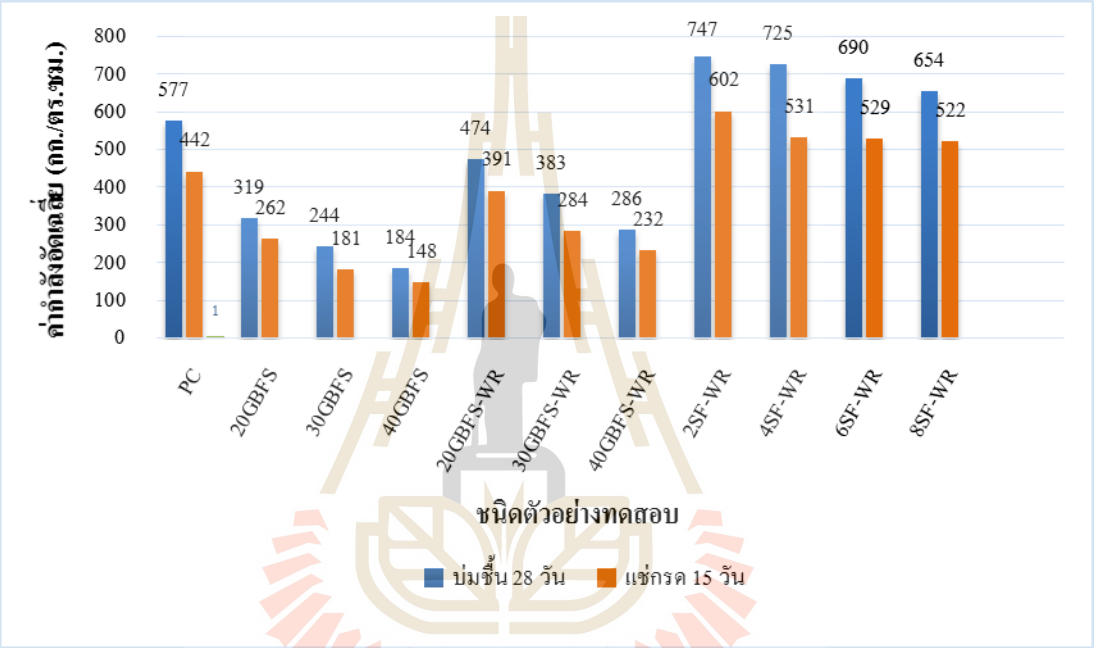
วัสดุปอร์ตโซลานที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) และซิลิกาฟูม (SF) โดยกำหนดให้ คอนกรีตควบคุม (PC) เป็นคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ล้วนเป็นส่วนผสมเพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังอัด โดยกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (PC) จากการทดสอบที่สภาวะการบ่มชื้นด้วยน้ำและกรด มีค่าดังนี้

- คอนกรีตควบคุม (PC) ในสภาวะบ่มชื้น 28 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 577 กก./ตร.ซม.
- คอนกรีตควบคุม (PC) ในสภาวะแช่กรด 15 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 442 กก./ตร.ซม.

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) และซิลิกาฟูม (SF) กับกำลังอัดคอนกรีตตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่ากำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีต

ผลของการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตตัวอย่าง ของงานวิจัยนี้พบว่าให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม (PC) ในทุกอัตราส่วนผสม ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิก้าฟูม พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่างมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (PC) ในทุกอัตราส่วนผสม เมื่อคอนกรีตมีอายุได้ 28 วัน โดยกำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่างจากการทดสอบที่สภาวะการบ่มชื้นด้วยน้ำและกรด มีค่าดังนี้

- ในสภาวะบ่มชื้น 28 วันคอนกรีต GBFS และ GBFS-WR มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 184 - 319 กก./ตร.ซม. และ 286 - 474 กก./ตร.ซม.ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต SF-WR มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 654 - 747 กก./ตร.ซม.
- ในสภาวะแช่กรด 15 วัน คอนกรีต GBFS และ GBFS-WR มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 148 - 262 กก./ตร.ซม. และ 232 - 391 กก./ตร.ซม.ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต SF-WR มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 522 - 602 กก./ตร.ซม.

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง เพราะเป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุประสาน และเป็นองค์ประกอบหลักที่สร้างกำลังอัดให้กับคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม (PC) หรือคอนกรีตปกติทั่วไป โดยเฉพาะในช่วงอายุเริ่มต้นของคอนกรีต จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) ที่มีค่าดัชนีตะกรัน เท่ากับ 100 และ120 จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี เนื่องจากมีความละเอียดสูงและส่งผลให้คอนกรีตพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นได้ โดยมีกำลังอัดสูงกว่าหรือใกล้เคียงกับคอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ล้วน จากผลการทดสอบค่าดัชนีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) ของ ห้างหุ้นส่วนจำกัด กูรู โรงบด ที่ใช้วิจัยพบว่ามีชั้นคุณภาพต่ำกว่า 80 จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อย และกำลังอัดมีค่าต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานผลการทดสอบหาสารประกอบโดยวิธี X- ray Fluorescence ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ระบุผลทดสอบปริมาณของสารประกอบตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) โดยมีค่า ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 1.858 เปอร์เซนต์ อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เท่ากับ 0.207 เปอร์เซ็นต์ และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับ 96.089 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) ที่เป็นส่วนสำคัญของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในอัตราส่วนที่น้อยมาก จึงเป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ต่ำ การนำคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) ที่มีชั้นคุณภาพ 80 ไปใช้งานควรพิจารณาใช้เฉพาะกับโครงสร้างทั่วไปที่รับกำลังแรงอัดไม่สูงมาก เนื่องจากมีการพัฒนากำลังอัดที่ช้ากว่าคอนกรีตควบคุม (PC)

