# การนำของเสียประเภทซิลิกาไปใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

นาย ณัฐพล เศรษฐโอฬาร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# UTILIZATION OF SILICA WASTE FOR READY MIXED CONCRETE PRODUCTION

Mr. Natthapol Sresthaolarn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การนำของเสียประเภทซิลิกาไปใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ |
| โดย | นายณัฐพล เศรษฐโอฬาร |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

........................................................คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

........................................................ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ )

........................................................อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

........................................................กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

........................................................กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

........................................................กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฒิกะ)

ณัฐพล เศรษฐโอฬาร: การนำของเสียประเภทซิลิกาไปใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ (UTILIZATION OF SILICA WASTE FOR READY MIXED CONCRETE PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, 108 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการนำกากของเสียซิลิกามาใช้แทนซิลิกาฟูมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยนำกากของเสียซิลิกาผ่านการแยกขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดให้มีความละเอียดสูงได้เป็นกากซิลิกาแยกละเอียด มีรูปร่างทรงกลม ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3.2 ไมโครเมตร จากนั้นนำกากของเสียซิลิกาแยกละเอียดเติมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับการใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นจากตัวแทนจำหน่าย เติมในปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตผสมเสร็จในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ที่ 0.40 ทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 , 28 และ 56 วัน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมให้กำลังอัดสูงที่สุด ส่วนคอนกรีตที่ผสมกากของเสียซิลิกาพบว่าการใช้กากของเสียซิลิกาแยกละเอียดร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ให้กำลังอัดสูงสุด การใช้กากของเสียซิลิกาแยกละเอียดเติมในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 สามารถใช้แทนซิลิกาฟูมร้อยละ 10 ได้ เนื่องจากมีกำลังอัดใกล้เคียงกันเมื่อคอนกรีตมีอายุ 56 วัน และผ่านเกณฑ์มาตรฐานนอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของกากของเสียซิลิกาแยกละเอียดร้อยละ 10 มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอีกเมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 56 วัน แสดงให้เห็นว่ากากของเสียซิลิกาแยกละเอียดมีศักยภาพสูงที่จะนำไปใช้แทนที่ซิลิกาฟูมเพื่อทำคอนกรีตผสมเสร็จ นอกจากนี้พบว่าของเสียประเภทซิลิกาสามารถใช้แทนซิลิกาฟูมได้ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ประมาณร้อยละ 40

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต........................................

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก........................................

ปีการศึกษา 2553

# # 5270289121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : SILICA WASTE; READY MIXED CONCRETE; SILICA FUME; POZZOLAN RECYCLE.



NATTHAPOL SRESTHAOLARN : UTILIZATION OF SILICA WASTE FOR READY MIXED CONCRETE PRODUCTION. ADVISOR: ASSOC.PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D., 108 pp.

This research investigated the utilization of silica waste to replace the imported condensed silica fume to make ready mixed concrete. Silica waste was classified by sieve analysis to have high fineness. The classified silica waste has spherical shape with average particle size of 3.2 micrometer. The classified silica waste was used to fill in Portland cement type I with the proportion content of 0, 5, 10, 15 และ 20 % by weight to produce ready mixed concrete. In addition, the samples of condensed silica fume obtained from representative supplier were also used to produce ready mixed concrete with cement proportion of 0, 5, 10, 15 และ 20 % by weight. The fix water cement ratio was at 0.4 was applied. The compressive strength of concretes containing classified silica waste and condensed silica fumes was determined and compared at the curing time of 7, 14 , 28 and 56 days. The results revealed that concrete mixed with condensed silica fume produced the highest compressive strength. For concrete mixed with silica waste, it was found that concrete with 10% of classified silica waste produced the highest compressive strength. The use of classified silica waste 10% or condensed silica fume 10% in replacing cement gave almost the same compressive strength of concrete at the curing age of 56 days. In addition, the concrete containing classified silica waste 10% fill in cement tended to have higher compressive strengths than those of condensed silica fume concretes after 56 days. The results indicated that classified silica waste high potential to replace condensed silica fume for producing ready mixed concrete with 40% saving of production cost.



Department : Environmental Engineering Student's Signature Sresthaolarn. N

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature Petchporn.C

Academic Year : 2010

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ เป็นอย่างสูง ที่เมตตาและให้โอกาสแก่ผู้วิจัยในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังกรุณาและแนะนำให้คำปรึกษาในงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทถ่ายทอดวิชาความรู้ทางวิชาการ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตรายและห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือวิจัย ขอขอบคุณ บมจ. TPI และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับงานคอนกรีต

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.......... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.......... จ

กิตติกรรมประกาศ.......... ฉ

สารบัญ.......... ช

สารบัญตาราง.......... ญ

สารบัญภาพ.......... ฑ

**บทที่ 1 บทนำ**.......... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.......... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.......... 1

1.3 ขอบเขตของการวิจัย.......... 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.......... 2

**บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**.......... 3

2.1 คอนกรีต.......... 3

2.2 วัสดุใหม่สำหรับงานคอนกรีต.......... 4

2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตสด.......... 8

2.4 กำลังอัดของคอนกรีต.......... 12

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต.......... 14

2.6 การบ่มคอนกรีต.......... 15

2.7 ปูนซีเมนต์.......... 20

2.8 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.......... 21

2.9 การกำจัดโดยการทำเสถียรและทำเป็นก้อนแข็ง.......... 27

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.......... 30

**บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย**.......... 33

3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.......... 33

3.1.1 วัตถุดิบ.......... 33

3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์.......... 34

หน้า

3.2 ตัวแปรที่ใช้ทดลอง........................................................................... 35
3.2.1 ตัวแปรอิสระ.................................................................... 35
3.2.2 ตัวแปรตาม...................................................................... 35
3.2.3 ตัวแปรควบคุม.................................................................. 35
3.3 การดำเนินการวิจัย........................................................................... 37
3.4 ผังสรุปงานวิจัย................................................................................ 41

**บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง**........................................... 42
4.1 การเตรียมวัสดุและวัตถุดิบ.................................................................. 42
4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของของเสียซิลิกา และซิลิกาฟูม.......................................................................................... 42
4.3 ผลวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักของของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมและของของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมเมื่อหล่อเป็นมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน.................................................................................... 47
4.4 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ตามอัตราส่วนต่างๆ .................. 47
4.5 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ตามอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ร้อยละ 10............................................................................................................ 54
4.6 ผลการวิเคราะห์วัสดุปอซโซลาน ........................................................ 56
4.7 ประมาณค่าใช้จ่ายกากของเสียซิลิกาใช้แทนซิลิกาฟูมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ.............................................................................. 56

**บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ**................................................... 58
5.1 สรุปผลการวิจัย................................................................................ 58
5.2 ข้อเสนอแนะ................................................................................... 59

**รายการอ้างอิง**...................................................................................... 60

**ภาคผนวก**............................................................................................. 63
ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบ.......................................................................... 64
ภาคผนวก ข การทดสอบการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค.................. 74

หน้า

ภาคผนวก ค การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซ็นต์และ
เฟสที่เกิดขึ้นด้วยวิธีเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์.......................... 77
ภาคผนวก ง การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนต่างๆ................. 80
ภาคผนวก จ การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนที่เหมาะสม...... 93
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลผลการวิเคราะห์โลหะหนัก............................................ 103

**ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์**........................................................................................ 108

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต.................................................... 3
ตารางที่ 2.2 ข้อได้เปรียบเสียเปรียบของการเพิ่มความชื้นในการบ่ม................................. 17
ตารางที่ 2.3 ข้อได้เปรียบเสียเปรียบของการป้องกันความชื้นในการบ่ม............................. 18
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์............................................... 22
ตารางที่ 2.5 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักปริมาณร้อยละ 80........................................................................................................ 24
ตารางที่ 2.6 กำลังของคอนกรีตที่ลดลงเนื่องจากซัลเฟตที่ปนอยู่ในน้ำ.............................. 26
ตารางที่ 2.7 รายละเอียดกลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็ง............................................. 28
ตารางที่ 2.8 วิธีการทำลายสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเฉพาะประเภท............................. 29
ตารางที่ 3.1 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในสภาวะต่างๆของของเสียซิลิกา...................... 39
ตารางที่ 3.2 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในสภาวะต่างๆของซิลิกาฟูม........................ 39
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซิลิกาเทียบกับปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูมและวัสดุชนิดอื่น........................................................................ 43
ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และของเสียซิลิกา......... 44
ตารางที่ 4.3 การกระจายขนาดคละของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และของเสียซิลิกา.............. 45
ตารางที่ 4.4 การชะละลายของโลหะหนักของวัตถุดิบและหลังหล่อเป็นมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วันด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)........................................... 47
ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมของของเสียซิลิกาเมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56วัน... 49
ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมของซิลิกาฟูมเมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน...... 50
ตารางที่ 4.7 ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมของของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน..................................................................... 51
ตารางที่ 4.8 ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมของของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน..................................................................... 54

หน้า

ตารางที่ 4.9 ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนเหมาะสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 56 และ 90 วัน........................................................................ 55
ตารางที่ 4.10 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของกากของเสียซิลิกาใช้แทนซิลิกาฟูมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ........................................................................ 57
ตารางที่ ผ1 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของเสียประเภทซิลิการ้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน.......... 81
ตารางที่ ผ2 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของเสียประเภทซิลิการ้อยละ10 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสม 82
น้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน.........
ตารางที่ ผ3 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของเสียประเภทซิลิการ้อยละ15 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน ........ 83
ตารางที่ ผ4 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของเสียประเภทซิลิการ้อยละ20 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน......... 84
ตารางที่ ผ5 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสม 85
น้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน.........
ตารางที่ ผ6 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของซิลิกาฟูมร้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน......... 86
ตารางที่ ผ7 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของซิลิกาฟูมร้อยละ 15 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน......... 87

หน้า

ตารางที่ ผ8 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของซิลิกาฟูมร้อยละ 20 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน.................. 88

ตารางที่ ผ9 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ควบคุมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (ของเสียซิลิกาและซิลิกาฟูมร้อยละ 5)...... 89

ตารางที่ ผ10 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ควบคุมของปูนซีเมนต์ประเภทที่1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (ของเสียซิลิกาและซิลิกาฟูมร้อยละ 10)... 90

ตารางที่ ผ11 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ควบคุมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (ของเสียซิลิกาและซิลิกาฟูมร้อยละ 15)... 91

ตารางที่ ผ12 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ควบคุมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (ของเสียซิลิกาและซิลิกาฟูมร้อยละ 20)... 92

ตารางที่ ผ13 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของเสียประเภทซิลิการ้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 56 และ 90 วัน (อัตราส่วนที่เหมาะสม)............................................................... 94

ตารางที่ ผ14 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของส่วนผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 56 และ 90 วัน (อัตราส่วนที่เหมาะสม)........................................................... 97

ตารางที่ ผ15 ค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 56 และ 90 วัน (อัตราส่วนที่เหมาะสม)........................................................................ 100

ตารางที่ ผ16 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักทองแดงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโตรมิเตอร์............................................................ 104

หน้า

ตารางที่ ผ17 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักสังกะสีด้วยเครื่องอะตอมมิก
แอบซอบชันสเปกโตรมิเตอร์.................................................................... 105
ตารางที่ ผ18 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชัน
สเปกโตรมิเตอร์...................................................................................... 106
ตารางที่ ผ19 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักโครเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิก
แอบซอบชันสเปกโตรมิเตอร์.................................................................... 107

# สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 คุณสมบัติของคอนกรีตสด........................................................................ 8
ภาพที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังอัดกับอัตราส่วนของความหนาแน่น........................................................................ 9
ภาพที่ 2.3 คอนกรีตที่ออกแบบไม่ถูกต้องจะแยกตัว........................................................ 10
ภาพที่ 2.4 คอนกรีตที่เหลวมากด้วยน้ำยาผสมคอนกรีตไม่มีการแยกตัว........................ 10
ภาพที่ 2.5 การเยิ้มของคอนกรีตก่อให้เกิดช่องว่างเรียงตัวในทิศทางเดียว........................ 11
ภาพที่ 2.6 อายุการบ่มคอนกรีต........................................................................ 16
ภาพที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1........................................................ 34
ภาพที่ 3.2 ทรายละเอียด........................................................................ 34
ภาพที่ 3.3 ของเสียประเภทซิลิกา........................................................................ 34
ภาพที่ 3.4 แบบหล่อก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 x 5x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร.............. 36
ภาพที่ 3.5 การผสมมอร์ต้าร์เพื่อนำไปทดสอบ........................................................ 36
ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด........................................................ 36
ภาพที่ 3.7 เครื่องเขย่าคัดขนาด........................................................................ 38
ภาพที่ 3.8 ผังสรุปงานวิจัย........................................................................ 41
ภาพที่ 4.1 ภาพวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ก) ของเสียซิลิกา ข) ซิลิกาฟูม ค) ซีเมนต์.............. 43
ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราดขยาย 5000 เท่า (ก) ซิลิกาฟูม (ข) ของเสียประเภทซิลิกา........................................ 44
ภาพที่ 4.3 การกระจายขนาดของของประเภทเสียซิลิกา........................................ 45
ภาพที่ 4.4 การกระจายขนาดของซิลิกาฟูมและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1.................. 46
ภาพที่ 4.5 แสดงขนาดของอนุภาค (ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ข) ซิลิกาฟูม.................. 48
ภาพที่ 4.6 อัตราส่วนผสมของของประเภทเสียซิลิกาเมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน 48
ภาพที่ 4.7 อัตราส่วนผสมของซิลิกาฟูมเมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน........................................ 49
ภาพที่ 4.8 อัตราส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน........................ 50

หน้า

ภาพที่ 4.9 อัตราส่วนผสมของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ร้อยละ 5........................................ 52
ภาพที่ 4.10 อัตราส่วนผสมของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ร้อยละ 10...................................... 52
ภาพที่ 4.11 อัตราส่วนผสมของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ร้อยละ 15...................................... 53
ภาพที่ 4.12 อัตราส่วนผสมของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ ร้อยละ 20........................................... 53
ภาพที่ 4.13 อัตราส่วนผสมของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์อัตราส่วนที่เหมาะสมที่ร้อยละ10............. 55
ภาพที่ 4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราดขยาย 2500 เท่า (ก) ซิลิกาฟูม (ข) ของเสียประเภทซิลิกา............................................ 56
ภาพที่ ผ1 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดของของเสียประเภทซิลิกา................................ 75
ภาพที่ ผ2 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดของเสียประเภทซิลิกา...................................... 76
ภาพที่ ผ3 ผลวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของซิลิกาฟูมและของเสียประเภทซิลิกา............ 78
ภาพที่ ผ4 ดิฟแฟรกโตแกรมของของเสียประเภทซิลิกา........................................ 79

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ของเสียประเภทซิลิกาเกิดจากกระบวนการดีโพลิเมอร์ไรเซชั่นในการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วเพื่อนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ปัจจุบันสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วมีปริมาณกว่า 1,000 ตันต่อปี ซึ่งในกระบวนการรีไซเคิลดังกล่าวจะเกิดของเสียประเภทซิลิกาประมาณร้อยละ 30-40 กล่าวคือประมาณ 300-400 ตัน/ปี จากปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียอุตสาหกรรมที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดและจัดการ จึงได้มีการสนับสนุนให้ศึกษาถึงการหมุนเวียนวัสดุที่ไม่ใช้แล้วและการนำของเสียมาใช้เป็นส่วนผสมของวัตถุดิบจากวัสดุของเสียที่ไม่ใช้แล้ว เพื่อลดปริมาณของเสียหรือของเสียที่เป็นมลพิษลงได้ ของเสียประเภทซิลิกาดังกล่าวมีลักษณะสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานและมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์เทียบเท่าซิลิกาฟูม ซึ่งโดยปกติซิลิกาฟูมต้องนำเข้าจากต่างประเทศ งานวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับปรุงและพัฒนาสารประกอบซิลิกาที่ใช้แล้วนี้ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งในการผลิตคอนกรีตเพื่อใช้ในการก่อสร้าง โดยศึกษาการปรับอัตราส่วนผสมวัตถุดิบซึ่งผ่านการคัดขนาดมาเป็นส่วนผสมซีเมนต์เพื่อให้ได้องค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมและมีคุณภาพดี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูม
2. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสัดส่วนที่เหมาะสมของ ของเสียประเภทซิลิกาและซิลิกาฟูมในการผลิตคอนกรีต
3. ศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี โครงสร้างทางจุลภาคของผลิตภัณฑ์
4. ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในกระบวนการผลิตคอนกรีตผสมจากของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูม

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ของเสียประเภทซิลิกาซึ่งได้จากกระบวนการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนจากโรงงานรีไซเคิลกากของเสีย เพื่อใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ เปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ โดยมีขอบเขตการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด ด้วยวิธีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซ็นซ์ (XRF) เปรียบเทียบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยวิธีเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (XRD) วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่องอินดักทีฟลีคัพเพิลพลาสมา (ICP) และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
2. ทำการแปรเปลี่ยนสัดส่วนของเสียประเภทซิลิกาและซิลิกาฟูมในการผสมเพื่อเตรียมมอร์ต้าร์ (ขนาด 5 × 5 × 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร) เป็นร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักซีเมนต์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ เท่ากับ 0.40 และระยะเวลาบ่มที่ 7, 14, 28 และ 56 วัน ตามลำดับ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
3. ทดสอบคุณภาพของมอร์ต้าร์ ได้แก่ ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด และ ทดสอบการชะละลาย
4. ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมมาใช้ในกระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำของเสียประเภทซิลิกาที่เกิดจากกระบวนการรีไซเคิลซิลิโคนที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์เชิงประยุกต์เพื่อทดแทนซิลิกาฟูมเป็นการเพิ่มมูลค่าและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย
2. ช่วยลดการนำเข้าซิลิกาฟูมจากต่างประเทศเพื่อใช้ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ
3. เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการนำของเสียประเภทซิลิกามาใช้ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

# บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อการใช้งานด้านโครงสร้าง และเป็นวัสดุที่สามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะตามต้องการและเหมาะสมกับงาน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบประการหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น ไม้ อิฐ หรือเหล็ก ดังตารางที่ 2.1 คอนกรีตเกิดจากการผสมซีเมนต์ น้ำ ซึ่งทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นวัสดุประสาน รวมเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ กับทราย หิน หรือกรวด ที่เป็นวัสดุผสมหรือมวลรวม ส่วนผสมทั้งหมดจะแข็งตัวภายใน 24 ชั่วโมง และจะสามารถทนแรงอัดได้ดีขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุ ตราบเท่าที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้างเพื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น คอนกรีตโดยทั่วไปจะมีปริมาตรของซีเมนต์เพสต์อยู่ประมาณร้อยละ 25-40 ซึ่งแยกออกเป็นปริมาตรของซีเมนต์ร้อยละ 7-15 น้ำร้อยละ 14-21 และฟองอากาศแทรกอยู่ในช่องว่างประมาณร้อยละ 0.5-3 ที่เหลือจะเป็นปริมาตรของวัสดุผสม (วินิต ช่อวิเชียร, 2544) สมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับคุณภาพของซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำและซีเมนต์ ซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เสริมช่องว่างระหว่างวัสดุผสม หล่อลื่นคอนกรีตสดในขณะทำงาน ให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัวและป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ในขณะที่วัสดุผสมมีหน้าที่เป็นตัวแทรกประสานอยู่ในซีเมนต์เพสต์เนื่องจากมีราคาถูกและช่วยให้คอนกรีตมีความคงทนปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2540)

**ตารางที่ 2.1** ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2540)

| ข้อได้เปรียบ | ข้อเสียเปรียบ |
|---|---|
| 1. สามารถหล่อขึ้นรูปร่างตามความต้องการได้ | 1. ความสามารถรับแรงดึงต่ำ |
| 2. ราคาถูก | 2. มีความยืดตัวต่ำ |
| 3. มีความทนทานสูง | 3. มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร |
| 4. ทนไฟได้ดี และไม่ไหม้ไฟ | 4. อัตรากำลังต่อน้ำหนักต่ำ |
| 5. สามารถเทหล่อได้ในสภาพที่ก่อสร้าง | |

ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตทั่ว ๆ ไป ที่มีขายได้แก่ ตราช้าง ตราเพชร ( 1 เม็ด ) ตราพญานาคสีเขียว ตราภูเขา ตราทีพีไอสีแดง

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทดัดแปลง (Modified Portland Cemant) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่มีความร้อนมากกว่าประเภท 1 ทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานเขื่อนกำแพงกั้นดินหนา ๆ ตอม่อสะพาน

3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว ( High Early Strength Portland Cement ) หรือเกิดแรงเร็วหรือให้กำลังอัดเร็ว ทำได้โดยการเพิ่ม $C_3S$ (ไม่เพิ่ม $C_3A$ เพราะเกิดความร้อนมากและกำลังสุดท้ายต่ำ) หรือบดปูนเม็ดให้ละเอียดมากกว่าปูนประเภท 1 เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการให้รับกำลังอัดได้เร็ว หรือต้องการถอดไม้แบบได้เร็ว เช่น ผลิตภัณฑ์คอนกรีตหล่อสำเร็จต่างๆ งานซ่อมแซมถนนคอนกรีต เป็นต้น มีข้อควรระวังคือไม่ควรใช้ในงานคอนกรีตที่มีความหนามาก หรือปริมาณมากเพราะจะมีความร้อนเกิดขึ้นในช่วงแรกมากกว่าประเภท 1 ซึ่งจะทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ ที่มีขายได้แก่ ตราช้างเอราวัณ ตราเพชร 3 เม็ด ตราพญานาคสีแดง ตรา ที พี ไอ สีแดง

4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่มีปริมาณมาก (คอนกรีตหลา Mass Concrete) ซึ่งจะมีความร้อนเกิดขึ้นมาก จึงต้องใช้ปูนที่เกิดความร้อนต่ำ เช่น งานเขื่อนใหญ่ ๆ ไม่มีผู้ผลิตขายในประเทศไทย

5. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulphate Resistand Portland Cement) จะมี $C_3A$ ต่ำ จึงป้องกันซัลเฟตที่มีในน้ำหรือดิน ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังช้า มีความร้อนเกิดขึ้นน้อย เหมาะกับงานคอนกรีตของโครงสร้างที่อยู่ในน้ำทะเลหรือในดินที่มีซัลเฟต เช่น ดินในภาคอีสานบางพื้นที่ ที่มีขาย ได้แก่ ตราช้างฟ้า ตราปลาฉลาม ตรา ทีพีไอ สีฟ้า

**2.2 วัสดุใหม่สำหรับงานคอนกรีต** (ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2553)

การศึกษาวัสดุศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีต ได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมากในศตวรรษนี้ โดยมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีตประเภทอื่นๆ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญคือต้องการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งคอนกรีตที่อยู่สภาพเหลว เช่น ความสามารถเทได้ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น กำลังอัด และที่สำคัญยิ่งคือ ต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีความทนทาน รวมทั้งต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีราคาเหมาะสมด้วย โดยมีการนำวัสดุอื่นๆ มาผสมวัสดุที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ

1. Pulverized Fuel Ash (PFA)
2. Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS)

3. Microsilica (MS) หรือ Silica Fume

การนำวัสดุเหล่านี้มาใช้นอกจากจะได้ประโยชน์โดยตรงคือ การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ได้ดีขึ้นแล้ว ยังได้ประโยชน์ทางอ้อม คือ เป็นการนำของเสีย (Waste) มาใช้ ซึ่งช่วยขจัดปัญหามลภาวะด้วย

2.2.1 กรรมวิธีการผลิต

2.2.1.1 Pulverized Fuel Ash (PFA)

PFA เป็นของแข็งเม็ดกลมมีความละเอียด ซึ่งลอยขึ้นมาพร้อมกับอากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินที่บดละเอียดในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และจะถูกจับด้วยเครื่องดักจับ หลังจากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังถังเก็บ ถ่านหินที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงประกอบด้วยสารประกอบคาร์บอนและแร่ธาตุอื่นๆ เช่น ดินดาน ดินเหนียว ซัลไฟด์ และคาร์บอเนต เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงในเตาเผาคุณสมบัติของสารประกอบต่างๆ ในถ่านหินจะเปลี่ยนแปลงไป ทั้งด้านกายภาพและด้านเคมี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเตาเผา รวมทั้งการทำให้เย็น PFA ที่ได้จากการเผานี้ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิกา และอะลูมินา

2.2.1.2 Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS)

GGBS เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอม Slag ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการหลอมตัวของแคลเซียมออกไซด์จากหินปูนกับซิลิกอนและอะลูมินาจากแท่งเหล็กและถ่านหิน

คุณภาพของเหล็กที่ได้จะสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเหล็ก และองค์ประกอบทางเคมีของ Slag ดังนั้นในการควบคุมคุณภาพของเหล็กที่หลอม ผู้ผลิตจะทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของ Slag อยู่ตลอดเวลา เพื่อทำการปรับปรุงสัดส่วนของวัตถุดิบและสภาพการทำงานของเตาเผา Slag ที่หลอมลอยอยู่ด้านบนของเบ้าหลอม จะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการเทลงในน้ำ หรือใช้น้ำฉีดทันที ผลคือ Slag ส่วนใหญ่จะกลายเป็นเม็ดแก้วกลม ที่มีองค์ประกอบทางเคมีค่อนข้างแน่นอน หลังจากนั้นจะผ่านกระบวนการระเหยน้ำออก และทำการบดเช่นเดียวกันการบดปูนซีเมนต์ โดยไม่มีการเติมวัสดุอื่นเข้าไป สุดท้ายจะทำการตรวจสอบคุณภาพเพื่อดูความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมี

2.2.1.3 Microsilica (MS) หรือ Silica Fume

MS หรือ Silica Fume หรือ Condensed Silica Fume เป็นของเหลือจากกระบวนการผลิตซิลิกอนเมททัล (Silicon Matel) หรือเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ (Ferrosilicon Alloy) โดยการนำเอาวัตถุดิบ ได้แก่ หินควอร์ต ถ่านและเหล็ก หลอมรวมกันในอัตราที่กำหนด เมื่อวัตถุดิบนี้ได้รับความร้อน เกิดการหลอมตัวจะเกิดไอของซิลิกอนโมโนออกไซด์ลอยตัวขึ้น ไอเหล่านี้

จะถูกดักจับไว้และทำให้เย็นตัว ได้เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก โดยมีขนาดเล็กกว่าเม็ดซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า หลังจากนั้นจะถูกส่งไปบรรจุในไซโลและแยกใส่ถุงออกจำหน่าย คุณสมบัติของ MS ในแหล่งเดียวกันจะมีการผันแปรด้านองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก เพราะวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตซิลิกอน (Silicon) หรือเฟอร์โรซิลิกอน (Ferrosilicon) ค่อนข้างบริสุทธิ์มาก

2.2.2 คุณประโยชน์และการใช้งาน

2.2.2.1 Pulverized Fuel Ash (PFA) ประโยชน์ที่ได้จากการใช้ PFA เป็นส่วนผสมคอนกรีตมีดังนี้

1. ปรับปรุงความสามารถเทได้ของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตไหลลื่นเข้าแบบได้ดี เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของ PFA ซึ่งมีรูปร่างกลม

2. ลดการเยิ้ม และแนวโน้มการแยกตัวของคอนกรีตสด

3. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นช้า ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะลดลงซึ่งลดโอกาสการแตกร้าวของคอนกรีต โดยเฉพาะโครงสร้างขนาดใหญ่

4. เพิ่มกำลังอัดคอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วัน

5. เพิ่มความทนทานของคอนกรีต ด้วยเหตุผล 2 ประการคือ

- ปริมาณน้ำที่ใช้ลดลงเมื่อต้องการควบคุมความสามารถเทได้เท่ากัน
- ปฏิกิริยาระหว่าง PFA กับ $Ca(OH)_2$ ทำให้ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตลดลง

การใช้งาน PFA ทำได้ 2 ลักษณะ

1. ผสม PFA กับซีเมนต์ในปริมาณที่ต้องการจากโรงงานผสม
2. ใช้ PFA เสมือนเป็นส่วนผสมอีกส่วนหนึ่งของคอนกรีต โดยผสม ณ โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จปริมาณที่ใช้จะอยู่ในช่วง 15-50 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ข้อควรคำนึงถึงในการใช้ PFA

1. PFA โดยทั่วๆ ไปจะลดกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงแรก
2. การบ่มมีผลอย่างมากต่อการผสม PFA กล่าวคือ การพัฒนากำลังอัดของ PFA คอนกรีตจะเกิดเมื่อคอนกรีตนั้นได้รับการบ่มขึ้นเท่านั้น

2.2.2.2 Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS) ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ GGBS เป็นส่วนผสมของคอนกรีตมีดังนี้

1. ปฏิกิริยาของคอนกรีตที่ผสมด้วย Slag จะช้ากว่าคอนกรีตโดยทั่วๆ ไป ส่งผลให้ความร้อนจากปฏิกิริยาต่ำ ทำให้เหมาะที่จะใช้ในงานโครงสร้างที่มีปัญหาการแตกร้าว เนื่องจากความร้อน ฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ เขื่อน เป็นต้น

2. คอนกรีตมีความทนทานต่อซัลเฟต น้ำทะเลและสารเคมีได้ดี

3. ลดปฏิกิริยา Alkali-Aggregate Reaction ในคอนกรีตที่ใช้หินทำปฏิกิริยากัน Alkali ในปูน

4. ทำให้คอนกรีตเนื้อแน่น มีความต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ดี ทำให้เหมาะที่จะใช้งานสระว่ายน้ำ ถังเก็บน้ำ เป็นต้น

5. เพิ่มกำลังอัดและกำลังดัด คอนกรีตมีอายุมากกว่า 28 วัน

การใช้งาน GGBS ทำได้ 2 ลักษณะเช่นเดียวกับ PFA โดยปริมาณการใช้จะอยู่ในช่วง 25 ถึง 65 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับ Supersulphate ซีเมนต์จะผสม Slag สูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์

ข้อคำนึงการใช้ GGBS

1. เวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมด้วย GGBS จะช้ากว่าคอนกรีตทั่วๆ ไป
2. กำลังอัดในช่วงต้นจะพัฒนาช้าและการบ่มจะมีผลอย่างมากเช่นเดียวกับคอนกรีต

2.2.2.3 Microsilica (MS) หรือ Silica Fume ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ MS มีดังนี้

1. ลดการเยิ้ม และการแยกตัวของคอนกรีตสด
2. เพิ่มกำลังอัด ของคอนกรีตทั้งในระยะสั้นและระยะยาว
3. เพิ่มความหนาแน่นมากทำให้มีความทนทานสูงการซึมผ่านของน้ำและอากาศเป็นไปได้ยาก