ในส่วนของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม (SF) พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (PC) ในทุกอัตราส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาฟูม (SF) มีอนุภาคที่เล็กมาก ไม่เป็นผลึก และมีรูปร่างกลม และจากการทดสอบหาสารประกอบโดยวิธี X- ray Fluorescence พบว่ามีค่า ซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 93.243 เปอร์เซนต์ อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เท่ากับ 0.107 เปอร์เซ็นต์ จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็วโดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ให้เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท เพิ่มการยึดเกาะและอุดช่องว่างระหว่างมวลรวมกับเพสต์ ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นและกำลังอัดเพิ่มมากขึ้น และจากการเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม (SF) พบว่ามีแนวโน้มทำให้กำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่างมีค่าลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (GBFS) และซิลิกาฟูม (SF) กับอัตราส่วนการสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีต จากการกัดกร่อนของกรด แสดงในตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซนต์การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่าง

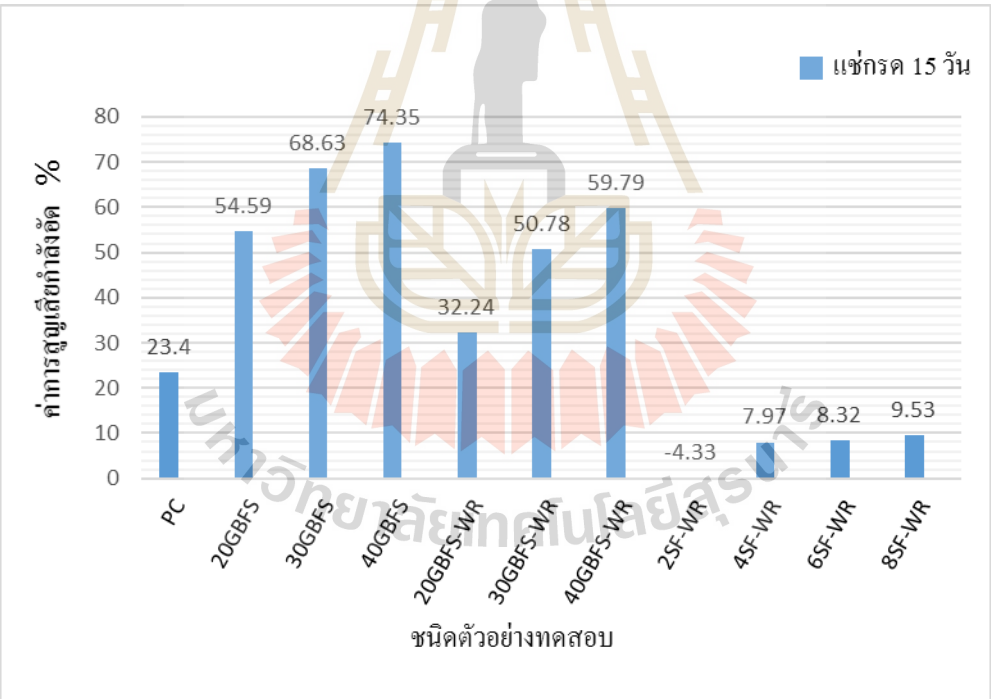
ชนิดตัวอย่าง	กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย	กำลังอัดคอนกรีต	กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย	ค่าการสูญเสียกำลังอัด
	บ่มชื้น 28 วัน		แช่กรด 15 วัน	
	(ksc.)	(%)	(ksc.)	(%)
PC	577	100	442	23.40
20GBFS	319	100	262	17.87
30GBFS	244	100	181	25.82
40GBFS	184	100	148	19.57
20GBFS-WR	474	100	391	17.51
30GBFS-WR	383	100	284	25.85
40GBFS-WR	286	100	232	18.88
2SF-WR	747	100	602	19.41
4SF-WR	725	100	531	26.76
6SF-WR	690	100	529	23.33
8SF-WR	654	100	522	20.18

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่างเปรียบเทียบกับ คอนกรีต PC

ชนิดตัวอย่าง	กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย	ค่าการสูญเสียกำลังอัด	กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย	ค่าการสูญเสียกำลังอัด
	บ่มชื้น 28 วัน		แช่กรด 15 วัน	
	(ksc.)	(%)	(ksc.)	(%)
PC	577	0	442	23.40
20GBFS	319	44.71	262	54.59
30GBFS	244	57.71	181	68.63
40GBFS	184	68.11	148	74.35
20GBFS-WR	474	17.85	391	32.24
30GBFS-WR	383	33.62	284	50.78

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

ชนิดตัวอย่าง	กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย	ค่าการสูญเสียกำลังอัด	กำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย	ค่าการสูญเสียกำลังอัด
	บ่มชื้น 28 วัน		แช่กรด 15 วัน	
	(ksc.)	(%)	(ksc.)	(%)
40GBFS-WR	286	50.43	232	59.79
2SF-WR	747	-29.46	602	-4.33
4SF-WR	725	-25.65	531	7.97
6SF-WR	690	-19.58	529	8.32
8SF-WR	654	-13.34	522	9.53



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่าง เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม (PC)

จากการทดลองโดยนำคอนกรีตที่บ่มชื้นด้วยน้ำ 28 วัน แช่กรดไฮโดรคลอริก พบว่าการกัดกร่อนทำลายจากกรด ทำให้ผิวของคอนกรีตเกิดการหลุดร่อน มีผลให้น้ำหนักและกำลังอัดลดลง โดยแสดงลักษณะการกัดกร่อน แสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4

คอนกรีตควบคุม PC

รูปที่ 4.3 ลักษณะการกัดกร่อนต่อผิวคอนกรีต PC

คอนกรีต 20GBFS

คอนกรีต 30GBFS

คอนกรีต 20GBFS-WR

คอนกรีต 30GBFS-WR

คอนกรีต 2SF-WR

คอนกรีต 8SF-WR

รูปที่ 4.4 ลักษณะการกัดกร่อนต่อผิวคอนกรีต GBFS, GBFS-WR และ SF-WR

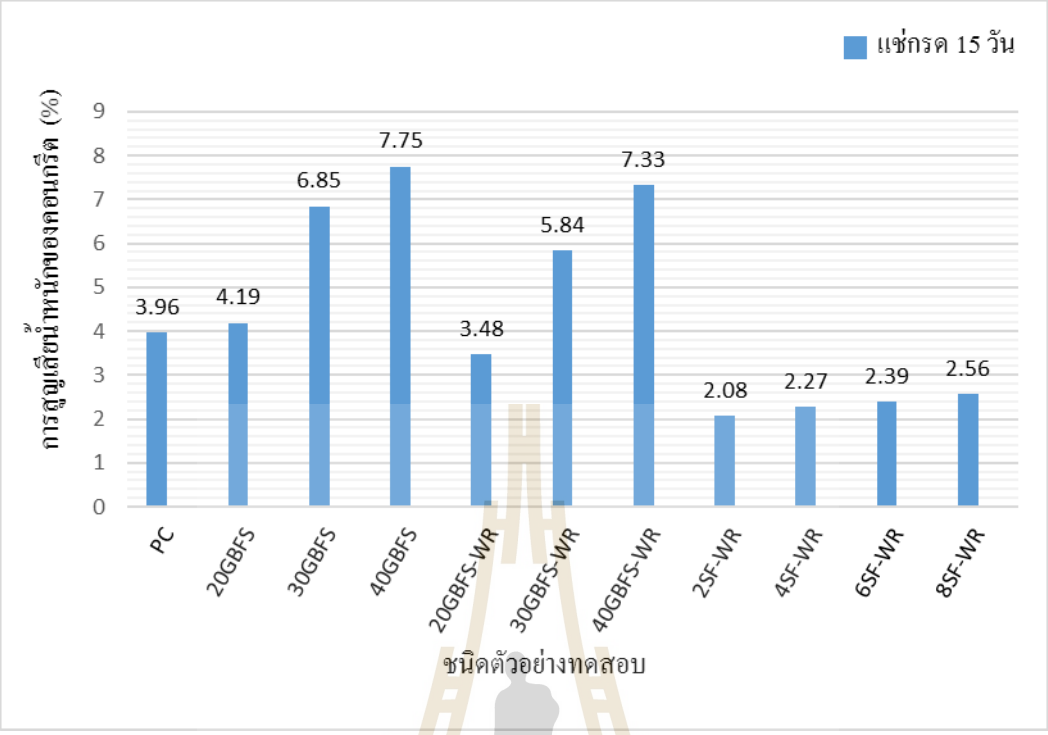
4.2 การทดสอบการต้านทานกรดของคอนกรีต

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) และซิลิกาฟูม (SF) เมื่อแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5% แสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 เปอร์เซนต์การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตตัวอย่าง

ชนิดตัวอย่าง	น้ำหนักคอนกรีตเฉลี่ย	น้ำหนักคอนกรีต	น้ำหนักคอนกรีตเฉลี่ย	ค่าการสูญเสียน้ำหนัก
	บ่มชื้น 28 วัน		แช่กรด 15 วัน	
	(กก.)	(%)	(กก.)	(%)
PC	8.275	100	7.947	3.96
20GBFS	8.097	100	7.758	4.19
30GBFS	8.035	100	7.485	6.85
40GBFS	8.125	100	7.495	7.75
20GBFS-WR	7.990	100	7.712	3.48
30GBFS-WR	7.952	100	7.488	5.84
40GBFS-WR	8.210	100	7.608	7.33
2SF-WR	8.255	100	8.083	2.08
4SF-WR	8.330	100	8.141	2.27
6SF-WR	8.160	100	7.965	2.39
8SF-WR	8.125	100	7.917	2.56

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงเปอร์เซนต์การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตตัวอย่าง

ผลทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตควบคุม (PC) ที่สภาวะบ่มชื้นด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก มีค่าดังนี้

- ในสภาวะแช่กรด 15 วัน คอนกรีตควบคุม (PC) มีค่าการสูญเสียน้ำหนัก ร้อยละ 3.96

ผลทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตตัวอย่าง GBFS และ SF ที่สภาวะบ่มชื้นด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ที่ระยะเวลา 30 วัน มีค่าดังนี้

- ในสภาวะแช่กรด 15 วัน คอนกรีต GBFS และ GBFS-WR มีค่าการสูญเสียน้ำหนักอยู่ระหว่าง ร้อยละ 4.19 - 7.75 และร้อยละ 3.48 - 7.33 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต SF-WR มีค่าการสูญเสียน้ำหนักอยู่ระหว่าง ร้อยละ 2.08 – 2.56

การทดสอบคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) พบว่าต้านทานการกัดกร่อนจากกรดได้ไม่ดีนัก โดยมีค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตตัวอย่าง 20GBFS-WR เพียงตัวอย่างเดียวที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนัก ร้อยละ 3.48 น้อยกว่าคอนกรีตควบคุม (PC) ส่วนตัวอย่างคอนกรีตอื่นๆเช่น 20GBFS, 30GBFS, 40GBFS, 30GBFS-WR และ 40GBFS-WR มีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตควบคุม (PC) สาเหตุที่ตัวอย่างคอนกรีตมีการสูญเสียน้ำหนักมาก เนื่องมาจากคอนกรีตมีความหนาแน่นน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากวัสดุทดลองตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด อาจไม่ได้ทำการคัดแยกแร่ธาตุหรือสิ่งที่เจือปนอยู่ออก และมีค่าดัชนีชั้น

คุณภาพต่ำกว่า 80 ทำให้มีคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานต่ำ เป็นผลให้ไม่สามารถลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตให้ต่ำลงได้ ซึ่งการกัดกร่อนผิวคอนกรีตเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่กระจายอยู่ในเนื้อคอนกรีต และพบว่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต GBFS มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

ส่วนผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม (SF) ที่แช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ร้อยละ 5พบว่าสามารถต้านทานกรดได้ดีกว่าคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) โดยมีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า คอนกรีตควบคุม (PC) ในทุกอัตราส่วนผสม การเพิ่มปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมในปริมาณร้อยละ 2 – 8 ทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนของกรดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและซิลิกาฟูม เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดสูงรวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ที่อาจเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางการวิจัยเกี่ยวกับการใช้วัสดุปอซโซลาน เพื่อใช้ในงานคอนกรีตต้านทานกรดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการใช้ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) และซิลิกาฟูม (SF) แทนที่ปูนซีเมนต์ เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนของกรดได้ดีที่สุดโดยการทดสอบหาค่าการสูญเสียกำลังอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต ซึ่งจากการทดลองมีปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อกำลังอัดและน้ำหนักของคอนกรีต สรุปได้ดังนี้คือ

5.1.1 ผลกระทบด้านกำลังอัด

ก. ผลกระทบด้านกำลังอัดต่อคอนกรีต GBFS

- เมื่อแช่กรดเป็นวลา 15 วัน คอนกรีต 20GBFS, 30GBFS และ 40GBFS มีกำลังอัดลดลงในอัตราร้อยละ 54.59, 68.63 และ 74.35 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม PC โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 262, 181 และ 148 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

ข. ผลกระทบด้านกำลังอัดต่อคอนกรีต GBFS-WR

- เมื่อแช่กรดเป็นวลา 15 วัน คอนกรีต 20GBFS-WR, 30GBFS-WR และ 40GBFS-WR มีกำลังอัดลดลงในอัตราร้อยละ 32.24, 50.78 และ 59.79 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม PC โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 391, 284 และ 232 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

ค. ผลกระทบด้านกำลังอัดต่อคอนกรีต SF

- เมื่อแช่กรดเป็นวลา 15 วัน คอนกรีต 4SF-WR, 6SF-WR และ 8SF-WR มีกำลังอัดลดลงในอัตราร้อยละ 7.97, 8.32 และ 9.53 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม PC โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 531, 529 และ 522 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต 2SF-WR มีกำลังอัดลดน้อยลงจาก 747 กก./ตร.ซม. เป็น 602 กก./ตร.ซม. มีค่าสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม PC

5.1.2 ผลกระทบด้านการสูญเสียน้ำหนัก

ก. ผลกระทบด้านการสูญเสียน้ำหนักต่อคอนกรีต GBFS

- เมื่อแช่กรดเป็นวลา 15 วัน คอนกรีต 20GBFS, 30GBFS และ 40GBFS มีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม PC โดยมีค่าสูญเสียน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 4.19, 6.85 และ 7.75 ตามลำดับ

ข. ผลกระทบด้านการสูญเสียน้ำหนักต่อคอนกรีต GBFS-WR

- เมื่อแช่กรดเป็นวลา 15 วัน คอนกรีต 20GBFS-WR มีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า คอนกรีตควบคุม PC โดยมีค่าสูญเสียน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 3.48 ส่วนคอนกรีต 30GBFS-WR และ 40GBFS-WR มีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม PC โดยมีค่าสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5.84และ 7.33 ตามลำดับ

ค. ผลกระทบด้านการสูญเสียน้ำหนักต่อคอนกรีต SF

- เมื่อแช่กรดเป็นวลา 15 วัน คอนกรีต 2SF, 4SF, 6SF และ 8SF มีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม PC โดยมีค่าสูญเสียน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 2.08, 2.27, 2.39 และ 2.56 ตามลำดับ

5.1.3 เปรียบเทียบการใช้สารลดน้ำของคอนกรีต GBFS

ผลจากการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต GBFS ที่ไม่ใช้สารลดน้ำผสมเพิ่ม กับคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำในปริมาณร้อยละ 0.60 ในส่วนผสม พบว่าคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นดังนี้

- บ่มชื้นด้วยน้ำ 28 วัน มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 32.70–36.29 ตามตารางที่ 5.1
- บ่มแช่กรด 15 วัน มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 32.99 – 36.27 ตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต GBFS เมื่อบ่มชื้นด้วยน้ำ 28 วัน

ชนิดตัวอย่าง	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.) ไม่ใช้สารลดน้ำ (WR)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.) ใช้สารลดน้ำ (WR)	ร้อยละกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น เมื่อใช้สารลดน้ำ (WR)
20GBFS	319	474	32.70
30GBFS	244	383	36.29
40GBFS	184	286	35.66