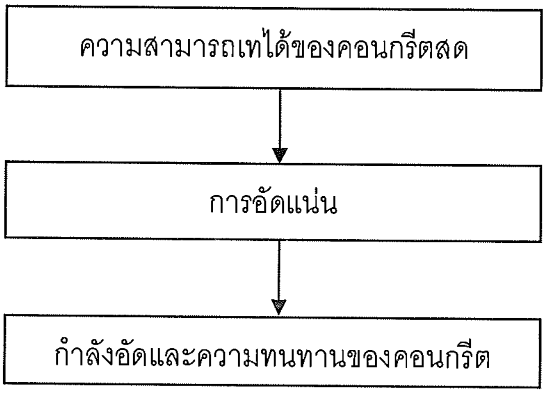
การใช้งาน MS ในทางปฏิบัติเราสามารถใช้ MS ผสมคอนกรีตได้ 2 ลักษณะคือ

1. ใช้ MS ในลักษณะที่เป็นของแข็งผสมไปในคอนกรีตลักษณะเดียวกับปูนซีเมนต์
2. ใช้ MS ในลักษณะที่เป็นของเหลว เหมือนน้ำยาผสมคอนกรีตทั่วๆ ไปปริมาณการใช้จะอยู่ในช่วง 7-10 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ข้อคำนึงถึงในการใช้ MS

1. คอนกรีตที่ผสม MS ความสามารถเทได้จะลดลงอย่างมาก จึงจำเป็นต้องใช้น้ำยาประเภทลดน้ำจำนวนมาก ผสมเพื่อเพิ่มค่ายุบตัว
2. คอนกรีตสดที่ผสม MS มีแนวโน้มจะเกิด Plastic Shrinkage มากกว่าคอนกรีตปกติดังนั้นจึงควรหาวิธีป้องกัน

**2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตสด** (ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2553) ดัง( ภาพที่ 2.1 )




***ภาพที่* 2.1** คุณสมบัติของคอนกรีตสด

2.3.1 ความสามารถเทได้

ความสามารถเทได้ คือผลรวมของพลังงานหรือกำลังงานที่จะเอาชนะแรงเสียดทานในระหว่างอนุภาคที่จะก่อเกิดการอัดแน่นของคอนรีตอย่างสมบูรณ์

โดยทฤษฎีพลังงานนี้จะต้องเอาชนะแรงเสียดทานภายในอนุภาคระหว่างส่วนผสมในเนื้อคอนกรีต แต่ในทางปฏิบัติพลังงานที่ใส่เข้าไปนี้จะต้องเอาชนะทั้งแรงเสียดทานภายในระหว่างอนุภาค แรงเสียดทานระหว่างส่วนผสมคอนกรีตกับไม้แบบและเหล็กเสริม นอกจากนี้พลังงานบางส่วนจะสูญเสียไปในการเขย่าไม้แบบ และเขย่าคอนกรีตที่อัดแน่นเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะวัดค่าความสามารถเทได้ของคอนกรีตตามคำนิยาม สิ่งที่วัดความสามารถเทได้เป็นวิธีการที่เราประยุกต์มาใช้ให้เหมาะสมเท่านั้น

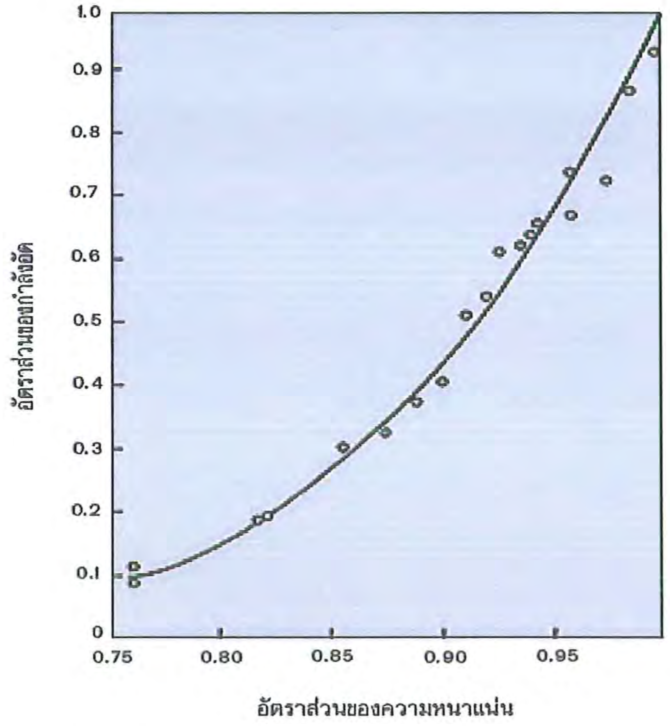
เพราะว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะผันแปรหรือถูกกระทบโดยตรงโดยช่องว่างที่ปรากฎอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตที่อัดแน่นดังนั้นควรทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นั่นคือต้องทำให้คอนกรีตสดมีความสามารถเทได้เพียงพอเพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถอัดแน่นได้ดีโดยใช้พลังงานที่เหมาะสมภายใต้สภาพที่กำหนด

ช่องว่างที่อยู่ภายในคอนกรีตจะทำให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง และส่งผลให้กำลังอัดลดลงอย่างมากโดยช่องว่างที่เกิดขึ้น 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ช่องว่างที่อยู่ในเนื้อคอนกรีตมี 2 ประเภทคือ

1. ช่องว่างเนื่องจากการจี้เขย่าไม่ดี
2. ช่องว่างที่เกิดจากน้ำส่วนเกินที่ระเหยออกไป

การลดช่องว่างนี้ทำได้โดยการเลือกใช้คอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อคอนกรีตต่ำ เลือกใช้มวลรวมที่มีส่วนคละดีคอนกรีตต้องมีความเหลวพอที่จะจี้เขย่าแบบได้ง่าย รวมทั้งควรเลือกใช้

น้ำยาผสมคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพ และที่สำคัญที่สุดคือ ต้องมีการจี้เขย่าคอนกรีตอย่างถูกต้อง และเพียงพอ ( ภาพที่ 2.2 )




**ภาพที่ 2.2** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังอัดกับอัตราส่วนของความหนาแน่น (ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2553)

2.3.2 การยึดเกาะและการแยกตัว ส่วนผสมของคอนกรีตที่ดีจะต้องมีความสามารถเทได้ ไม่มีการแยกตัวขององค์ประกอบหรือคอนกรีตควรมีความสม่ำเสมอที่เนื้อเดียวกันตลอดทุกส่วน นั้นคือ คอนกรีตมีการยึดเกาะที่ดีนั่นเอง

2.3.2.1 รูปแบบของการยึดเกาะของคอนกรีต

1. มวลรวมหยาบแยกตัวออกจากส่วนผสม เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคอนกรีตผ่านทางชัน หรือมวลรวมหยาบจมตัวลงมากกว่ามวลรวมละเอียด
2. น้ำปูนแยกตัวออกจากส่วนผสมเนื่องจากส่วนผสมเหลวมากเกินไป

2.3.2.2 สาเหตุของการแยกตัวของคอนกรีต

1. ใช้หินทรายที่มีความถ่วงจำเพาะแตกต่างกันมาก
2. ใช้สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่เหมาะสม เช่น เหลวหรือแข็งมากเกินไป
3. การขนย้าย การเทลงแบบ และการจี้เขย่าไม่ถูกวิธี

- ลำเลียงคอนกรีตที่มีความเหลวมาเป็นระยะทางไกล
- เทคอนกรีตไหลผ่านรางที่เปลี่ยนทิศทาง
- ปล่อยคอนกรีตผ่านสิ่งกีดขวาง
- จี้เขย่าให้คอนกรีตไหลไปตามแบบหรือให้คอนกรีตแผ่เป็นพื้นที่กว้าง

2.3.2.3 วิธีการป้องกันการแยกตัว

1. ใช้หินทรายที่มีขนาดคละดีมีความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันไม่มาก
2. ทำให้คอนกรีตเหลวและมีความสามารถเทได้โดยใช้น้ำยาประเภทลดน้ำหนักหรือน้ำยาลดน้ำหนักจำนวนมาก
3. เลือกสัดส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสม
4. ใช้เครื่องจี้เขย่าที่ถูกวิธี

**ภาพที่** 2.3 คอนกรีตที่ออกแบบไม่ถูกต้องจะแยกตัว (ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2553)

**ภาพที่** 2.4 คอนกรีตที่เหลวมากด้วยน้ำยาผสมคอนกรีตไม่มีการแยกตัว (ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2553)

2.3.3 การเยิ้ม

การเยิ้มคือ การคายน้ำจากส่วนผสมคอนกรีตซึ่งเกิดหลังจากการจี้เขย่าคอนกรีตเข้าแบบแล้วลักษณะที่สำคัญคือจะมีน้ำบางส่วนที่จะลอยขึ้นมาอยู่บนผิวหน้าของคอนกรีตสดเนื่องจากองค์ประกอบที่เป็นของแข็งในส่วนผสมจมตัวลงและดันน้ำที่มีองค์ประกอบที่เบาที่สุดให้ลอยตัวขึ้น การหาค่าการเยิ้มสามารถแสดงออกมาเป็นปริมาณซึ่งได้จากอัตราส่วนค่ายุบตัวลงต่อหน่วยความสูงของคอนกรีต ( ภาพที่ 2.5 )

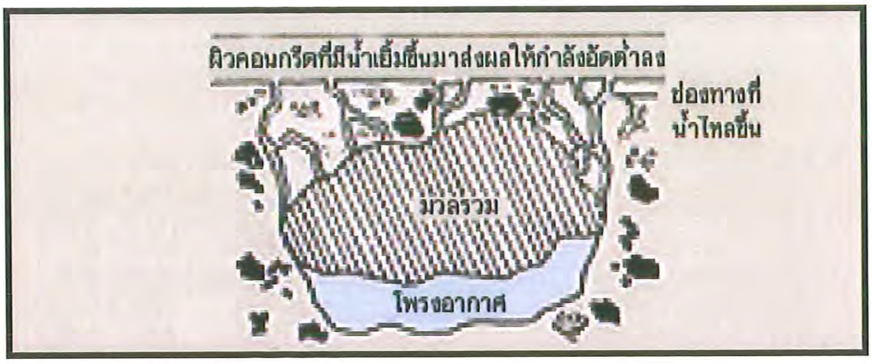
การเยิ้มจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพคอนกรีตใน 2 ลักษณะคือ

1. ผิวด้านบนของคอนกรีตมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดหรือมีกำลังอัดต่ำที่สุด เมื่อคอนกรีตแข็งตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดการเป็นฝุ่นที่ผิว และถ้าต้องเทคอนกรีตทับบนผิวนี้เช่นการเทคอนกรีตฐานรากขนาดใหญ่จะเกิดชั้นที่อ่อนแอและเป็นรูพรุนทำให้โครงสร้างนี้ขาดความทนทาน

2. นอกจากนี้น้ำที่ลอยตัวขึ้นมาแล้วน้ำบางส่วนจะถูกกักไว้ใต้มวลรวมหยาบหรือเหล็กเสริมก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้าร์และมวลรวมและเหล็กเสริมอย่างมาก และเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว จะเกิดช่องว่างเรียงตัวในทิศทางเดียวการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น การเยิ้มนี้จะพบได้บ่อยในงานคอนกรีตพื้นที่ขนาดใหญ่ เช่น พื้นถนน เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการเยิ้ม

1. ปริมาณน้ำในส่วนผสม การลดน้ำจะลดการเยิ้ม
2. คุณภาพของปูนซีเมนต์ การเยิ้มจะลดลงเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้น
3. องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ซีเมนต์ที่เป็นด่างมากจะมีการเยิ้มน้อย
4. อุณหภูมิ
5. สัดส่วนคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณมากมีแนวโน้มจะเกิดการเยิ้มน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์น้อย
6. สารกักกระจายฟองอากาศจะลดการเยิ้ม




**ภาพที่ 2.5** การเยิ้มของคอนกรีตก่อให้เกิดช่องว่างเรียงตัวในทิศทางเดียว

(ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2553)

2.3.4 เวลาการก่อตัว

เวลาการก่อตัวมีความสามารถต่อการทำงานคอนกรีตโดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเวลาการเทคอนกรีต การก่อตัวจะมี 3 ขั้นตอน

1. การเริ่มก่อตัว คือเวลาที่คอนกรีตเหลวรับแรงเสียดทานจากเครื่องทดสอบได้ 5 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรือ 70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ณ เวลานี้คอนกรีตเริ่มแข็งกระด้าง

2. การก่อตัวเริ่มต้น คือเวลาที่คอนกรีตเหลวรับแรงเสียดทานได้ 36 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรือ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ณ เวลานี้คอนกรีตจะแข็งตัวแล้ว ถ้าเทคอนกรีตสดทับลงไปอีกจะก่อให้เกิดชั้นรอยต่อที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่เรียกว่า Cold Jiont

3. การก่อตัวสุดท้าย คือเวลาที่คอนกรีตแข็งตัวสมบูรณ์ โดยสามารถรับแรงเสียดทานได้ 276 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรือ 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

การทำงานเทคอนกรีตจะต้องให้เสร็จสิ้นก่อนเวลาการเริ่มก่อตัว ปัจจุบันได้มีการพัฒนาด้านน้ำยาคอนกรีตประเภทยืดเวลาการก่อตัว ซึ่งยืดเวลาการก่อตัวได้ 2-8 ชั่วโมง

ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อตัว

การก่อตัวของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ประการที่สำคัญคือ

1. ชนิดของปูนซีเมนต์ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี ที่สำคัญ
2. อุณหภูมิของอากาศ
3. ความชื้นสัมพัทธ์
4. ความหนาแน่นของโครงสร้างคอนกรีต

ในบางกรณีอาจมีปัญหาด้านการก่อตัวผิดปกติของคอนกรีตซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือการก่อตัวผิดจังหวะ คือหลังจากผสมระยะหนึ่งคอนกรีตจะแข็งตัวชั่วขณะแต่พอผสมต่อไป ก็จะเหลวเหมือนคอนกรีตปกติ สาเหตุเกิดจากโมเลกุลของน้ำในยิบซัมถูกดึงออกไปใน

1. กระบวนการบด ดังนั้นเมื่อเริ่มผสมยิปซัมนี้จะดึงน้ำบางส่วนเพื่อคืนตัวเป็นยิปซัมอย่างเดิมโดยเริ่มจับเป็นกลุ่มแล้วค่อยๆ กระจายตัวออก จึงทำให้เกิดการแข็งตัวชั่วขณะ
2. การก่อตัวเร็ว ลักษณะการก่อตัวจะเกิดขึ้นเร็วมากและไม่คืนกลับสู่สภาพเหลวได้อีก

**2.4 กำลังอัดรับแรงอัดของคอนกรีต** (ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2553)

คุณสมบัติของคอนกรีตในขณะที่ยังอยู่ในสภาพเหลวจะมีความสำคัญเพียงขณะก่อสร้างเท่านั้น ในขณะที่คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานโครงสร้างของคอนกรีตนั้นอย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติคุณสมบัติของคอนกรีตใน 2 ลักษณะ จะมีผลต่อกันและกัน การที่จะให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วดี จะต้องมาจากการเลือกสัดส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลวมีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน

คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วได้แก่ กำลัง ความทนทาน และการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งในบทนี้จะกล่าวเพียงกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งเป็นเพียงส่วนหนึ่งของคุณสมบัติด้านกำลัง

ธรรมชาติของกำลังอัดคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. กำลังของมอร์ต้าร์
2. กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม
3. แรงยึดเหยี่ยวระหว่างมอร์ต้าร์กับผิวของมวลรวม

2.4.1 กำลังมอร์ต้าร์

กำลังของมอร์ต้าร์มีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยกำลังของมอร์ต้าร์นี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ต้าร์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความพรุนจะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กำลังของมอร์ต้าร์ขึ้นอยู่อย่างมากกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

การเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ ปริมาณ กำลัง ลักษณะผิว ขนาดใหญ่สุด การดูดซึม และแร่ธาตุต่างๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มาก

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังดึงน้อยกว่ากำลังอัด โดยอัตราส่วนของกำลังดึงต่อกำลังของคอนกรีต จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของกำลังดึงต่อกำลังของคอนกรีต จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น

2.4.2 กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม

สำหรับกำลังของมอร์ต้าร์ที่กำหนดให้ความสามารถต้านแรงของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังของหินและแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้าร์ แต่โดยทั่วไปกำลังของมวลรวม จะสูงเป็นหลายเท่าของกำลังของมอร์ต้าร์ ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจะเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดให้  กำลังของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้หินขนาดใหญ่ขึ้น เพราะหินขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดน้ำใต้หินมากขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้าร์ลดลง

ขนาดของมวลรวม จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต ที่มีสัดส่วนน้ำของคอนกรีต ที่มีสัดส่วนต่อซีเมนต์ต่ำ หรือปานกลางมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง

การเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลังอัด รวมทั้งถ้าใช้หินที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้น

2.4.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ต้าร์

แรงยึดเหนี่ยวนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่างลักษณะผิวของมวลรวม และลักษณะทางเคมี คือปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่างๆ ในเนื้อมวลรวม

นอกจากนี้ทิศทางในการหล่อและทิศทางในการให้น้ำหนักจะมีผลต่อกำลังเช่นกัน โดยจะมีผลต่อกำลังดึงมากกว่ากำลังอัดด้วยสาเหตุที่ว่าจะเกิดช่องว่างทำแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ต้าร์ต่ำลง

## 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต (ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2553)

2.5.1 คุณสมบัติของวัสดุผสม

1. ปูนซีเมนต์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมากทั้งนี้ เพราะว่าปูนซีเมนต์แต่ละประเภท จะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้แม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกันแต่มีความละเอียดแตกต่างกันแล้ว อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตก็จะแตกต่างไปด้วยคือ ถ้าผสมปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน

2. มวลรวม มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ดีมวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อยซึ่งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบจะให้กำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าพวกกรวดที่มีผิวเกลี้ยง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน เพราะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก สำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถเทได้เท่ากัน ดังนั้นคอนกรีตที่มีมวลรวมขนาดใหญ่ จึงมักให้กำลังดีกว่า ส่วนขนาดคละของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตในแง่ที่ว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดคละไม่เหมาะสม คือมีส่วนละเอียดมากเกินไปนั้น จะต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีส่วนคละที่ดี เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้เท่ากัน อีกทั้งยังก่อให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวนมากกว่า ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงได้ นอกจากนี้ความสะอาดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต เช่นกัน

3. น้ำมีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใส และปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ น้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะต้นสูง น้ำขุ่นหรือน้ำที่มีสารแขวนลอยปนอยู่ จะทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

2.5.2 การทำคอนกรีต

1. การชั่งตามส่วนผสม

การใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากอัตราส่วนผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้

อัตราส่วนผสม จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง โดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

2. การผสมคอนกรีต

การผสมคอนกรีตจะต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อให้น้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เพลสต์กระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลได้เต็มที่ ดังนั้นการผสมคอนกรีตหากกระทำไม่ทั่วถึง จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่ทั่วถึงได้

3. การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น

จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเพราะหากคอนกรีตแยกตัวในขณะลำเลียง หรือเท จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้จะทำให้คอนกรีตแน่นตัวหากทำได้ไม่เต็มที่ ก็จะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลงลดได้ หรือหากใช้วิธีทำให้คอนกรีตแน่นตัวที่ไม่เหมาะสม ก็สามารถทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นในเนื้อคอนกรีตได้ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ

2.5.3 การบ่มคอนกรีต

1. ความชื้น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำนั้นจำเป็นต้องค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพลสต์ และซีเมนต์เพลสต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ถ้ามีความชื้นอยู่ตลอดเวลาถ้าซีเมนต์เพลสต์ไม่มีความชื้นอยู่ คอนกรีตก็จะไม่มีการเพิ่มกำลังอีกต่อไป ในทางปฏิบัติเรามักบ่มคอนกรีตจนถึงอายุ 28 วัน ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที
2. อุณหภูมิ ถ้าหากอุณหภูมิสูงในขณะบ่มก็จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตถูกเร่งให้เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า
3. เวลาที่ใช้ในการบ่ม ถ้าหากสามารถบ่มคอนกรีตให้ชื้นอยู่ตลอดเวลาได้ยิ่งนานเท่าใดก็จะยิ่งได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

**2.6 การบ่มคอนกรีต** (ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2553)

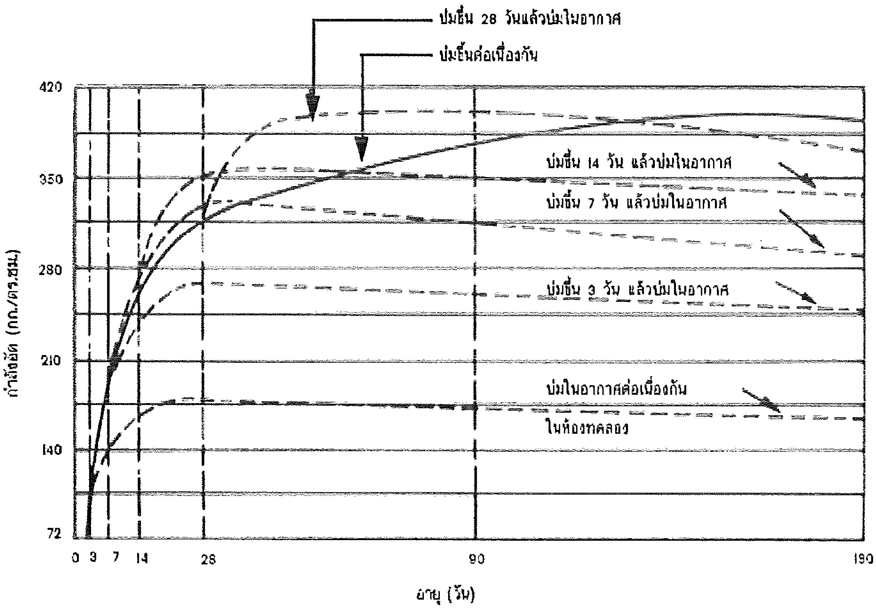
การบ่ม (Curing) คือชื่อเฉพาะของวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการทำโดยให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมีด้วยกัน 2 ประการ คือ

1. ป้องกันความสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต
2. รักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

สำหรับวัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทานและเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสมและลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

การบ่มอาจหมายถึงการควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตด้วยทั้งนี้อุณหภูมิที่สูงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อันทำให้คุณภาพของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก อย่างไรก็ตามการเร่งนี้อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในระยะยาว
ดัง (ภาพที่ 2.6 )




**ภาพที่ 2.6** อายุการบ่มคอนกรีต (ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2553)

2.6.1 กรรมวิธีการบ่ม

แบ่งกรรมวิธีการบ่มออกเป็น 2 ชนิด ตามสภาพอุณหภูมิที่ใช้บ่มคือ

2.6.1.1 การบ่มที่อุณหภูมิปกติ สามารถแยกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ การเพิ่มความชื้นและวิธีป้องกันการเสียความชื้น

1. การเพิ่มความชื้น โดยให้ความชื้นต่อผิวหน้าของคอนกรีตแข็งตัว วิธีนี้นอกจากจะเป็นวิธีบ่มที่ดีแล้วยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีตลงด้วยจึงเหมาะกับคอนกรีตที่เทในอากาศร้อน การบ่มแบบนี้ทำได้หลายวิธี รวมทั้งมีข้อดีข้อเสีย ดังสรุปในตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** ข้อได้เปรียบเสียเปรียบของการเพิ่มความชื้นในการบ่ม (ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2553)

| วิธีการบ่ม | ข้อได้เปรียบ | ข้อเสียเปรียบ |
|---|---|---|
| **1. การขังน้ำ**<br>เหมาะสมกับงานคอนกรีตที่มีพื้นราบ เช่น แผ่นพื้นทั่วไป ดาดฟ้า พื้นสะพาน ถนนทางเท้าสนามบิน<br>วิธีการ ทำโดยใช้ดินเหนียวหรือก่ออิฐทำเป็นคันโดยรอบของงานคอนกรีตที่จะบ่ม<br>ข้อควรระวัง อย่างให้น้ำที่ใช้บ่มมีอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตเกิน 10°ซ | 1. ทำได้สะดวก,ง่าย,ราคาถูก<br>2. วัสดุหาได้ง่าย เช่นดินเหนียวและน้ำ<br>3. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้<br>4. ซ่อมแซมได้สะดวก,รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายตัวอย่างเช่นทำคันดินเหนียวและพังก็สามารถซ่อมได้ทันที | 1. ต้องหมั่นตรวจดูรอยแตกร้าวของดินเหนียวที่นำมาใช้อยู่เสมอมิฉะนั้นน้ำจะซึมหนี<br>2. ต้องเก็บทำความสะอาดบริเวณคอนกรีตที่บ่มเมื่อเสร็จงานบ่มเรียบร้อยแล้ว |
| **2. โดยการฉีดน้ำหรือพรมน้ำ**<br>**วิธีการ** ใช้ได้ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง เช่น ผนัง กำแพง และพื้น | 1. ทำได้สะดวก ได้ผลดี<br>2. ค่าใช้จ่ายถูก<br>3. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้<br>4. ไม่ต้องดูแลตลอดเวลา | 1. ไม่เหมาะสมกับสถานที่ที่หาน้ำได้ยาก<br>2. ไม่สะดวกกับการฉีดกับกำแพงในแนวดิ่ง เพราะน้ำจะแห้งเร็ว |
| **3. โดยการใช้วัสดุเปียกชื้นคลุม**<br>**วิธีการ** เช่นนำผ้าใบ กระสอบ ซึ่งอุ้มน้ำได้ ถ้าเป็นผ้าใบควรเป็นสีขาว เพราะสะท้อนความร้อนได้ดี และรอยต่อต้องเหลื่อมกันให้มาก ถ้าใช้ฟางหรือขี้เลื่อยคลุมควรหนาไม่น้อยกว่า 15 ซม. คลุมให้ทั่วและฉีดน้ำให้ชุ่มเสมอ | 1. ได้ผลดีมาก ราคาไม่สูงเกินกว่าที่จะทำ<br>2. ทำได้ทั้งแนวราบและแนวดิ่งในกรณีที่ใช้ผ้าใบและกระสอบ<br>3. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้<br>4. สามารถหาวัสดุมาใช้ได้ง่าย | 1. ถ้าอากาศร้อนจะแห้งเร็ว<br>2. ถ้าที่กว้างๆถ้าใช้ผ้าใบคลุมจะเสียค่าใช้จ่ายมาก<br>3. ต้องฉีดน้ำให้ชุ่มอยู่เสมอ<br>4. ต้องพิจารณาก่อนที่จะนำมาใช้ว่าวัสดุนั้นเป็นอันตรายต่อซีเมนต์หรือผิวคอนกรีตหรือไม่ |

2. วิธีป้องกันการเสียน้ำออกจากคอนกรีต วิธีนี้เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีตมิให้เล็ดลอดออกสู่ภายนอก การป้องกันความชื้นวิธีนี้ ได้แก่ การใช้กระดาษกันน้ำ ผ้าพลาสติก หรือสารเคมี เป็นต้นอย่างไรก็ตามไม้แบบที่ยังไม่ถอดออกก็สามารถกันความชื้นได้เช่นกัน ดังสรุปในตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** ข้อได้เปรียบเสียเปรียบของการป้องกันความชื้นในการบ่ม (ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน), 2553)

| วิธีการบ่ม | ข้อได้เปรียบ | ข้อเสียเปรียบ |
|---|---|---|
| **1. การใช้กระดาษกันน้ำซึมได้คลุม**<br>กระดาษนี้ทำด้วยกระดาษเหนียวยึดติดกันด้วยกาวประเภทยางมะตอยและเสริมความเหนียวด้วยใยแก้วและมีคุณสมบัติยืดหดตัวไม่มาก **วิธีการใช้** รอยต่อควรเหลื่อมกันให้มากพอสมควร และรอยต่อระหว่างแผ่นต้องผนึกติดแน่นด้วยกาว เทปหรือทรายก็ได้ | 1. ทำได้สะดวก รวดเร็ว<br>2. ป้องกันคอนกรีตไม่ให้แห้งได้เร็วแต่ต้องคอยราดน้ำไว้ด้วย<br>3. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้ | 1. ราคาแพง<br>2. ไม่สะดวกในการปฏิบัติงาน<br>3. ไม่สะดวกในการเก็บรักษาต่อไปเมื่อนำมาใช้งานต่อ |
| **2. การใช้แผ่นพลาสติกคลุม**<br>เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและสามารถใช้คลุมงานคอนกรีตที่จะบ่มได้ทันทีที่ต้องการ | 1. มีน้ำหนักเบา ปฏิบัติงานง่าย<br>2. ได้ผลดีในการป้องกันน้ำที่ระเหยออกไปจากคอนกรีต<br>3. ไม่ต้องราดน้ำให้ชุ่มอยู่ภายใน | 1. บางมาก,ชำรุดง่าย<br>2. ต้องหาของหนักทับเพื่อกันปลิว<br>3. ราคาแพง ถ้าใช้ในการคลุมงานคอนกรีตที่กว้างๆ |
| **3. การบ่มด้วยน้ำยาเคมีเคลือบผิวคอนกรีต**<br>มีหลายสีด้วยกัน เช่น ใส ขาว เทาอ่อนและดำ สำหรับสีขาวจะเหมาะสมกว่าเพราะสะท้อนความร้อนและแสงได้ดีกว่า โดยการใช้พ่นคลุมพื้นผิวคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็วๆเช่นลานบินหลังคากว้างๆ งานพิเศษต่างๆ หรือตึกสูงๆที่น้ำส่งขึ้นไปได้ลำบาก | 1. สะดวก รวดเร็ว<br>2. ได้ผลดีพอสมควร ถ้าน้ำยานั้นเป็นของแท้และมีความเข้มข้นตามมาตรฐานของผู้ผลิต<br>3. ไม่ต้องคอยรดน้ำ<br>4. ไว้ใช้ในกรณีที่การบ่มด้วยวิธีอื่นไม่ได้ผล | 1. ค่าใช้จ่ายสูง<br>2. ต้องจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับพ่นทุกครั้ง<br>3. ต้องใช้บุคคลากรที่เคยทำมาก่อนการพ่น<br>4. น้ำยาเคมีที่ใช้พ่นอาจทำอันตรายแก่ผู้ที่อยู่ในระยะใกล้เคียงได้ |
| **4. การบ่มโดยใช้แบบ**<br>ต้องพ่นไม้แบบให้มีความชื้นอยู่เสมอไม้แบบจะป้องกันการเสียความชื้นได้ดีมาก ฉะนั้นควรรักษาไม้แบบไว้ให้นานที่สุด หลังจากถอดแบบแล้วจึงใช้วิธีอื่นต่อไป | 1. ทำได้สะดวก<br>2. ใช้คนงานระดับกรรมกรทำได้ | 1. ต้องใช้ไม้แบบจำนวนมาก<br>2. ช้าเพราะต้องนำไม้แบบไปใช้งานอื่นต่อไป<br>3. ถ้าเป็นไม้แบบเก่าต้องเสียเวลาทำความสะอาดไม้แบบ |