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีต GBFS เมื่อแช่กรด 15 วัน

ชนิดตัวอย่าง	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.) ไม่ใช้สารลดน้ำ (WR)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.) ใช้สารลดน้ำ (WR)	ร้อยละกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น เมื่อใช้สารลดน้ำ (WR)
20GBFS	262	391	32.99
30GBFS	181	284	36.27
40GBFS	148	232	36.21

5.1.4 ข้อเปรียบเทียบผลการใช้ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม

เปรียบเทียบผลของการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูม (SF) เป็นส่วนผสม โดยเปรียบเทียบกับคอนกรีต 2SF-WR ซึ่งมีค่าสูญเสียน้ำหนัก จากการกัดกร่อนของกรดต่ำที่สุด และจากผลของการทดลองสรุปได้ดังนี้

- การใช้ GBFS แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ทำให้คอนกรีต GBFS มีค่าสูญเสียกำลังอัด มากกว่าคอนกรีต 2SF-WR ทุกอัตราส่วนผสม
- การใช้ GBFS แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ทำให้คอนกรีต GBFS มีค่าสูญเสียน้ำหนัก มากกว่าคอนกรีต 2SF-WR ทุกอัตราส่วนผสม
- กำลังอัดของคอนกรีตผสม GBFS ให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม PC ในทุกอัตราส่วนผสม
- กำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม 2SF-WR ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม PC ในทุกอัตราส่วนผสม
- ร้อยละอัตราส่วนผสมของซิลิกาฟูม (SF) ต่อวัสดุประสาน ใช้น้อยกว่าอัตราส่วนผสมของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS)

5.1.5 ผลของระยะเวลาในการแช่กรดที่มีต่อกำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต สรุปได้ดังนี้

ก. ผลของเวลาต่อกำลังอัดของคอนกรีต

- คอนกรีต GBFS เมื่อแช่กรดเป็นเวลา 15 วัน มีกำลังอัดลดลง ทุกอัตราส่วนผสมเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต PC
- คอนกรีต GBFS-WR เมื่อแช่กรดเป็นเวลา 15 วัน มีกำลังอัดลดลง ทุกอัตราส่วนผสมเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต PC
- คอนกรีต SF เมื่อแช่กรดเป็นเวลา 15 วัน มีกำลังอัดลดลง ทุกอัตราส่วนผสมเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต PC

ข. ผลของเวลาต่อการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต

- คอนกรีต GBFS เมื่อแช่กรดเป็นเวลา 15 วัน มีค่าสูญเสียน้ำหนักมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต PC โดยมีค่าสูญเสียน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 4.19, 6.85 และ7.75 ตามลำดับ
- คอนกรีต 20GBFS-WR เมื่อแช่กรดเป็นเวลา 15 วัน มีค่าสูญเสียน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 3.48 น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต PC และกำลังอัดของคอนกรีต 30GBFS-WR และ 40GBFS-WR มีค่าสูญเสียน้ำหนักมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต PC โดยมีค่าสูญเสียน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 5.84 และ 7.33 ตามลำดับ
- คอนกรีต SF เมื่อแช่กรดเป็นเวลา 15 วัน มีค่าสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต PC ทุกอัตราส่วนผสม โดยมีค่าสูญเสียน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 2.08, 2.27, 2.39 และ 2.56 ตามลำดับ

ผลทดสอบกำลังอัดคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GBFS) และซิลิกาฟูม (SF) เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะแช่กรด พบว่า

- คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด(GBFS) มีค่าการสูญเสียกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม PC และคอนกรีต 20GBFS-WR ค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม PC ส่วนคอนกรีต 30GBFS-WR และ 40GBFS-WR มีค่าสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตควบคุม PC
- คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม (SF) มีค่าการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม PC ทุกอัตราส่วนผสม โดยคอนกรีต 2SF-WR มีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดในอัตราร้อยละ 2.08 ซึ่งบ่งชี้ว่าสามารถต้านทานการกัดกร่อนจากกรดได้ดีที่สุด
- การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด(GBFS) และซิลิกาฟูม (SF)ในปริมาณที่มากขึ้น พบว่ามีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนของกรดเพิ่มมากขึ้นด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบกำลังอัดและวิเคราะห์ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ ชี้ให้เห็นว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ มีคุณภาพต่ำ และไม่เหมาะสำหรับใช้ในการผสมแทนที่คอนกรีต เพราะทำให้กำลังอัดลดน้อยลงและมีการต้านทานกรดต่ำ ส่วนซิลิกาฟูม (SF) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ได้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ มีความสามารถต้านทานกรดได้

เป็นอย่างดี งานวิจัยคอนกรีตทนกรดนี้ยังคงต้องศึกษาและทดสอบวัสดุอื่นๆ เพิ่มเติมอีกมาก เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตให้ตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งาน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม พบว่าสามารถต้านทานกรดได้ดีกว่าตะกรันเตาถลุงเหล็ก โดยพบว่า มีอัตราส่วนการสูญเสียน้ำหนักน้อยและมีกำลังอัดสูงในช่วงอายุเริ่มต้น แต่จะลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงมากดังนั้นปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมที่มีความข้นเหลวปกติ จึงมีความต้องการปริมาณน้ำสูงขึ้น ควรใช้สารลดน้ำผสมเพิ่ม เพื่อช่วยไม่ให้ปริมาณน้ำในคอนกรีตสูงเกินไป ซึ่งอาจมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต ข้อควรระวังในการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้งาน โดยเฉพาะตะกรันเตาถลุงเหล็ก ต้องพิจารณาถึงความละเอียดของวัสดุ และวิธีในการผลิตด้วยว่ามีขั้นตอนการผลิตอย่างถูกต้อง เพราะอาจส่งผลให้การรับกำลังอัดของคอนกรีตลดน้อย และมีผลต่อความแข็งแรงทนทานของคอนกรีตได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

จตุพล ตั้งปกาศิต และนฤชาติ ชูเมือง. (2558). **การต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด.** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

เจต นาจารย์. (2558). **การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด.** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2537). **คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology).** คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้างจำกัด.