2.6.1.2 การบ่มที่อุณหภูมิสูง

การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงสามารถเร่งอัตราการเพิ่มกำลังได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป เช่น ท่อ คาน และพื้น เป็นต้น ข้อดีในการปฏิบัติ คือ

- สามารถผลิตได้อย่างรวดเร็ว
- ประหยัดแบบหล่อเพราะสามารถถอดแบบได้เร็ว
- คอนกรีตมีกำลังสูงเร็ว ทนต่อการเคลื่อนย้ายและใช้งานได้ดี

การบ่มด้วยไอน้ำที่มีความกดดันต่ำ (Low Pressure Steam Curing)

อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 40-100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ได้ผลดีที่สุดจะอยู่ระหว่าง 65-80 องศาเซลเซียส การเลือกอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มกำลังและกำลังสูงสุดที่ต้องการ อุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและกำลังประลัยจะมีค่าต่ำ อุณหภูมิที่ต่ำให้กำลังประลัยสูงสุดที่สูงแต่ด้วยอัตราการเพิ่มกำลังที่ต่ำ

นอกจากอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้บ่มแล้ว สิ่งที่สำคัญก็คือเวลาที่ใช้ในการบ่มซึ่งประกอบด้วยช่วงเวลา การค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เวลาที่อุณหภูมิสูงสุดจริง และการลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิปกติ ขั้นตอนการควบคุมอุณหภูมิควรทิ้งคอนกรีตไว้ที่อุณหภูมิปกติประมาณ 2-6 ชั่วโมงหลังการหล่อก่อนที่จะผสมกับไอน้ำ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขั้นเบื้องต้นก่อน อัตราการเพิ่มอุณหภูมิไม่ควรเกิน 30 องศาเซลเซียส/ชั่วโมง เวลาที่คอนกรีตอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงสุดเป็นสิ่งกำหนดปริมาณกำลังที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลคูณระหว่างเวลาและอุณหภูมิหรือที่เรียกว่า Maturity

ในหลายโอกาส เราใช้การบ่มด้วยน้ำนี้เพื่อให้ได้กำลังสูงสุดพอที่จะให้ความปลอดภัยต่อการถอดแบบและขนย้ายเท่านั้น จากนั้นก็สามารถบ่มคอนกรีตด้วยความชื้นตามปกติได้

การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันสูง (High Pressure Steam Curing)

หากต้องการบ่มคอนกรีตด้วยอุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส เราต้องให้ความกดดันสูงขึ้นและต้องบ่มคอนกรีตในภาชนะปิดสนิท ซึ่งมีชื่อว่า Autoclave อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง 160-120 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 6-20 atm สารประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะดังกล่าวมีคุณสมบัติต่างจากสารประกอบ ซึ่งบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และมีผลดีที่สำคัญ คือ

- สามารถใช้คอนกรีตได้ภายในเวลา 24 ชั่วโมงเพราะคอนกรีตมีกำลังสูงทัดเทียมการบ่มปกติเป็นเวลา 28 วัน
- มีการหดตัวและการล้าลดลงมาก
- ทนเกลือซัลเฟตได้ดีขึ้น
- มีความชื้นต่ำภายหลังการบ่ม

ในทางปฏิบัติ การบ่มแบบนี้สิ้นค่าใช้จ่ายสูงและใช้ได้กับคอนกรีตสำเร็จรูปเท่านั้น มีการบ่มนี้สำหรับผลิตภัณฑ์บางอย่าง เช่น แผ่นกระเบื้องซีเมนต์ใยหิน เป็นต้น

2.6.2 ระยะเวลาการบ่ม

โดยทั่วไประยะเวลาของการบ่มคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ อาทิเช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วนผสมของคอนกรีต กำลังของคอนกรีต กำลังของคอนกรีตที่ต้องการขนาดและรูปร่างของแท่งคอนกรีต อุณหภูมิที่ใช้บ่ม และความชื้นในขณะบ่ม เป็นต้น องค์ประกอบเหล่านี้ถือได้ว่ามีผลต่อระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต ซึ่งอาจจะถึง 1 เดือน สำหรับคอนกรีตที่ใช้ทำเขื่อน หรือเพียง 3 วัน สำหรับคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ในปริมาณสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดเกิดกำลังสูงเร็ว

สำหรับงานโครงสร้างทั่วๆ ไป ส่วนใหญ่จะกำหนดระยะเวลาในการบ่มไว้ตั้งแต่ 3 วัน จนถึง 2 สัปดาห์ ซึ่งกำหนดระยะเวลาดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยปกตินิยมกำหนดระยะเวลาการบ่มไว้ที่ประมาณ 1 สัปดาห์ สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

## 2.7 ปูนซีเมนต์ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ หินปูนหรือดินปูนขาวกับดินเหนียวหรือดินดาน จนรวมตัวกันจนสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนขาวซีเมนต์ที่กล่าวนี้หมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮโดรลิก (Hydraulic Cement) ที่ผสมกับน้ำตามส่วนและสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำ ได้เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างรางน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงทนทาน เมื่อแข็งตัวแล้วขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและการให้ความชื้นในขณะที่เริ่มแข็งตัว

ปูนซีเมนต์เรียกในทางวิชาการว่า "ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ได้มาจากการตั้งชื่อของนายโจเซฟ แอสปดิน โดยในปี ค.ศ.1824 นายโจเซฟได้ทำการจดทะเบียนลิขสิทธิ์ของวิธีการผลิตปูนซีเมนต์อย่างหนึ่งซึ่งได้จากการเผาส่วนผสมระหว่างหินปูนและดินเหนียว

เมื่อนำมาบดจะได้ผงปูนซีเมนต์ หลังจากการรวมกับน้ำและตัวจะมีสีเหลืองเทาคล้ายหินในเกาะของเมืองปอร์ตแลนด์ในประเทศอังกฤษ ปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ขณะนั้นยังมีคุณภาพต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาส่วนผสมดังกล่าวใช้ความร้อนต่ำซึ่งทำให้หินปูนกับดินเหนียวยังรวมตัวกันไม่ดี (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

**2.8 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์** (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

1. ไตรคัลเซียมซิลิเกต ($C_3S$)

มีชื่อย่อว่า $C_3S$ เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ $C_3S$ เหมือนคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมงและจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ $C_3S$ จะถูกกระทบโดยยิบซั่ม ปริมาณ $C_3S$ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 35-55

2. ไดคัลเซียมซิลิเกต ($C_2S$)

$C_2S$ เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย$C_2S$ มีอยู่หลายแบบมีเพียง $C_2S$เท่านั้นที่อยู่ตัวที่อุณหภูมิทั่วไป $C_2S$ มีคุณสมบัติยึดเกาะเมื่อผสมน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาว จะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ $C_3S$ ปริมาณ $C_2S$ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 15-35

3. ไตรคัลเซียมอลูมิเนต ($C_3A$)

$C_3A$ เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน $C_3A$ จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อให้เกิด Flash Set ทำได้โดยเติมยิปซัมลงระหว่างการบดซีเมนต์กำลังอัดของ $C_3A$ จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี $C_3A$ ประมาณร้อยละ 7-15

4. เตตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ($C_4AF$)

$C_4AF$ ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมากและก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ $C_4AF$ ค่อนข้างต่ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี $C_4AF$ ประมาณร้อยละ 5-10

โดยคุณสมบัติต่างๆ เช่น อัตราการเกิดปฏิกิริยา การพัฒนากำลังอัด กำลังประลัย ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และคุณสมบัติอื่นๆ ของสารประกอบในปูนซีเมนต์นั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

**ตารางที่** 2.4 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

| **คุณสมบัติ** | $C_3S$ | $C_2S$ | $C_3A$ | $C_4AF$ |
|---|---|---|---|---|
| 1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น | เร็ว(ชั่วโมง) | ช้า(ชั่วโมง) | ทันทีทันใด | เร็วมาก(นาที) |
| 2.การพัฒนากำลังอัด | เร็ว(วัน) | ช้า(อาทิตย์) | เร็วมาก(วันเดียว) | เร็วมาก(วันเดียว) |
| 3. กำลังอัดประลัย | สูง | ค่อนข้างสูง | ต่ำ | ต่ำ |
| 4. ความร้อน จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น | ปานกลาง (500 จูล/กรัม) | น้อย (250 จูล/กรัม) | สูงมาก (850 จูล/กรัม) | ปานกลาง (420 จูล/กรัม) |
| 5. คุณสมบัติอื่นๆ | คุณสมบัติเหมือนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ | - | ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย | ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา |

2.8.1 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

2.8.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration reaction)

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ

1. อาศัยสารละลายซีเมนต์ จะละลายในน้ำก่อให้เกิดไอออนในสารละลายและไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า โซลิดสเตรทรีแอคชั่น (Solid State Reaction)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิดเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไปทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

- ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของคัลเซียมซิลิเกต ($C_3S$,$C_2S$)

คัลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$และCalcium Silicate Hydrate(CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน และสมการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

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

หรือ $$2C_3S+6H \rightarrow C_3S_2H_3+3Ca(OH)_2$$

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

หรือ $$2C_3S+4H \rightarrow C_3S_2H_3+3Ca(OH)_2$$

$Ca(OH)_2$ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมีพีเอชประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กสนิมได้อย่างดีมาก

- ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรคัลเซียมอลูมิเนต ($C_3A$)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ $C_3A$ จะเกิดทันทีทันใดและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์ดังสมการ

$$3CaO.Al_2O+6H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$$

หรือ $$C_3A+6H \rightarrow C_3AH_6$$

เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม($CaSO_4.2H_2O$) เข้าไปในระหว่างกระบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ$C_3A$ ก่อให้เกิดชั้นของ เอสทรินไกท์(Ettringite) บนผิวของอนุภาค $C_3A$ ดังสมการ

$$C_3A+CaSO_4.2H2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O \text{ (Ettingite)}$$

ชั้นของเอสทรินไกท์ (Ettringite) ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ $C_3A$ และทำการก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ $C_3A$ และ $C_2A$ เป็นส่วนใหญ่แต่ชั้นของเอสทรินไกท์ (Ettringite) จะเกิดแรงดันที่มาจากเพิ่มปริมาณของของแข็งแรงดันนี้จะทำให้ชั้นของเอสทรินไกท์ (Ettringite) แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น $C_3A$ แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิดเอสทรินไกท์ (Ettringite) ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอีกครั้งหนึ่งขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่งซัลเฟตไอออน (Sulphate Ions) มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดเอสทรินไกท์ (Ettringite) จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ $C_3A$ โดยเปลี่ยนเอสทรินไกท์ (Ettringite) ไปเป็นโมโนซัลเฟต (Monosulphate)

- ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเตตราคัลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ ($C_4AF$)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ $C_4AF$ นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย $C_4AF$ จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมและ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของซัลโฟรูมิเนต (Sulphoaluminate) และซัลโฟ-เฟอไลต์ (Sulphoferrite) ดังสมการ

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

เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นปริมาณร้อยละ 80 ของสารประกอบหลักทั้ง 4 ดังตารางที่ 2.5

**ตารางที่ 2.5** เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบหลักปริมาณร้อยละ 80 (กฤษฎา ปัญญาภรดี และคณะ, 2542)

| **สารประกอบหลัก** | **เวลา (วัน)** |
|---|---|
| $C_3S$ | 10 |
| $C_2S$ | 100 |
| $C_3A$ | 6 |
| $C_3AF$ | 50 |

2.8.1.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยที่ซิลิกาออกไซด์ ($SiO_2$) และอะลูมินาออกไซด์ ($Al_2O_3$) ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สารประกอบคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียม-อลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \rightarrow dCaO.eSiO2.fH_2O \quad (1)$$

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O\ xCaO \rightarrow yAl_2O_3.zH_2O \quad (2)$$

ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์ยึดประสานและมีกำลังดีขึ้น โดยปกติปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นอย่างช้าๆและต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มทำปฏิกิริยาเมื่ออายุประมาณ 7-14 วัน ขึ้นไปและมีปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ จนหลังอายุ 28 วัน จะทำปฏิกิริยาที่เร็วขึ้นโดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี และลักษณะสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอซโซลาน

2.8.2 น้ำ

น้ำสำหรับผสมคอนกรีตมีหน้าที่หลักคือ ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อให้เกิดการจับตัวแน่นกับวัสดุผสมทำให้เกิดการเกาะตัวเป็นก้อนแข็ง ช่วยเคลือบผิววัสดุผสมให้เปียกเพื่อการยึดจับซีเมนต์เพสต์ได้ดี และยังช่วยให้ส่วนผสมมีความลื่น มีความข้นเหลวพอดีสามารถทำงานได้อย่างสะดวก และหล่อเข้าแบบได้ตามต้องการ ดังนั้นคุณภาพและปริมาณน้ำจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต น้ำที่นำมาผสมในคอนกรีตจะต้องเป็นน้ำที่สะอาด ไม่มีน้ำมัน กรด ด่าง สารอินทรีย์ และต้องมีความขุ่นไม่เกิน 2,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จะส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีตได้เช่นระยะเวลาในการแข็งตัว ค่ากำลังรับแรงอัด หรือทำให้คอนกรีตมีสีผิวที่ไม่สม่ำเสมอ

ตะกอนที่ทำให้เกิดความขุ่นเกินมาตรฐาน อาจทำให้ต้องใช้น้ำปริมาณมากกว่าปกติ เกิดการหดตัวของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นหรือในบางครั้งอาจทำให้เกิดคราบเกลือที่ผิวคอนกรีตน้ำตาล ไนเตรท กรดแทนนิค และสารอินทรีย์ในน้ำ ทำให้คอนกรีตแข็งตัวช้า ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ช้าลง และค่ากำลังรับแรงอัดลดลง อีกทั้งยังอาจทำให้เกิดฟองอากาศปริมาณมากจนกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ในขณะที่คาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต ทำให้คอนกรีตแข็งตัวเร็วเกินไป คอนกรีตที่ได้จึงกำลังต่ำ น้ำที่มีซัลเฟตปนอยู่เพียงปริมาณเล็กน้อย สามารถทำให้คอนกรีตกำลังลดลงได้เช่นกัน (ประณต กุลประสูตร, 2541) ปริมาณซัลเฟตที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลา 28 วันลดลง แต่อาจส่งผลให้การก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีตเร็วขึ้นเนื่องจากเกลือของซัลเฟตจะทำให้การตกผลึกของแอตทริงไกท์ช้าลง (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2540) กล่าวว่าสารละลายเกลืออินทรีย์บางชนิด อาจทำให้การก่อตัวและแข็งตัวช้าลง เช่น เกลือของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส และดีบุก เช่นเดียวกับฟอสเฟต อาร์ซีเนตและบอเรต โดยอนุโลมให้น้ำมีระดับความเข้มข้นของสารเหล่านี้ได้ไม่เกิน 500 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งสารละลายดังกล่าวพบมากในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ได้ผ่านระบบบำบัด หรือน้ำที่ซึมออกมาจากเหมืองแร่

น้ำที่มีความเป็นกรดหรือด่างเพียงเล็กน้อย อาจไม่ทำให้เกิดปัญหากับคอนกรีต ขณะที่น้ำที่มีปริมาณโซเดียมหรือโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เกิน 500 ส่วนในล้านส่วนอาจทำให้เกิดการก่อตัวเร็วและค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง

คอนกรีตต้องการน้ำจำนวนเพียงให้สามารถลื่นไหลเข้าแบบหล่อได้ แต่การใส่ปริมาณน้ำมากเกินไปอาจทำให้คอนกรีตมีสภาพเหลว ซึ่งอาจมีความสะดวกต่อการเทแต่ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จะมีค่าต่ำลง ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดจะเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

นอกจากนี้พบว่าซัลเฟตที่ปนอยู่ในน้ำมีผลต่อกำลังรับแรงอัด ดังแสดงในตารางที่ 2.6 โดยพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงอย่างมากถ้าปริมาณซัลเฟตในน้ำมีค่ามากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

**ตารางที่ 2.6** กำลังของคอนกรีตที่ลดลงเนื่องจากซัลเฟตที่ปนอยู่ในน้ำ (ประณต กุลประสูตร, 2541)

| **ปริมาณซัลเฟตในน้ำ (เปอร์เซ็นต์)** | **กำลังของคอนกรีตที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)** |
|---|---|
| 0.5 | 4 |
| 1.0 | 10 |
| มากกว่า 10 | ไม่ควรใช้ผสมคอนกรีตเนื่องจากทำให้กำลังลดลงอย่างมาก |

น้ำสำหรับการบ่มเป็นน้ำที่คอนกรีตต้องการในขณะที่แข็งตัวแล้ว ต้องเป็นน้ำสะอาด เพื่อป้องกันการผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต และรอยเปื้อนที่ผิวอันเกิดจากการใช้น้ำสกปรกบ่มคอนกรีต ส่วนน้ำสำหรับการใช้ล้างวัสดุนั้นไม่จำเป็นต้องสะอาดเหมือนกับน้ำสำหรับส่วนผสมและบ่ม แต่ก็ควรเป็นน้ำที่สะอาดพอสมควร ไม่มีฝุ่น เกลือ หรือสารอินทรีย์ปนอยู่ เพราะอาจเคลือบผิววัสดุผสมและทำให้คอนกรีตที่ได้กำลังอัดลดลงหรือแข็งตัวช้า

2.8.3 วัสดุผสม (Aggregate)

วัสดุผสม หรือบางครั้งเรียกว่ามวลรวม เป็นวัสดุเฉื่อยที่สำคัญสำหรับการผลิตคอนกรีต โดยจะแทรกประสานกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ มีปริมาณร้อยละ 70-80 ของส่วนผสมทั้งหมด วัสดุผสมโดยทั่วไป ได้แก่ หินย่อย กรวด และทรายหยาบ ซึ่งเมื่อผสมกับซีเมนต์แล้วทำให้คอนกรีตมีความคงทน ความแข็งแรง (Durability) เพราะวัสดุผสมโดยทั่วไปในธรรมชาติสามารถรับกำลังรับแรงอัดได้ดีกว่าคอนกรีต (วัสดุผสมโดยทั่วไปสามารถรับแรงกดได้ 700-3500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปริมาตรของคอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก (Volume stability) และที่สำคัญยังช่วยให้คอนกรีตมีราคาถูกลง กำลังและสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมหลายอย่างมีผลต่อสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาพเหลวและแข็งตัวแล้ว ดังนั้นการเลือกวัสดุผสมที่เหมาะสมไม่เพียงประหยัด ยังเท่ากับเป็นการช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นด้วย วัสดุผสมที่ใช้งานคอนกรีตมวลเบา คือ วัสดุผสมละเอียด (Fine aggregates) เป็นวัสดุที่ส่วนใหญ่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 (4.76 มิลลิเมตร) ได้ แต่ต้องไม่เล็กจนเป็นฝุ่น (0.07 มิลลิเมตร) หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 200 วัสดุผสมที่ละเอียดที่นิยมใช้คือ ทรายธรรมชาติ และควรเป็นทรายน้ำจืดที่สะอาด มีเหลี่ยมคม และขนาดของเม็ดสม่ำเสมอ

## 2.9 การกำจัดโดยการทำเสถียรและทำเป็นก้อนแข็ง

2.9.1 คำจำกัดความและวัตถุประสงค์การทำก้อนแข็ง

สำหรับการทำก้อนแข็ง (Solidification) LaGrega และคณะ (1994) ได้นิยามว่า คือกระบวนการเติมสารหรือวัสดุประสาน (Binder) ที่ช่วยให้เกิดการแข็งตัวหรือคงรูปในของเสียที่อันตรายโดยสารที่เพิ่มเติมลงไปจะช่วยเพิ่มกำลังลดความสามารถในการถูกบีบอัด (Compressibility) และลดค่าการซึมน้ำของของเสียนั้น

การทำก้อนแข็งมีวัตถุประสงค์เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายขนส่ง ลดพื้นที่ผิวของของเสียเพื่อลดการแพร่กระจายของสารพิษ จำกัดอัตราการละลายของสารพิษเมื่อสัมผัสกับสารละลาย และลดความเป็นพิษ

2.9.2 วิธีทำก้อนแข็ง

วิธีที่ใช้จัดการกับของเสียในกระบวนการทำก้อนแข็งมีมากมาย ดังนี้

ก. วิธีการใช้ซีเมนต์ (Cement – based techniques)

ข. วิธีการใช้ปูนขาว หรือ วัสดุปอซโซลาน (Lime-based techniques / Pozzolanic techniques)

ค. วิธีการใช้วัสดุที่มีสมบัติแข็งตัวเหมือนซีเมนต์ (Self-cementing method)

ง. วิธีการหลอมให้เป็นแก้ว (Glassification)

จ. วิธีการเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic techniques)

ฉ. วิธีเทอร์โมเซตติ้ง (Thermosetting techniques)

ช. วิธีแอนแคปซูเลชัน (Encapsulation techniques)

โดย 4 วิธีแรกเหมาะกับกระบวนการที่ใช้เพื่อจับยึดสารอนินทรีย์ ในขณะที่ 3 วิธีหลังเหมาะกับกระบวนการจับยึดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ประจุลบ รายละเอียดของกระบวนการทำก้อนแข็งตามวิธีต่างๆ ข้างต้น เพื่อที่สามารถเลือกวิธีการบำบัดได้อย่างเหมาะสมกับชนิดและลักษณะของเสียที่ต้องการบำบัด

2.9.3 กลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็ง

การทำความเข้าใจพื้นฐานของกลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็งเป็นสิ่งที่ควรทราบเนื่องจากเป็นการประเมินถึงความสามารถหรือประสิทธิภาพของการทำเสถียร โดยที่กลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็งนั้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.7

**ตารางที่ 2.7** รายละเอียดกลไกการจับยึดในการทำก้อนแข็ง (LaGrega และคณะ, 1994)

| กลไกการจับยึด | รายละเอียด |
|---|---|
| 1. แมคโครแอนแคปซูเลชั่น (Macro encapsulation) | เป็นวิธีทางกายภาพซึ่งเป็นลักษณะของรูภายในที่ไม่ต่อเนื่องจับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระน้อยลง |
| 2. ไมโครแอนแคปซูเลชั่น (Micro encapsulation) | เป็นวิธีทางกายภาพซึ่งของเสียจะถูกจับภายในโครงสร้างของผลึก โดยจะจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กเป็นส่วนมาก |
| 3. การดูดซับ (Absorption) | เป็นวิธีทางเคมีซึ่งใช้ในการปรับปรุงลักษณะของก้อนเพื่อให้สะดวกต่อการทำก้อน กระบวนการแรกของวิธีนี้คือการดูดซับของเหลวที่อยู่ในก้อนเสีย |
| 4. การดูดซึม (Adsorption) | เป็นวิธีการทางเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิว และยังเป็นวิธีการทำให้เกิดการจับตัวกันซึ่งอาจจะหมายรวมถึงพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาล์ว มักจะเกิดเมื่อวัสดุประเภทซีเมนต์เป็นวัสดุประสานของของเสียประเภทอนินทรีย์ |
| 5. การทำให้ตกผลึก (Precipitation) | เป็นวิธีการทางเคมีเพื่อทำให้เสถียรมากขึ้น โดยเป็นวิธีที่ใช้กับของเสียประเภทอนินทรีย์ สารที่เป็นตัวก่อให้เกิดผลึก ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ ซิลิเกต คาร์บอเนต และฟอสเฟต |
| 6.การทำให้ความเป็นพิษลดลง (Detoxification) | เป็นวิธีการทางเคมีที่เกิดขึ้นขณะเกิดกระบวนการทำเสถียร เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเพื่อให้เกิดสารรูปอื่นๆ ที่มีความเป็นพิษน้อยลง หรือไม่มีความเป็นพิษเลย |

2.9.4 วิธีการทำลายสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเฉพาะประเภท

วิธีการทำลายสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเฉพาะประเภทดังแสดงในตารางที่ 2.8

**ตารางที่ 2.8** วิธีการทำลายสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเฉพาะประเภท (กระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1, 2531)

| ประเภทสิ่งปฏิกูล | วิธีการทำลายฤทธิ์ |
|---|---|
| กากตะกอนที่มีสารปรอทปนเปื้อน | นำกากตะกอนมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ($Na_2S$) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ (HgS) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (Solidification) ด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม (additives) ผสมลงไปด้วย |
| กากจากการผลิตหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีสารปนเปื้อน | นำกากที่อาจต้องผ่านการบดให้มีขนาดเล็กลงก่อนเพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ทั่วถึงมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ($Na_2S$) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ (HgS) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (Solidification) ด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม (additives)ผสมลงไปด้วย |
| กากตะกอน หรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว แมงกานีส เป็นต้น | ใช้สารละลายด่าง เช่น ปูนขาว หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผสมกับกากตะกอนให้ทั่วกันจนสารโลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบของเกลือไฮดรอกไซด์ที่มีค่าพีเอช ของของผสมประมาณ 11 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ในกรณีที่เป็นกากตะกอนหรือฝุ่นที่ปนเปื้อนด้วย แคดเมียม (Cd) จะต้องทำให้เป็นก้อนต่อด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์ |
| กากตะกอนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มียาฆ่าแมลงยากำจัดศัตรูพืช หรือยากำจัดเชื้อราปนเปื้อน | เติมสารละลายด่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในปริมาณที่สามารถจะทำลายพิษด้วยตัวยาแต่ละชนิดได้หมด |

2.9.5 ตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัดของเสียโดยการทำก้อนแข็ง

Shin และ Sujiwattana (1998) ได้ศึกษาและกล่าวสรุปว่าตัวแปรทีมีผลต่อความสามารถในการถูกชะละลาย และการรับแรงอัดของตัวอย่างก้อนแข็ง ได้แก่ ปริมาณของเสียเริ่มต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร และระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเรื่องการนำของเสียประเภทซิลิกาและซิลิกาฟูมมาใช้ประโยชน์ในการทำคอนกรีตเพื่อ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง มีดังนี้

วิสันต์ หิรัญเขต และ อภินันท์ บัณฑิตนุกุล (2543) ศึกษาออกแบบปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต โดยแยกเป็นคอนกรีตที่ผสมสาร Superplasticizer Mighty RD-HP CPAC เพียงอย่างเดียว Superplasticizer Mighty RD-HP CPAC + Microsilica เข้าด้วยกัน ซึ่งผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ใส่ Superplasticizer Mighty RD-HP CPAC เพียงอย่างเดียว โดยใช้ปริมาณเท่า 1.2, 1.4, 1.6, 1.8% ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.37, 0.33, 0.30 โดยลดปริมาณน้ำ 6.5, 13.5, 23, 30% ตามลำดับ ได้ค่ากำลังอัดประลัยเฉลี่ยสูงสุดของรูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 895 กก./ตร.ซม. ส่วนคอนกรีตที่ผสม Superplasticizer Mighty RD-HP CPAC + Microsilica โดยปริมาณน้ำและใส่ Superplasticizer Mighty RD-HP CPAC เช่นเดียวกันส่วนปริมาณของ Microsilica ที่ผสมลงไปเท่ากับ 6 , 8, 10% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ได้ค่ากำลังอัดประลัยเฉลี่ยสูงสุดของรูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 1000 กก./ตร.ซม. พบว่า สารผสมเพิ่มและวัสดุเพิ่ม ผลของคอนกรีตที่ผสม Superplasticizer Mighty RD-HP CPAC + Microsilica จะมีค่ากำลังสูงกว่าผสม Superplasticizer Mighty RD-HP CPAC + Microsilica จะมีค่ากำลังอัดสูงกว่าผสม Superplasticizer Mighty RD-HP CPAC เพียงอย่างเดียว

ธีรราช ลีกีรติกุล และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2545) ศึกษาพัฒนาการนำเถ้าถ่านหินเพื่อใช้แทนซิลิกาฟูมควบแน่นในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง โดยนำเถ้าถ่านหินแม่เมาะผ่านการแยกด้วยเครื่อง Air Classifier ให้มีความละเอียดสูงได้เป็น เถ้าถ่านหินแยกละเอียด มีรูปร่างทรงกลม ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3.2 ไมโครเมตร จากนั้นนำเถ้าถ่านหินแยกละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับการใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นจากสองแหล่งผลิต แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตกำลังสูงในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมควบแน่นให้กำลังอัดสูงที่สุด ส่วน

คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดร้อยละ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ให้กำลังอัดสูงสุด การใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ถึง 35 สามารถใช้แทนซิลิกาฟูมควบแน่นร้อยละ 5 ถึง 15 ได้ เนื่องจากมีกำลังอัดใกล้เคียงกันเมื่อคอนกรีตมีอายุ 180 วัน นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินแยกละเอียดร้อยละ 15 ถึง 50 มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอีกเมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 180 วัน แสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินแยกละเอียดมีศักยภาพสูงที่จะนำไปใช้แทนที่ซิลิกาฟูมควบแน่นหรือทำคอนกรีตที่รับกำลังอัดสูง

Wan และคณะ (2007) ศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ทำการเติมนาโนซิลิกาทดแทนซีเมนต์บางส่วน ในอัตราส่วนของซิลิกา 3%, 6%, 10% และ 11% โดยนาโนซิลิกามีขนาดเท่ากับ 40 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 60 ตารางเมตรต่อกรัม ใช้โพลีคาร์บอกซีเลตเป็นซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ ขึ้นรูปเป็นรูปลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร บ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นเวลา 7 วันและ 28 วัน และนำไปทดสอบความแข็งแรง ทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเปรียบเทียบกับการเติมซิลิกาฟูม ผลการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วันและ 28 วัน ซีเมนต์เพสต์ที่ทำการเติมอนุภาคระดับนาโนเมตร มีความแข็งแรงสูงกว่าที่เติมซิลิกาฟูม เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่าซิลิกาฟูม อนุภาคระดับนาโนเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วและเกิดผลิตผลไปเติมช่องว่างระหว่างมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้น ยืนยันจากโครงสร้างระดับจุลภาค โดยพบว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง

Kadri และคณะ (2009) ศึกษาคุณสมบัติของซิลิกาฟูมในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีต โดยทำการเติมซิลิกาฟูมทดแทนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ในอัตราส่วนของซิลิกาฟูม 10-30 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนน้ำต่อปอร์ตแลนด์ซีเมนต์รวมกับซิลิกาฟูม เป็น 0.25 และ 0.4 โดยบ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นเวลา 10 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าซิลิกาฟูมสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้รวดเร็วกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยสามารถทนต่อกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ไม่มีการเติมซิลิกาฟูม

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวินัย หอมศรีประเสริฐ (2552) ศึกษาอิทธิพลของเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมในคอนกรีตซีเมนต์ภายใต้การกระทำของซัลเฟต โดยคุณสมบัติที่ศึกษาประกอบด้วย คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูม การสูญเสียกำลังอัด การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต สารละลายซัลเฟตที่ใช้ได้แก่

สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามมาตราฐาน ASTM C 1012 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงของคอนกรีตที่ศึกษาเท่ากับ 0.25, 0.35 และ 0.45 และอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟูมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าการใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.25 ช่วยให้คอนกรีตมีความทนทานต่อซัลเฟตทั้งในด้านการสูญเสียกำลังอัด การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนัก นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบในด้านเศรษฐศาสตร์แล้วเถ้าแกลบดำบดละเอียดมีราคาต่ำกว่าซิลิกาฟูมมาก และที่สำคัญเถ้าแกลบดำบดละเอียดถือว่าเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตทนทานซัลเฟต

Hamid และคณะ (2010) ศึกษาสมบัติคอนกรีตที่เติมซิลิกาฟูม เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีต โดยเติมซิลิกาฟูมในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ แทนที่คอนกรีต แปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อคอนกรีตรวมกับซิลิกาฟูม เป็น 0.22 - 0.40 และนำส่วนผสมที่ได้ไปทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแต่ละชนิด ด้วยวิธี ultrasonic relative amplitude ratio (RAR) และ ultrasonic pulse velocity (UPV)

ธีรวัฒน์ สินศิริ (2553) ศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการนำเถ้าชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมซึ่งพบว่า คุณสมบัติของเถ้าชีวมวลนั้นมีคุณสมบัติในการทดแทนวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ พบว่าการนำวัสดุเถ้าชีวมวลคือ เถ้าแกลบ ซึ่งมีปริมาณซิลิกาค่อนข้างสูงมาสังเคราะห์เป็นนาโนซิลิกา เพื่อทดแทนการนำเข้าซิลิกาฟูม นอกจากนี้ยังเป็นการส่งเสริมการรักษาสภาพแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย ซึ่งจะนำไปสู่การใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างเหมาะสมและเป็นทางเลือกใหม่ต่อไปในอนาคตขึ้นในการประยุกต์ใช้ต่อไป

# บทที่ 3

# ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้วิจัย เก็บตัวอย่างของเสียประเภทซิลิกาจากโรงงานรีไซเคิลกากของเสียที่ใช้ในงานวิจัยและซิลิกาฟูมที่มีในท้องตลาด

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยทั้ง 2 ชนิด (ของเสียประเภทซิลิกาและซิลิกาฟูม)

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของมอร์ต้าร์ในการผลิตคอนกรีตโดยใช้ของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูม โดยแปรเปลี่ยนสัดส่วนของวัสดุที่ใช้ผสมกับซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และ ระยะเวลาในการบ่ม

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบคุณภาพของมอร์ต้าร์ ได้แก่ ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด และทดสอบการชะละลาย

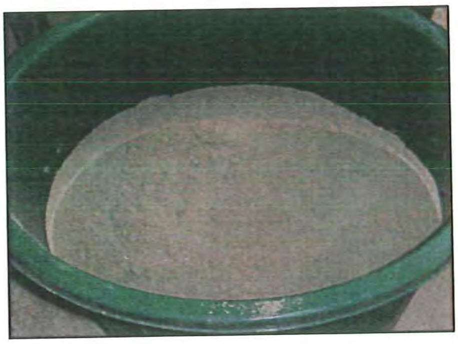
ขั้นตอนที่ 5 ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมมาใช้ในกระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

## 3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัตถุดิบ

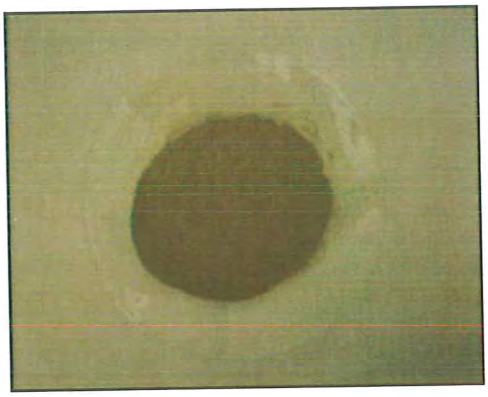
1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ตราช้าง (Ordinary Portland Cement, ตามมาตรฐาน มอก. เล่ม1 (2532) (ภาพที่ 3.1)
2. ทรายแม่น้ำที่ได้มาตรฐาน 1 (ภาพที่ 3.2)
3. ของเสียประเภทซิลิกาที่ใช้ในการวิจัย (ภาพที่ 3.3) เป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการดีโพลิเมอร์ไรเซชั่นในการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วจากโรงงานรีไซเคิลกากของเสียเพื่อนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่
4. ซิลิกาฟูมที่ใช้ในการวิจัย เป็นวัตถุดิบของบริษัท ซิก้า จำกัด (นำเข้าจากต่างประเทศ) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร องค์ประกอบทาง

เคมีของซิลิกาฟูมมีซิลิคอนออกไซด์มากกว่าร้อยละ 90 มีพื้นที่ผิวสูงและมีโครงสร้างไม่เป็นผลึกจึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมาก



**ภาพที่** 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1

**ภาพที่** 3.2 ทรายละเอียด



**ภาพที่** 3.3 ของเสียประเภทซิลิกา

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.2.1 การหล่อแบบและทดสอบสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง

1. เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 1 ตำแหน่ง
2. กระบอกตวง: ขนาด 500 มิลลิลิตร อ่านค่าได้ละเอียด 10 มิลลิลิตร
3. เครื่องผสม (Mixer) มอร์ต้าร์ และคอนกรีต
4. นาฬิกาจับเวลา
5. ตู้อบไฟฟ้า
6. แท่งกระทุ้ง (Tamper): ขนาดหน้าตัด 0.5x0.5 ตารางนิ้ว ยาว 5-6 นิ้วปลายตัดเรียบและหน้าตัดตั้งฉากกับแกนมือจับทำจากวัสดุไม่ดูดซึมน้ำ
7. เกรียง: ทำด้วยเหล็กแบนขอบสันเกรียงเป็นเส้นตรงยาว 100-150 มิลลิเมตร
8. แบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์:ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ภาพที่ 3.4) และมอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบ (ภาพที่ 3.5)
9. เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด: น้ำหนักกดสูงสุด 150 ตัน (ภาพที่ 3.6)
10. กรวยเหล็กมาตรฐานสำหรับทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ: เส้นผ่านศูนย์กลางภายในด้านบน 40 $\pm$ 3 มิลลิเมตร ด้านล่าง 90 $\pm$ 3 มิลลิเมตร สูง 75 $\pm$ 3 มิลลิเมตร หนาอย่างน้อย 0.8 มิลลิเมตร
11. เครื่องเขย่าคัดขนาด (Sieve Shaker) ซึ่งประกอบด้วยตะแกรงขนาดต่างๆ ขนาดเบอร์ 3/8 นิ้ว ขนาดเบอร์ 4 เบอร์ 8 ถาดรอง (pan)

## 3.2 ตัวแปรที่ใช้ทดลอง

3.2.1 ตัวแปรอิสระ

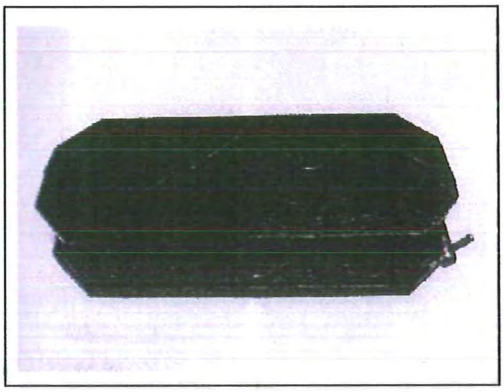
- อัตราส่วนผสมของเสียประเภทซิลิกาและซิลิกาฟูมต่อปริมาตรรวม
- อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำ ต่อ วัสดุประสาน
- ระยะเวลาการบ่มคอนกรีต

3.2.2 ตัวแปรตาม

- ค่ากำลังรับแรงอัด

3.2.3 ตัวแปรควบคุม

- ชนิดของวัสดุผสม (ของเสียประเภทซิลิกาและซิลิกาฟูม)
- อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.5



**ภาพที่** 3.4 แบบหล่อก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 x 5x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

**ภาพที่** 3.5 การผสมมอร์ต้าร์เพื่อนำไปทดสอบ

**ภาพที่** 3.6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

**3.3 การดำเนินการวิจัย**

3.3.1 การทดลองตอนที่ 1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย

3.3.1.1 การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบได้แก่ ของเสียประเภทซิลิกาและซิลิกาฟูม

ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยทั้ง 2 ชนิด (ของเสียประเภทซิลิกาและซิลิกาฟูม) นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ความหนาแน่น การกระจายขนาดคละ และทดสอบการชะละลาย วัสดุที่นำมาใช้ทดลองเตรียมโดยร่อนผ่านตะแกรงเพื่อนำมาผสมซีเมนต์

3.3.1.2 การออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมของมอร์ต้าร์โดยเปรียบเทียบการใช้วัสดุประสาน 2 ชนิด (ของเสียประเภทซิลิกาและซิลิกาฟูม) เปรียบเทียบกับชุดควบคุม ทำการออกแบบส่วนผสมโดยแปรเปลี่ยนปริมาณซิลิกาเป็นร้อยละ 5 10, 15 และ 20 โดยมวลของซีเมนต์ และโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.40 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28 และ 56 วัน

3.3.1.3 การเตรียมวัสดุผสม

ล้างทรายด้วยน้ำสะอาด แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 และทราย ด้วยอัตราส่วนมวลรวมละเอียด1 ต่อ 1.25

3.3.2 การทดลองตอนที่ 2 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยทั้ง 2 ชนิด (ของเสียประเภทซิลิกาและซิลิกาฟูม)

3.3.2.1 ทดสอบการชะละลายโลหะหนัก

ศึกษาการชะละลายตามมาตรฐาน U.S.EPA SW 846 Method 1311 (ภาคผนวก ก.1) ในกรณีที่ต้องการเทียบกับมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาแต่ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (ภาคผนวก ก.2)

3.3.2.2 วิเคราะห์การกระจายขนาดคละของวัสดุ

วิเคราะห์การกระจายขนาดคละของ ของเสียประเภทซิลิกา และซิลิกาฟูม ด้วยวิธี Sieve Analysis ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C136 – 93 ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตและทดสอบวัสดุของภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเรียงจากตะแกรงช่องใหญ่อยู่บนไปช่องเล็กสุดอยู่ล่างตามขนาดโดยใช้เครื่องเขย่าคัดขนาด (Sieve analysis) ที่มีขนาดต่างๆ ดังนี้ ขนาดเบอร์ 3/8 นิ้ว ขนาดเบอร์ 4 (4.76 มิลลิเมตร) เบอร์ 8 (2.36 มิลลิเมตร) ดังแสดงในภาพที่ 3.7

**ภาพที่** 3.7 เครื่องเขย่าคัดขนาด

3.3.2.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและทางจุลภาคของวัสดุ

ทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM C150-07, 2008 (ภาคผนวก ก.3) ความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทรายตามมาตรฐาน ASTM C128-07a, 2008 (ภาคผนวก ก.4) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ (ของเสียประเภทซิลิกาและซิลิกาฟูม) ด้วยวิธีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซ็นซ์ (XRF) และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-6400PVM )

3.3.3 การทดลองตอนที่ 3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของมอร์ต้าร์ในการผลิตคอนกรีตโดยใช้ของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูม

3.3.3.1 การทดลองที่ 3.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยแปรเปลี่ยนสัดส่วนของวัสดุที่ใช้ผสมกับซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และ ระยะเวลาในการบ่ม โดยหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ทำการทดลองส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง) แทนค่าของเสียประเภทซิลิกาผสมกับซีเมนต์ที่ร้อยละ 0, 5, 10 , 15 และ 20 โดยมวลของซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 แปรระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่างที่ 7, 14, 28 และ 56 วัน วัดค่าหน่วยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C29, (1996) โดยการชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง หารด้วยปริมาตรของก้อนตัวอย่างทดสอบ และพิจารณากำลังรับแรงอัด (ภาคผนวก ก.5) เป็นเกณฑ์ในการตัดสิน โดยมีการทดลองที่อัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 สำหรับของเสียซิลิกาและตารางที่ 3.2 สำหรับซิลิกาฟูม

**ตารางที่** 3.1 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในสภาวะต่างๆ ของของเสียซิลิกา

| **ร้อยละของเสียประเภทซิลิกาผสมกับซีเมนต์โดยมวล** | **กำลังรับแรงอัด (กก./ซม$^2$) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **7 วัน** | **14 วัน** | **28 วัน** | **56วัน** |
| 0 | | | | |
| 5 | | | | |
| 10 | | | | |
| 15 | | | | |
| 20 | | | | |

หมายเหตุ : ทำการทดลองส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง

**ตารางที่** 3.2 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในสภาวะต่างๆ ของซิลิกาฟูม

| **ร้อยละของซิลิกาฟูมผสมกับซีเมนต์โดยมวล** | **กำลังรับแรงอัด (กก./ซม$^2$) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **7 วัน** | **14 วัน** | **28 วัน** | **56 วัน** |
| 0 | | | | |
| 5 | | | | |
| 10 | | | | |
| 15 | | | | |
| 20 | | | | |

หมายเหตุ : ทำการทดลองส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง

3.4.4 การทดลองที่ 4 นำมอร์ต้าร์ที่เตรียมด้วยสัดส่วนที่เหมาะสมมาทำการทดสอบการชะละลายตามวิธี WET ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (ภาคผนวก ก.2)

วิธี Waste Extraction Test (WET) เป็นการตรวจสอบการชะละลายของโลหะหนักหรือสารอินทรีย์อันตรายที่เจือปนอยู่ในของเสียประเภทซิลิกา (Silica waste) ซึ่งเป็นการจัดจำแนกว่าสารตัวอย่างว่าเป็นของเสียอันตรายหรือไม่ เพื่อที่จะได้ทำการจัดเก็บหรือฝังกลบอย่างถูกต้อง

การทดสอบวิธี WET จะทำก็ต่อเมื่อค่า Total Concentration < Total Threshold Limit Concentration (TTLC) แต่ ≥ Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) หรือเมื่อจะฝังกลบเท่านั้น ( STLC ≥ Total Concentration < TTLC )

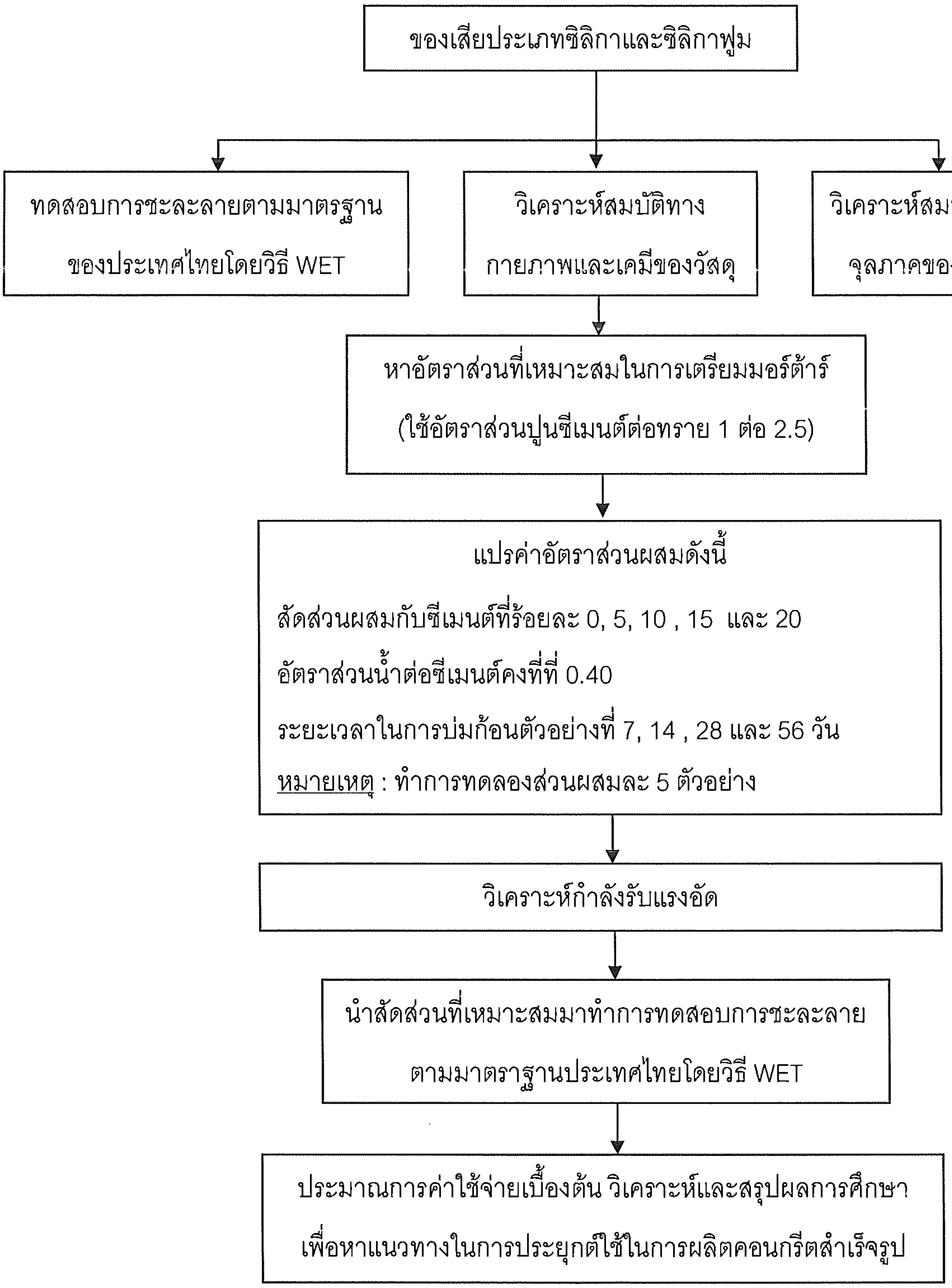
หมายเหตุ: - ค่า Total Concentration คือค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปนมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (mg/kg; wet weight) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC)

- สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดแล้ว มีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)

3.4.5 การทดลองที่ 5 ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมมาใช้ในกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป และเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างประเภทเดียวกัน ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด ตลอดจนคำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูม ในหน่วยราคาบาทต่อตันของเสีย และนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้าง โดยใช้ราคาวัสดุอ้างอิงจากราคา ณ ปัจจุบัน จากสำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า www.price.moc.go.th [สิงหาคม, 2553] อาทิเช่น ทรายละเอียดราคาลูกบาศก์เมตรละ 362.50 บาท ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ราคาถุงละ 115.30 บาท สำหรับประเทศไทยไม่สามารถผลิตซิลิกาฟูมได้ จำเป็นต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศทำให้มีราคาแพงคือตั้งแต่ 15 ถึง 80 บาทต่อกิโลกรัม หรือสูงกว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 6 ถึง 12 เท่า

### 3.4 ผังสรุปงานวิจัย

ภาพรวมของการวิจัยสามารถสรุปดังภาพที่ 3.8




**ภาพที่** 3.8 ผังสรุปงานวิจัย

# บทที่ 4

# ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ของเสียประเภทซิลิกาซึ่งได้จากกระบวนการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนซึ่งเป็นสารประกอบซิลิกอนจากโรงงานรีไซเคิลกากของเสีย เพื่อใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ เปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ โดยศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด ด้วยวิธีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซ็นซ์ (XRF) วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอพซอพชั่นสเปคโตรมิเตอร์ (AAS) ทำการแปรเปลี่ยนสัดส่วนของเสียประเภทซิลิกาและซิลิกาฟูมในการผสมเพื่อเตรียมมอร์ต้าร์ (ขนาด 5 × 5 × 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร) เป็นร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักซีเมนต์ แปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.40 และระยะเวลาบ่มที่ 7, 14, 28 และ 56 วัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ ผลการทดลองแสดงได้ดังต่อไปนี้

## 4.1 การเตรียมวัสดุและวัตถุดิบ

นำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยมีความถ่วงจำเพาะของวัสดุเท่ากับ 3.15 (บมจ.ปูนซีเมนต์ไทย) มาผสมกับทรายแม่น้ำ เพื่อนำมาหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ ขนาด 5 × 5 × 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใช้เป็นชุดควบคุม ส่วนซิลิกาฟูม (บมจ.ซิกก้า (ประเทศไทย))ถูกนำมาใช้เติมในซีเมนต์ในอัตราส่วนดังนี้คือ ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซึ่งนำมาหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ ขนาด 5 × 5 × 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับของเสียประเภทซิลิกาจากกระบวนการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนนำมาเติมในซีเมนต์ในอัตราส่วนดังกล่าวเช่นเดียวกัน หลังจากนั้นจึงนำมอร์ต้าร์ทั้งหมดมาบ่มที่อายุ 7 14 28 และ 56 วัน จากนั้นนำ มอร์ต้าร์มาทดสอบกำลังรับแรงอัด **แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.5**

## 4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของของเสียซิลิกาและซิลิกาฟูม

จากผลการทดลองเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของของเสียซิลิกาและซิลิกาฟูมวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาพบว่าลักษณะสมบัติทางเคมีของเสียประเภทซิลิกา มีซิลิกอนไดออกไซด์เฉลี่ยร้อยละ 74 ส่วนซิลิกาฟูมมีซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 89 ซึ่งของเสียประเภทซิลิกามีลักษณะสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานมีองค์ประกอบซิลิกอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งมีลักษณะเป็นวัสดุปอซโซลาน (ธีรวัฒน์

สินศิริ, 2553) และเปรียบเทียบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยวิธีเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (XRD) พบว่ามีลักษณะแบบอสัณฐาน (Amorphous) ไม่เป็นผลึก ดังภาคผนวก ค ภาพที่ ผ4

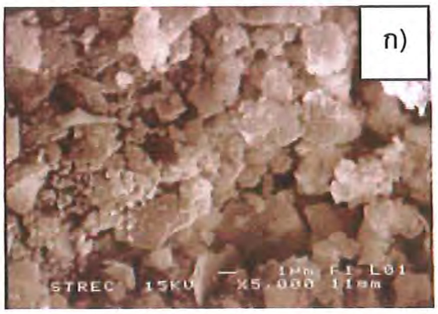
**ตารางที่** 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซิลิกาเทียบกับปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูมและวัสดุชนิดอื่น

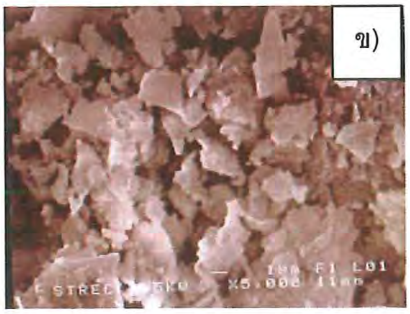
| ออกไซด์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ปูนซีเมนต์ประเภท 1* | ซิลิกาฟูม** | ของเสียซิลิกา** | เถ้าถ่านหินแม่เมาะ* | เถ้าแกลบ* |
| $SiO_2$ | 20 | 88.99 | 73.99 | 48 | 90 |
| $Al_2O_3$ | 5 | 0.30 | <0.01 | 26 | 0.5 |
| $Fe_2O_3$ | 3 | 0.37 | 0.08 | 10 | 2.0 |
| CaO | 60 | 0.01 | <0.01 | 5 | 0.5 |
| MgO | 1.1 | 0.35 | <0.01 | 2 | 0.2 |
| $SO_3$ | 2.4 | 0.43 | <0.01 | 0.7 | 1.5 |
| ออกไซด์อื่นๆ | 1.5 | 9.55 | 25.88 | 1.3 | - |
| LOI ไม่เกิน | 2 | 3 | 6 | 3 | 4.7 |

ที่มา : * ธีรราช ลีกีรติกุล และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2545 **องค์ประกอบทางเคมีวิเคราะห์ด้วย XRF

นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.1 ได้แก่ ของเสียซิลิกา ซิลิกาฟูม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และลักษณะสมบัติทางจุลภาคมีความใกล้เคียงกันของซิลิกาฟูมและของเสียซิลิกาซึ่งหล่อเป็นมอร์ต้าร์ดังแสดงในภาพที่ 4.2 จึงสามารถนำมาใช้แทนซิลิกาฟูมได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นการลดการสั่งซื้อซิลิกาฟูมจากต่างประเทศได้และจากการศึกษาการคละขนาดของกากของเสียซิลิกาส่วนมากมีขนาดเท่ากับ 288.133 ไมโครเมตร โดยพบว่าต้องนำไปทำการบดเพื่อให้มีความละเอียดมากพอสำหรับนำไปใช้ในงานวิจัยได้ต่อไป

**ภาพที่** 4.1 ภาพวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ก) ของเสียซิลิกา ข) ซิลิกาฟูม ค) ซีเมนต์




**ภาพที่** 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราดขยาย 5000 เท่า (ก) ซิลิกาฟูม (ข) ของเสียซิลิกา

ลักษณะสมบัติทางกายภาพที่สำคัญซึ่งจะเป็นตัวกำหนดวัสดุปอซโซลานของของเสียซิลิกาต้องทำการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดละเอียดจนมีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิดของตะแกรง 45 ไมโครเมตร) ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ธีรราช ลีกีรติกุล และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2545) ซึ่งเป็นอนุภาคของซิลิกาขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึก (Wan และคณะ, 2007) แสดงลักษณะทางกายภาพทั่วไปของของเสียซิลิกาเทียบกับปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูมดังแสดงในตารางที่ 4.2

**ตารางที่** 4.2 ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และของเสียซิลิกา

| ลักษณะสมบัติทางกายภาพ | รหัสของชนิดและประเภทของกากอุตสาหกรรม*** | | |
|---|---|---|---|
| | ปูนซีเมนต์ ประเภท 1* | ซิลิกาฟูม* | ของเสียซิลิกา** |
| ความละเอียด ( ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ) | 3,400 | 150,000 | 140,000 |
| ความหนาแน่น ( กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ) | 1,400 | 240 | 230 |
| ความถ่วงจำเพาะ ( กรัมต่อลูกบาศ์กเซนติเมตร ) | 3.15 | 2.2 | 2.1 |
| ความเป็นกรด-ด่าง | 7.0-8.0 | 3.5-5.0 | /2.2-3.5 |
| สี | เทา | เทาดำ | เทาดำ |

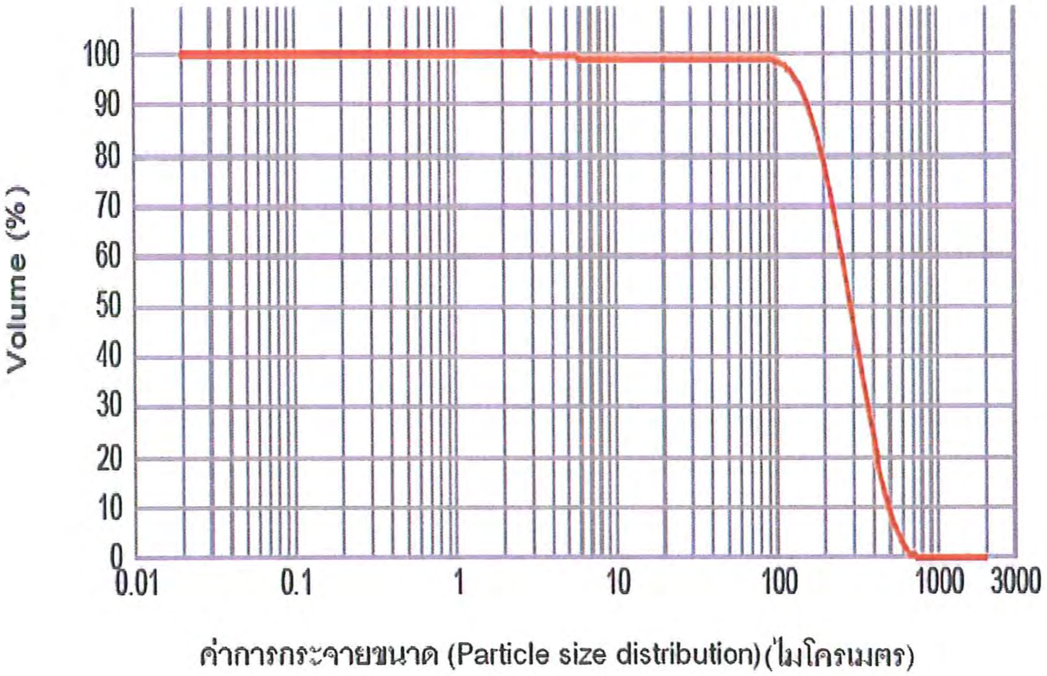
ที่มา : * ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2539 **ลักษณะสมบัติทางกายภาพวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

*** ของเสียประเภทซิลิกา 19 02 06 ( กรมโรงงานอุตสาหกรรม )

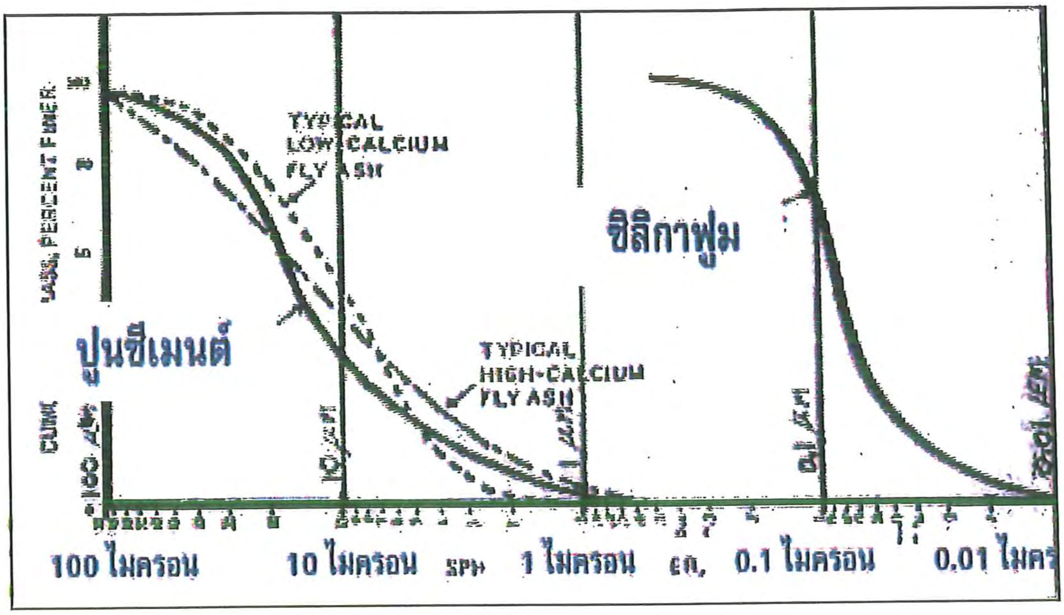
การกระจายขนาดคละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซิลิกาฟูม และของเสียซิลิกา มีขนาดอนุภาคประมาณ 10, 0.1 และ 288 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งขนาดของเสียซิลิกาเป็นขนาดที่ได้ก่อนทำการศึกษาวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.3 ถึง 4.4 โดยขนาดดังกล่าวไม่มีความเหมาะสมในการนำมาหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ ควรนำไปบดให้ละเอียดโดยมีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมเพื่อนำไปหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ต่อไป ผลศึกษาขนาดของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซิลิกาฟูม โดยวิธีการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด พบว่าขนาดของซิลิกาฟูมมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประมาณ 100 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.5