ปริญญา คูณมี. (2556). **การใช้ตะกรันเหล็กเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีต : การวิเคราะห์ทางสถิติ**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมอุตสาหการ). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ.

ปิติศานต์ กร้ำมาตร. (2553). **คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ผศ.ดร.สำเริง รักซ้อน และ ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2557). **ทฤษฎีและการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี.** แองเกิ้ลออฟไซ. พิมพ์ครั้งที่ 5.

วินิต ช่อวิเชียร. (2525). **คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology).** ป.สัมพันธ์พาณิชย์

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2556). **ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต .** สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย (สคท.). พิมพ์ครั้งที่ 7.

สมภพ สุวรรณกวิน. (2539). **ผลกระทบของซิลิกาฟูมในปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง.** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์ วิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมหมาย แสวงกิจ. (2538). **การใช้เถ้าถ่านหินในการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีต.** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สัญญา ธิรางกูรรัตน์. (2544). **การกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกต่อคอนกรีตและมอร์ต้าผสมวัสดุปอซโซลาน.** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมโยธา). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี.

สำเริง รักซ้อน และ ธง ลานธารทอง. (2556). **นวัตกรรมคอนกรีตต้นทุนต่ำไหลเข้าแบบง่ายโดยการใช้เถ้าทิ้ง.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล พระนคร.

สุภิชาติ เจนจิระปัญญา และ ปิติศานต์ กร้ำมาตร. (2557). **การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม**. มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

ASTM C127. (2005). **Standard Test Method for Specific Gravity and Apsorption of Coarse Aggregates**.

ASTM C128. (2001). **Standard Test Method for Specific Gravity and Apsorption of Fine Aggregates.**

ASTM C136. (2005) . **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**.

ASTM C138. (2017) . **Standard Test Method for Density (Unit Weight)** , Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C143. (2005). **Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete**.

ASTM C150. (2017). **Standard Specification for Portland Cement**. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C33. (2005). **Standard Specification Concrete Aggregates**.

ASTM C39. (2005) . **Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.**

ASTM C494. (2004). **Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete**.

BS 1881-108. (1983) . **Testing Concrete Part 108. Method for Making Cubes from Fresh Concrete.**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก.
ผลการทดสอบหาปริมาณสารประกอบในวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลการทดสอบหาปริมาณสารประกอบในวัสดุ

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบหาสารประกอบของไมโครซิลิกาและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

รายการ	รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	
		ชื่อตัวอย่าง: 1. Microsillca	ชื่อตัวอย่าง 2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตราช้าง
		หมายเลขตัวอย่าง:ฝวดNS0261/6	หมายเลขตัวอย่าง:ฝวดNS0262/61
		ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง:ผงสีเทา	ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง:ผงสีเทา
1	MgO %	0.220	0.388
2	Al_2O_3 %	0.107	2.240
3	SiO_2 %	93.243	12.895
4	SO_3 %	1.818	3.501
5	CaO %	1.286	75.123
6	MnO %	0.052	0.092
7	Fe_2O_3 %	0.069	4.435

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบหาสารประกอบของตะกรันเหล็ก

รายการที่	รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ
		ตัวอย่าง: 3. ตะกรันเหล็ก (Slag)
		หมายเลขตัวอย่าง: ฝวดNS0263/61
		ลักษณะหรือสภาพตัวอย่าง: ผงสีดำ
1	MgO %	0.071
2	Al_2O_3 %	0.207
3	SiO_2 %	1.858
4	SO_3 %	0.085
5	CaO %	0.466
6	MnO %	0.503
7	Fe_2O_3 %	96.089

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่าง

ตารางที่ ก.3 ค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต โดยบ่มชื้นด้วยน้ำ ที่อายุ 28 วัน

ชนิดตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง	พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง (ตร.ซม.)	น้ำหนักตัวอย่าง (กก.)	ค่ายุบตัวคอนกรีต (ซม.)	กำลังอัดคอนกรีต (ก.ก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ยคอนกรีต (ก.ก./ตร.ซม.)
PC	1	225	8.285	10	553	577
	2	225	8.270		588	
	3	225	8.270		590	
20GBFS	1	225	8.180	13	300	319
	2	225	8.080		328	
	3	225	8.030		330	
30GBFS	1	225	8.000	14	229	244
	2	225	8.035		265	
	3	225	8.195		240	
40GBFS	1	225	8.105	14	185	184
	2	225	8.155		179	
	3	225	8.125		188	
20GBFS-WR	1	225	8.035	15	472	474
	2	225	8.000		470	
	3	225	7.935		481	
30GBFS-WR	1	225	7.935	15	398	383
	2	225	7.960		412	
	3	225	7.960		339	
40GBFS-WR	1	225	8.200	15	279	286
	2	225	8.170		281	
	3	225	8.260		299	
2SF-WR	1	225	8.280	18	747	747
	2	225	8.205		769	
	3	225	8.280		732	
4SF-WR	1	225	8.330	18	725	725
	2	225	8.350		729	
	3	225	8.300		720	
6SF-WR	1	225	8.165	17	700	690
	2	225	8.175		662	
	3	225	8.140		690	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

ชนิดตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง	พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง (ตร.ซม.)	น้ำหนักตัวอย่าง (กก.)	ค่ายุบตัวคอนกรีต (ซม.)	กำลังอัดคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ยคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)
8SF-WR	1	225	8.115	16	735	654
	2	225	8.180		727	
	3	225	8.080		654	

ตารางที่ ก.4 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เป็นเวลา 15 วัน

ชนิดตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง	พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต (ตร.ซม.)	น้ำหนักคอนกรีต (กก.)	ค่ายุบตัวคอนกรีต (ซม.)	กำลังอัดคอนกรีต (ก.ก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ยคอนกรีต (ก.ก./ตร.ซม.)
PC	1	225	7.960	10	420	442
	2	225	7.950		446	
	3	225	7.930		462	
20GBFS	1	225	7.760	13	250	262
	2	225	7.780		271	
	3	225	7.735		266	
30GBFS	1	225	7.475	14	211	181
	2	225	7.490		163	
	3	225	7.485		169	
40GBFS	1	225	7.635	14	158	148
	2	225	7.495		125	
	3	225	7.460		161	
20GBFS-WR	1	225	7.740	15	376	391
	2	225	7.750		403	
	3	225	7.645		395	
30GBFS-WR	1	225	7.525	15	246	284
	2	225	7.495		291	
	3	225	7.445		316	
40GBFS-WR	1	225	7.565	15	236	232
	2	225	7.635		240	
	3	225	7.625		220	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

ชนิดตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง	พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง (ตร.ซม.)	น้ำหนักตัวอย่าง (กก.)	ค่ายุบตัวคอนกรีต (ซม.)	กำลังอัดคอนกรีต (ก.ก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ยคอนกรีต (ก.ก./ตร.ซม.)
4SF-WR	1	225	8.040	18	602	602
	2	225	8.065		631	
	3	225	8.145		527	
4SF-WR	1	225	8.100	18	531	531
	2	225	8.165		566	
	3	225	8.168		546	
6SF-WR	1	225	7.945	17	496	529
	2	225	7.985		530	
	3	225	7.965		529	
8SF-WR	1	225	7.935	16	568	522
	2	225	7.885		557	
	3	225	7.930		522	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข.
การทดสอบหาคุณสมบัติวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การทดสอบหาคุณสมบัติวัสดุ

น้ำหนักทราย ตัวอย่างที่ 1 = 762.2 กรัม : ตัวอย่างที่ 2 = 551.6 กรัม

ตารางที่ ข.1 การทดสอบหาค่าขนาดของทราย

ขนาดตะแกรง	ตัวอย่างที่ 1			ตัวอย่างที่ 2		
	นน.ทรายค้าง	%ทรายค้าง	%ค้างสะสม	นน.ทรายค้าง	%ทรายค้าง	%ค้างสะสม
3/8”	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	3.200	3.200	0.420	1.900	1.900	0.344
8	16.400	19.600	2.572	10.800	12.700	2.302
16	81.000	100.600	13.199	53.200	65.900	11.947
30	242.800	343.400	45.054	174.600	240.500	37.074
50	315.900	659.300	86.500	230.400	470.900	85.370
100	86.700	746.000	97.875	68.200	539.100	97.734
PAW	16.100	762.100		12.100	551.200	
FM			2.456			2.348

ค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย = 2.402

ตารางที่ ข.2 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของทราย

รายการ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
ปริมาตร โมล. (A) (ลบ.ซม.)	5,536.315	5,536.315
น้ำหนักโมล. (กรัม)	10,588.000	10,588.000
น้ำหนักทราย+โมล. (กรัม)	19,455.000	19,478.500
น้ำหนักทราย (B) (กรัม)	8,867.000	8,890.000
หน่วยน้ำหนักทราย = B/A (กก./ลบ.เมตร)	1,601.000	1,605.000
ค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักทราย (กก./ลบ.เมตร)	1,603.000	

ตารางที่ ข.3 การทดสอบหาการดูดซึมน้ำของทราย

รายการ		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักทรายอิ่มตัวผิวแห้ง+ภาชนะ	(กรัม)	124.000	150.800
น้ำหนักภาชนะ	(กรัม)	28.600	28.100.
น้ำหนักทรายอิ่มตัวผิวแห้ง (B)	(กรัม)	95.400	122.700
น้ำหนักทราย+ภาชนะ	(กรัม)	122.800	149.900
น้ำหนักทรายแห้ง (A)	(กรัม)	94.200	121.800
การดูดซึมน้ำของทราย = ((B-A)/A)x100	(%)	1.274	0.739
ค่าเฉลี่ยการดูดซึม		1.00	

ตารางที่ ข.4 การทดสอบหาขนาดของหิน

ขนาดตะแกรง	ตัวอย่างที่ 1			ตัวอย่างที่ 2		
	นน.หินค้าง	% หินค้าง	% หินค้างสะสม	นน.หินค้าง	% หินค้าง	% หินค้างสะสม
3/4”	2,134.100	52.603	52.603	2,345.100	58.076	58.076
1/2”	1,903.500	46.919	99.552	1,678.000	41.563	99.639
3/8”	17.100	0.421	99.943	11.800	0.292	99.931
#4	2.300	0.057	100.000	2.800	0.069	100.000
PAN	4,057.000			4,038.000		
FM			2.52			2.58