**ตารางที่** 4.3 การกระจายขนาดคละของปูนซีเมนต์ ซิลิกาฟูม และของเสียซิลิกา

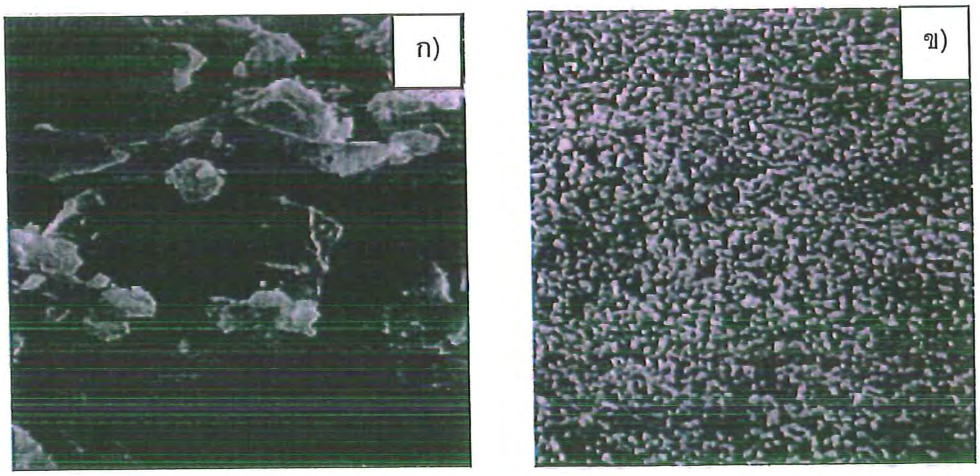
| ขนาดคละ | ปูนซีเมนต์ ประเภท I (ไมโครเมตร) | ซิลิกาฟูม (ไมโครเมตร) | ของเสียซิลิกา (ไมโครเมตร) |
|---|---|---|---|
| D(0.1) | > 10 | > 0.1 | 158.324 |
| D(0.5) | 10 | 0.1 | 288.133 |
| D(0.9) | < 10 | < 0.1 | 498.317 |




**ภาพที่ 4.3** การกระจายขนาดของของเสียซิลิกา




ภาพที่ 4.4 การกระจายขนาดของซิลิกาฟูมและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1




ภาพที่ 4.5 แสดงขนาดของอนุภาค (ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ข) ซิลิกาฟูม

### 4.3 ผลวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักของของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูม และของของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมเมื่อหล่อเป็นมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน

จากการทดสอบการชะละลายโลหะหนักตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 การศึกษาพบว่าของเสียประเภทซิลิกามีปริมาณโลหะหนัก ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และโครเมียม เท่ากับ 0.015, 0.203, <0.001 และ 0.698 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนซิลิกาฟูม มีปริมาณโลหะหนัก ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และโครเมียม เท่ากับ 0.122, 0.310, 0.149, และ 0.093 มิลลิกรัมต่อลิตร และของเสียประเภทซิลิกาเมื่อหล่อเป็นมอร์ต้าร์มีปริมาณโลหะหนัก ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และโครเมียม เท่ากับ 0.088, 0.465, 0.026 และ 0.192 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนซิลิกาฟูม มีปริมาณโลหะหนัก ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และโครเมียม เท่ากับ 0.084, 0.361, 0.027 และ 0.160 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบว่าปริมาณโลหะหนักทุกชนิดมีค่าไม่เกินมาตรฐานจึงสรุปได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการนำของเสียซิลิกามาใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตเพื่อใช้ในการก่อสร้าง การวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ตราช้างซึ่งเป็น AFR ใช้กากอุตสาหกรรมผสมจึงทำให้มีโลหะหนักปนเปื้อนออกมาในน้ำชะละลายเมื่อนำมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วันมาทดสอบ WET

**ตารางที่** 4.4 การชะละลายของโลหะหนักของวัตถุดิบและหลังหล่อเป็นมอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วันด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

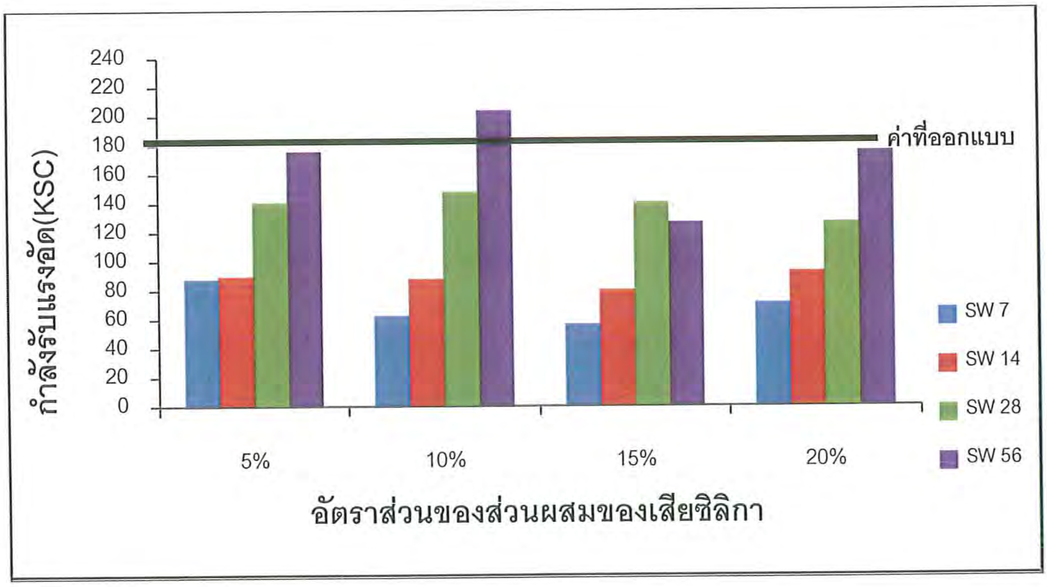
| ประเภท | โลหะหนัก | ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก(mg/l) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ทองแดง (Cu) | สังกะสี (Zn) | ตะกั่ว (Pb) | โครเมียม (Cr) |
| วัตถุดิบ | ของเสียซิลิกา | 0.015 | 0.203 | <0.001 | 0.698 |
| | ซิลิกาฟูม | 0.122 | 0.310 | 0.149 | 0.093 |
| มอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน | ของเสียซิลิกา | 0.088 | 0.465 | 0.026 | 0.192 |
| | ซิลิกาฟูม | 0.084 | 0.361 | 0.027 | 0.160 |
| กำหนดค่า Threshold Limit Concentration (STLC) (mg/l) | | 25 | 250 | 5.0 | 5.0 |

### 4.4 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ตามอัตราส่วนต่าง ๆ

ทำการเตรียมก้อนมอร์ต้าร์ตามอัตราส่วนผสมวัตถุดิบซึ่งผ่านการคัดขนาดมาเป็นส่วนผสมซีเมนต์ที่เหมาะสม (วินิต ช่อวิเชียร, 2544) โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 และใช้ของเสียซิลิกา และ ซิลิกาฟูม ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักซีเมนต์ แล้วนำมาทดสอบ

ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน ในภาพที่ 4.6 และตารางที่ 4.5 พบว่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมของของเสียซิลิกาเมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ใช้ในการออกแบบของมอร์ต้าร์ควบคุมในงานวิจัยนี้ (180 ksc) ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมคือร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 239.62 ksc

ในภาพที่ 4.7 และตารางที่ 4.6 พบว่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมของซิลิกาฟูมเมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน พบว่าทุกอัตราส่วนมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมคือร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 262.70 ksc และ ในภาพที่ 4.8 และตารางที่ 4.7 พบว่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน พบว่าทุกอัตราส่วนมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมคือร้อยละ 10 ที่ระยะเวลาบ่ม 90 วัน โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 227.18 ksc

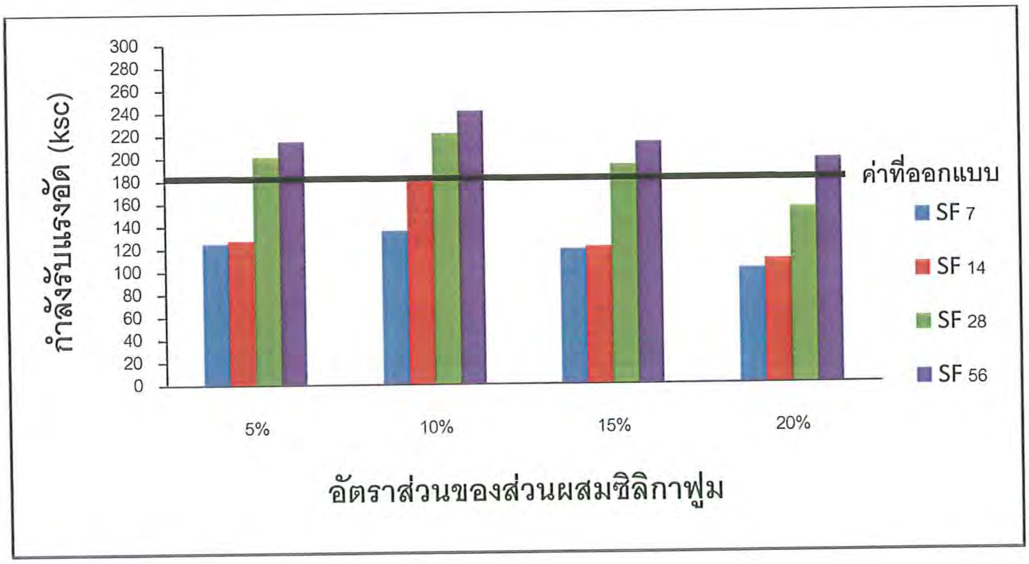



**ภาพที่** 4.6 อัตราส่วนผสมของของเสียซิลิกาเมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน

**ตารางที่ 4.5** ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมของของเสียซิลิกาเมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน

| ของเสีย ซิลิกา | 7 วัน (ksc) | | 14 วัน (ksc) | | 28 วัน (ksc) | | 56 วัน (ksc) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ค่าเฉลี่ย | ±SD | ค่าเฉลี่ย | ± SD | ค่าเฉลี่ย | ± SD | ค่าเฉลี่ย | ±SD |
| ร้อยละ 5 | 87.78 | ± 3.39 | 89.42 | ± 6.24 | 140.57 | ±16.09 | 175.72 | ±20.13 |
| ร้อยละ 10 | 62.58 | ±5.79 | 87.71 | ±6.21 | 147.60 | ±8.25 | 203.68 | ± 44.38 |
| ร้อยละ 15 | 56.32 | ±5.27 | 80.06 | ±9.85 | 140.40 | ±30.03 | 175.50 | ±37.54 |
| ร้อยละ 20 | 70.96 | ±15.50 | 92.62 | ±21.21 | 126.29 | ±20 | 175.54 | ±27.78 |

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 5 (มอร์ต้าร์ควบคุมออกแบบให้กำลังรับแรงอัด 180 ksc)

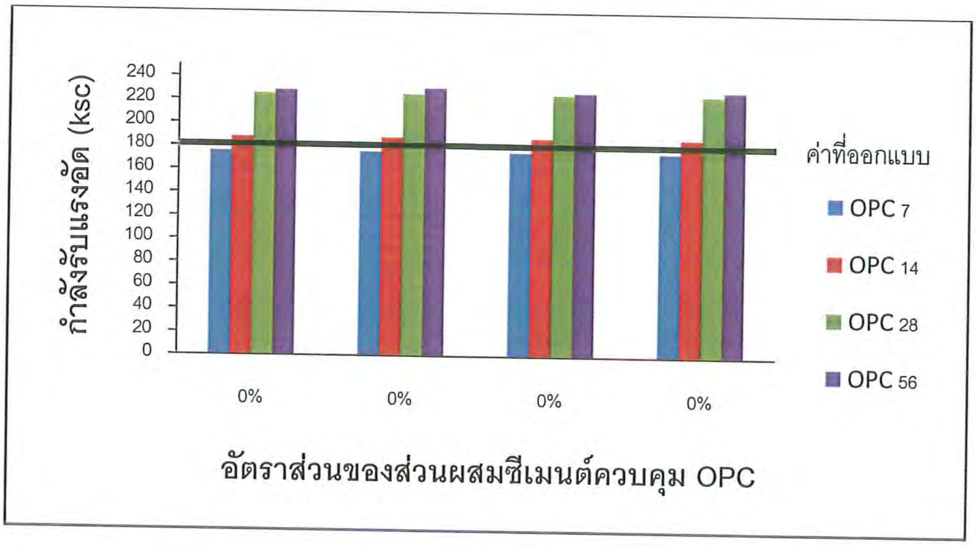



**ภาพที่ 4.7** อัตราส่วนผสมของซิลิกาฟูมเมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน

**ตารางที่ 4.6** ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมของซิลิกาฟูมเมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน

| ซิลิกาฟูม | 7 วัน (ksc) | | 14 วัน (ksc) | | 28 วัน (ksc) | | 56 วัน (ksc) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ค่าเฉลี่ย | ±SD | ค่าเฉลี่ย | ± SD | ค่าเฉลี่ย | ± SD | ค่าเฉลี่ย | ±SD |
| ร้อยละ 5 | 125.11 | ±18.22 | 127.44 | ±27.16 | 201.04 | ±16.72 | 215.12 | ±17.89 |
| ร้อยละ 10 | 135.72 | ±11.02 | 178.98 | ±20.25 | 221.25 | ±15.77 | 241.00 | ±15.58 |
| ร้อยละ 15 | 118.61 | ±8.29 | 121.28 | ±19.97 | 193.22 | ±10.22 | 212.55 | ±11.25 |
| ร้อยละ 20 | 101.10 | ± 30.32 | 108.68 | ±12.19 | 154.59 | ±25.53 | 197.98 | ±39.78 |

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 5 (มอร์ต้าร์ควบคุมออกแบบให้กำลังรับแรงอัด 180 ksc)




**ภาพที่ 4.8** อัตราส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน

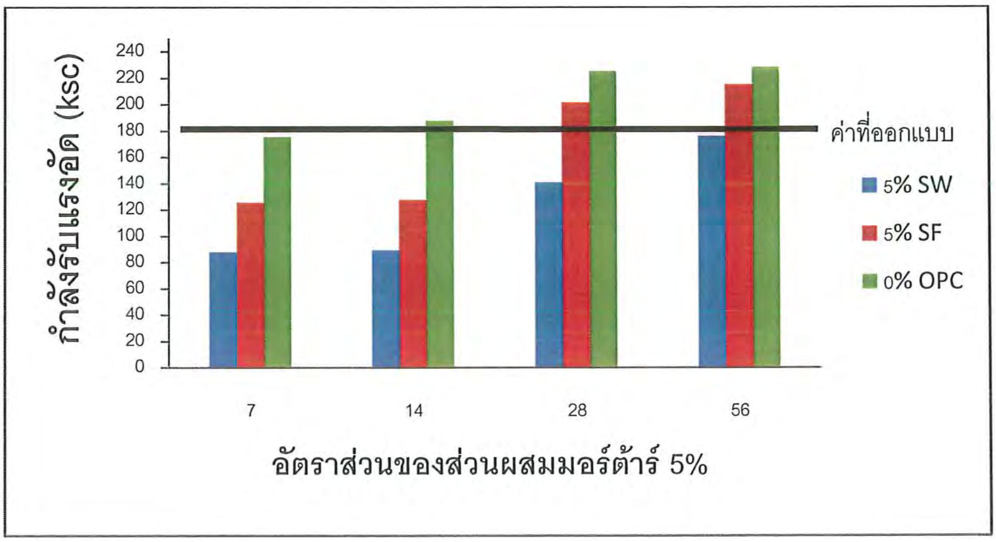
**ตารางที่ 4.7** ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมของของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน

| ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 | 7 วัน (ksc) | | 14 วัน (ksc) | | 28 วัน (ksc) | | 56 วัน (ksc) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ค่าเฉลี่ย | ±SD | ค่าเฉลี่ย | ± SD | ค่าเฉลี่ย | ± SD | ค่าเฉลี่ย | ±SD |
| ชุดควบคุมร้อยละ5 | 175.35 | ± 6.35 | 187.49 | ±13.38 | 225.41 | ±19.75 | 227.61 | ±20.04 |
| ชุดควบคุมร้อยละ10 | 175.16 | ±13.58 | 187.22 | ±11.33 | 225.27 | ±17.98 | 229.78 | ±18. 34 |
| ชุดควบคุมร้อยละ15 | 176.32 | ± 7.38 | 187.59 | ± 13.56 | 219.35 | ± 17.83 | 226.75 | ±19.87 |
| ชุดควบคุมร้อยละ20 | 173.67 | ± 6.33 | 187.49 | ± 13.38 | 225.41 | ± 19.75 | 228.79 | ± 20.05 |

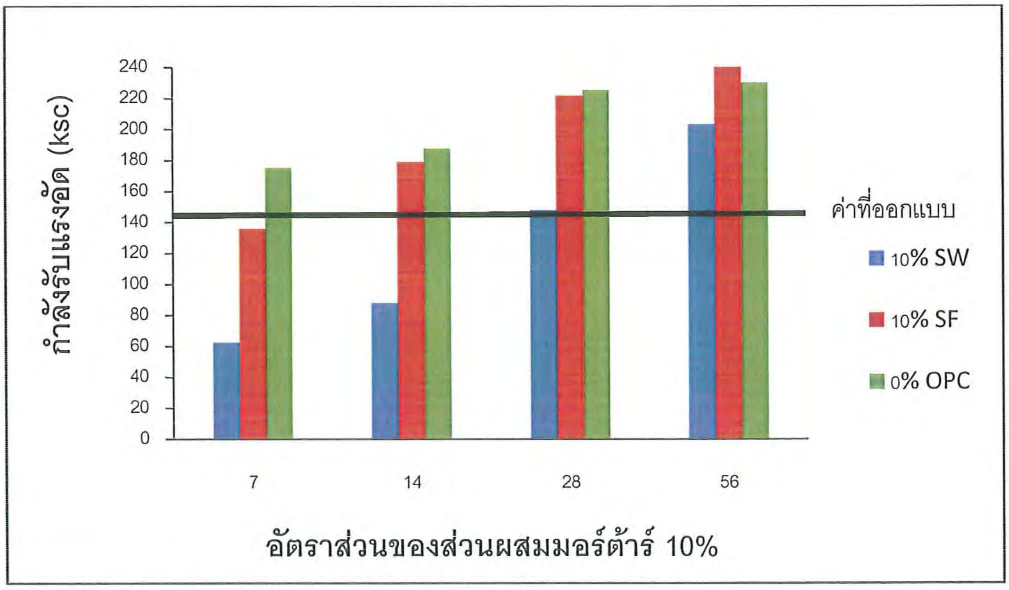
หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 5 (มอร์ต้าร์ควบคุมออกแบบให้กำลังรับแรงอัด 180 ksc)

เมื่อพิจารณาในภาพที่ 4.9 ถึง 4.12 และตารางที่ 4.8 พบว่ากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ระยะเวลาบ่มที่ 7, 14, 28 และ 56 วัน พบว่าที่อัตราส่วนร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด ในระยะเวลาบ่ม 56 วัน

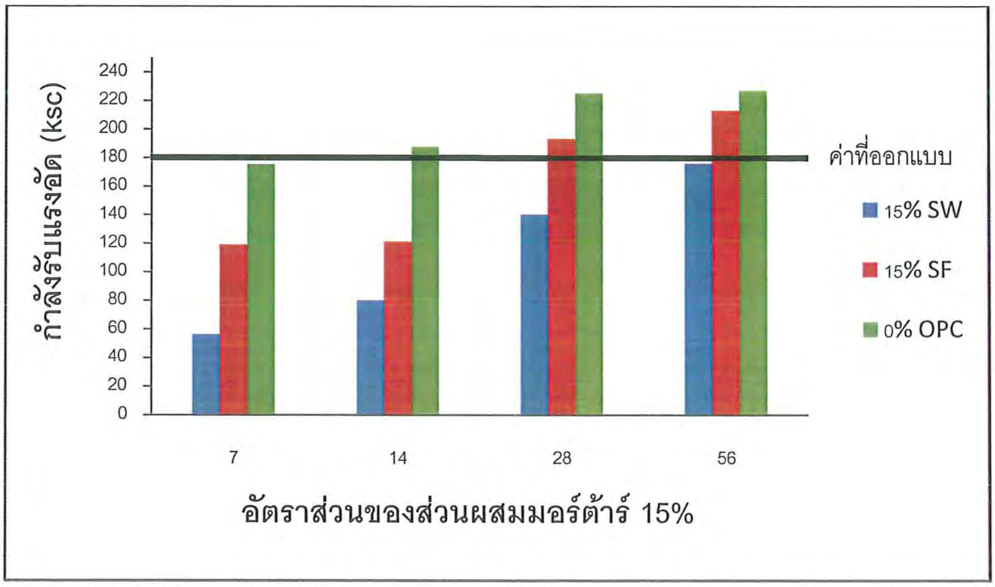
เมื่อนำอัตราส่วนที่เหมาะสมคือร้อยละ 10 มาทดสอบกำลังรบแรงอัดโดยการหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ซึ่งเพิ่มตัวอย่างเป็น 10 ตัวอย่าง แล้วนำไปบ่มที่ระยะเวลา 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน พบว่าของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 239.62, 262.70 และ 227.18 ksc ตามลำดับ บ่มที่ระยะเวลา 90 วัน มากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมออกแบบให้กำลังรับแรงอัด 180 ksc



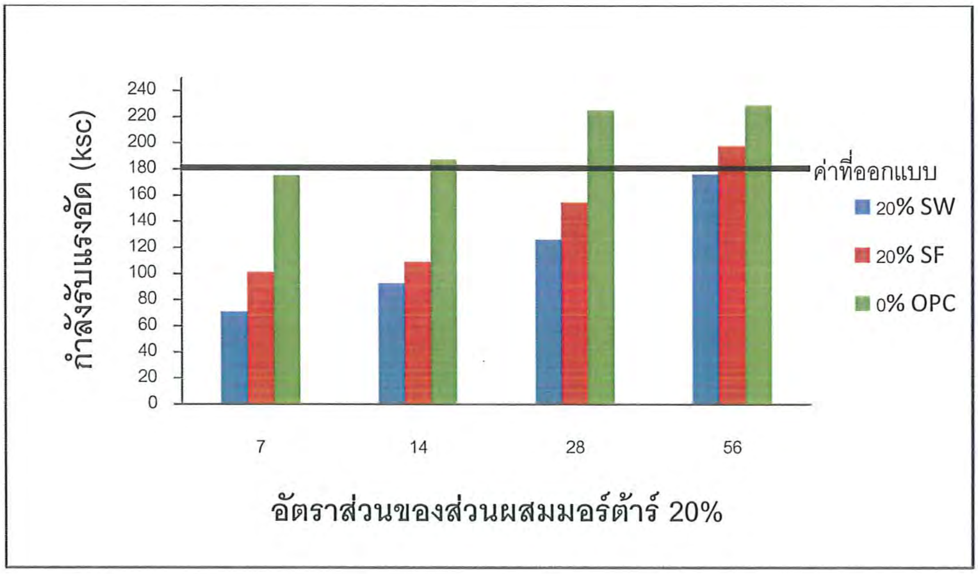

**ภาพที่** 4.9 อัตราส่วนผสมของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ร้อยละ 5




**ภาพที่** 4.10 อัตราส่วนผสมของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ร้อยละ 10




**ภาพที่** 4.11 อัตราส่วนผสมของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ร้อยละ 15




**ภาพที่** 4.12 อัตราส่วนผสมของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ ร้อยละ 20

**ตารางที่** 4.8 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมของของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 และ 56 วัน

| ประเภทของวัสดุ | วัน | ร้อยละ5 | | ร้อยละ10 | | ร้อยละ15 | | ร้อยละ 20 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ค่าเฉลี่ย | ± SD | ค่าเฉลี่ย | ± SD | ค่าเฉลี่ย | ± SD | ค่าเฉลี่ย | ± SD |
| ของเสียซิลิกา | 7 | 87.78 | 3.39 | 62.58 | 5.79 | 56.32 | 5.27 | 70.96 | 15.50 |
| | 14 | 89.42 | 6.42 | 87.71 | 6.21 | 80.06 | 9.85 | 92.62 | 21.21 |
| | 28 | 140.57 | 16.09 | 147.60 | 8.25 | 140.00 | 30.03 | 126.29 | 20.00 |
| | 56 | 175.72 | 20.13 | 203.68 | 44.38 | 175.50 | 37.54 | 175.54 | 27.78 |
| ซิลิกาฟูม | 7 | 125.11 | 18.22 | 135.72 | 11.02 | 118.61 | 8.29 | 101.10 | 30.32 |
| | 14 | 127.44 | 27.16 | 178.98 | 20.25 | 121.28 | 19.97 | 108.68 | 12.19 |
| | 28 | 201.04 | 16.72 | 221.25 | 15.77 | 193.22 | 10.22 | 154.59 | 25.53 |
| | 56 | 215.12 | 17.89 | 241.00 | 15.58 | 212.55 | 11.25 | 197.88 | 39.78 |
| ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 | 7 | 175.35 | 6.35 | 175.16 | 13.58 | 175.35 | 6.35 | 175.35 | 6.35 |
| | 14 | 187.49 | 13.38 | 187.22 | 11.33 | 187.49 | 13.38 | 187.49 | 13.4 |
| | 28 | 225.41 | 19.75 | 225.27 | 17.98 | 225.41 | 19.75 | 225.41 | 19.75 |
| | 56 | 227.61 | 20.04 | 229.78 | 18.34 | 226.75 | 19.87 | 228.79 | 20.05 |

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 5 (มอร์ต้าร์ควบคุมออกแบบให้กำลังรับแรงอัด 180 ksc)

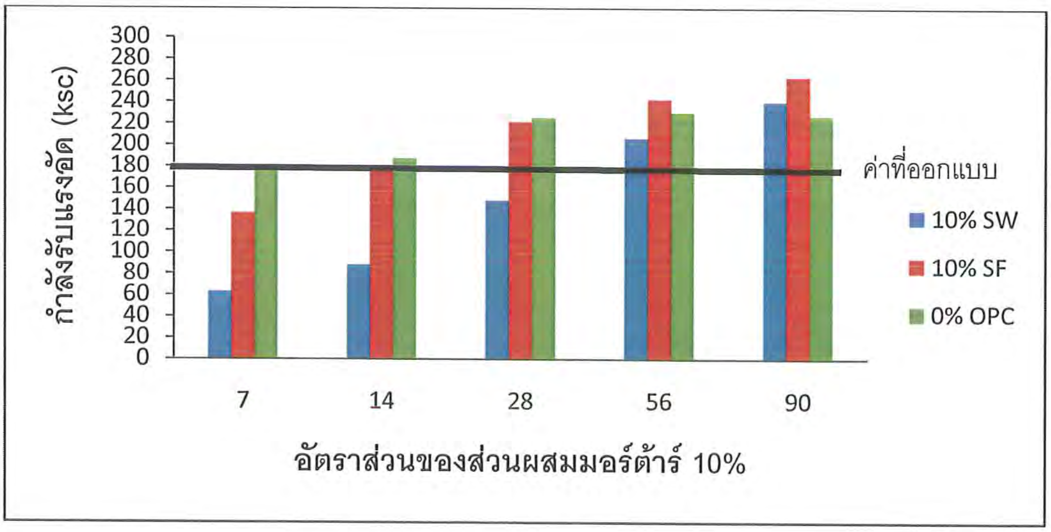
### 4.5 ผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ตามอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ร้อยละ 10

ทำการทดลองผสมอัตราส่วนผสมของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์อัตราส่วนที่เหมาะสมที่ร้อยละ 10 และทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 56 และ 90 วัน ดังสรุปในตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.13

**ตารางที่** 4.9 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสมเหมาะสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์ตามสัดส่วนต่างๆ และระยะเวลาบ่มที่ 7 14 28 56 และ 90 วัน

| ประเภทของวัสดุ | วัน | ร้อยละ 10 | |
|---|---|---|---|
| | | ค่าเฉลี่ย | ± SD |
| ของเสียซิลิกา | 7 | 60.18 | ± 3.47 |
| | 14 | 88.26 | ± 3.93 |
| | 28 | 147.66 | ± 8.69 |
| | 56 | 186.22 | ± 13.51 |
| | 90 | 239.62 | ± 11.79 |
| ซิลิกาฟูม | 7 | 136.62 | ± 6.59 |
| | 14 | 184.98 | ±10.16 |
| | 28 | 221.45 | ±11.85 |
| | 56 | 239.31 | ± 9.01 |
| | 90 | 262.70 | ±15.94 |
| ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 | 7 | 178.02 | ± 10.99 |
| | 14 | 207.57 | ±19.62 |
| | 28 | 221.45 | ±11.85 |
| | 56 | 239.31 | ± 9.01 |
| | 90 | 225.06 | ±13.75 |

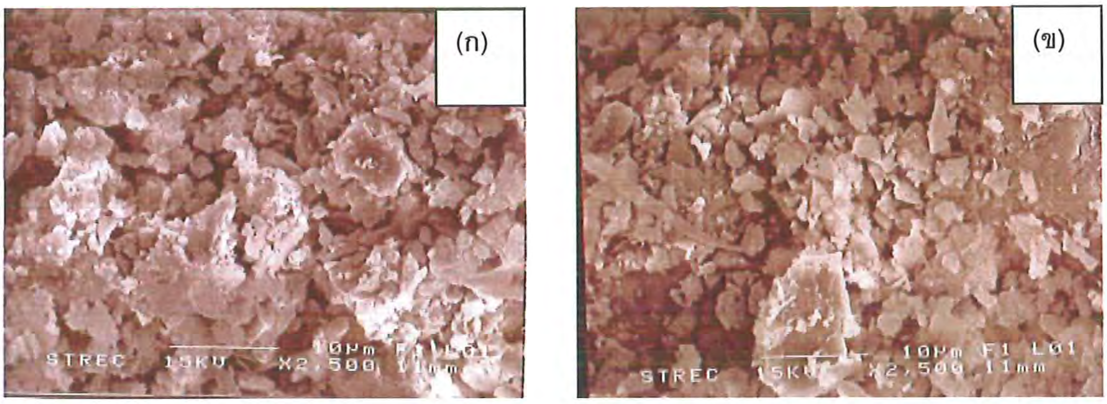
หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 10 (มอร์ต้าร์ควบคุมออกแบบให้กำลังรับแรงอัด 180 ksc)




**ภาพที่** 4.13 อัตราส่วนผสมของของเสียประเภทซิลิกา ซิลิกาฟูม และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ต้าร์อัตราส่วนที่เหมาะสมที่ร้อยละ 10

## 4.6 ผลการวิเคราะห์วัสดุปอซโซลาน

นำก้อนมอร์ต้าร์ที่บ่มอายุ 28 วันนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด จะสังเกตุเห็นว่ายังมีปฏิกิริยาปอซโซลาน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล,2547) ต่อเนื่องอยู่ที่ที่บริเวณเรืองแสง (Hamid และคณะ, 2010) ทั้งมอร์ต้าร์ของซิลิกาฟูมและมอร์ต้าร์ของของเสียซิลิกาแสดงว่าสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นหากทำการบ่มต่อไปอีก (Kadri และ Duval, 2009)




ภาพที่ 4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบสแกนขยาย 2500 เท่า
(ก) ซิลิกาฟูม (ข) ของเสียซิลิกา

## 4.7 ประมาณค่าใช้จ่ายในการใช้กากของเสียซิลิกาแทนซิลิกาฟูมในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป

ตารางที่ 4.10 แสดงประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมมาใช้ในกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป ในหน่วยราคาบาทต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้ราคาวัสดุอ้างอิงจากราคา ณ ปัจจุบัน จากสำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า www.price.moc.go.th [สิงหาคม, 2553] สำหรับประเทศไทยไม่สามารถผลิตซิลิกาฟูมได้จำเป็นต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง (80 บาทต่อกิโลกรัม) ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมราคาลูกบาศก์เมตรละ 7,300 บาท และราคาคอนกรีตผสมกากซิลิกา ราคาลูกบาศก์เมตรละ 4,380 บาท จะเห็นได้ว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ลูกบาศก์เมตรละ 2,920 บาท (ลดค่าใช้จ่ายลงประมาณร้อยละ 40) และยังสามารถนำกากของเสียซิลิกามาใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างได้ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการลดพื้นที่ในการฝังกลบของเสียประเภทซิลิกาที่เหลือจากกระบวนการรีไซเคิลซิลิโคนและช่วยลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย

**ตารางที่ 4.10** ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของกากของเสียซิลิกาใช้แทนซิลิกาฟูมในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป

| ค่าใช้จ่าย | ราคาต่อหน่วย | คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม | | คอนกรีตผสมกากซิลิกา | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | จำนวนที่ใช้ (ก.ก.) | ราคา (บาทลบ.ม) | จำนวนที่ใช้ (ก.ก.) | ราคา (บาทลบ.ม |
| คอนกรีตผสมเสร็จ** | 4,000บาท/ลบ.ม. [a] | - | 4,000 | - | 4,000 |
| สารลดน้ำที่ใส่ในคอนกรีต | 0.0 บาท/ลบ.ม. [b] | - | - | - | - |
| ค่าแรงงานในการยกเทผสม | 100.0 บาท/ลบ.ม.[c] | - | 100 | - | 100 |
| ซิลิกาฟูม | 80.0 บาท/กก. [d] | 40 | 3,200 | - | - |
| ของเสียประเภทซิลิกา | 7.0 บาท/กก. | - | - | 40 | 280 |
| ราคาค่าวัตถุดิบ/ลบ.ม. | - | - | 7,300 | - | 4,380 |
| *ค่าพลังงานที่ใช้ในการบด*** | 2.7 บาท/ชม. [e] | 13 ชม. = 35.1 บาท | | | |
| *ค่าพลังงานที่ใช้ในเตาอบ | 5.4 บาท/ชม. [f ] | 36 ชม. = 194.4 บาท | | | |
| *ค่าพลังงานที่ใช้ในการบรรจุ | 5.58 บาท/ชม. [g] | 5.30 ชม. = 29.57 บาท | | | |
| *เตาเผาไฟฟ้า | 13.99 บาท/ชม. [h] | 19.45 ชม.= 272.03 บาท | | | |
| รวมค่าใช้จ่ายของพลังงาน | - | 531.10 บาท | | | |
| ราคาของพลังงาน/ก.ก. | - | 6.54 บาท (7.0 บาท) | | | |
| ราคาคอนกรีตผสมเสร็จ/ลบ.ม. | - | 7,300 | | 4,380 | |

หมายเหตุ

*กำลังไฟฟ้าของเครื่องบด = 1.50 กิโลวัตต์

*กำลังไฟฟ้าของเตาอบ = 3.00 กิโลวัตต์

*กำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดขึ้นรูป = 3.10 กิโลวัตต์

*กำลังไฟฟ้าของเตาเผาไฟฟ้า = 7.77 กิโลวัตต์

การคำนวณ

ราคาค่าวัตถุดิบ/ลบ.ม. = [a]*คอนกรีตผสมเสร็จ /ลบ.ม. + [b]*สารลดน้ำที่ใช้ + [c]*ค่าแรงงานที่ใช้ / วัน

= [a]*คอนกรีตผสมเสร็จ /ลบ.ม. + [c]*ค่าแรงงานที่ใช้ / วัน+ [d]*จำนวนวัตถุดิบ / ลบม.

ราคาของพลังงาน/ก.ก. = [e]*จำนวนชั่วโมงทำงาน + [f]*จำนวนชั่วโมงทำงาน + [g]*จำนวนชั่วโมงทำงาน + [h]*จำนวนชั่วโมงทำงาน

หน่วยค่าไฟฟ้า(Unit) = กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kW-hr), ค่าไฟฟ้าคิดราคาเท่ากับ 1.8 บาทต่อหน่วย (อ้างอิงข้อมูลจากการไฟฟ้านครหลวง, 2554)

**คอนกรีตผสมเสร็จ 1 ลบ.ม. ใช้ปูนซีเมนต์ 400 ก.ก.

***ใส่ของเสียประเภทซิลิกา 1 ก.ก. บดแล้วจะได้ 0.8 ก.ก.

คอนกรีตผสมเสร็จโดยการเติมซิลิกาฟูมและของเสียประเภทซิลิกาอัตราส่วนผสมร้อยละ 10

# บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางในการนำของเสียซิลิกาไปใช้ประโยชน์แทนซิลิกาฟูมในการผลิตคอนกรีต ผสมเสร็จพบว่ามีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนซิลิกาฟูมในการผลิตคอนกรีตได้ สามารถปรับอัตราส่วนผสมวัตถุดิบมาเป็นส่วนผสมซีเมนต์เพื่อให้ได้องค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมและมีคุณภาพในการผลิตคอนกรีตเพื่อใช้ในการก่อสร้างได้ดังนี้

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ของเสียซิลิกาที่ผ่านการบดละเอียดสามารถเป็นวัสดุปอซโซลานเมื่อนำมาเป็นส่วนผสมมอร์ต้าร์ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถให้กำลังอัดใกล้เคียงมอร์ต้าร์มาตรฐานที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน

5.1.2 ของเสียซิลิกามีลักษณะเป็นวัสดุปอซโซลาน มีผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่ามีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ตรงตามข้อกำหนดความเป็นวัสดุปอซโซลาน ASTM C 618-96 สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อทำการบ่มเป็นระยะเวลาเพิ่มขึ้นต่อไป สามารถนำมาทดแทนซิลิกาฟูมในการทำคอนกรีตผสมเสร็จได้

5.1.3 ผลของการทดสอบการชะละลายโลหะหนักของของเสียประเภทซิลิกาเมื่อหล่อเป็นมอร์ต้าร์เปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมที่หล่อเป็นมอร์ต้าร์พบว่าสารละลายมีโลหะหนักประกอบด้วยตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และโครเมียมไม่เกินมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม 2548

5.1.4 ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียประเภทซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟูมมาใช้ในกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปพบว่าคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมราคาลูกบาศก์เมตรละ 7,300 บาท และราคาคอนกรีตผสมกากซิลิกา ราคาลูกบาศก์เมตรละ 4,380 บาท จะเห็นได้ว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ลูกบาศก์เมตรละ 2,920 บาท (ลดค่าใช้จ่ายลงประมาณร้อยละ 40)

**5.2 ข้อเสนอแนะ**

จากการทดลองนำของเสียประเภทซิลิกาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์แทนซิลิกาฟูมเพื่อผลิตคอนกรีตผสมเสร็จพบว่า ควรจะทำการวิจัยเพิ่มเติมดังนี้

5.2.1 ศึกษาการลดขนาดอนุภาคของของเสียประเภทซิลิกาที่ใช้แล้วให้มีขนาดเล็กลงโดยให้ใกล้เคียงกับซิลิกาฟูมที่นำเข้าจากต่างประเทศ

5.2.2 ศึกษาส่วนผสมของสารลดน้ำซึ่งเป็นน้ำยาซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ที่เหมาะกับงานคอนกรีตผสมเสร็จ ทำให้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกินค่ากำหนด

5.2.3 ศึกษาการนำอะลูมินาบริสุทธิ์มาใช้ร่วมกับของเสียประเภทซิลิกาที่ใช้แล้ว เพื่อเพิ่มปริมาณของอะลูมินาในส่วนผสมให้มีค่าสูงขึ้น เพื่อทำให้มีสัดส่วนที่เหมาะสมในการเพื่อทนความร้อนและการทำหน้าที่เป็นตัวทนไฟ

5.2.4 ศึกษาการนำไปใช้ประโยชน์ โดยการนำไปทำจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์โดยใช้ของเสียประเภทซิลิกาแทนซีเมนต์ประเภท 1

# รายการอ้างอิง

## ภาษาไทย


กฤษฎา ปัญญาภรดี ณัฐ เหลืองคำชาติ และเอกรินทร์ พงศ์พิพัฒนชัย. 2542. การศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำต่อระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2540. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่5. กรุงเทพมหานคร: คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.

ธีรราช ลีกีรติกุล และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2545. ศึกษาการใช้เถ้าแกลบเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.kmutt.ac.th/organization/Research/Intellect/civil11.htm.[2553, สิงหาคม 10].

ธีรวัฒน์ สินศิริ. 2553. ผลกระทบของนาโนซิลิกาจากเถ้าแกลบต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าร์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: eng.sut.ac.th/ce/ccbm/files/nano54.doc. [2553, สิงหาคม 10].

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวินัย หอมศรีประเสริฐ. 2552. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ ปีที่ 32 ฉบับที่ 4

ประณต กุลประสูตร. 2541. เทคนิคงานปูน-คอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547 . ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: สมาคมคอนกรีตไทย.

ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน). 2553. เอกสารเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีสมัยใหม่. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี.

วินิต ช่อวิเชียร. 2544. คอนกรีตเทคโนโลยี.พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์สัมพันธ์พาณิชย์.

วิสันต์ หิรัญเขต และ อภินันท์ บัณฑิตนุกุล. 2543. คอนกรีตกำลังอัดสูงผสมไมโครซิลิก้า. [ออนไลน์].แหล่งที่มา:library.kmutnb.ac.th/projects/edu/TTC/ttc0220t.html. [2553, สิงหาคม 9].

สำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า. ราคาวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.price.moc.go.th [2553, สิงหาคม 10].

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2531. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม.ฉบับที่ 1. กำหนดวิธีการเก็บทำลายฤทธิ์กำจัด ฝังทิ้ง เคลื่อนย้ายและการขนส่งสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2548. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 1. การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว.

**ภาษาอังกฤษ**

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard specification for concrete aggregates. C33-93. Annual book of ASTM standard. 4:10-16.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard specification for coal fly ash or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. C618-96. Annual book of ASTM standard. 04.02 section 4 : 184-190

American Society for Testing and Materials.1996. Standard test method for bulk unit weight and voids in Aggregate. C29. Annual book of ASTM standard. 4:21-26.

American Society for Testing and Materials. 2008. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars ( using 2-in or 50-mm cube specimens).C109-07. Annual book of ASTM standard. 4:78-86.

American Society for Testing and Materials. 2008. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate.C127-07. Annual book of ASTM standard. 4:77-82.

American Society for Testing and Materials. 2008. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate.C128-07a. Annual book of ASTM standard. 4:83-89.

American Society for Testing and Materials. 2008. Standard specification for Portland cement. C 150-07. Annual book of ASTM standard. 4:150-155.

American Society for Testing and Materials. 2008. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate.C127-07. Annual book of ASTM standard. 4:77-82.

American Society for Testing and Materials. 2008. Standard test method for steady-state.Heat flux measurements and thermal transmission properties by mean of the guarded-hot plate apparatus. C177-04. Annual book of ASTM standard. 4:21-42.

Batayneh, M., Marie, I., and Asi, I. 2007. Use of selected waste materials in concrete mixes. Waste management. 27: 1870-1876.

De Schutter, G. 2006. Fundamental and practical study of thermal stress in hardening massive concrete elements. Doctoral thesis in Dutch. Ghent University.

Hetal, M.A. 2002. Effect of curing time on the physico-mechanical characteristics of the hardened cement pastes containing limestone. Cement Concrete Research 32 : 447-450.

Hamid, R., Yusof, K. M., and Zain, M. F. M. 2010. A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume. Construction and Building Materials. 24 : 94-98.

Kadri, El-H., and Duval, R. 2009. Hydration heat kinetics of concrete with silica fume. Construction and Buiding Materials. 23: 3388-3392.

LaGrega, M.D., Buckingham, P. L., and Evans, J.C. 1994. Stabilization and solidification. In P.H. King (ed.). Hazardous waste management, pp. 641-704. Singapore: McGraw-Hill book.

Lea, F.M. 1970. The chemistry of cement and concrete. 3rd ed. New York: Chemical publishing.

Omya company. 2004. Advantages of using OMYA Calcium Carbonate in Concrete. Fine Calcium Carbonate for the Concrete Industry.

Shamaran, M., Christianto, H., and Yaman, I. 2005. The effect chemical admixture and mineral additives on the properties of self compacting mortar. Cement and concrete composites.

Shannag, M.J., and Yeginobali, A. 1995. Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan. Cement and concrete research. 3: 647-657.

Shin, H. S., and Sujiwattana, P. 1998. Factors affecting solidification of hazardous wastes materials. Hazadous waste: detection, control, treatment. 4: 1549-1560.

U.S. Environment Protection Agency.1992. Leaching Test. Method 1311. Code of federal regulation. : 260-299.

Wan, B., Kim, H.C.,Tae, H.G., and Park, B.J. 2007. Characteristics of cement mortar with nano-sio2 particles. Construction and Buiding Materials. 21: 1351-1355.

# ภาคผนวก

# ภาคผนวก ก

# วิธีการทดสอบ

**ภาคผนวก ก.1**

**วิธีการทดสอบการชะละลาย (Leaching Test)**

**(มาตรฐาน SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA)**

เป็นวิธีที่ออกแบบมาเพื่อหาการชะละลายของทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่อยู่ในสถานะของแข็ง และของเหลว ซึ่งเป็นการจำลองการย่อยสลายในหลุมฝังกลบ (Landfill) ซึ่งมีวิธีทดสอบดังต่อไปนี้

1. **การเตรียมน้ำสกัด**

น้ำสกัดชนิดที่ 1 เติมกรดอะซิติคเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ลงในขวดที่มีน้ำกลั่นอยู่ 500 มิลลิลิตร เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 64.3 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรน้ำให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร ถ้าเตรียมถูกต้อง พีเอชจะมีค่าประมาณ 4.93 $\pm$ 0.05

น้ำสกัดชนิดที่ 2 เติมกรดอะซิติคเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ลงในขวดที่มีน้ำกลั่นอยู่ 500 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรน้ำให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร ถ้าเตรียมถูกต้อง พีเอชจะมีค่าประมาณ 2.88 $\pm$ 0.05

2. **การเลือกน้ำสกัดให้เหมาะสมในกรณีปริมาณของแข็งในตัวอย่างมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5%**

- แบ่งตัวอย่างที่เป็นของแข็งขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ1 มิลลิเมตรจำนวน 500กรัมใส่ในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 96.5 มิลลิเมตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา (Watchglass) นำไปกวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 5 นาที วัดและจดค่าพีเอช ถ้าพีเอช น้อยกว่า 5 เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 1

- ถ้าพีเอชมากกว่าหรือเท่ากับ 5 เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 3.5 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา (Watchglass) นำไปให้ความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และวัดค่าพีเอช ถ้าพีเอชน้อยกว่า 5 เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 2

วิธีการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. หากตัวอย่างเป็นของเหลวหรือมีของแข็ง (Dry solids) ปะปนในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ0.5 ให้กรองตัวอย่างนั้นด้วยแผ่นกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวที่ผ่านกระบวนการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่อง ICP

2. หากตัวอย่างมีของแข็งปนอยู่ในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 0.5 ให้นำทดสอบด้วยวิธีดังต่อไปนี้

นำตัวอย่างจำนวน 100 กรัม ใส่ลงในขวดโพลีโพพีลีน เลือกน้ำสกัดที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการทดสอบดังกล่าวไว้แล้วด้านบนเติมลงในขวดแล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator)ที่อัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 18 ชั่วโมง กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้ว ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วมาทำการปรับค่าพีเอชให้น้อยกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกจากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัพเพิลพลาสมา (ICP)

## ภาคผนวก ก.2

## การทดสอบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้วโดยนำมาสกัดด้วยวิธี (WET)

เป็นการจำลองสถานการณ์ฝนกรด สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นของแข็งสามารถบดได้ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ พ.ศ.2548 ทดสอบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้ว โดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) โดยการ นำสารละลายที่ได้ไปทดสอบหาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่ชะละลายออกมา ตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. บดตัวอย่างเพื่อให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ขนาด 2 มิลลิเมตร

2. ให้ใช้สารละลายโซเดียมซิเตรท (Sodium citrate) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่พีเอชเท่ากับ 5.0 $\pm$ 0.1 3. นำตัวอย่างหนัก 50 กรัมของตัวอย่างใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลีเอทธิลีน ภาชนะที่ใช้ในการสกัดควรผ่านการล้างอย่าง ต่อเนื่องด้วยกรดไน-ตริก ซึ่งเตรียมได้จากการนำเอาสารละลายกรดไนตริกมาผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร

3. เติม 500 มิลลิลิตรของน้ำสกัดลงในตัวอย่าง จากนั้นนำของผสมไปไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำสกัดออกไป และป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในอากาศละลายลงไปในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว และนำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่า (table shaker หรือ overhead stirrer หรือ rotary extractor) ซึ่งสามารถทำให้ของ ผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมตลอดเวลา เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

4. จากนั้นนำเอาของผสมไปกรอง หรืออาจปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (centrifuged) แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน โดยใช้ thick-walled suction flask ที่สะอาด สำหรับของแข็งขนาดหยาบสามารถใช้ Pressure filtration แทน vacuum filtration ได้ สำหรับของแข็งขนาดละเอียดอาจเหวี่ยงที่ความเร็วรอบถึง 10,000 x G ก่อนนำไปกรองผ่านเมมเบรน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน นำของผสมไปไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที ควรปรับอุณหภูมิในระหว่างสกัดอยู่ระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียส

5. ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะเท่านั้น ให้ถ่ายสารละลายที่กรองได้จาก ข้อ 5. ลงในขวดโพลีเอทธิลีน และปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริก เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ให้ปรับสภาพให้เป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง)

6. นำของเหลวไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัพเพิลพลาสมา (ICP)

## ภาคผนวก ก.3

## การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ (มาตรฐาน ASTM C150-07, 2008)

### ขั้นตอนการทดลอง

1. เติมน้ำมันก๊าดลงในขวดชาเตอร์ลิเอร์ จนกระทั่งน้ำมันก๊าดอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 มิลลิลิตร
2. บันทึกค่าปริมาตร อุณหภูมิและน้ำหนักน้ำมันก๊าด
3. ชั่งน้ำหนักซีเมนต์ให้มีความละเอียดอย่างน้อย 0.05 กรัม (ประมาณ 64 กรัมสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลน) ที่มีอุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิของน้ำมันก๊าด
4. เติมปูนซีเมนต์ลงในขวดแก้วทีละน้อย ระวังอย่าให้ปูนซีเมนต์ติดข้างขวด เมื่อปูนซีเมนต์จมอยู่ในน้ำมันก๊าดทั้งหมดจึงปิดฝา (Ground Glass Stopper) แล้วไล่อากาศโดยเอียงขวดเป็นวงกลมในแนวราบแล้วกลิ้งไปมาอย่างช้าๆ จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศขึ้นมาจากน้ำมันก๊าดอีก
5. วางขวดแก้วตั้งไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิอีกครั้ง จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันก๊าดคงที่และแตกต่างกับที่อ่านครั้งแรกไม่เกิน 0.2 องศาเซลเซียส จึงบันทึกค่าปริมาตรของน้ำมันก๊าด นำไปชั่งบันทึกค่าน้ำหนัก เสร็จแล้วนำขวดไปล้างโดยใช้น้ำมันก๊าด

### การคำนวณ

ความหนาแน่นของซีเมนต์ (Density of Cement)

$$\rho = Wc / Vc$$

ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ (Specific Gravity of Cement)

$$Gc = Wc/ (Vc) * (\gamma w)$$

โดยที่ $Wc$ = น้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่ใช้ (กรัม)

$Vc$ = ปริมาตรของปูนซีเมนต์จากการแทนที่ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$\gamma w$ = หน่วยน้ำหนักของน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (มีค่าเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

## ภาคผนวก ก.4

### ก 4.1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของทราย (มาตรฐาน ASTM C128-07a, 2008)

**ขั้นตอนการทดลอง**

1. นำมวลรวมหยาบที่เก็บมาประมาณ1,000 กรัม โดยวิธีการแบ่งสี่ ( Method of Quartering) ร่อนเอาส่วนผ่านตะแกรงเบอร์ 4
2. ชั่งน้ำหนักของวัสดุจนคงที่ที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งและอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งให้เย็นประมาณ 1-3 ชั่วโมง
3. นำมวลรวมหยาบไปแช่ไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. เป่ามวลรวมด้วยเครื่องเป่าผมจนอยู่ในสภาวะไหลอิสระ (Free-Flowing)
5. ทดสอบสภาวะไหลอิสระทำโดยการเทมวลรวมละเอียดลงในกรวยทรายจนเต็มแล้วกระทุ้งเบาๆ จำนวน 25 ครั้ง จากนั้นยกกรวยขึ้นตรงๆ หากมีความชื้นที่ผิวอยู่ยังคงเป็นรูปกรวยให้ใช้เครื่องเป่าจนอยู่ในสภาพไหลอิสระ ซึ่งเรียกว่าสภาวะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง
6. เทมวลรวมลงไปในกระบอกตวง 500 กรัม จนถึงขีดระดับประมาณ 450 มล.
7. นำกระบอกตวงตามข้อที่6 ไปแช่ในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ประมาณ 23± 1.7 องศาเซลเซียส แล้วเขย่ากระบอกตวงเพื่อไล่ฟองอากาศออก เติมน้ำจนถึงระดับ 500 มล. แล้วทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่
8. ชั่งหาน้ำหนักกระบอกตวง มวลรวมและน้ำทั้งหมด
9. เทมวลรวมละเอียดออกจากกระบอกตวงใส่ในถาดโลหะ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ110 ± 5 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่ (อบประมาณ 24 ชั่วโมง) จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 1-1½ ชั่วโมง แล้วชั่งหาน้ำหนักของมวลรวมละเอียดที่แห้ง
10. ชั่งหาน้ำหนักของกระบอกตวงที่มีน้ำที่ระดับ 500 มล. ที่มีอุณหภูมิประมาณ 23 องศาเซลเซียส

**การคำนวณ**

ความถ่วงจำเพาะทั้งหมด (Bulk Specific Gravity) ในสภาวะแห้งด้วยเตาอบ (Oven-Dried) ได้จาก

ความถ่วงจำเพาะทั้งหมด(Oven-Dried) = A / (B-C)

โดยที่ A = น้ำหนักของมวลรวมอบแห้ง (กรัม)

B = น้ำหนักของมวลรวมที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งที่ชั่งในอากาศ (กรัม)

C = น้ำหนักของมวลรวมที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งชั่งในน้ำ (กรัม)

## ก 4.2 การหาค่าการดูดซึมน้ำของทราย(มาตรฐาน ASTM C128-07a, 2008)

**ขั้นตอนการทดลอง**

1. ใช้วัสดุประมาณ 1 กิโลกรัม ในถาดขนาดพอเหมาะ เทน้ำให้ท่วมวัสดุเล็กน้อย ทิ้งไว้ให้ดูดซึม เป็นเวลา 24 $\pm$ 4 ชั่วโมง
2. เกลี่ยตัวอย่างวัสดุให้ทั่วถาดทิ้งไว้กลางแจ้ง ที่มีลมพัดและกวนตัวอย่างเป็นระยะๆ เพื่อให้แห้ง ทั่วกันจนกระทั่งวัสดุเริ่มไหลได้อย่างอิสระ (Free flow)
3. เทตัวอย่างใส่แบบหล่อกรวยมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบน 40$\pm$ 3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางล่าง 90 $\pm$ 3 มิลลิเมตร และสูง 75 $\pm$ 3 มิลลิเมตร แล้วกระทุ้งเบาๆ ที่ผิวหน้า
4. ดึงแบบหล่อออกในแนวดิ่ง ถ้าวัสดุยังคงรูปกรวยอยู่แสดงว่ายังมีความชื้นอยู่ที่ผิว นำไปไว้กลางแจ้งอีกครั้งและกวนเป็นระยะๆ
5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 และ 4 จนกว่าเมื่อยกแบบหล่อกรวยออกตัวอย่างวัสดุยุบตัวหรือล้ม (ถือว่าวัสดุในขณะนี้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)
6. ชั่งน้ำหนักของวัสดุที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งและอบแห้ง
7. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุ

**การคำนวณ**

เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ = [(B-A) / A] x 100

โดยที่ A = น้ำหนักของวัสดุอบแห้ง (Oven dry weight)

B = น้ำหนักของวัสดุที่สภาวะอิ่มตัวที่ผิวแห้ง (Saturated surface dryweight)

# ภาคผนวก ก.5

# การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (มาตรฐาน ASTM C109-07, 2008)

## ขั้นตอนการทดลอง

<u>การเตรียมแบบหล่อตัวอย่าง</u>

-ทาน้ำมันบางๆ ที่ผิวด้านในของแบบหล่อกับฐาน

-ทาน้ำมันชนิดเข้มข้นหรือจารบีระหว่างตัวแบบหล่อกับฐาน

-เช็ดน้ำมันส่วนเกินออกจากแบบหล่อ

-ใช้จารบีทารอยต่อระหว่างแบบหล่อกับฐานที่ด้านนอก

<u>การหล่อก้อนตัวอย่าง</u>

1. หล่อก้อนตัวอย่างโดยใช้ขนาดแบบหล่อ 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยชั่งวัสดุที่ใช้ตามอัตราส่วนที่ต้องการทดสอบโดยให้ ได้ปริมาณ 3 ตัวอย่าง ในแต่ละการผสม
2. การผสมใช้วิธีการผสมโดยเครื่องผสม โดยผสมส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน
3. เอาส่วนผสมลงในแบบหล่อ ภายในเวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที หลังการผสมแล้วการหล่อจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกหนา ประมาณ 1 นิ้ว แล้วใช้แท่งกระทุ้ง ชั้นละ 16 ครั้งโดย 8 ครั้งแรกจะมีทิศทางตั้งฉากกับ 8 ครั้งหลังให้แรงกระทุ้งพอประมาณและเท่ากันตลอด ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที เติมส่วนผสมชั้นที่ 2 ให้ เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อย และใช้มือป้องขณะกระทุ้งใช้ แท่งกระทุ้ง กระทุ้ง 16 ครั้งเช่นเดียวกับครั้งแรกเมื่อเสร็จแล้วให้ใช้เกรียงปาดส่วนเกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อย
4. หลังจากหล่อเสร็จให้นำตัวอย่างพร้อมแบบหล่อเก็บไว้ในที่ชื้นทันที และถอดแบบในเวลา 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างต่อจนครบระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยค่าความคลาดเคลื่อนแสดงในตาราง ก.3.1

**ตารางที่ ก.5.1** การหาค่ากำลังรับแรงอัดให้กระทำในช่วงเวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

| เวลาที่ทดสอบ | ช่วงเวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ |
|---|---|
| 1 วัน | ± ½ ชั่วโมง |
| 3 วัน | ± 1 ชั่วโมง |
| 7 วัน | ± 3 ชั่วโมง |
| 28 วัน | ± 12 ชั่วโมง |

นำก้อนตัวอย่างที่จะทดสอบ วัดพื้นที่หน้าตัดที่จะให้แรงกด โดยใช้ด้านที่สัมผัสกับแบบหล่อ เช็ดผิวหน้าทั้ง 2 ด้าน ให้สะอาดปราศจากเม็ดทราย ผิวหน้าของเครื่องมือทั้ง 2 ด้านที่สัมผัสกับก้อนตัวอย่างจะต้องเรียบ ในการให้กดกับแท่งตัวอย่าง จะต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่อง โดยเวลาที่ใช้ในการทดสอบควรอยู่ที่ 20-80 วินาที

**การคำนวณ**

บันทึกค่าแรงกดสูงสุดจากเครื่องกดและคำนวณในหน่วยของกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยให้คำนวณความละเอียดถึง 0.1 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตรหรือกิโลปาสคาล โดยคำนวณความละเอียดถึง 10 กิโลปาสคาล

ก้อนตัวอย่างที่ไม่สมบูรณ์ในการทดสอบแต่ละครั้ง หากมีผลการทดสอบของก้อนตัวอย่างใดที่มีค่าเบี่ยงเบนเกินกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย ควรตัดผลการทดสอบออกและนำก้อนใหม่มาวัดแทน

# ภาคผนวก ข

# การทดสอบการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค

MALVERN INSTRUMENTS

# MASTERSIZER 2000

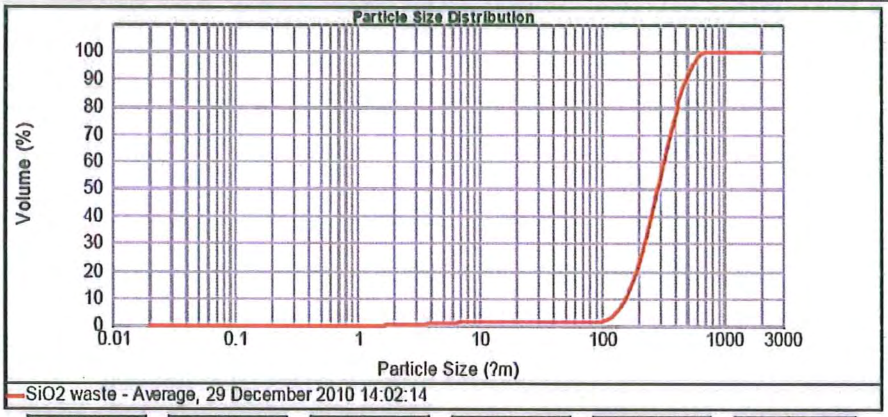
## Result Analysis Report

| | | |
|---|---|---|
| **Sample Name:** SiO2 waste - Average | **SOP Name:** | **Measured:** 29 December 2010 14:02:14 |
| **Sample Source & type:** | **Measured by:** User | **Analysed:** 29 December 2010 14:02:15 |
| **Sample bulk lot ref:** | **Result Source:** Averaged | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Particle Name:** Silica 0.1 | **Accessory Name:** Hydro 2000SM (A) | **Analysis model:** General purpose | **Sensitivity:** Normal |
| **Particle RI:** 1.544 | **Absorption:** 0.1 | **Size range:** 0.020 to 2000.000 um | **Obscuration:** 7.63 % |
| **Dispersant Name:** Water | **Dispersant RI:** 1.330 | **Weighted Residual:** 1.164 % | **Result Emulation:** Off |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Concentration:** 0.1426 %Vol | **Span :** 1.180 | **Uniformity:** 0.369 | **Result units:** Volume |
| **Specific Surface Area:** 0.0445 m²/g | **Surface Weighted Mean D[3,2]:** 134.798 um | **Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 308.876 um | |

**d(0.1):** 158.324 um    **d(0.5):** 288.133 um    **d(0.9):** 498.317 um




| Size (?m) | Volume In % | Size (?m) | Volume In % | Size (?m) | Volume In % | Size (?m) | Volume In % | Size (?m) | Volume In % | Size (?m) | Volume In % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.010 | 0.00 | 0.105 | 0.00 | 1.096 | 0.00 | 11.482 | 0.00 | 120.226 | 2.61 | 1258.925 | 0.00 |
| 0.011 | 0.00 | 0.120 | 0.00 | 1.259 | 0.00 | 13.183 | 0.00 | 138.038 | 4.36 | 1445.440 | 0.00 |
| 0.013 | 0.00 | 0.138 | 0.00 | 1.445 | 0.00 | 15.136 | 0.00 | 158.489 | 6.33 | 1659.587 | 0.00 |
| 0.015 | 0.00 | 0.158 | 0.00 | 1.660 | 0.04 | 17.378 | 0.00 | 181.970 | 8.36 | 1905.461 | 0.00 |
| 0.017 | 0.00 | 0.182 | 0.00 | 1.905 | 0.08 | 19.953 | 0.00 | 208.930 | 10.10 | 2187.762 | 0.00 |
| 0.020 | 0.00 | 0.209 | 0.00 | 2.188 | 0.09 | 22.909 | 0.00 | 239.883 | 11.33 | 2511.886 | 0.00 |
| 0.023 | 0.00 | 0.240 | 0.00 | 2.512 | 0.11 | 26.303 | 0.00 | 275.423 | 11.79 | 2884.032 | 0.00 |
| 0.026 | 0.00 | 0.275 | 0.00 | 2.884 | 0.12 | 30.200 | 0.00 | 316.228 | 11.39 | 3311.311 | 0.00 |
| 0.030 | 0.00 | 0.316 | 0.00 | 3.311 | 0.13 | 34.674 | 0.00 | 363.078 | 10.21 | 3801.894 | 0.00 |
| 0.035 | 0.00 | 0.363 | 0.00 | 3.802 | 0.14 | 39.811 | 0.00 | 416.869 | 8.40 | 4365.158 | 0.00 |
| 0.040 | 0.00 | 0.417 | 0.00 | 4.365 | 0.14 | 45.709 | 0.00 | 478.630 | 6.24 | 5011.872 | 0.00 |
| 0.046 | 0.00 | 0.479 | 0.00 | 5.012 | 0.14 | 52.481 | 0.00 | 549.541 | 4.08 | 5754.399 | 0.00 |
| 0.052 | 0.00 | 0.550 | 0.00 | 5.754 | 0.13 | 60.256 | 0.00 | 630.957 | 1.71 | 6606.934 | 0.00 |
| 0.060 | 0.00 | 0.631 | 0.00 | 6.607 | 0.12 | 69.183 | 0.00 | 724.436 | 0.02 | 7585.776 | 0.00 |
| 0.069 | 0.00 | 0.724 | 0.00 | 7.586 | 0.10 | 79.433 | 0.00 | 831.764 | 0.00 | 8709.636 | 0.00 |
| 0.079 | 0.00 | 0.832 | 0.00 | 8.710 | 0.08 | 91.201 | 0.36 | 954.993 | 0.00 | 10000.000 | |
| 0.091 | 0.00 | 0.955 | 0.00 | 10.000 | 0.02 | 104.713 | 1.29 | 1096.478 | 0.00 | | |
| 0.105 | | 1.096 | | 11.482 | | 120.226 | | 1258.925 | | | |

**ภาพที่ ผ1** ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดของของเสียประเภทซิลิกา

MALVERN INSTRUMENTS

# MASTERSIZER 2000

## Result Analysis Report

**Sample Name:**
SiO2 waste - Average

**SOP Name:**

**Measured:**
29 December 2010 14:02:14

**Sample Source & type:**

**Measured by:**
User

**Analysed:**
29 December 2010 14:02:15

**Sample bulk lot ref:**

**Result Source:**
Averaged

---

**Particle Name:**
Silica 0.1

**Accessory Name:**
Hydro 2000SM (A)

**Analysis model:**
General purpose

**Sensitivity:**
Normal

**Particle RI:**
1.544

**Absorption:**
0.1

**Size range:**
0.020 to 2000.000 um

**Obscuration:**
7.63 %

**Dispersant Name:**
Water

**Dispersant RI:**
1.330

**Weighted Residual:**
1.164 %

**Result Emulation:**
Off

---

**Concentration:**
0.1426 %Vol

**Span :**
1.160

**Uniformity:**
0.369

**Result units:**
Volume

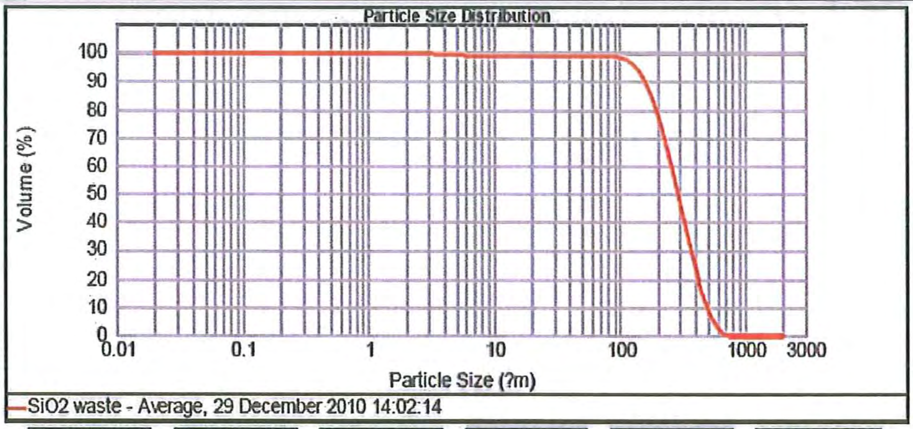
**Specific Surface Area:**
0.0445 m²/g

**Surface Weighted Mean D[3,2]:**
134.798 um

**Vol. Weighted Mean D[4,3]:**
308.876 um

**d(0.1): 158.324 um** **d(0.5): 288.133 um** **d(0.9): 498.317 um**

---




| Size (?m) | Volume In % |
|---|---|
| 0.010 | 0.00 |
| 0.011 | 0.00 |
| 0.013 | 0.00 |
| 0.015 | 0.00 |
| 0.017 | 0.00 |
| 0.020 | 0.00 |
| 0.023 | 0.00 |
| 0.026 | 0.00 |
| 0.030 | 0.00 |
| 0.035 | 0.00 |
| 0.040 | 0.00 |
| 0.046 | 0.00 |
| 0.052 | 0.00 |
| 0.060 | 0.00 |
| 0.069 | 0.00 |
| 0.079 | 0.00 |
| 0.091 | 0.00 |
| 0.105 | |

| Size (?m) | Volume In % |
|---|---|
| 0.105 | 0.00 |
| 0.120 | 0.00 |
| 0.138 | 0.00 |
| 0.158 | 0.00 |
| 0.182 | 0.00 |
| 0.209 | 0.00 |
| 0.240 | 0.00 |
| 0.275 | 0.00 |
| 0.316 | 0.00 |
| 0.363 | 0.00 |
| 0.417 | 0.00 |
| 0.479 | 0.00 |
| 0.550 | 0.00 |
| 0.631 | 0.00 |
| 0.724 | 0.00 |
| 0.832 | 0.00 |
| 0.955 | 0.00 |
| 1.096 | |

| Size (?m) | Volume In % |
|---|---|
| 1.096 | 0.00 |
| 1.259 | 0.00 |
| 1.445 | 0.00 |
| 1.660 | 0.04 |
| 1.905 | 0.06 |
| 2.188 | 0.09 |
| 2.512 | 0.11 |
| 2.884 | 0.12 |
| 3.311 | 0.13 |
| 3.802 | 0.14 |
| 4.365 | 0.14 |
| 5.012 | 0.14 |
| 5.754 | 0.13 |
| 6.607 | 0.12 |
| 7.586 | 0.10 |
| 8.710 | 0.08 |
| 10.000 | 0.02 |
| 11.482 | |

| Size (?m) | Volume In % |
|---|---|
| 11.482 | 0.00 |
| 13.183 | 0.00 |
| 15.136 | 0.00 |
| 17.378 | 0.00 |
| 19.953 | 0.00 |
| 22.909 | 0.00 |
| 26.303 | 0.00 |
| 30.200 | 0.00 |
| 34.674 | 0.00 |
| 39.811 | 0.00 |
| 45.709 | 0.00 |
| 52.481 | 0.00 |
| 60.256 | 0.00 |
| 69.183 | 0.00 |
| 79.433 | 0.00 |
| 91.201 | 0.35 |
| 104.713 | 1.29 |
| 120.226 | |

| Size (?m) | Volume In % |
|---|---|
| 120.226 | 2.61 |
| 138.038 | 4.36 |
| 158.489 | 6.33 |
| 181.970 | 8.36 |
| 208.930 | 10.10 |
| 239.883 | 11.33 |
| 275.423 | 11.79 |
| 316.228 | 11.39 |
| 363.078 | 10.21 |
| 416.869 | 8.40 |
| 478.630 | 6.24 |
| 549.541 | 4.06 |
| 630.957 | 1.71 |
| 724.436 | 0.02 |
| 831.764 | 0.00 |
| 954.993 | 0.00 |
| 1096.478 | 0.00 |
| 1258.925 | |

| Size (?m) | Volume In % |
|---|---|
| 1258.925 | 0.00 |
| 1445.440 | 0.00 |
| 1659.587 | 0.00 |
| 1905.461 | 0.00 |
| 2187.762 | 0.00 |
| 2511.886 | 0.00 |
| 2884.032 | 0.00 |
| 3311.311 | 0.00 |
| 3801.894 | 0.00 |
| 4365.158 | 0.00 |
| 5011.872 | 0.00 |
| 5754.399 | 0.00 |
| 6606.934 | 0.00 |
| 7585.776 | 0.00 |
| 8709.636 | 0.00 |
| 10000.000 | |

**Operator notes:**

Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK

Mastersizer 2000 Ver. 5.22
Serial Number : MAL101513

File name: PSD.mea
Record Number: 9878

**ภาพที่ ผ2** ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดของของเสียประเภทซิลิกา

# ภาคผนวก ค

# การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซ็นซ์และ
# เฟสที่เกิดขึ้นด้วยวิธีเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

# รายงานผลการวิเคราะห์

ตัวอย่าง : ผง

เจ้าของตัวอย่าง : คุณณัฐพล เศรษฐโอฬาร

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัตถุประสงค์ : เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ

วิธีวิเคราะห์ : Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry

เครื่องมือวิเคราะห์ : X-ray fluorescence spectrometer, Philips model PW2400

ผู้วิเคราะห์ : นายสมบูรณ์ เหรียญภูมิการกิจ

วันที่วิเคราะห์ : 16 กุมภาพันธ์ 2554

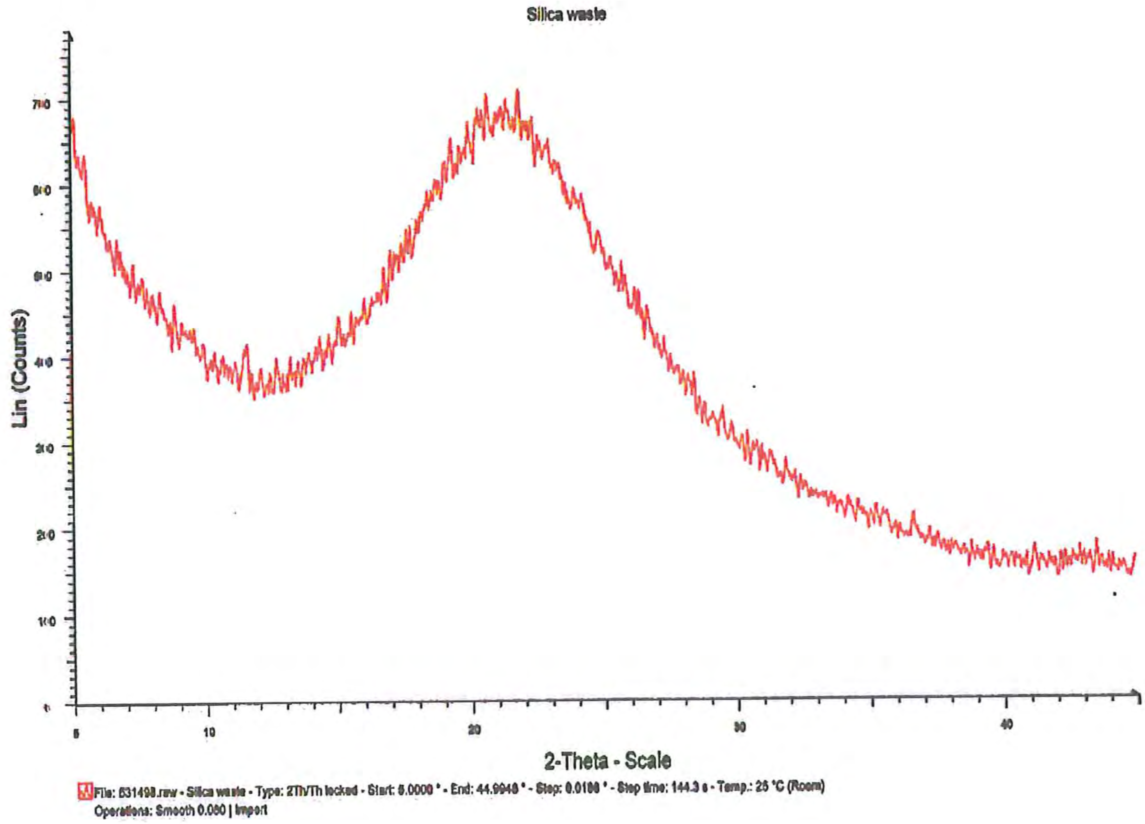
ผลการวิเคราะห์

| ตัวอย่าง | ปริมาณธาตุ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)* | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $Na_2O$ | MgO | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | $P_2O_5$ | $SO_3$ | Cl | $K_2O$ | CaO | $Cr_2O_3$ | $MnO_2$ | $Fe_2O_3$ | CuO | ZnO |
| Silica Fume | 0.17 | 0.35 | 0.30 | 88.99 | 0.57 | 0.43 | 0.06 | 3.58 | 2.47 | <0.01 | 0.04 | 0.37 | 0.01 | 0.02 |
| Silica Waste | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 73.99 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.02 | 0.03 | <0.01 | 0.08 | <0.01 | <0.01 |

* 1. ปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical formulas, "fundamental parameter calculations"

2. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้คำนวณค่าให้อยู่ในรูป oxide ของธาตุนั้นๆ

**ภาพที่ ผ3** ผลวิเคราะห์หาปริมาณปริธาตุของซิลิกาฟูมและของเสียประเภทซิลิกา




**Date** : 4/6/2010

**Sample** : Silica waste

**Instrument** : X-Ray Diffractometer ; Bruker AXS Model D8 Discover

**Condition** :

| | | |
|---|---|---|
| Target | Cu | |
| Voltage | 40 | kV |
| Current | 40 | mA |
| Angle | 5-45 | degree |
| Increment | 0.02 | degree/step |
| Scan speed | 0.3 | sec/step |
| Detecter | VÅNTEC-1 Detector | (Super Speed Detector) |

**Operator** : Manop Tirarattanasompot

**Memo** :

| Angle 2-Theta ° | d value Angstrom | Intensity Count | Intensity % % |
|---|---|---|---|
| 11.5883 | 7.6302 | 414 | 59.2 |
| 21.4592 | 4.1375 | 700 | 100.0 |

**ภาพที่ ผ4** กราฟเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชั่นของของเสียซิลิกา

# ภาคผนวก ง

# การทดสอบกำลังรับอัดของมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนต่างๆ

**ตารางที่ ผ1** แสดงกำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของเสียประเภทซิลิการ้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 260 | 25.2 | 3.297347 | 83.09 | 87.78±3.39 |
| | 2 | 264 | 27.0 | 3.297347 | 89.50 | |
| | 3 | 266 | 25.5 | 3.297347 | 84.41 | |
| | 4 | 262 | 27.3 | 3.297347 | 90.25 | |
| | 5 | 266 | 27.8 | 3.297347 | 91.67 | |
| 14 | 1 | 260 | 26.00 | 3.297347 | 85.73 | 89.42±6.24 |
| | 2 | 264 | 25.60 | 3.297347 | 84.41 | |
| | 3 | 266 | 30.50 | 3.297347 | 100.57 | |
| | 4 | 262 | 27.90 | 3.297347 | 92.00 | |
| | 5 | 266 | 25.60 | 3.297347 | 84.41 | |
| 28 | 1 | 260 | 40.39 | 3.297347 | 133.18 | 140.57±16.09 |
| | 2 | 264 | 37.25 | 3.297347 | 122.83 | |
| | 3 | 266 | 46.82 | 3.297347 | 154.38 | |
| | 4 | 262 | 49.90 | 3.297347 | 164.54 | |
| | 5 | 266 | 38.79 | 3.297347 | 127.90 | |
| 56 | 1 | 262 | 50.49 | 3.297347 | 166.48 | 175.72±20.13 |
| | 2 | 264 | 46.56 | 3.297347 | 153.52 | |
| | 3 | 266 | 58.53 | 3.297347 | 192.99 | |
| | 4 | 260 | 62.38 | 3.297347 | 205.69 | |
| | 5 | 260 | 48.49 | 3.297347 | 159.89 | |

**ตารางที่ ผ2** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของเสียประเภทซิลิการ้อยละ10 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 248 | 18.2 | 3.297347 | 60.01 | 62.58±5.79 |
| | 2 | 246 | 16.4 | 3.297347 | 54.08 | |
| | 3 | 246 | 21.1 | 3.297347 | 69.57 | |
| | 4 | 246 | 18.4 | 3.297347 | 60.67 | |
| | 5 | 246 | 20.8 | 3.297347 | 68.58 | |
| 14 | 1 | 246 | 28.3 | 3.297347 | 93.31 | 87.71±6.21 |
| | 2 | 250 | 27.6 | 3.297347 | 91.01 | |
| | 3 | 242 | 28.3 | 3.297347 | 93.31 | |
| | 4 | 248 | 25.2 | 3.297347 | 83.09 | |
| | 5 | 248 | 23.6 | 3.297347 | 77.82 | |
| 28 | 1 | 248 | 42.61 | 3.297347 | 140.50 | 147.60±8.25 |
| | 2 | 248 | 41.5 | 3.297347 | 136.84 | |
| | 3 | 252 | 47.85 | 3.297347 | 157.78 | |
| | 4 | 252 | 44.55 | 3.297347 | 146.90 | |
| | 5 | 250 | 47.3 | 3.297347 | 155.96 | |
| 56 | 1 | 250 | 58.80 | 3.297347 | 193.88 | 203.68±44.38 |
| | 2 | 248 | 57.27 | 3.297347 | 188.84 | |
| | 3 | 252 | 66.03 | 3.297347 | 217.72 | |
| | 4 | 248 | 61.48 | 3.297347 | 202.72 | |
| | 5 | 250 | 65.27 | 3.297347 | 215.22 | |

**ตารางที่ ผ3** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของเสียประเภทซิลิการ้อยละ15 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 258 | 15.5 | 3.297347 | 51.11 | 56.32±5.27 |
| | 2 | 262 | 19.6 | 3.297347 | 64.63 | |
| | 3 | 260 | 18.3 | 3.297347 | 60.34 | |
| | 4 | 264 | 16.2 | 3.297347 | 53.42 | |
| | 5 | 262 | 15.8 | 3.297347 | 52.10 | |
| 14 | 1 | 258 | 28.3 | 3.297347 | 93.31 | 80.06±9.85 |
| | 2 | 262 | 22.5 | 3.297347 | 74.19 | |
| | 3 | 260 | 21.4 | 3.297347 | 70.56 | |
| | 4 | 264 | 27.5 | 3.297347 | 90.68 | |
| | 5 | 262 | 21.7 | 3.297347 | 71.55 | |
| 28 | 1 | 258 | 35.2 | 3.297347 | 116.07 | 140.40±30.03 |
| | 2 | 262 | 42.3 | 3.297347 | 139.48 | |
| | 3 | 260 | 34.8 | 3.297347 | 114.75 | |
| | 4 | 264 | 59.8 | 3.297347 | 197.18 | |
| | 5 | 262 | 40.8 | 3.297347 | 134.53 | |
| 56 | 1 | 264 | 44 | 3.297347 | 145.08 | 175.50±37.54 |
| | 2 | 262 | 52.88 | 3.297347 | 174.36 | |
| | 3 | 260 | 43.5 | 3.297347 | 143.43 | |
| | 4 | 258 | 74.75 | 3.297347 | 246.48 | |
| | 5 | 262 | 51 | 3.297347 | 168.16 | |

**ตารางที่ ผ4** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของเสียประเภทซิลิการ้อยละ20 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 266 | 29.2 | 3.297347 | 96.28 | 70.96±15.50 |
| | 2 | 260 | 20.5 | 3.297347 | 67.60 | |
| | 3 | 266 | 14.7 | 3.297347 | 48.47 | |
| | 4 | 266 | 20.2 | 3.297347 | 66.61 | |
| | 5 | 268 | 23 | 3.297347 | 75.84 | |
| 14 | 1 | 266 | 38.9 | 3.297347 | 128.27 | 92.62±21.21 |
| | 2 | 260 | 31.6 | 3.297347 | 104.20 | |
| | 3 | 266 | 24.2 | 3.297347 | 79.80 | |
| | 4 | 266 | 20.85 | 3.297347 | 68.75 | |
| | 5 | 268 | 24.9 | 3.297347 | 82.10 | |
| 28 | 1 | 266 | 48.9 | 3.297347 | 161.24 | 126.29±21.21 |
| | 2 | 260 | 31.6 | 3.297347 | 104.20 | |
| | 3 | 266 | 33.3 | 3.297347 | 109.80 | |
| | 4 | 266 | 39.5 | 3.297347 | 130.25 | |
| | 5 | 268 | 38.2 | 3.297347 | 125.96 | |
| 56 | 1 | 266 | 67.97 | 3.297347 | 224.12 | 175.54±27.78 |
| | 2 | 264 | 43.92 | 3.297347 | 144.82 | |
| | 3 | 266 | 46.29 | 3.297347 | 152.63 | |
| | 4 | 262 | 54.91 | 3.297347 | 181.06 | |
| | 5 | 266 | 53.1 | 3.297347 | 175.09 | |

**ตารางที่ ผ5** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 262 | 30.1 | 3.297347 | 99.25 | 125.11±18.22 |
| | 2 | 266 | 36.5 | 3.297347 | 120.35 | |
| | 3 | 268 | 43.2 | 3.297347 | 142.45 | |
| | 4 | 264 | 45.12 | 3.297347 | 148.78 | |
| | 5 | 262 | 34.8 | 3.297347 | 114.75 | |
| 14 | 1 | 262 | 29.3 | 3.297347 | 96.61 | 127.44±27.16 |
| | 2 | 266 | 39.5 | 3.297347 | 96.61 | |
| | 3 | 268 | 49.05 | 3.297347 | 130.25 | |
| | 4 | 264 | 46.1 | 3.297347 | 161.73 | |
| | 5 | 262 | 34.8 | 3.297347 | 152.01 | |
| 28 | 1 | 262 | 70.25 | 3.297347 | 231.64 | 201.04±16.72 |
| | 2 | 266 | 58.2 | 3.297347 | 191.91 | |
| | 3 | 268 | 62.5 | 3.297347 | 206.08 | |
| | 4 | 264 | 57.1 | 3.297347 | 188.28 | |
| | 5 | 262 | 56.8 | 3.297347 | 187.29 | |
| 56 | 1 | 262 | 75.17 | 3.297347 | 247.86 | 215.12±17.89 |
| | 2 | 268 | 62.27 | 3.297347 | 205.33 | |
| | 3 | 268 | 66.88 | 3.297347 | 220.53 | |
| | 4 | 262 | 61.1 | 3.297347 | 201.47 | |
| | 5 | 264 | 60.78 | 3.297347 | 200.41 | |

**ตารางที่ ผ6** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของซิลิกาฟูมร้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 246 | 36.9 | 3.297347 | 121.67 | 135.72±11.02 |
| | 2 | 244 | 46.2 | 3.297347 | 152.34 | |
| | 3 | 252 | 41.2 | 3.297347 | 135.85 | |
| | 4 | 252 | 38.3 | 3.297347 | 126.29 | |
| | 5 | 252 | 43.2 | 3.297347 | 142.45 | |
| 14 | 1 | 254 | 59 | 3.297347 | 194.54 | 178.98±20.25 |
| | 2 | 254 | 52.3 | 3.297347 | 172.45 | |
| | 3 | 250 | 43.2 | 3.297347 | 142.45 | |
| | 4 | 250 | 60 | 3.297347 | 197.84 | |
| | 5 | 250 | 56.9 | 3.297347 | 187.62 | |
| 28 | 1 | 250 | 59.1 | 3.297347 | 194.87 | 221.25±15.77 |
| | 2 | 250 | 64.2 | 3.297347 | 211.69 | |
| | 3 | 252 | 71.2 | 3.297347 | 234.77 | |
| | 4 | 252 | 69.5 | 3.297347 | 229.17 | |
| | 5 | 252 | 71.5 | 3.297347 | 235.76 | |
| 56 | 1 | 250 | 65.6 | 3.297347 | 216.31 | 241.00±15.58 |
| | 2 | 252 | 71.26 | 3.297347 | 234.97 | |
| | 3 | 250 | 79.03 | 3.297347 | 260.59 | |
| | 4 | 252 | 77.15 | 3.297347 | 254.39 | |
| | 5 | 252 | 79.37 | 3.297347 | 238.76 | |

**ตารางที่ ผ**7 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของซิลิกาฟูมร้อยละ 15 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 266 | 32.35 | 3.297347 | 106.67 | 118.61±8.29 |
| | 2 | 264 | 35.4 | 3.297347 | 116.73 | |
| | 3 | 258 | 34.5 | 3.297347 | 113.76 | |
| | 4 | 262 | 38.9 | 3.297347 | 128.27 | |
| | 5 | 260 | 38.7 | 3.297347 | 127.61 | |
| 14 | 1 | 266 | 36.3 | 3.297347 | 119.69 | 121.28±19.97 |
| | 2 | 264 | 29.1 | 3.297347 | 95.95 | |
| | 3 | 258 | 40.8 | 3.297347 | 134.53 | |
| | 4 | 262 | 45.9 | 3.297347 | 151.35 | |
| | 5 | 260 | 31.8 | 3.297347 | 104.86 | |
| 28 | 1 | 266 | 62.3 | 3.297347 | 205.42 | 193.22±10.22 |
| | 2 | 264 | 53.2 | 3.297347 | 175.42 | |
| | 3 | 258 | 59.8 | 3.297347 | 197.18 | |
| | 4 | 262 | 60.2 | 3.297347 | 198.50 | |
| | 5 | 260 | 57.5 | 3.297347 | 189.60 | |
| 56 | 1 | 262 | 68.53 | 3.297347 | 225.97 | 212.55±11.25 |
| | 2 | 264 | 58.52 | 3.297347 | 192.96 | |
| | 3 | 260 | 65.78 | 3.297347 | 216.90 | |
| | 4 | 262 | 66.22 | 3.297347 | 218.35 | |
| | 5 | 260 | 63.25 | 3.297347 | 208.56 | |

**ตารางที่ ผ8** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของซิลิกาฟูมร้อยละ 20 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 39.8 | 3.297347 | 131.23 | 39.8 | 101.10±30.32 |
| | 2 | 20.6 | 3.297347 | 67.93 | 20.6 | |
| | 3 | 18.6 | 3.297347 | 61.33 | 18.6 | |
| | 4 | 35.1 | 3.297347 | 115.74 | 35.1 | |
| | 5 | 39.2 | 3.297347 | 129.26 | 39.2 | |
| 14 | 1 | 266 | 39.5 | 3.297347 | 130.25 | 108.68±12.19 |
| | 2 | 260 | 29.6 | 3.297347 | 97.60 | |
| | 3 | 266 | 33.3 | 3.297347 | 109.80 | |
| | 4 | 266 | 33.2 | 3.297347 | 109.47 | |
| | 5 | 268 | 29.2 | 3.297347 | 96.28 | |
| 28 | 1 | 266 | 61.5 | 3.297347 | 202.79 | 154.59±25.53 |
| | 2 | 260 | 41.6 | 3.297347 | 137.17 | |
| | 3 | 266 | 39.6 | 3.297347 | 130.57 | |
| | 4 | 266 | 44.62 | 3.297347 | 147.13 | |
| | 5 | 268 | 47.1 | 3.297347 | 155.31 | |
| 56 | 1 | 264 | 73.8 | 3.297347 | 243.34 | 197.98±39.78 |
| | 2 | 268 | 49.92 | 3.297347 | 164.60 | |
| | 3 | 266 | 47.52 | 3.297347 | 156.69 | |
| | 4 | 266 | 53.54 | 3.297347 | 176.54 | |
| | 5 | 266 | 75.43 | 3.297347 | 248.72 | |

**ตารางที่ ผ9** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ควบคุมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (ของเสียซิลิกาและซิลิกาฟูมร้อยละ 5)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 258 | 54.9 | 3.297347 | 181.02 | 175.35±6.35 |
| | 2 | 262 | 52.9 | 3.297347 | 174.43 | |
| | 3 | 260 | 49.6 | 3.297347 | 163.55 | |
| | 4 | 260 | 54.7 | 3.297347 | 180.36 | |
| | 5 | 256 | 53.8 | 3.297347 | 177.40 | |
| 14 | 1 | 258 | 59.9 | 3.297347 | 197.51 | 187.49±13.38 |
| | 2 | 262 | 55.6 | 3.297347 | 183.33 | |
| | 3 | 260 | 60.6 | 3.297347 | 199.82 | |
| | 4 | 260 | 58.7 | 3.297347 | 193.55 | |
| | 5 | 256 | 49.5 | 3.297347 | 163.22 | |
| 28 | 1 | 258 | 73.1 | 3.297347 | 241.04 | 225.41±19.75 |
| | 2 | 262 | 65.6 | 3.297347 | 216.31 | |
| | 3 | 260 | 58.6 | 3.297347 | 193.22 | |
| | 4 | 260 | 75.7 | 3.297347 | 249.61 | |
| | 5 | 256 | 68.8 | 3.297347 | 226.86 | |
| 56 | 1 | 258 | 73.83 | 3.297347 | 243.44 | 227.61±20.04 |
| | 2 | 266 | 66.26 | 3.297347 | 218.48 | |
| | 3 | 266 | 59.1 | 3.297347 | 194.87 | |
| | 4 | 264 | 76.46 | 3.297347 | 252.12 | |
| | 5 | 260 | 69.49 | 3.297347 | 229.13 | |

**ตารางที่ ผ10** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ควบคุมของปูนซีเมนต์ประเภทที่1 โดยน้ำหนักด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (ของเสียซิลิกาและซิลิกาฟูมร้อยละ 10)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 258 | 56.2 | 3.297347 | 185.31 | 175.16±13.58 |
| | 2 | 262 | 49.5 | 3.297347 | 163.22 | |
| | 3 | 260 | 50.7 | 3.297347 | 167.18 | |
| | 4 | 260 | 59.7 | 3.297347 | 196.85 | |
| | 5 | 256 | 49.5 | 3.297347 | 163.22 | |
| 14 | 1 | 260 | 59.3 | 3.297347 | 195.53 | 187.22±11.33 |
| | 2 | 264 | 61.3 | 3.297347 | 202.13 | |
| | 3 | 258 | 51.3 | 3.297347 | 169.15 | |
| | 4 | 258 | 55.3 | 3.297347 | 182.34 | |
| | 5 | 256 | 56.7 | 3.297347 | 186.96 | |
| 28 | 1 | 264 | 60.5 | 3.297347 | 199.49 | 225.27±17.98 |
| | 2 | 262 | 70.7 | 3.297347 | 233.12 | |
| | 3 | 262 | 75.4 | 3.297347 | 248.62 | |
| | 4 | 262 | 71.4 | 3.297347 | 235.43 | |
| | 5 | 260 | 63.6 | 3.297347 | 209.71 | |
| 56 | 1 | 260 | 61.71 | 3.297347 | 203.48 | 229.78±18.34 |
| | 2 | 262 | 72.11 | 3.297347 | 237.77 | |
| | 3 | 260 | 76.91 | 3.297347 | 253.60 | |
| | 4 | 262 | 72.83 | 3.297347 | 240.15 | |
| | 5 | 264 | 64.87 | 3.297347 | 213.90 | |

**ตารางที่ ผ11** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ควบคุมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (ของเสียซิลิกาและซิลิกาฟูมร้อยละ 15)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 260 | 56.37 | 3.297347 | 185.87 | 176.32±7.38 |
| | 2 | 262 | 53.1 | 3.297347 | 175.09 | |
| | 3 | 260 | 54.7 | 3.297347 | 180.36 | |
| | 4 | 258 | 49.6 | 3.297347 | 163.55 | |
| | 5 | 256 | 53.6 | 3.297347 | 176.74 | |
| 14 | 1 | 258 | 59.9 | 3.297347 | 197.51 | 187.49±13.38 |
| | 2 | 262 | 55.6 | 3.297347 | 183.33 | |
| | 3 | 260 | 60.6 | 3.297347 | 199.82 | |
| | 4 | 260 | 58.7 | 3.297347 | 193.55 | |
| | 5 | 256 | 49.5 | 3.297347 | 163.22 | |
| 28 | 1 | 258 | 73.1 | 3.297347 | 241.04 | 225.41±19.75 |
| | 2 | 262 | 65.6 | 3.297347 | 216.31 | |
| | 3 | 260 | 58.6 | 3.297347 | 193.22 | |
| | 4 | 260 | 75.7 | 3.297347 | 249.61 | |
| | 5 | 256 | 68.8 | 3.297347 | 226.86 | |
| 56 | 1 | 258 | 73.54 | 3.297347 | 242.49 | 226.75±19.87 |
| | 2 | 266 | 65.99 | 3.297347 | 217.59 | |
| | 3 | 266 | 58.95 | 3.297347 | 194.38 | |
| | 4 | 264 | 76.15 | 3.297347 | 251.09 | |
| | 5 | 260 | 69.21 | 3.297347 | 228.21 | |

**ตารางที่ ผ12** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ควบคุมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (ของเสียซิลิกาและซิลิกาฟูมร้อยละ 20)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 260 | 53.5 | 3.297347 | 176.41 | 173.67±6.33 |
| | 2 | 262 | 51.9 | 3.297347 | 171.13 | |
| | 3 | 258 | 49.45 | 3.297347 | 163.05 | |
| | 4 | 260 | 55.2 | 3.297347 | 182.01 | |
| | 5 | 256 | 53.3 | 3.297347 | 175.75 | |
| 14 | 1 | 258 | 59.9 | 3.297347 | 197.51 | 187.49±13.4 |
| | 2 | 262 | 55.6 | 3.297347 | 183.33 | |
| | 3 | 260 | 60.6 | 3.297347 | 199.82 | |
| | 4 | 260 | 58.7 | 3.297347 | 193.55 | |
| | 5 | 256 | 49.5 | 3.297347 | 163.22 | |
| 28 | 1 | 258 | 73.1 | 3.297347 | 241.04 | 225.41±19.75 |
| | 2 | 262 | 65.6 | 3.297347 | 216.31 | |
| | 3 | 260 | 58.6 | 3.297347 | 193.22 | |
| | 4 | 260 | 75.7 | 3.297347 | 249.61 | |
| | 5 | 256 | 68.8 | 3.297347 | 226.86 | |
| 56 | 1 | 260 | 74.2 | 3.297347 | 244.66 | 228.79±20.05 |
| | 2 | 262 | 66.58 | 3.297347 | 219.54 | |
| | 3 | 260 | 59.48 | 3.297347 | 196.13 | |
| | 4 | 262 | 76.84 | 3.297347 | 253.37 | |
| | 5 | 258 | 69.83 | 3.297347 | 230.25 | |

# ภาคผนวก จ

# ข้อมูลผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ อัตราส่วนที่เหมาะสมร้อยละ 10

**ตารางที่ ผ13** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของเสียประเภทซิลิการ้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (อัตราส่วนที่เหมาะสม)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 248 | 17 | 3.297347 | 56.05* | 60.18±3.47 |
| | 2 | 246 | 15.4 | 3.297347 | 50.78* | |
| | 3 | 246 | 21.1 | 3.297347 | 69.57* | |
| | 4 | 246 | 18.4 | 3.297347 | 60.67 | |
| | 5 | 246 | 19.9 | 3.297347 | 65.62 | |
| | 6 | 250 | 22.4 | 3.297347 | 73.86* | |
| | 7 | 246 | 17.5 | 3.297347 | 57.70 | |
| | 8 | 248 | 16.6 | 3.297347 | 54.74* | |
| | 9 | 248 | 17.2 | 3.297347 | 56.71 | |
| | 10 | 248 | 24.1 | 3.297347 | 79.47* | |
| 14 | 1 | 246 | 28.1 | 3.297347 | 92.66 | 88.26±3.93 |
| | 2 | 250 | 27.6 | 3.297347 | 91.01 | |
| | 3 | 242 | 28 | 3.297347 | 92.33 | |
| | 4 | 248 | 25 | 3.297347 | 82.43 | |
| | 5 | 248 | 22.6 | 3.297347 | 74.52* | |
| | 6 | 250 | 25.8 | 3.297347 | 85.07 | |
| | 7 | 246 | 23.5 | 3.297347 | 77.49* | |
| | 8 | 254 | 26.1 | 3.297347 | 86.06 | |
| | 9 | 252 | 20.8 | 3.297347 | 68.58* | |
| | 10 | 246 | 39.1 | 3.297347 | 128.93* | |

หมายเหตุ *กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบนเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (10 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

**ตารางที่ ผ13(ต่อ)** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของเสียประเภทซิลิการ้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (อัตราส่วนที่เหมาะสม)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 28 | 1 | 248 | 43.61 | 3.297347 | 143.80 | 147.66±8.69 |
| | 2 | 248 | 42.41 | 3.297347 | 139.84 | |
| | 3 | 252 | 47.85 | 3.297347 | 157.78 | |
| | 4 | 252 | 44.55 | 3.297347 | 146.90 | |
| | 5 | 250 | 47.19 | 3.297347 | 155.60 | |
| | 6 | 254 | 48.23 | 3.297347 | 159.03 | |
| | 7 | 254 | 46.5 | 3.297347 | 153.33 | |
| | 8 | 248 | 41.18 | 3.297347 | 135.78 | |
| | 9 | 250 | 45.8 | 3.297347 | 151.02 | |
| | 10 | 248 | 40.5 | 3.297347 | 133.54 | |
| 56 | 1 | 258 | 72.3 | 3.297347 | 238.4* | 186.22±13.51 |
| | 2 | 256 | 75.6 | 3.297347 | 249.28* | |
| | 3 | 258 | 83.1 | 3.297347 | 274.01* | |
| | 4 | 254 | 51.1 | 3.297347 | 168.49 | |
| | 5 | 254 | 66 | 3.297347 | 217.62* | |
| | 6 | 260 | 54 | 3.297347 | 178.06 | |
| | 7 | 256 | 32.8 | 3.297347 | 108.15* | |
| | 8 | 256 | 66.2 | 3.297347 | 218.28* | |
| | 9 | 258 | 59.6 | 3.297347 | 196.52 | |
| | 10 | 254 | 61.2 | 3.297347 | 201.8 | |

<u>หมายเหตุ</u> *กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบนเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (10 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

**ตารางที่ ผ.13 (ต่อ)**แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของเสียประเภทซิลิการ้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 56 และ 90 วัน (อัตราส่วนที่เหมาะสม)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 90 | 1 | 260 | 76.9 | 3.297347 | 253.57 | 239.62±11.79 |
| | 2 | 254 | 76.2 | 3.297347 | 251.26 | |
| | 3 | 258 | 72 | 3.297347 | 237.41 | |
| | 4 | 260 | 70.1 | 3.297347 | 231.14 | |
| | 5 | 254 | 71.2 | 3.297347 | 234.77 | |
| | 6 | 252 | 66.2 | 3.297347 | 218.28 | |
| | 7 | 258 | 74.2 | 3.297347 | 244.66 | |
| | 8 | 254 | 68.1 | 3.297347 | 224.55 | |
| | 9 | 258 | 77 | 3.297347 | 253.90 | |
| | 10 | 252 | 74.8 | 3.297347 | 246.64 | |

<u>หมายเหตุ</u> *กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบนเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (10 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

**ตารางที่ ผ14** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ของซิลิกาฟูมร้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (อัตราส่วนที่เหมาะสม)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 246 | 35.4 | 3.297347 | 116.73* | 136.62±6.59 |
| | 2 | 244 | 46.2 | 3.297347 | 152.34* | |
| | 3 | 252 | 41.2 | 3.297347 | 135.85 | |
| | 4 | 252 | 38.3 | 3.297347 | 126.29 | |
| | 5 | 252 | 40.7 | 3.297347 | 134.20 | |
| | 6 | 254 | 45.1 | 3.297347 | 148.71 | |
| | 7 | 250 | 47.1 | 3.297347 | 155.31* | |
| | 8 | 246 | 41.8 | 3.297347 | 137.83 | |
| | 9 | 252 | 41.5 | 3.297347 | 136.84 | |
| | 10 | 250 | 34.3 | 3.297347 | 113.10* | |
| 14 | 1 | 254 | 59 | 3.297347 | 194.54 | 184.98±10.16 |
| | 2 | 254 | 52.3 | 3.297347 | 172.45 | |
| | 3 | 250 | 43.2 | 3.297347 | 142.45* | |
| | 4 | 250 | 60 | 3.297347 | 197.84* | |
| | 5 | 250 | 56.9 | 3.297347 | 187.62 | |
| | 6 | 244 | 61.5 | 3.297347 | 202.79 | |
| | 7 | 248 | 53.1 | 3.297347 | 175.09 | |
| | 8 | 250 | 46.7 | 3.297347 | 153.99* | |
| | 9 | 252 | 53.9 | 3.297347 | 177.73 | |
| | 10 | 258 | 56 | 3.297347 | 184.65 | |

หมายเหตุ *กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบนเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (10 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

**ตารางที่ ผ14(ต่อ)** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ซิลิกาฟูมร้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (อัตราส่วนที่เหมาะสม)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 28 | 1 | 250 | 69.1 | 3.297347 | 227.85 | 221.45±11.85 |
| | 2 | 250 | 68.8 | 3.297347 | 226.86 | |
| | 3 | 252 | 72.5 | 3.297347 | 239.06 | |
| | 4 | 252 | 67.5 | 3.297347 | 222.57 | |
| | 5 | 252 | 71.5 | 3.297347 | 235.76 | |
| | 6 | 254 | 65.5 | 3.297347 | 215.98 | |
| | 7 | 254 | 62 | 3.297347 | 204.44 | |
| | 8 | 250 | 62.4 | 3.297347 | 205.75 | |
| | 9 | 256 | 69.4 | 3.297347 | 228.84 | |
| | 10 | 254 | 62.9 | 3.297347 | 207.40 | |
| 56 | 1 | 258 | 56.2 | 3.297347 | 185.31* | 239.31±9.01 |
| | 2 | 254 | 75.18 | 3.297347 | 247.89 | |
| | 3 | 258 | 58.04 | 3.297347 | 191.38* | |
| | 4 | 254 | 69.64 | 3.297347 | 229.63 | |
| | 5 | 254 | 75.43 | 3.297347 | 248.72 | |
| | 6 | 260 | 82.49 | 3.297347 | 272* | |
| | 7 | 256 | 83.08 | 3.297347 | 273.94* | |
| | 8 | 256 | 81.56 | 3.297347 | 268.93* | |
| | 9 | 248 | 81.56 | 3.297347 | 268.93* | |
| | 10 | 254 | 70.06 | 3.297347 | 231.01 | |

หมายเหตุ *กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบนเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (10 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

**ตารางที่ ผ14 (ต่อ)**แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ซิลิกาฟูมร้อยละ 10 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 56 และ 90 วัน (อัตราส่วนที่เหมาะสม)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 90 | 1 | 250 | 83.1 | 3.297347 | 274.01 | 262.70±15.94 |
| | 2 | 256 | 85.1 | 3.297347 | 280.60 | |
| | 3 | 254 | 78 | 3.297347 | 257.19 | |
| | 4 | 256 | 85.4 | 3.297347 | 281.59 | |
| | 5 | 256 | 84.7 | 3.297347 | 279.29 | |
| | 6 | 254 | 72 | 3.297347 | 237.41 | |
| | 7 | 258 | 77.3 | 3.297347 | 254.88 | |
| | 8 | 252 | 73.1 | 3.297347 | 241.04 | |
| | 9 | 254 | 82.4 | 3.297347 | 271.70 | |
| | 10 | 260 | 75.6 | 3.297347 | 249.28 | |

หมายเหตุ *กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบนเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (10 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

**ตารางที่ ผ15** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (อัตราส่วนที่เหมาะสม)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1 | 258 | 54.9 | 3.297347 | 181.02 | 178.02±10.99 |
| | 2 | 262 | 45.6 | 3.297347 | 150.36* | |
| | 3 | 260 | 48.6 | 3.297347 | 160.25 | |
| | 4 | 260 | 56.7 | 3.297347 | 186.96 | |
| | 5 | 256 | 48.8 | 3.297347 | 160.91 | |
| | 6 | 260 | 54.3 | 3.297347 | 179.05 | |
| | 7 | 258 | 56.7 | 3.297347 | 186.96 | |
| | 8 | 258 | 57.7 | 3.297347 | 190.26 | |
| | 9 | 264 | 51.4 | 3.297347 | 169.48 | |
| | 10 | 258 | 56.8 | 3.297347 | 187.29 | |
| 14 | 1 | 260 | 64.3 | 3.297347 | 212.02* | 207.57±19.62 |
| | 2 | 264 | 78.6 | 3.297347 | 259.17* | |
| | 3 | 258 | 42.1 | 3.297347 | 138.82* | |
| | 4 | 258 | 60.8 | 3.297347 | 200.48 | |
| | 5 | 256 | 61.7 | 3.297347 | 203.45 | |
| | 6 | 260 | 48.1 | 3.297347 | 158.60* | |
| | 7 | 260 | 48.9 | 3.297347 | 161.24* | |
| | 8 | 260 | 34.8 | 3.297347 | 114.75* | |
| | 9 | 262 | 56.6 | 3.297347 | 186.63 | |
| | 10 | 262 | 72.7 | 3.297347 | 239.72 | |

หมายเหตุ *กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบนเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (10 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

**ตารางที่ ผ15(ต่อ)** แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน (อัตราส่วนที่เหมาะสม)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 28 | 1 | 250 | 69.1 | 3.297347 | 227.85 | 221.45±11.85 |
| | 2 | 250 | 68.8 | 3.297347 | 226.86 | |
| | 3 | 252 | 72.5 | 3.297347 | 239.06 | |
| | 4 | 252 | 67.5 | 3.297347 | 222.57 | |
| | 5 | 252 | 71.5 | 3.297347 | 235.76 | |
| | 6 | 254 | 65.5 | 3.297347 | 215.98 | |
| | 7 | 254 | 62 | 3.297347 | 204.44 | |
| | 8 | 250 | 62.4 | 3.297347 | 205.75 | |
| | 9 | 256 | 69.4 | 3.297347 | 228.84 | |
| | 10 | 254 | 62.9 | 3.297347 | 207.40 | |
| 56 | 1 | 258 | 56.2 | 3.297347 | 185.31* | 239.31 ±9.01 |
| | 2 | 254 | 75.18 | 3.297347 | 247.89 | |
| | 3 | 258 | 58.04 | 3.297347 | 191.38* | |
| | 4 | 254 | 69.64 | 3.297347 | 229.63 | |
| | 5 | 254 | 75.43 | 3.297347 | 248.72 | |
| | 6 | 260 | 82.49 | 3.297347 | 272* | |
| | 7 | 256 | 83.08 | 3.297347 | 273.94* | |
| | 8 | 256 | 81.56 | 3.297347 | 268.93* | |
| | 9 | 248 | 81.56 | 3.297347 | 268.93* | |
| | 10 | 254 | 70.06 | 3.297347 | 231.01 | |

<u>หมายเหตุ</u> *กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบนเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (10 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

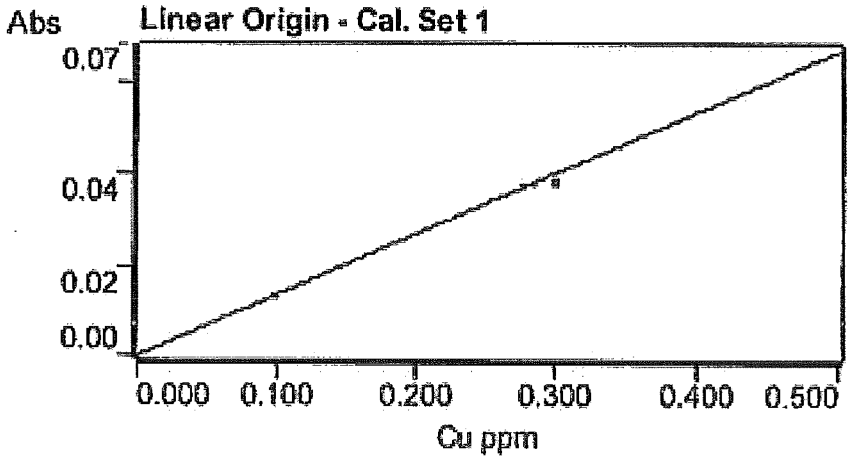
**ตารางที่ ผ.15 (ต่อ)**แสดงค่ากำลังรับแรงอัดด้วยอัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยน้ำหนัก ด้วยส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานคงที่ที่ 0.40 ด้วยระยะเวลาบ่ม 7 14 28 56 และ 90 วัน (อัตราส่วนที่เหมาะสม)

| ระยะเวลาบ่ม (วัน) | ตัวอย่าง | น้ำหนักมอร์ต้าร์ (กรัม) | น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน) | Calibration Factor | ค่ากำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.) | เฉลี่ย |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 90 | 1 | 264 | 82.1 | 3.297347 | 270.93* | 225.06±13.75 |
| | 2 | 262 | 83.9 | 3.297347 | 276.94* | |
| | 3 | 264 | 52.2 | 3.297347 | 172.39* | |
| | 4 | 262 | 61.0 | 3.297347 | 201.17* | |
| | 5 | 264 | 66.8 | 3.297347 | 220.44 | |
| | 6 | 268 | 69.4 | 3.297347 | 229.15 | |
| | 7 | 268 | 63.9 | 3.297347 | 210.94 | |
| | 8 | 264 | 71.3 | 3.297347 | 235.22 | |
| | 9 | 268 | 74.9 | 3.297347 | 247.10 | |
| | 10 | 266 | 62.9 | 3.297347 | 207.50 | |

<u>หมายเหตุ</u> *กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบนเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (10 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

# ภาคผนวก ฉ
# ข้อมูลผลการวิเคราะห์โลหะหนัก

ตารางที่ ผ16 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักทองแดงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโตรมิเตอร์



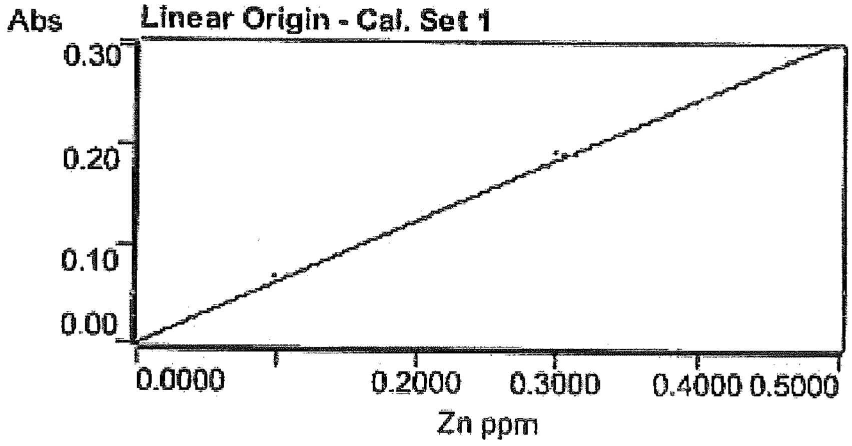

Calibration data for Cu

| Standard ID | Mean Absorbance | Entered Concentration (mg/l) | Calculated Concentration (mg/l) | % RSD |
|---|---|---|---|---|
| Blank | -0.0005 | - | -0.003 | 27.4 |
| Standard 1 | 0.0129 | 0.1 | 0.096 | 2.0 |
| Standard 2 | 0.0378 | 0.3 | 0.282 | 2.7 |
| Standard 3 | 0.0683 | 0.5 | 0.511 | 0.6 |
| Correlation Coefficient : 0.9985 | Slope : 0.13369 | | | |
| SpectrAA Report. | | | | 09:56 10/2/2011 |

| Sample | Absorbance | Concentration (mg/l) | % RSD |
|---|---|---|---|
| ซิลิกาฟูม | 0.0163 | **0.122** | 1.4 |
| มอร์ต้าร์ซิลิกาฟูม | 0.0112 | **0.084** | 3.5 |
| ของเสียซิลิกา | 0.0020 | **0.015** | 10.1 |
| มอร์ต้าร์ของเสียซิลิกา | 0.0118 | **0.088** | 2.8 |

**ภาพที่ ผ5** ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วของของเสียประเภทซิลิกา

ตารางที่ ผ17 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักสังกะสีด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโตรมิเตอร์

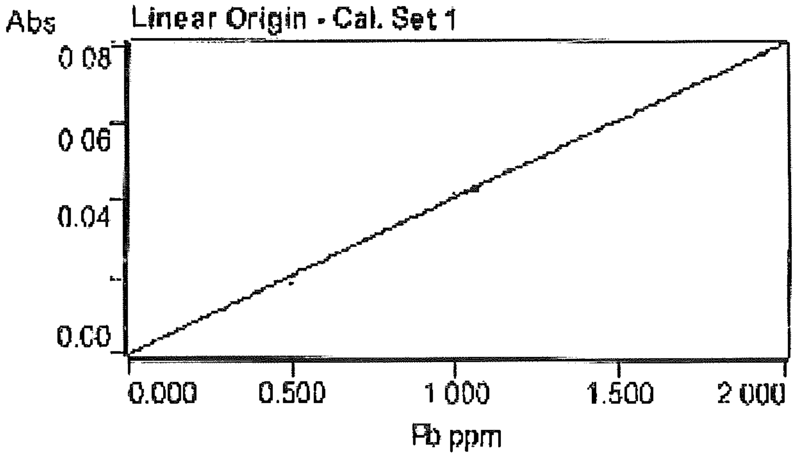



Calibration data for Zn

| Standard ID | Mean Absorbance | Entered Concentration (mg/l) | Calculated Concentration (mg/l) | % RSD |
|---|---|---|---|---|
| Blank | 0.0000 | - | 0.0000 | >100 |
| Standard 1 | 0.0662 | 0.1 | 0.1072 | 0.3 |
| Standard 2 | 0.1912 | 0.3 | 0.3095 | 0.4 |
| Standard 3 | 0.3450 | 0.5 | 0.4929 | 0.2 |
| Correlation Coefficient : 0.9993 | Slope : 0.6178 | | | |
| SpectrAA Report. | | | | 10:52 9/2/2011 |

| Sample | Absorbance | Concentration (mg/l) | % RSD |
|---|---|---|---|
| ซิลิกาฟูม | 0.2872 | 0.3103 | 0.1 |
| มอร์ต้าร์ซิลิกาฟูม | 0.2232 | 0.3614 | 0.2 |
| ของเสียซิลิกา | 0.1255 | 0.2031 | 0.3 |
| มอร์ต้าร์ของเสียซิลิกา | 0.1917 | 0.4649 | 0.7 |

ตารางที่ ผ18 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโตรมิเตอร์

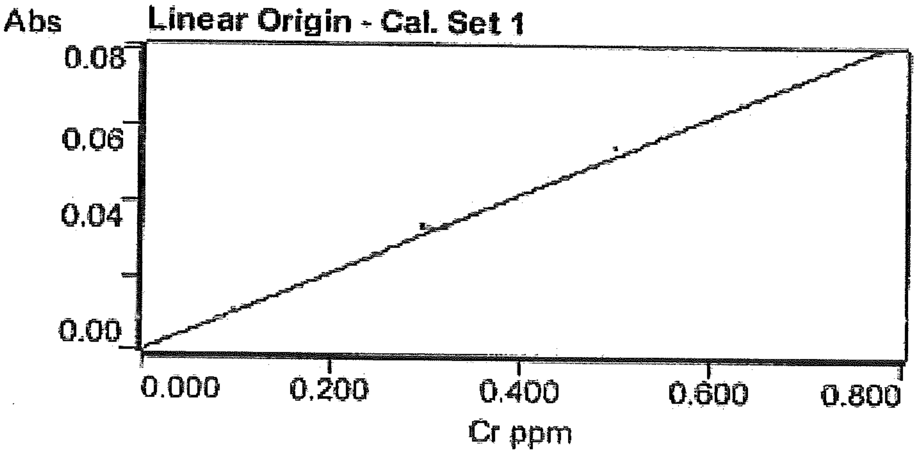



Calibration data for Pb

| Standard ID | Mean Absorbance | Entered Concentration (mg/l) | Calculated Concentration (mg/l) | % RSD |
|---|---|---|---|---|
| Blank | 0.0015 | - | 0.038 | 1.3 |
| Standard 1 | 0.0178 | 0.5 | 0.440 | 0.9 |
| Standard 2 | 0.0414 | 1.0 | 1.022 | 1.1 |
| Standard 3 | 0.0813 | 2.0 | 2.004 | 0.3 |
| Correlation Coefficient : 0.9991 | Slope : 0.04055 | | | |
| SpectrAA Report. | | | | 14:04 10/2/2011 |

| Sample | Absorbance | Concentration (mg/l) | % RSD |
|---|---|---|---|
| ซิลิกาฟูม | 0.0061 | 0.149 | 2.6 |
| มอร์ต้าร์ซิลิกาฟูม | 0.0011 | 0.027 | 23.2 |
| ของเสียซิลิกา | -0.0011 | <0.001 | 6.7 |
| มอร์ต้าร์ของเสียซิลิกา | 0.0011 | 0.026 | 17.6 |

ตารางที่ ผ19 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักโครเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโตรมิเตอร์




Calibration data for Cr

| Standard ID | Mean Absorbance | Entered Concentration (mg/l) | Calculated Concentration (mg/l) | % RSD |
|---|---|---|---|---|
| Blank | 0.0000 | - | 0.000 | >100 |
| Standard 1 | 0.0106 | 0.1 | 0.101 | 1.3 |
| Standard 2 | 0.0334 | 0.3 | 0.318 | 0.4 |
| Standard 3 | 0.0547 | 0.5 | 0.522 | 0.2 |
| Standard 4 | 0.0818 | 0.8 | 0.779 | 0.4 |
| Correlation Coefficient : 0.9985 | | Slope : 0.10491 | | |
| SpectrAA Report. | | | | 11:16 10/2/2011 |

| Sample | Absorbance | Concentration (mg/l) | % RSD |
|---|---|---|---|
| ซิลิกาฟูม | 0.0097 | 0.093 | 1.1 |
| มอร์ต้าร์ซิลิกาฟูม | 0.0168 | 0.160 | 0.8 |
| ของเสียซิลิกา | 0.0732 | 0.698 | 0.4 |
| มอร์ต้าร์ของเสียซิลิกา | 0.0201 | 0.192 | 0.9 |

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐพล เศรษฐโอฬาร อายุ 56 ปี เกิดวันที่ 30 สิงหาคม 2497 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา พญาไท ปีการศึกษา 2516 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2520 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2552

**การเผยแพร่วิทยานิพนธ์**

[1] ณัฐพล เศรษฐโอฬาร และ เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ "การนำของเสียซิลิกาไปใช้ประโยชน์แทนซิลิกาฟูมในการผลิตคอนกรีต" เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และการจัดการสิ่งแวดล้อม ครั้งที่ 3. วันที่ 14-15 มีนาคม 2554 ณ อาคารมหามกุฎ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: หน้า 34.

[2] ณัฐพล เศรษฐโอฬาร และเพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ " การนำของเสียประเภทซิลิกาไปใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ" **ได้รับการตอบรับให้นำเสนอบทความแบบบรรยาย** ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16. วันที่ 18-20 พฤษภาคม 2554 ณ โรงแรมเดอะไซด์ พัทยา (รหัสบทความENV0044)