FM ของหิน = (2.52+2.58) /2 = 2.55

ตารางที่ ข.5 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหิน

รายการ		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ค่าเฉลี่ย
น้ำหนักหินในน้ำ (C)	(กรัม)	585.750	613.500	
น้ำหนักหินอิ่มตัวผิวแห้ง (B)	(กรัม)	926.300	974.300	
น้ำหนักหินแห้ง (A)	(กรัม)	922.900	971.100	
Bsd. ของหิน = B/(B-C)		2.720	2.700	2.710
Bsg. ของหิน = A/(B-C)		2.710	2.692	2.701
Asd. ของหิน = A/A-C		2.737	2.716	2.727
การดูดซึมของหิน = ((B-A)/A)x100	(%)	0.368	0.330	0.350

ตารางที่ ข.6 การหาหน่วยน้ำหนักของหิน

รายการ		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
ปริมาตรของโมล. (A)	(ลบ.ซม.)	5,536.315	5,536.315
น้ำหนักของโมล.	(กรัม)	10,588.000	10,588.000
น้ำหนักหิน+โมล.	(กรัม)	18,533.000	18,547.500
น้ำหนักหิน (B)	(กรัม)	7,945.000	7,959.500
หน่วยน้ำหนักหิน = B/A	(กก./ลบ.ม.)	1,435.000	1,437.000
ค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักหิน	(กก./ลบ.ม.)	1,436.000	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค.
การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

วิธีการคำนวณสัดส่วนผสม

การคำนวณสัดส่วนผสมใช้วิธีของ ACI ดังมีรายละเอียดดังนี้

1. กำหนดค่ากำลังอัดที่ต้องการ เท่ากับ 425 กก./ตร.ซม.
2. เลือกอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40
3. ต้องการค่าการยุบตัว ประมาณ 8-10 ซม.
4. ปริมาณน้ำเท่ากับ 195 กก. ต่อ ลบ.ม. (จากตารางที่ ค.1)
5. คำนวณน้ำหนักส่วนผสมคอนกรีต (กก. / ลบ.ม.) ได้ส่วนประกอบดังนี้

ปูนซีเมนต์	:	น้ำ	:	ทราย	:	หิน
488	:	145	:	708	:	1040

ตารางที่ ค.1 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่าการยุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่าง ๆ

ประเภทของงาน	**ค่าการยุบตัว (ซม.)**
งานฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก	2 – 8
คานและกำแพงเสริมเหล็ก	2 – 10
เสาอาคาร	2 – 10
พื้นถนนและแผ่นพื้น	2 – 8
คอนกรีตหลา	2 - 8

ตารางที่ ค.2 ปริมาณน้ำและฟองอากาศสำหรับค่าการยุบตัวและขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ

	ปริมาณน้ำ (กก./ม.3)							
	ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ (มม.)							
	10	12.5	20	25	40	50	75	150
ค่าการยุบตัว (มม.)	คอนกรีตไม่มีสารกระจายกักฟองอากาศ							
30 - 50	205	200	185	180	160	155	145	125
80 -100	225	215	200	195	175	170	160	140
ปริมาณฟองอากาศ (%)	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
ค่าการยุบตัว (มม.)	คอนกรีตที่มีสารกระจายกักฟองอากาศ							
30 – 50	180	175	165	160	145	140	135	120
80 - 100	200	190	180	175	160	155	150	135

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 28 วัน (กก/ซม.^{2})	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตไม่กระจายกักฟองอากาศ	คอนกรีตกระจายกักฟองอากาศ
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.04
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

หมายเหตุ ค่าที่ได้จากตารางนี้ ทำการทดลองจากแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ถ้าแท่งตัวอย่างเป็นแบบลูกบาศก์ ค่ากำลังอัดประลัยจะสูงกว่าค่าในตารางประมาณ 20%

ตารางที่ ค.4 ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต

ขนาดโตสุดของหิน	ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีต สำหรับค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายต่างๆ กัน			
3/8”(10มม.)	0.50	0.48	0.46	0.44
½” (12.5มม)	0.59	0.57	0.55	0.53
¾” (20มม.)	0.66	0.64	0.62	0.60
1” (25มม.)	0.71	0.69	0.67	0.65
1 ½” (40มม.)	0.76	0.74	0.72	0.70
2” (50มม.)	0.78	0.76	0.74	0.72
3” (75มม.)	0.81	0.79	0.77	0.75
6” (150มม.)	0.87	0.85	0.73	0.81

หมายเหตุ.- ค่าที่กำหนดให้นี้ เป็นค่าสำหรับงานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่ว ๆ ไป สำหรับงานคอนกรีตที่ทำได้ง่ายกว่า เช่น ถนน พื้น เป็นต้น อาจเพิ่มค่าเหล่านี้ขึ้นได้อีก 10 เปอร์เซ็นต์

ประวัติผู้เขียน

นายชาตรี อยู่ร่มพฤกษ์ เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน 2506 ที่เขตบางกอกน้อย จังหวัดกรุงเทพมหานคร สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 603/1 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงบางขุนศรี เขตบางกอกน้อย จังหวัดกรุงเทพมหานคร ปัจจุบันประกอบธุรกิจด้านรับเหมาก่อสร้าง ทำงานในตำแหน่งกรรมการผู้จัดการ บริษัท อรชา ซีวิล จำกัด ประวัติด้านการศึกษา จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสุวรรณารามวิทยาคม กรุงเทพมหานคร ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง วิทยาลัยเทคนิคดุสิต กรุงเทพมหานคร ปริญญาตรี วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (เทเวศร์) กรุงเทพมหานคร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี