



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

“คอกีตผลสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทบาง”

โดย

หัวหน้าโครงการวิจัย	รศ.ดร.สุวิมล สัจจาณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ตระกูล อร่ามรักษ์
นักศึกษาผู้วิจัย	นายวุฒิกรณ์ มาลี
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	

ตุลาคม 2549

สัญญาเลขที่ RDG4950009

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

“คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทบาง”

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|---|---|
| 1. หัวหน้าโครงการวิจัย รศ.ดร.สุวิมล สัจจาณิชย์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 3. อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.ตระกูล อร่ามรักษ์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 2. นักศึกษาผู้วิจัย นายวุฒิกรณ์ มาลี | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

และ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง
จำกัด (มหาชน) ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และให้ความอนุเคราะห์เรื่องการ
บดวัสดุ และข้อมูลการทดสอบ XRD

EXECUTIVE SUMMARY

ทุนวิจัยสกว.- บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) 2548

<http://www.trfmag.org>

1. ชื่อโครงการ(ภาษาไทย)เรื่องคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทบาง
(ภาษาอังกฤษ) Concrete Incorporating Metakaolin and Fly Ash for Repair Work
คำสำคัญ (3-5 คำ) คอนกรีต, ดินขาว , เถ้าลอย, งานซ่อม
Keywords (5 keywords) Concrete, Metakaolin, Fly Ash, Repair
2. ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากที่ประชุมคณะกรรมการบัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เมื่อวันที่.....3.....เดือน.....พฤศจิกายน.....พ.ศ.....2547.....
3. ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ชื่อ-สกุล รศ.ดร.สุวิมล สัจจานิชย์.
หน่วยงานที่สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ที่อยู่ 50 พหลโยธิน จตุจักร กทม 10900
โทรศัพท์ 02-5797565.....โทรสาร 02-579457.....
E-mail fengsusa@ku.ac.th.....
4. ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม (ถ้ามี)
ชื่อ-สกุล รศ.ดร.ตระกูล อารัมรักษ์
หน่วยงานที่สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ที่อยู่ 50 พหลโยธิน จตุจักร กทม 10900
โทรศัพท์ 02-5797565.....โทรสาร 02-5794575.....
E-mail fengtka@ku.ac.th.....
5. ชื่อนักศึกษาผู้วิจัย
ชื่อ-สกุล นายวุฒิกรณ์ มาลี
โทรศัพท์.....โทรสาร.....
E-mail tao.m69@gmail.com
6. ชื่อและสถานที่ติดต่อผู้ร่วมสนับสนุนอื่น (ถ้ามี)
ชื่อ-สกุล และตำแหน่งบุคลากรที่ร่วมโครงการ.....
ชื่อหน่วยงานบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง(มหาชน).จำกัด.....
ที่อยู่.....

โทรศัพท์..... โทรสาร.....

E-mail.....

ลงนาม (ลายเซ็น).....

ชื่อและสถานที่ติดต่อคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย หรือคณบดี/ผู้อำนวยการสถาบันต้นสังกัดของผู้
เสนอโครงการ

ชื่อ-สกุล อ. นนทวัฒน์ จันทร์เจริญ

ตำแหน่ง คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ที่อยู่ สำนักงานเลขานุการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 พหลโยธิน
จตุจักร กทม 10900

โทรศัพท์ 02 - 9428555 โทรสาร 02 - 5722778

E-mail.....

ลงนาม (ลายเซ็น).....

7. โครงการที่เสนอนี้มีหัวข้อ

☐ สอดคล้องกับหัวข้อของสกว. (ตรวจสอบจากเว็บไซต์)

☐ ฝ่าย 2 ชุดโครงการ.

.....

☒ ฝ่าย 5 ชุดโครงการ การพัฒนา marine cement ให้สามารถต้านผลกระทบของไออน
คลอไรด์ และซัลเฟตจากน้ำทะเลในอ่าวไทยตอนบนด้านตะวันตก

.....

☐ ฝ่าย 5 ทู่นำหรือนักศึกษาที่ทำวิทยานิพนธ์การแก้ปัญหาในโรงงานอุตสาหกรรม

☐ ไม่สอดคล้องกับหัวข้อของสกว.

9. โครงการที่เสนอนี้เป็นโครงการต่อเนื่องจากโครงการ IRPUS หรือไม่

☐ ต่อเนื่อง

☒ ไม่ต่อเนื่อง

10. ได้เสนอโครงการนี้หรือโครงการที่มีส่วนเหมือนกับเรื่องนี้บางส่วนเพื่อขอทุนกับแหล่งอื่นที่
ใดบ้าง

☒ ไม่ได้เสนอกับแหล่งทุนอื่น.....

☐ เสนอต่อ.....

☐ ชื่อโครงการที่เสนอ.....

กำหนดทราบผล (หรือสถานภาพเท่าที่ทราบ)

☐ เคยได้รับทุนสนับสนุนในโครงการนี้หรือโครงการที่มีส่วนเหมือนกับเรื่องนี้บางส่วนแล้ว
จาก จำนวนเงิน...บาท

12. ระยะเวลาดำเนินงาน 12..... เดือน

ข้าพเจ้า นายวุฒิกรณ์ มาลี

ขอรับรองว่าข้อความในเอกสารการขอรับทุนทั้งหมดเป็นความจริงทุกประการ

(ลงชื่อนักศึกษาผู้วิจัย).....

(วุฒิกรณ์ มาลี)

...../...../.....

ข้าพเจ้า รศ.ดร.สุวิมล สัจจานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาของนายวุฒิกรณ์ มาลี ขอรับรองว่าข้อความใน
เอกสารการขอรับทุนทั้งหมดเป็นความจริงทุกประการ

(ลงชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา).....

(รศ.ดร.สุวิมล สัจจานิชย์)

...../...../.....

บทสรุปย่อผู้บริหาร

1. ชื่อโครงการ(ภาษาไทย)เรื่องคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทบาง
(ภาษาอังกฤษ) Concrete Incorporating Metakaolin and Fly Ash for Repair Work คำสำคัญ
(3-5 คำ) คอนกรีต, ดินขาว , เถ้าลอย, งานซ่อม
Keywords (5 keywords) Concrete, Metakaolin, Fly Ash, Repair
2. ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ชื่อ-สกุล รศ.ดร.สุวิมล สัจจาณิชย์.
หน่วยงานที่สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ที่อยู่ 50 พหลโยธิน จตุจักร กทม 10900
โทรศัพท์ 02-5797565 โทรสาร 02-5794575
E-mail fengsusa@ku.ac.th
3. ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม (ถ้ามี)
ชื่อ-สกุล รศ.ดร.ตระกูล อร่ามรักษ์
หน่วยงานที่สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ที่อยู่ 50 พหลโยธิน จตุจักร กทม 10900
โทรศัพท์ 02-5797565 โทรสาร 02-5794575
E-mail fengtka@ku.ac.th
4. ชื่อและสถานที่ติดต่อผู้ร่วมสนับสนุนอื่น (ถ้ามี)
ชื่อ-สกุล และตำแหน่งบุคลากรที่ร่วมโครงการ.....
ชื่อหน่วยงานหรือบริษัท.....
ที่อยู่.....
โทรศัพท์..... โทรสาร.....
E-mail.....
ลงนาม (ลายเซ็น).....

6. ระยะเวลาดำเนินงาน 12 เดือน

7. ปัญหาที่ท้าวิจัยและความสำคัญของปัญหา และสรุป

ในปัจจุบันมีการนำเถ้าลอยมาใช้งานคอนกรีตแพร่หลายมากขึ้น แต่การศึกษาและวิจัยยังมีจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับต่างประเทศซึ่งมีพัฒนาการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2478 อย่างไรก็ตามผลการศึกษาพบว่าเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศโดยเฉพาะแหล่งใหญ่ มีคุณลักษณะเป็นสารปอชโซลานและช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตด้านต่างๆให้ดีขึ้นทั้งขณะสดและแข็งตัวแล้ว เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วมีความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต และความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้น โดยเฉพาะประการหลังมีผลต่อการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมซึ่งเป็นปัญหาที่พบกันมากในประเทศไทยโดยเฉพาะบริเวณชายฝั่งทะเล และในเขตเมืองใหญ่ แต่การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตมีข้อด้อยคือมักมีกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นๆ โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงทำให้การใช้งานในสภาพ แวดล้อมรุนแรงอาจได้ผลไม่ดีเท่าที่ควร ขณะเดียวกันมีรายงานการศึกษาการใช้ดินขาวดิบจากแหล่งในประเทศซึ่งเป็นวัสดุปอชโซลานธรรมชาติอีกชนิดหนึ่งนำมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการเผา และบดที่อุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสม ทำให้ได้ดินขาวอนุภาคละเอียดที่สามารถทำปฏิกิริยาปอชโซลаниกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม และจากข้อมูลการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ดินขาวในงานก่อสร้างที่มีจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอย พบว่าดินขาวมีผลกระทบต่อการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ ที่ดีขึ้น เช่นการเพิ่มกำลังอัดในช่วงอายุต้นของคอนกรีต การเพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์และการกัดกร่อนต่อกรด ค่าการซึมผ่านของน้ำลดลง และยังช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตอีกด้วย แต่ยังพบข้อด้อยบางประการ เช่น การลดความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น และมีผลต่ออุณหภูมิและความร้อนในคอนกรีตเพิ่มขึ้นซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาการแตกร้าวได้ ปัญหาเหล่านี้เป็นผลมาจากดินขาวมีอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วและยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน อีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงนำแนวคิดการใช้จุดเด่นของสารปอชโซลานทั้งสองชนิด มาใช้ร่วมกันเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยคาดว่าผลจากโครงการนี้อาจเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาส่วนผสมดินขาวและเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศให้

เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างโดยเฉพาะ โครงสร้างที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมรุนแรง
ซ่อมแซมชนิดเทปาง และคอนกรีตพิเศษ

งาน

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินขาวและเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศซึ่งใช้การบดในลักษณะบดแยกและบดรวม โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพและผลการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยที่บดทั้งสองลักษณะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนต่อคุณสมบัติของมอร์ต้าและต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านความสามารถเทได้ของคอนกรีตสด และการพัฒนากำลัง ความคงทนของคอนกรีตและหาอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยที่เหมาะสม

ผลจากการศึกษาอาจสรุปเป็น 4 ส่วนดังนี้

ในด้านคุณสมบัติของวัสดุ ดินขาวในงานวิจัยนี้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน และบดด้วยวิธี Rod Mill ในช่วงเวลาที่เหมาะสมจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C168 มีลักษณะอนุภาคที่ไม่แน่นอนส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นแผ่นมีรูปทรงมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.51 มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง(13,890 ตร.ซม./ก.) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาและวิธีในการบด เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคทรงกลมเมื่อผ่านการบดมีค่าความละเอียดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 4,045 ตร.ซม./ก. และมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.64

ในด้านคุณสมบัติของมอร์ต้า มอร์ต้าผสมดินขาวมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากพื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวสูง แต่สามารถลดความต้องการน้ำลงได้โดยเติมเถ้าลอยลงในส่วนผสม โดยผลกระทบของดินขาวและเถ้าลอยต่อค่าการไหลทั้งกรณีบดแยกและบดรวมไม่แตกต่างกันชัดเจน ส่วนผสมมอร์ต้าจากการบดรวมกันของ ดินขาวและเถ้าลอยมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าจากการบดแยกโดยที่อายุ 7 วัน มอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยกรณีการบดรวมมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมประมาณร้อยละ 8-14 ในขณะที่กรณีบดแยกมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมประมาณร้อยละ 18-26 และที่อายุทดสอบ 28 วัน มอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยกรณีการบดรวมมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมประมาณร้อยละ 26-37 และกรณีบดแยกมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมประมาณร้อยละ 15-42 และอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดคือ 10:10

ในด้านคุณสมบัติของคอนกรีต การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวและเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 20 ในส่วนผสมทำให้ปริมาณอากาศในคอนกรีตลดลงโดยความแตกต่างของอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยไม่มีผลที่ชัดเจนต่อความแตกต่างของปริมาณอากาศ ดินขาวมีผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตโดยลดค่ายุบตัวของคอนกรีตและมีอัตราการสูญเสียค่ายุบตัวสูง

กว่าคอนกรีตควบคุม การเติมเถ้าลอยลงในส่วนผสมสามารถช่วยความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต การใช้ดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตระยะเวลาการเกิดอุณหภูมิสูงสุดให้สั้นลง ขณะที่การเติมเถ้าลอยในส่วนผสมยี่ระยะเวลาการเกิดอุณหภูมิสูงสุดโดยมีค่าใกล้เคียงหรือนานกว่าคอนกรีตควบคุม การใช้วัสดุทั้งสองร่วมกันช่วยคงพฤติกรรมของคอนกรีตให้ใกล้เคียงคอนกรีตควบคุมได้ ภายหลัง 28 วัน คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนผสมให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ปริมาณ ดินขาวในส่วนผสมร้อยละ 15-20 มีผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุ 1-7 วันแรก ขณะที่ปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสมมีผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงหลัง ส่วนผสมที่มีดินขาวและเถ้าลอยในอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุทดสอบ 91 วัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกอย่างต่อเนื่อง ดินขาวและเถ้าลอยมีผลกำลังอัดของคอนกรีตในลักษณะเดียวกับกำลังอัด คือ ส่วนผสมที่ใช้ดินขาวและเถ้าลอยโดยมีดินขาวร้อยละ 15-20 มีผลดีต่อการพัฒนากำลังอัด เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15-20 มีผลต่อกำลังอัดในช่วงต้นลดลง แต่ในช่วงปลายกำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่อายุทดสอบ 91 วัน

ในด้านความคงทนของคอนกรีต พบว่าความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตดีขึ้นจากการปรับปรุงคุณลักษณะของเพสต์ด้วยดินขาวและเถ้าลอยโดยมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และมีความต้านทานการขัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดและอายุทดสอบเพิ่มขึ้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวและเถ้าลอยในคอนกรีตปริมาณร้อยละ 20 ลดการซึมผ่านของคลอไรด์ลงได้อย่างชัดเจน โดยมีระดับความซึมผ่านจ้อยู่ในระดับต่ำถึงต่ำมากตามมาตรฐาน ASTM C1202 นอกจากนั้นยังช่วยปรับปรุงความต้านทานการเกิดสนิมในเหล็กเสริมให้ดีขึ้นโดยส่วนผสมของดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนมีระดับความต้านทานการกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะซึมลึกของคลอไรด์และระดับความรุนแรงในการเกิดสนิมในเหล็กเสริมที่วัดได้

จากการศึกษาแสดงถึงศักยภาพของการใช้สารปอซโซลานในประเทศที่มีราคาต่ำสองชนิด ร่วมกันในการพัฒนาคุณสมบัติคอนกรีตให้เหมาะสมสำหรับงานซ่อมแซมชนิดทาง และคอนกรีตพิเศษที่ต้องการคุณสมบัติด้านความคงทนและกำลังที่ดีทั้งระยะต้นและระยะปลาย ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในโครงการนี้อาจนำไปสู่การพัฒนาในเชิงพาณิชย์ได้ โครงการนี้ นอกจากจะเป็นความพยายามใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้มีประสิทธิภาพ กลุ่มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ และเป็นการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้นแล้ว ยังอาจมีผลกระทบในทางบวกจาก

การลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เท่าที่จำเป็นซึ่งมีผลถึงการลดการทำลายสภาวะแวดล้อมเพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ และยังอาจทดแทนการนำเข้าวัสดุราคาแพงจากต่างประเทศได้อีกด้วย

8. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของดินขาวและเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศทั้งในลักษณะบดแยกและบดรวม และเพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยที่บดทั้งสองลักษณะต่อคุณสมบัติค่าการไหลและกำลังอัดของมอร์ต้าที่ใช้อัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยแตกต่างกันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน

2. เพื่อศึกษาผลของการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในคอนกรีต ที่มีต่อคุณสมบัติในด้านความสามารถเทได้ โดยเฉพาะค่ายุบตัวและการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตสด และหาอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยที่เหมาะสม

3. เพื่อศึกษาผลของการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยที่มีต่อคุณสมบัติในด้านการพัฒนากำลังอัด กำลังดัด ความต้านทานการขัดสี ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ และความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยมีอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยที่แตกต่างกันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในคอนกรีต

9. ระเบียบวิธีวิจัย (โดยย่อ)

การวิจัยประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

1. การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินขาวที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นสารปอซโซลาน จากดินขาวดิบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง แล้วนำดินขาวมาบดด้วยเครื่องบดวัสดุ ในลักษณะ Rodded Mill 2 ลักษณะคือ การบดดินขาวล้วน และการบดดินขาวร่วมกับเถ้าลอยโดยแปรผันส่วนผสมดินขาวต่อเถ้าลอย 5 ระดับคือ 20:0, 15:5, 10:10, 5:15 และ 0:20

2. การตรวจสอบประสิทธิภาพของการบดเพื่อหาเวลาการบดที่เหมาะสมต่อการใช้งานทั้ง 2 ลักษณะ โดยแปรผันเวลาที่ใช้ในการบด และตรวจสอบค่าความละเอียดโดยวัดพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี Air Blaine Permeability ให้ได้ความความละเอียดอยู่ในช่วง 10,000-11,000 ตร.ซม./ ก.

3. การทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีในด้านความถ่วงจำเพาะ หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) หา

สถานะ ทางผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectroscopy (XRD) และหาคุณสมบัติของ ส่วนผสมดินขาวเถ้าลอยที่บดรวมกันในด้านรูปร่างและลักษณะอนุภาคโดยใช้เครื่องถ่ายภาพ กำลังขยายสูง Scanning Electron Microscope (SEM) และทดสอบสถานะทางผลึกของ ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28 และ 91 วัน ข้อมูลเหล่านี้จะใช้เป็นพื้นฐานในการ พัฒนาวัสดุ

4. ทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยโดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75 โดยแบ่งการเตรียมตัวอย่างมอร์ต้าเป็น 2 ชุดคือตัวอย่างมอร์ต้าที่เตรียมจากดินขาวล้วน ที่ผ่านการบดในช่วงเวลาที่เหมาะสมผสมกับเถ้าลอยด้วยเครื่องผสมซีเมนต์มอร์ต้าและตัวอย่าง มอร์ต้าที่เตรียมจากดินขาวและเถ้าลอยที่ผ่านการบดรวมกันในช่วงเวลาที่เหมาะสม โดยมอร์ต้า ทั้ง 2 ชุดจะผันแปรอัตราส่วนระหว่างดินขาวต่อเถ้าลอย 5 ระดับ และใช้แทนที่ซีเมนต์ใน ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ทดสอบค่าการไหลของมอร์ต้า ตามมาตรฐาน ASTM C 230 โดยผันแปรปริมาณน้ำเพื่อให้ได้ค่าการไหลแปรตามต้องการ เพื่อนำส่วนผสมมาทดสอบ ดัชนีกำลังจากการทำปฏิกิริยาร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดย เปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าควบคุมที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

5. ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตควบคุมตามมาตรฐาน ACI ให้มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน อยู่ ในช่วง 300-350 กก./ตร.ซม. ควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 7.5 ± 2.5 ซม. เพื่อใช้เตรียมตัวอย่าง และทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งที่ผสมและไม่ผสมดินขาวและเถ้าลอย ในสภาพสด เพื่อ ศึกษาความสามารถทำงานได้ในด้านการยุบตัว และการสูญเสียค่าการยุบตัว การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิของปริมาณอากาศในคอนกรีต การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมดินขาวและ เถ้าลอยที่ ในสภาพแข็งตัวแล้ว ในด้านการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต โดยใช้แบบหล่อทรง ลูกบาศก์ขนาด 7.5x7.5x7.5 ซม. และทดสอบกำลังอัดเมื่อคอนกรีตอายุได้ 24 ชั่วโมงหลังจาก การหล่อ และที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 91 ทดสอบกำลังคัดของคอนกรีต โดยใช้คานขนาด 6.25x6.25x30 ซม. ทดสอบกำลังคัดเมื่อคอนกรีตอายุได้ 24 ชั่วโมงหลังจากการหล่อ และ ที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน ทดสอบความต้านทานการขัดสีที่อายุการบ่ม 28 และ 56 วัน โดยใช้ชิ้นตัวอย่างขนาด 15x15x7.5 ซม. โดยเครื่องมือทดสอบเทียบเท่ามาตรฐาน ASTM C944-90a ทดสอบความซึมผ่านของคลอไรด์ที่อายุการบ่ม 28 และ 56 วัน โดยวิธี Rapid Chloride Permeability Test ตามมาตรฐาน ASTM C1202 โดยวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผ่าน ขึ้นตัวอย่างตัดชิ้นตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 5 ซม. เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยหาความสัมพันธ์ของผลรวมของประจุที่ไหลผ่านตัวอย่างกับความซึมผ่านได้ของคลอไรด์อิออนและนำผลเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานว่ามีความซึมผ่านได้ของคลอไรด์มากน้อยเพียงใด

ทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้า (Half Cell Potential Test) ตามมาตรฐาน ASTM C876 โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ฝังเหล็กเส้นกลมขนาด 9 มม. ซึ่งแช่ในสารละลาย NaCl 3% หลังจาก บ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องปกติเป็นเวลา 27 วัน เพื่อเร่งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าโดยวัดค่า Half Cell Potential ที่ระยะ 5 , 10 และ 15 ซม. จากปลายบนของตัวอย่างทุกๆ 2 วันใน 30 วันแรก และทุกๆ 7 วันใน 60 วัน

ข้อมูลและคุณสมบัติเหล่านี้จะใช้เป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของกระบวนการพัฒนาวัสดุและการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยในการพัฒนาคุณสมบัติคอนกรีตในด้านต่างๆ ให้เหมาะสมกับงานก่อสร้าง โดยเฉพาะงานที่ต้องการความคงทนที่ดีขึ้น

10. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในเชิงความรู้พื้นฐานและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ เช่น

เชิงนโยบาย เชิงสาธารณะ และการพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์

ผลการศึกษาเบื้องต้นจากโครงการนี้คาดว่าจะให้ข้อมูลเบื้องต้นของส่วนผสมดินขาวและเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศและประสิทธิภาพของกระบวนการบดทั้งในลักษณะบดแยก และบดรวม ตลอดจนประสิทธิภาพของการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยในการพัฒนาคุณสมบัติคอนกรีตในด้านต่างๆ ให้เหมาะสมสำหรับงานซ่อมแซมชนิดเทบาง ที่มีความคงทนดีขึ้น และอาจนำไปสู่การพัฒนาในเชิงพาณิชย์ได้ อีกประการหนึ่งโครงการนี้จัดเป็นการวิจัยเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน เนื่องจากเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยอาศัยจุดด้อยและจุดเด่นของสารปอซโซลานราคาต่ำทั้งสองชนิดดังกล่าวมาใช้ร่วมกันเพื่อเพิ่มมูลค่าและประสิทธิภาพของวัสดุอย่างเป็นรูปธรรมได้ นอกจากนั้นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลงโดยใช้วัสดุที่พัฒนาขึ้นทดแทน ยังมีผลดีต่อการอนุรักษ์สภาวะแวดล้อมจากการใช้หินภูเขาเป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ลดลง

สรุปรายงานความก้าวหน้า

สัญญาเลขที่ RDG4950009

โครงการ “ คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทพาง ”

สรุปรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1

ข้อมูลโครงการ

ชื่อโครงการ “ คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทพาง ”

สัญญาเลขที่ RDG4950009

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน รศ.ดร.สุวิมล สัจจาณิชย์

โครงการเริ่มวันที่....ตุลาคม พ.ศ. 2548

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 รวมเวลาที่ทำวิจัยทั้งสิ้น 6 เดือน

รายงานกระบวนการทำวิจัย

1. ในรอบ 6 เดือน

- ติดต่อทางโทรศัพท์ / โทรสาร กับ ผู้ร่วมให้ทุน ประมาณ 6 ครั้ง
- ประชุมร่วมกับผู้ร่วมให้ทุน 1 ครั้ง เมื่อวันที่.....
- ไปพบ ผู้ร่วมให้ทุน ณ สถานที่.....ครั้ง เมื่อวันที่.....
- ติดต่อผู้ให้ทุนหรือสำนักงานโครงการกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัย สกว. สาขา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 4 ครั้ง (ทางโทรศัพท์)
- ประชุมทีมวิจัย 6 ครั้ง เป็นเรื่อง
 - ทบทวน / วางแผน 6 ครั้ง
 - หาหรือปัญหาทำการวิจัย 6 ครั้ง
 - วิเคราะห์ผล 3 ครั้ง
 - มอบหมายงานครั้ง
 - การจัดหาจัดจ้างครั้ง

2. ในรอบ 6 เดือน ที่ผ่านมาได้ติดตามข้อมูลงานวิจัยโดย

- บันทึกการทำวิจัย (สมุดเล่มคำ) จำนวนหน้า
- อ่าน Paper ที่เกี่ยวข้อง 10 ชิ้น
- ค้นข้อมูลทาง internetครั้ง

3. ในกรณีที่มิ้นักศึกษาบัณฑิตศึกษาหรือผู้ช่วยวิจัยในโครงการ ในรอบ 6 เดือน ที่ผ่าน มาท่านได้

- ให้นักศึกษานำเสนอความก้าวหน้า 2 ครั้ง
- ประชุมกับนักศึกษา / ผู้ช่วยวิจัยหรือนักศึกษาขอพบเพื่อหารือการทำวิจัย 6 ครั้ง
- ตรวจสอบผลงานวิจัยที่ทำโดยนักศึกษา หรือผู้ช่วยวิจัย

สัญญาเลขที่ RDG4950009

โครงการ “ คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทปาง ”

สรุปรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2

ข้อมูลโครงการ

ชื่อโครงการ “ คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทปาง ”

สัญญาเลขที่ RDG4950009

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน รศ.ดร.สุวิมล สัจจาณิชย์

โครงการเริ่มวันที่...ตุลาคม พ.ศ. 2548

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2 รวมเวลาที่ทำวิจัยทั้งสิ้น 12 เดือน

รายงานกระบวนการทำวิจัย

1. ในรอบ 12 เดือน

- ติดต่อทางโทรศัพท์ / โทรสาร กับ ผู้ร่วมให้ทุน ประมาณ...10... ครั้ง
- ประชุมร่วมกับผู้ร่วมให้ทุน...2..ครั้ง เมื่อวันที่.....
- ไปพบผู้ร่วมให้ทุน ณ สถานที่..โรงงานปูนซีเมนต์นครหลวง...1.....ครั้ง
เมื่อวันที่...29-30 มิถุนายน 2549.....
- ติดต่อผู้ให้ทุนหรือสำนักงานโครงการกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัย สกว. สาขา
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้ง (ทางโทรศัพท์)
- ประชุมทีมวิจัย ..10. ครั้ง เป็นเรื่อง
 - ทบทวน / วางแผน ...6... ครั้ง
 - หาหรือปัญหาทำการวิจัย...3.. ครั้ง
 - วิเคราะห์ผล ...4.... ครั้ง
 - มอบหมายงาน...1..ครั้ง
 - การจัดหาจัดจ้างครั้ง

2. ในรอบ 12 เดือน ที่ผ่านมาได้ติดตามข้อมูลงานวิจัยโดย

- บันทึกการทำวิจัย (สมุดเล่มดำ) จำนวนหน้า
- อ่าน Paper ที่เกี่ยวข้อง...71..... ชิ้น
- ค้นข้อมูลทาง internet40.....ครั้ง

3. ในกรณีที่มิ้นักศึกษาบัณฑิตศึกษาหรือผู้ช่วยวิจัยในโครงการ ในรอบ 12 เดือน ที่ผ่าน มาท่านได้

- ให้นักศึกษานำเสนอความก้าวหน้า...10... ครั้ง

- ประชุมกับนักศึกษา / ผู้ช่วยวิจัยหรือนักศึกษาขอพบเพื่อหารือการทำวิจัย..15. ครั้ง (พบอย่างไม่เป็นทางการทุก..15.. วัน)
- ตรวจแก้ผลงานวิจัยที่ทำโดยนักศึกษา หรือผู้ช่วยวิจัย

4. เขียนและนำเสนอบทความ

- เรื่อง “ผลกระทบของการใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าและคอนกรีต” ในการประชุมวิชาการ “วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11” ดังเอกสารแนบท้ายในภาคผนวก ง

5. ร่วมเขียนบทความ

- เรื่อง “*Effect of fly ash on chloride permeability and steel corrosion risk of Metakaolin concrete*” เพื่อร่วมประชุม “Fifth International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia” ดังเอกสารแนบท้ายในภาคผนวก ง

6. งานที่กำลังดำเนินการ

- อยู่ในระหว่างการเขียนบทความเพื่อนำเสนอการตีพิมพ์ในวารสารในระดับนานาชาติ “ACI Materials Journal”

แผนงานประจำปี

[illegible]

แบบสรุปโครงการวิจัย

สัญญาเลขที่ RDG4950009 ชื่อโครงการ “คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทบาง”

หัวหน้าโครงการผู้รับทุน รศ.ดร.สุวิมล สัจจาณิชย์ สถาบัน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความสำคัญ/ความเป็นมา

ในปัจจุบันมีการนำเถ้าลอยมาใช้งานคอนกรีตแพร่หลายมากขึ้น แต่การศึกษาและวิจัยยังมีจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับต่างประเทศซึ่งมีพัฒนาการมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2478 อย่างไรก็ตามผลการศึกษาพบว่าเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศโดยเฉพาะแหล่งใหญ่ มีคุณลักษณะเป็นสารปอซโซลานและช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตด้านต่างๆให้ดีขึ้นทั้งขณะสดและแข็งตัวแล้ว เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วมีความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต และความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้น โดยเฉพาะประการหลังมีผลต่อการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมซึ่งเป็นปัญหาที่พบกันมากในประเทศไทยโดยเฉพาะบริเวณชายฝั่งทะเลและในเขตเมืองใหญ่ แต่การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตมีข้อด้อยคือมักมีกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นๆ โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงทำให้การใช้งานในสภาพ แวดล้อมรุนแรงอาจได้ผลไม่ดีเท่าที่ควร ขณะเดียวกันมีรายงานการศึกษาการใช้ดินขาวดิบจากแหล่งในประเทศซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติอีกชนิดหนึ่งนำมาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการเผาและบดที่อุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสม ทำให้ได้ดินขาวอนุภาคละเอียดที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมและจากข้อมูลการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ดินขาวในงานก่อสร้างที่มีจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอย พบว่าดินขาวมีผลกระทบต่อการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ ที่ดีขึ้น เช่นการเพิ่มกำลังอัดในช่วงอายุต้นของคอนกรีต การเพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์และการกัดกร่อนต่อกรด ค่าการซึมผ่านของน้ำลดลง และยังช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตอีกด้วย แต่ยังพบข้อเสียบางประการ เช่น การลดความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น และมีผลต่ออุณหภูมิและความร้อนในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาการแตกร้าวได้ ปัญหาเหล่านี้เป็นผลมาจากดินขาวมีอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วและยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชันอีกด้วยดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงนำแนวคิดการใช้จุดเด่นของสารปอซโซลานทั้งสองชนิดมาใช้ร่วมกันเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดยคาดว่าผลจากโครงการนี้อาจเป็นข้อมูล

เบื้องต้นสำหรับการพัฒนาส่วนผสมดินขาวและเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศให้เหมาะสม
สำหรับงานก่อสร้างโดยเฉพาะ โครงสร้างที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมรุนแรง งานซ่อมแซมชนิดเท
บาง และคอนกรีตพิเศษ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินขาวและเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศ
ซึ่งใช้การบดในลักษณะบดแยกและบดรวม โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพและผลการใช้ดินขาว
ผสมเถ้าลอยที่บดทั้งสองลักษณะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ต่อคุณสมบัติของมอร์
ต้าและต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านความสามารถเทได้ของคอนกรีตสด และการพัฒนา
กำลัง ความคงทนของคอนกรีต และหาอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยที่เหมาะสม

- วัตถุประสงค์โครงการ**
1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของดินขาวและเถ้าลอยจาก
แหล่งในประเทศทั้งในลักษณะบดแยกและบดรวม
 2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยที่บดทั้งสองลักษณะต่อคุณ
สมบัติค่าการไหลและกำลังอัดของมอร์ต้าที่ใช้อัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยที่แตกต่างกัน
แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน
 3. เพื่อศึกษาผลของการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอย ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดในด้านค่า
ยุบตัวและการสูญเสียค่ายุบตัว และต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในด้านการพัฒนา
กำลัง โดยใช้อัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยที่แตกต่างกันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
บางส่วน
 4. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้สำหรับงานซ่อมชนิดเทบาง โดยพิจารณา
ในด้านความต้านทานการขัดสี การซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมใน
คอนกรีต

ผลที่ได้รับ	บรรลुวัตถุประสงค์	โดยทำให้
1. ข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของดินขาวและเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศ	ข้อ1	1. ทราบข้อมูลเบื้องต้นของดินขาวและเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศ และผลกระทบจากการบดทั้งในลักษณะบดแยกและบดรวม

2.ผลการใช้ดินขาวผสมเถ้า ลอยที่บดในลักษณะบดแยก และบดรวมต่อคุณสมบัติค่า การไหลและกำลังอัดของมอร์ต้า ที่ใช้อัตราส่วนของดินขาว ต่อเถ้าลอยที่แตกต่างกัน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ บางส่วน	ข้อ2	2.พบความแตกต่างของ ผลกระทบจากการบดต่าง ลักษณะโดยการศึกษาการ บดรวมให้ค่ากำลังอัดมอร์ต้า ต่ำกว่าจากกรณีการบดแยก และอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้า ลอยที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดคือ 10:10
3. ผลของการใช้ดินขาวผสม เถ้าลอย ต่อคุณสมบัติของ คอนกรีตสดในด้านค่ายุบตัว และการสูญเสียค่ายุบตัว และ ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่ แข็งตัว	ข้อ3	3.ทราบถึงผลกระทบของดิน ขาวต่อการลดความสามารถ ในการทำงานได้ของคอนกรีต และอัตราการสูญเสียความ ยุบตัวสูง ซึ่งอาจชดเชยโดย การเติมเถ้าลอยลงในส่วน ผสมและทราบถึงผลกระทบ ต่อการพัฒนากำลังในทุกช่วง อายุ และทราบถึงอัตรา ส่วนผสมระหว่างดินขาวและ เถ้าลอยที่มีผลดีต่อการพัฒนา กำลังและมีผลต่อคุณสมบัติ ของคอนกรีตสดต่ำ(10:10)
4. ทราบถึงความเป็นไปได้ใน การประยุกต์ใช้สำหรับงาน ซ่อมชนิดเทบาง โดย พิจารณาในด้านความ ต้านทานการขัดสี การซึม ผ่านของคลอไรด์ และการ เกิดสนิมของเหล็กเสริมใน คอนกรีต	ข้อ4.	4. ทราบถึงผลกระทบของการ ใช้ดินขาวและเถ้าลอยร่วมกัน ต่อการเพิ่มความต้านทานการ ขัดสี ลดการซึมผ่านของคลอ ไรด์และความต้านทานการ เกิดสนิมในเหล็กเสริมดีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับปรุง ความทึบแน่นของโครงสร้าง จุลภาค

ผลลัพธ์จากโครงการวิจัยนี้

1. มหาบัณฑิต 1 คน

2. การเขียนและนำเสนอบทความ

- การเขียนและนำเสนอบทความเรื่อง “ผลกระทบของการใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าและคอนกรีต” ในการประชุมวิชาการ “วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11”
- ร่วมเขียนบทความเรื่อง “*Effect of fly ash on chloride permeability and steel corrosion risk of Metakaolin concrete*” เพื่อร่วมประชุม “Fifth International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia”
- กำลังอยู่ในระหว่างดำเนินการการเขียนบทความเพื่อนำเสนอการตีพิมพ์ในวารสารในระดับนานาชาติ “ACI Materials Journal”

คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเทบาง

รองศาสตราจารย์ สุวิมล สัจจานิชย์, Ph.D.

รองศาสตราจารย์ ตระกูล อร่ามรักษ์, Ph.D.

นายวุฒิกรณ์ มาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาคอนกรีตที่ผสมดินขาวร่วมกับเถ้าลอยเพื่อเป็นวัสดุสำหรับงานซ่อม โดยศึกษาผลกระทบของการใช้ดินขาวและเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศร่วมกันต่อความสามารถทำงานได้ การพัฒนากำลัง และความคงทนของคอนกรีตและมอร์ตาร์ โดยใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และผันแปรอัตราส่วนผสมดินขาวต่อเถ้าลอย 5 ระดับ คือ 20:0, 15:5, 10:10, 5:15 และ 0:20

จากการศึกษาพบว่า ความสามารถทำงานได้ของมอร์ตาร์และคอนกรีตลดลงเมื่อใช้เฉพาะดินขาวแทนที่ซีเมนต์ แต่การใช้เถ้าลอยร่วมในส่วนผสม สามารถชดเชยความสามารถทำงานได้ที่สูญเสียไป ดินขาวมีผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุ 7 วันแรก ส่วนเถ้าลอยช่วยพัฒนากำลังอัดในระยะยาว อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องและให้กำลังอัดสูงสุดที่ 91 วัน ในด้านความคงทนของคอนกรีตซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งของงานซ่อมพบว่า ดินขาวและเถ้าลอยมีผลต่อการเพิ่มความต้านทานการขัดสี การซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจน และลดโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอยสามารถชดเชยจุดด้อยและเสริมจุดเด่นที่มีในวัสดุปอซโซลานทั้งสองชนิด ทำให้ได้วัสดุที่มีศักยภาพเพียงพอต่อการพัฒนาเพื่อนำมาใช้งานด้านการซ่อมต่อไป

Concrete Incorporating Metakaolin and Fly Ash for Repair

Associate Professor Suvimol Sujjavanich, Ph.D.

Associate Professor Trakool Aramraks, Ph.D.

Mr. Wutikorn Malee

Department of Civil Engineering.

Kasetsart University

The aim of this research is to obtain the basic information for improvement of concrete properties for repair work. The investigated properties were workability, strength development and durability of concrete and mortar. In this study, the Metakaolin (MK) incorporating Fly Ash (FA) as total percentage replacements of 20 by weight for Portland cement (PC) was constant and the ratio of MK to FA varied for 5 levels ; 20:0, 15:5, 10:10, 5:15 and 0:20.

The result indicated that the significant reduction in workability was found from the mixture contained only MK. The incorporating FA enabled to compensate loss in workability. It was confirmed that MK affected the early-age strength development at the first 7 days, whereas incorporated FA influenced later-age strength gained. The ratio of MK to FA of 10:10 appeared to optimize strength development, and also shown the highest compressive strength at 91 days. Concerning durability which was one key factor for repair work, the incorporating MK and FA increased the abrasion resistance, decreased chloride permeability and corrosion risk of reinforcing steel significantly. This research shown that using MK incorporating FA could enhance and compensate deficit properties of this two pozzolan materials, provide the potential for further development for the use in repair work.

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
ขอบเขตการศึกษา	3
การตรวจเอกสาร	4
การเสื่อมสภาพและความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีต	4
วัสดุซ่อมคอนกรีต	5
วัสดุปอชโซลาน	6
ดินขาว	7
ผลกระทบของดินขาวต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าและคอนกรีต	12
เถ้าลอย	17
ผลกระทบของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าและคอนกรีต	18
การใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอย	24
อุปกรณ์และวิธีการ	29
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	31
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	37
การศึกษาเบื้องต้น	37
การวิเคราะห์คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอย	42
คุณสมบัติของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอย	58
คุณสมบัติของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยในสภาพสด	61
คุณสมบัติของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยในสภาพแห้งตัว	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สรุปและข้อเสนอแนะ	84
สรุป	84
ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	88
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	98
ภาคผนวก ข วิธีการทดสอบและเครื่องมือทดสอบ	152
ภาคผนวก ค การทดลองส่วนเพิ่มเติม	159
ภาคผนวก ง บทความสำหรับการเผยแพร่	167

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 อัตราส่วนผสมสำหรับคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย	33
2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ	39
3 ความละเอียดของวัสดุดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการบดด้วยเครื่อง Ball Mill	40
4 ความละเอียดของวัสดุดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการบดด้วยเครื่อง los Angeles	40
5 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ดินขาวและเถ้าลอย	41
6 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวและเถ้าลอยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618	42
7 กำลังอัดและกำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยบดแยกและบดรวมที่อัตราส่วนต่างๆ	58
8 ปริมาณอากาศของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ	60
9 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ	61
10 อุณหภูมิสูงสุดที่เวลาต่างๆหลังการผสมของคอนกรีต	64
11 กำลังอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 7.5x7.5x7.5 ซม. ที่อายุทดสอบต่างๆ	65
12 ตัวคูณปรับแก้ค่ากำลังอัดเทียบเท่าของคอนกรีตรูปทรงกระบอก	65
13 กำลังอัดเทียบเท่าทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุทดสอบต่างๆ	66
14 กำลังคัดของคอนกรีตที่อายุทดสอบต่างๆ	68
15 น้ำหนักที่หายไปจากการซึ่ผิวด้านบนของคอนกรีตแต่ละส่วนผสม	69
16 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 28 และ 56 วัน	70
17 ปริมาณประจุไฟฟ้าและระดับความซึมผ่านของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1202	71
18 การเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์และความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนจากสนิมตามมาตรฐาน ASTM C876	73
19 ระยะเวลาทดสอบที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมากกว่าร้อยละ 90 และเริ่มเห็นรอยแตกร้าว	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
20 ระยะซึมลึกเฉลี่ยของคลอไรด์จากการฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุทดสอบ 91 และ 140 วัน	81
21 การจำแนกระดับความรุนแรงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม	82
22 การจำแนกระดับความรุนแรงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตควบคุมและ คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่ระยะเวลาทดสอบ 91 และ 140 วัน	83
 ตารางผนวกที่	
ก1 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าและค่าการไหล	99
ก2 กำลังอัดมอร์ต้าส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 7 วัน	100
ก3 กำลังอัดมอร์ต้าส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 28 วัน	101
ก4 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตควบคุม	102
ก5 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0	102
ก6 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5	103
ก7 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10	103
ก8 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15	104
ก9 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20	104
ก10 การพัฒนาอุณหภูมิของคอนกรีตส่วนผสมต่างๆ	105
ก11 กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมรูปทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. สูง 15 ซม.	116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก12 กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม	117
ก13 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0	118
ก14 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5	119
ก15 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10	120
ก16 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15	121
ก17 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20	122
ก18 กำลังคัดของคอนกรีตควบคุม	123
ก19 กำลังคัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0	124
ก20 กำลังคัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5	125
ก21 กำลังคัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10	126
ก22 กำลังคัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15	127
ก23 กำลังคัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20	128
ก24 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตควบคุม	129
ก25 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย อัตราส่วน 20:0	129

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก26 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย อัตราส่วน 15:5	130
ก27 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย อัตราส่วน 10:10	130
ก28 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย อัตราส่วน 5:15	131
ก29 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย อัตราส่วน 0:20	131
ก30 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม	132
ก31 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน ดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0	135
ก32 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน ดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5	138
ก33 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน ดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10	141
ก34 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน ดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15	144
ก35 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน ดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20	147
ก36 ผลการทดลองการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธี Rapid Chloride Permeability Test ของตัวอย่างคอนกรีตส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 28 วัน	150
ก37 ผลการทดลองการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธี Rapid Chloride Permeability Test ของตัวอย่างคอนกรีตส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 56 วัน	151

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 เครื่องมือทดสอบหาค่าความซึมผ่านของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1202	35
2 กระบวนการเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยไฟฟ้า	36
3 จำลองการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า (Half Cell Potential Test)	36
4 ลักษณะดินขาวดิบ ดินขาวหลังการบด เถ้าลอย และดินขาวผสมเถ้าลอย ที่อัตราส่วนต่างๆ	38
5 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาค (ก)ดินขาว และ (ข)เถ้าลอย	39
6 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย MK:FA/10:10 ที่อายุ 3 วัน	43
7 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย MK:FA/10:10 ที่อายุ 7 วัน	43
8 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย MK:FA/10:10 ที่อายุ 14 วัน	44
9 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย MK:FA/10:10 ที่อายุ 28 วัน	44
10 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย MK:FA/10:10 ที่อายุ 91 วัน	45
11 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน MK:FA/20:0 ที่อายุต่างๆ	46
12 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน MK:FA/10:10 ที่อายุต่างๆ	48
13 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน MK:FA/0:20 ที่อายุต่างๆ	50
14 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุ 1 วัน	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
15 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุ 3 วัน	53
16 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุ 7 วัน	54
17 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุ 14 วัน	55
18 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุ 28 วัน	56
19 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุ 91 วัน	57
20 กำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยบดแยกและบดรวมที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อายุ 7 และ 28 วัน	59
21 การทดสอบค่าการยุบตัวโดยควบคุมค่ายุบตัวที่ 7.5 ± 2.5 ซม.	60
22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัวสัมพัทธ์กับเวลา	62
23 เครื่องมือสำหรับบันทึกอุณหภูมิและการติดตั้งเทอร์โมคอปเปิ้ลในตัวอย่างคอนกรีต	63
24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยกับเวลา	64
25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุทดสอบของคอนกรีตส่วนผสมต่างๆ	67
26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคัดประลัยกับอายุทดสอบของคอนกรีตส่วนผสมต่างๆ	68
27 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่อายุ 28 และ 56 วัน	71
28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะเวลาทดสอบ	73
29 การเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตควบคุมที่อายุต่างๆ	74
30 ตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อายุ 91 และ 140 วัน	76
31 ตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่พ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุ 91 วัน	77
32 ตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่พ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุ 140 วัน	78
33 การวัดระดับความลึกการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตด้วยการฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุ 91 วัน	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
34 การวัดระดับความลึกการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตด้วยการฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุ 140 วัน	80
ภาพผนวกที่	
ข1 เตาเผาไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	153
ข2 เครื่องบดวัสดุแบบ Ball Mill	153
ข3 เครื่อง Los Angeles และ Rods สำหรับบดวัสดุ	154
ข4 การบ่มตัวอย่างทดสอบชนิดต่างๆ	154
ข5 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าและกำลังคัดของคอนกรีต	155
ข6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	155
ข7 ชุดอุปกรณ์การทดสอบความซึมผ่านของคลอไรด์ Rapid Chloride Permeability	156
ข8 เครื่องมือทดสอบการขัดสีเทียบเท่ามาตรฐาน ASTM C944-90a	156
ข9 ชุดอุปกรณ์เร่งการเกิดสนิมด้วยไฟฟ้า	157
ข10 การเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยไฟฟ้า	157
ข11 ความเสียหายของแผ่นพื้นคอนกรีตในลักษณะต่างๆ	158
ค1 กำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยบดแยกและบดรวมที่อัตราส่วนต่างๆ ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน	161
ค2 การประกอบชิ้นทดสอบแรงยึดเหนี่ยวกับชุดยึดจับ	163
ค3 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยว	164
ค4 การทดสอบ Ring Test	165

คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยสำหรับงานซ่อมชนิดเททาง

Concrete Incorporating Metakaolin and Fly Ash for Repair Work

คำนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตกันอย่างแพร่หลาย แต่ยังคงอยู่ในแวดวงจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับต่างประเทศ เช่น ในแถบยุโรป ญี่ปุ่น หรือสหรัฐอเมริกา ซึ่งพัฒนาการใช้เถ้าลอยมานานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2478 จากการศึกษาพบว่าเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศไทยโดยทั่วไปโดยเฉพาะแหล่งใหญ่ มีคุณลักษณะเป็นสารปอซโซลานและช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ ให้ดีขึ้นได้ เช่น ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ คอนกรีตสามารถเทเข้าแบบได้ง่าย ลดการเย็นน้ำและการแยกตัวของส่วนผสม ในขณะที่ก่อตัวและแข็งตัวจะช่วยลดการสะสมความร้อนที่ทำให้เกิดการแตกร้าวในคอนกรีตได้ และเพิ่มกำลังอัดในระยะยาว คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตและความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้น เพิ่มความสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและยังช่วยลดการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างด่างแอลคาไลกับมวลรวมบางประเภทที่ไวต่อปฏิกิริยาอีกด้วย อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตมีข้อด้อยบางประการคือ กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นๆต่ำ และยิ่งต่ำมากหากใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงขึ้น (คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ, 2544)

ดินขาว เป็นวัสดุปอซโซลานอีกชนิดหนึ่งได้จากการนำดินขาวดิบ (Kaolin) ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม มาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการเผาและบดที่อุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสมทำให้ได้ดินขาวอนุภาคละเอียดและมีรูปร่างไม่แน่นอน เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ และในปัจจุบันมีการใช้ดินขาวดิบที่มีอยู่หลายแหล่งภายในประเทศไทยซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก แต่ในต่างประเทศมีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติปอซโซลานที่ดีของดินขาวที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพแล้วมากมาย (Murat, 1983; Murat and Comel, 1983; Wild et al., 1996-1997)

แม้ว่าการศึกษาและวิจัยภายในประเทศเกี่ยวกับการใช้ดินขาวในงานคอนกรีตยังมีจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับเถาหลอยที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย (ประจิต, 2523; ปริญญา และ อินทรชัย 2528; กรกฎ, 2530; สุวิมล และ ประเสริฐ, 2545) แต่จากผลรายงานการศึกษาส่วนใหญ่แสดงว่าดินขาวมีผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆที่ดีขึ้น เช่น กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้น ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้น ความต้านทานการกัดกร่อนต่อกรดเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านของน้ำลดลง และยังช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตอีกด้วย แต่การใช้ดินขาวในงานคอนกรีตยังมีข้อเสียบางประการ เช่น ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลงเนื่องจากดินขาวมีการดูดซึมน้ำสูง ต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวใกล้เคียงหรือเท่ากับคอนกรีตควบคุม ค่าการยุบตัวจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น และมีผลต่ออุณหภูมิและความร้อนในคอนกรีตเพิ่มขึ้นซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาการแตกร้าวได้ ปัญหาเหล่านี้เป็นผลมาจากดินขาวมีอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เร็วและเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ จึงมีแนวคิดที่จะนำจุดเด่นของสารปอซโซลานทั้งสองชนิดดังกล่าวมาใช้ร่วมกัน เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ความสามารถทนต่อการสูญเสียค่ายุบตัว กำลังอัดในช่วงต้น โดยงานวิจัยมุ่งเน้นในด้านความทนทานของคอนกรีต โดยเฉพาะความต้านทานการขัดสี ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ และความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต คุณสมบัติดังกล่าวมีความจำเป็นสำหรับงานซ่อมชนิดเททางซึ่งในปัจจุบันมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

ผลจากงานวิจัยนี้ให้ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาส่วนผสมดินขาวและเถาหลอยจากแหล่งในประเทศให้เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้าง และแนวทางการพัฒนากระบวนการบดโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการบดทั้งในลักษณะบดแยกและบดรวม ตลอดจนประสิทธิภาพของการใช้สารปอซโซลานราคาต่ำสองชนิดดังกล่าวที่มีจุดด้อยและจุดเด่นต่างกัน เพื่อพัฒนาคุณสมบัติคอนกรีตในด้านต่างๆให้เหมาะสมสำหรับงานซ่อมแซมชนิดเททางที่มีความคงทนดีขึ้น และอาจนำไปสู่การพัฒนาในเชิงพาณิชย์ได้ โครงการนี้นอกจากจะเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ แล้วยังอาจมีผลกระทบในทางบวกจากการลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์โดยใช้เท่าที่จำเป็นอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีผลถึงการลดการทำลายสภาวะแวดล้อมเพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ และยังอาจทดแทนการนำเข้าวัสดุราคาแพงจากต่างประเทศได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของดินขาวและเถ้าลอยจากแหล่งในประเทศทั้งในลักษณะบดแยกและบดรวม
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยที่บดทั้งสองลักษณะต่อคุณสมบัติค่าการไหลและกำลังอัดของมอร์ต้าที่ใช้อัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยที่แตกต่างกัน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน
3. เพื่อศึกษาผลของการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอย ต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดในด้านค่ายุบตัวและการสูญเสียค่ายุบตัว และต่อคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในด้านการพัฒนากำลัง โดยใช้อัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยที่แตกต่างกันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน
4. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้สำหรับงานซ่อมชนิดเทบาง โดยพิจารณาในด้านการต้านทานการขัดสี การซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ขอบเขตการศึกษา

ในการศึกษานี้มีขอบเขตดังนี้คือ ใช้ดินขาวดิบจากแหล่งเฉพาะ จ.ระนอง นำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และใช้เถ้าลอยจากแหล่งใหญ่ที่ อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง นำวัสดุดังกล่าวมาบดให้มีความละเอียดระหว่าง 10,000-11,000 ตร.ซม./ก. โดยศึกษาผลการบด 2 ลักษณะคือ การแยกบดเฉพาะดินขาวหรือเถ้าลอย และ การบดดินขาวร่วมกับเถ้าลอย โดยผันแปรส่วนผสมดินขาวต่อเถ้าลอย 5 ระดับคือ 20:0, 15:5, 10:10, 5:15, 0:20 และใช้ส่วนผสมดังกล่าวแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาค่ายุบตัวและการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตสด และศึกษาการพัฒนากำลังอัด กำลังดัด ความต้านทานการขัดสี การซึมผ่านของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยคอนกรีตควบคุมมีกำลังอัดเป้าหมายที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 300-350 กก./ตร.ซม. มีค่ายุบตัว 7.5 ± 2.5 ซม.

การตรวจเอกสาร

การเสื่อมสภาพและความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีต

ในปัจจุบันจะพบปัญหาการเสื่อมสภาพ (Deterioration) ของโครงสร้างคอนกรีตมีอยู่เป็นจำนวนมาก โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของโครงสร้างพบตั้งแต่ขั้นตอนของการออกแบบ การเลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพไม่ได้มาตรฐาน ขณะก่อสร้างขาดการควบคุมงานที่ดีทำให้คอนกรีตไม่ได้คุณภาพตามต้องการ และจากลักษณะการใช้งานที่แตกต่างไปจากการออกแบบ เช่น การรับน้ำหนักเกินกว่าข้อกำหนดก็เป็นปัจจัยที่ทำให้โครงสร้างเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควร และปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งคือ สภาพแวดล้อมที่โครงสร้างต้องสัมผัส เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟต หรือกรด หรือสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเลล้วนเป็นสาเหตุทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสื่อมสภาพ

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตสามารถจำแนกได้เป็น 5 ชนิด ตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพ คือ การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (Physical Deterioration) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (Chemical Deterioration) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (Mechanical Deterioration) การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางชีวภาพ (Biological Deterioration) และการเสื่อมสภาพโดยสาเหตุรวม (Mixed Deterioration) (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543) โดยการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเหล่านี้จะนำไปสู่ความเสียหายของโครงสร้าง อันอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ดังนั้นเมื่อโครงสร้างเกิดความเสียหายงานซ่อมจึงถือว่ามีความสำคัญและมีความจำเป็น เพื่อหยุดความเสียหายที่เกิดขึ้นและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างออกไป โดยงานซ่อมจะประกอบด้วยวิธีการซ่อมและวัสดุซ่อม ซึ่งต้องพิจารณาเลือกวิธีการและวัสดุให้เหมาะสมกับลักษณะของความเสียหาย

ลักษณะความเสียหายของพื้นคอนกรีตที่พบเห็นโดยส่วนใหญ่ อาจปรากฏในลักษณะการหลุดร่อนที่ผิวหน้าคอนกรีต (Scaling) การแตกกระเทาะ (Spalling) การเกิด Pop-Outs การแตกร้าวตามมุม (Corner Crack) การแตกร้าวในแนวทแยงมุม (Diagonal Crack) การแตกร้าวในแนวขวาง (Transverse Crack) หรือการแตกร้าวในแนวยาว (Longitudinal Crack) ดังในภาพผนวกที่ ข11 ซึ่งวิธีการซ่อมแซมความเสียหายดังกล่าวจะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะและระดับความรุนแรงของความเสียหาย หากระดับความเสียหายของโครงสร้างไม่รุนแรงมากนักเช่นการแตกร้าวในบริเวณแคบๆ และมีความลึกของความเสียหายไม่เกิน 1/3 ของความหนาพื้นคอนกรีต วิธีการซ่อมสามารถ

เลือกใช้วิธีการซ่อมแบบฉาบปะ (Patching Repair) หรือแบบเทบาง (Partial-Depth Repair) ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากใช้เวลาในการซ่อมน้อยทำให้สามารถใช้งานโครงสร้างได้เร็ว (FHWA-RD-99-152, 1999) โดยวิธีการซ่อมประกอบด้วยกระบวนการ ตรวจสอบหาสาเหตุของความเสียหาย กำหนดขอบเขตบริเวณซ่อม สกัดคอนกรีตส่วนที่เสียหายออกและทำความสะอาด ทาวัสดุที่ใช้สำหรับเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ระหว่างผิวคอนกรีตเดิมและวัสดุซ่อม เสร็จแล้วเทวัสดุซ่อมลงในบริเวณที่จะซ่อม หลังจากนั้นทำการตกแต่งผิวและบ่มคอนกรีตเพื่อให้ได้กำลังตามต้องการ

วัสดุซ่อมคอนกรีต

วัสดุในงานซ่อมคอนกรีตโดยทั่วไปประกอบด้วยวัสดุซ่อมแบบดั้งเดิมและวัสดุซ่อมชนิดพิเศษ ซึ่งวัสดุซ่อมที่เลือกใช้ต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมและสอดคล้องกับความต้องการของงานซ่อมแต่ละประเภทเพื่อให้งานซ่อมมีประสิทธิภาพสูงสุด คุณสมบัติสำคัญของวัสดุซ่อมโดยทั่วไปคือ กำลังอัดและกำลังยึดหน่วง และนอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติที่จำเป็นอื่นที่ต้องพิจารณาสำหรับวัสดุซ่อม เช่น คุณสมบัติด้านสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of Thermal Expansion) คุณสมบัติด้านการหดตัว (Shrinkage) คุณสมบัติด้านการซึมผ่าน (Permeability) ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) คุณสมบัติด้านเคมี (Chemical Properties) คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties) และคุณสมบัติด้านสี (Color Properties) (ACI 546R-96, 2001)

ในปัจจุบันวัสดุซ่อมโครงสร้างคอนกรีตที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์มีอยู่มากมาย และมีคุณสมบัติแตกต่างกันตามความเหมาะสมกับงานในแต่ละประเภท โดยส่วนใหญ่วัสดุซ่อมเหล่านี้จะนำเข้ามาจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง จึงทำให้ต้นทุนในงานซ่อมเพิ่มสูงขึ้น การพิจารณานำวัสดุที่มีภายในประเทศมาปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ และเป็นการลดต้นทุนในงานซ่อม นอกเหนือไปจากนั้นยังเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้เกิดประสิทธิผลสูงสุด

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan)

ASTM C168, ACI 116R-00, Troxell et. al (1968) ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า วัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานอยู่ในรูปผงที่มีความละเอียดสูง เมื่อสัมผัสกับน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์($\text{Ca}(\text{OH})_2$)ที่อุณหภูมิปกติทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติการเชื่อมประสาน

มาตรฐาน ASTM C168 แบ่งสารปอซโซลานออกเป็น 3 ประเภท คือ ปอซโซลาน Class N, Class F และ Class C โดยปอซโซลาน Class N เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ต้องปรับปรุงหรือไม่ต้องปรับปรุงคุณภาพก็ได้ เช่น หินพัมมิไซด์ (Pumicite) หินโอปอลไลด์ (Opaline) หินเชิร์ต (Cherts) และหินเชลล์ (Shale) และถ่านหินไฟ สารปอซโซลานธรรมชาติบางชนิดเมื่อได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 500-1,100 องศาเซลเซียส จะทำให้ความไวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปอซโซลาน Class F เป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 5 มีคุณสมบัติการเป็นวัสดุเชื่อมประสานอยู่น้อยแต่มีคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน และปอซโซลาน Class C เป็นวัสดุปอซโซลานที่เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminus) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงกว่าร้อยละ 10 มีคุณสมบัติการเป็นวัสดุเชื่อมประสานและคุณสมบัติปอซโซลานในตัวเอง

สารปอซโซลานมีองค์ประกอบของซิลิกาหรืออลูมินาที่ไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์และทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นสารปอซโซลานที่มีอนุภาคขนาดเล็กยังหน้าที่อุดแทรกช่องว่าง (Filling Effect) ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น มีความทนทานเพิ่มขึ้นรวมทั้งกำลังอัดประลัยเพิ่มขึ้นอีกด้วย

ดินขาว (Metakaolin)

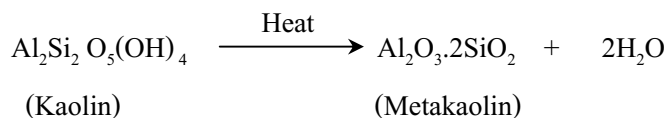
ดินขาว ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) จัดเป็นวัสดุปอซโซลานซึ่งได้จากการนำดินขาวดิบจากธรรมชาติ ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) มาปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน โดยวิธีการเผาในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นอัมมอร์ฟ (Amorphous) ไม่มีรูปร่างที่แน่นอน มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุเหล็ก ของดินขาวประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาคือ เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น โดยองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีปริมาณที่แตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดของดิน อนุภาคของดินขาวมีขนาดโดยมีเฉลี่ยประมาณ 1.5 ไมครอน (Balaguru, 2001) ตามมาตรฐาน ASTM C168 จัดดินขาวเป็นสารปอซโซลาน Class N (Raw or Calcined Pozzolan) เมื่อผสมในคอนกรีต ดินขาวจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรตที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีต นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นเพิ่มขึ้น (Wild, 1996) นอกเหนือไปจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง ดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านกายภาพให้กับคอนกรีตอีกด้วย โดยอนุภาคของดินขาวที่มีขนาดเล็กจะเข้าไปแทรกช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุน (Porosity) และทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้ดินขาวผสมในคอนกรีต จึงมักให้ผลดีในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในด้านกำลัง (Strength) และความทนทาน (Durability) มีงานวิจัยหลายชิ้นรายงานว่า ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดให้กับคอนกรีตคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (Wild, 1996; จิรวัดน์, 2546)

การปรับปรุงคุณภาพดินขาว

การปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบด้วยความร้อนเพื่อให้ได้ดินขาวที่มีคุณภาพและคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต ทำได้โดยใช้กระบวนการเผาที่ควบคุมอุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสม ทำให้ดินขาวดิบสูญเสียน้ำและเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีกลายสภาพเป็นดินขาวที่มีสถานะผลึกเป็นอัมมอร์ฟ โดยคุณภาพของดินขาวที่ได้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแร่ตามแหล่งกำเนิด ความบริสุทธิ์ ขนาดของเม็ดดินและสถานะทางผลึก (Murat, 1983)

ปฏิกิริยาจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดินขาวด้วยความร้อนแสดงได้ดังนี้

(Pera and Ambroise, 1998)



อุณหภูมิการเผามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะและลักษณะทางผลึกของดินขาว ซึ่งมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก มีรายงานวิจัยของ Chatterji et al. (1960) และ Measson et al. (1978) ที่แสดงว่าการเผาดินขาวที่เผาด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส ดินขาวดิบบางส่วนยังคงสภาพเดิม แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยยังต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ดินขาวดิบจะกลายสภาพเป็นดินขาวทั้งหมด แต่มีสถานะทางผลึกเป็นอันธรูปน้อยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดำและที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมที่สุดเพราะทำให้ได้ดินขาวมีสถานะทางผลึกมีลักษณะเป็นอันธรูปมากขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง หากใช้อุณหภูมิสูงกว่า 850 องศาเซลเซียส ดินขาวจะกลายสภาพเป็นสารประกอบชนิดอื่น เช่น มูไลต์ (Mulite; $2(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2)$) สปิเนล (Spinel; $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$) และซิลิกาออกไซด์ ซึ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

เพื่อให้ได้วัสดุปอซโซลานคุณภาพดี กระบวนการผลิตและปรับปรุงคุณภาพเป็นสิ่งสำคัญ Nevill (1996) รายงานว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวจะอยู่ในช่วง 650-850 องศาเซลเซียส และบดจนอนุภาคมีความละเอียดโดยมีพื้นที่ผิวประมาณ 700-900 ตร.ม./กก. จะได้ดินขาวที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้สูง (High Pozzolanicity)

วิธีการเผามีอิทธิพลต่อสถานะทางผลึกของดินขาวเช่นกัน Murat and Comel (1983) ได้ศึกษาผลกระทบจากวิธีการและอุณหภูมิ โดยเผาดินขาวด้วยวิธีใช้ถังนิ่ง (Fixed-Bed) เป็นเวลา 3-6 ชั่วโมง และวิธีใช้ถังกวน (Stirred-Bed) เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง โดยใช้ช่วงอุณหภูมิการเผาเดียวกันคือ 700-850 องศาเซลเซียส พบว่าดินขาวที่ได้จากการเผาโดยใช้ถังนิ่งเป็นเวลา 6 ชั่วโมงเมื่อนำมาผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ จะให้กำลังอัดสูงกว่าการเผาโดยใช้ถังกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และพบว่าวิธีการเผาโดยใช้ถังนิ่งได้ดินขาวที่มีสถานะทางผลึกมีลักษณะเป็นอันธรูปมากกว่าวิธีการเผาโดยใช้ถังกวนจึงมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่สูงกว่าทำให้มีกำลังอัดสูงกว่าด้วย

ในประเทศไทยมีรายงานการศึกษาถึงอุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบจากแหล่งใหญ่ต่างๆ เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน เช่น แหล่งดินจังหวัดปราจีนบุรี, จังหวัดระนอง และจังหวัดลำปาง

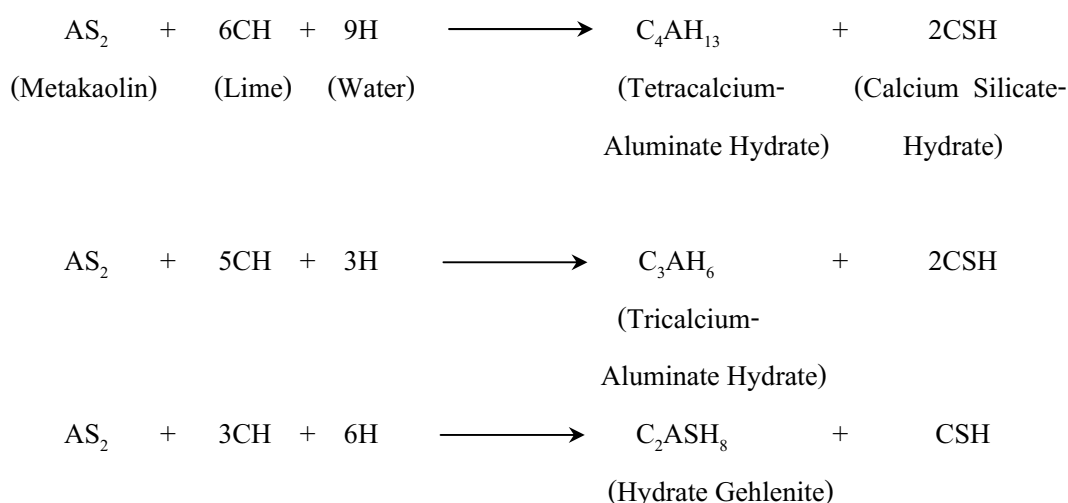
รายงานของ Hengsadeekul (1995) ที่ศึกษาการเผาดินขาวดิบที่ผ่านการล้าง (Washed Kaolin) และดินขาวดิบที่ผ่านการบด (Crushed Kaolin) โดยใช้แหล่งดินจากจังหวัดลำปางเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน และใช้เตาเผาแบบถังนิ่ง แปรผันอุณหภูมิการเผาที่ 700, 750, 800 และ 850 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบคือ 800 องศาเซลเซียส การเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ดินขาวดิบที่ผ่านการล้างให้ดินขาวที่ทำให้กำลังอัดของมอร์ต้ามีค่าสูงกว่าดินขาวดิบที่ผ่านการบด ที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์เดียวกัน

Sayamipuk (1999) ได้รายงานการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับอุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบจากแหล่งดิน 2 แหล่ง คือ จังหวัดระนองและลำปาง โดยเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส และแปรผันระยะเวลาการเผาที่ 3, 6, 12 และ 18 ชั่วโมง พบว่าดินขาวดิบจากแหล่งดินจังหวัดระนองเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อย่างเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ดินขาวที่ให้ค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) สูงที่สุด และสอดคล้องกับรายงานอื่น (อนุพงษ์, 2543) ที่ศึกษาอุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเผาดินขาวดิบจากแหล่งดิน 3 แหล่ง คือ จังหวัดปราจีน, จังหวัดระนอง และจังหวัดลำปาง โดยเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส และแปรผันระยะเวลาการเผาที่ 4, 6 และ 8 ชั่วโมง โดยพบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ต่อเนื่อง 6 ชั่วโมง เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับดินขาวทั้ง 3 แหล่ง เมื่อพิจารณาจากค่ากำลังอัดและค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้า ซึ่งมีค่า 131, 115 และ 100 ตามลำดับ

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาว (Pozzolanic Reaction of Metakaolin)

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากซิลิกาออกไซด์และ อลูมินาออกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในดินขาว ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต

Murat (1983) ได้เสนอสมการของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาว ที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนด้วยการเผาโดยใช้ถ่านที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ และบ่มตัวอย่างในห้องบ่มควบคุมอุณหภูมิที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-90 วัน ผลการตรวจสอบตัวอย่างด้วย X-Ray Diffraction (XRD) และ Differential Thermal Analysis (DTA) แสดงให้เห็นว่ามีสารประกอบ C_4AH_{13} , C_3AH_6 , C_2ASH_8 และ CSH เกิดขึ้น โดยชนิดของสารประกอบจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตั้งต้น โดยสมการแสดงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีดังนี้



ปฏิกิริยาปอซโซลานิกลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนในคอนกรีตลงและเพิ่มสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานซึ่งมีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น คุณสมบัติด้านกำลัง การซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทานต่อสารเคมี เป็นต้น

Wild and Khatib (1997) ตรวจสอบปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธี Thermogravimetric Analysis (TG) ในซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวที่ระดับร้อยละ 0-15 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 0.55 เปรียบเทียบกำลังอัดกับซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าควบคุมที่อายุการบ่ม 3-365 วัน พบว่าภายในช่วงการบ่ม 7 วัน ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าที่ผสมดินขาวจะมีแนวโน้มลดลง และมีปริมาณต่ำสุดที่อายุการบ่ม 14 วัน โดยมีความสัมพันธ์กับกำลังอัดสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นในช่วง 7 วันแรก และสูงสุดที่อายุการบ่ม 14 วัน และค่อยๆลดลงซึ่งอธิบายได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกดึงแคลเซียมไฮดรอก

ไฮดรอกไซด์ออกจากระบบจะเกิดขึ้นสูงสุดที่อายุการบ่ม 14 วัน ทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และแคลเซียมออลูมิเนตไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และมอร์ต้าดีขึ้นและมีข้อเสนอแนะว่าปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวสูงกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก สามารถใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยาจนหมดซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kostuch(1993) และ Oriol and Pera (1995) ที่พบว่าปริมาณดินขาวที่ใช้ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมดอยู่ในช่วงระดับการแทนที่ร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก โดยปริมาณที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของดินขาว พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 0.50 ดินขาวสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมดภายในระยะเวลา 28 วัน (Oriol and Pera, 1995)

ความละเอียดของดินขาวมีผลต่อกำลังอัดและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเช่นเดียวกันกับสารปอซโซลานประเภทอื่นโดยเฉพาะกำลังอัดในช่วงเริ่มต้น แต่ในระยะยาวไม่เห็นผลแตกต่างที่ชัดเจน เมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะของดินขาวเพิ่มขึ้นจาก 12,000 ตร.ซม./ก. เป็น 15,000 ตร.ซม./ก. จะมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเร็วขึ้นและค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวในช่วงเริ่มต้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่กำลังอัดในระยะยาว 90 วัน ไม่แสดงผลชัดเจน Wild et al.(1997) และคณะของ Curico et al. (1998) ศึกษาผลกระทบขององค์ประกอบทางเคมีและความละเอียดของดินขาว 4 ชนิด ต่อค่ากำลังอัดของมอร์ต้าโดยเปรียบเทียบกับมอร์ต้าผสมซิลิกาฟูมในปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากัน พบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวที่มีความละเอียดสูงมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุ 7-28 วันแรก เร็วกว่ามอร์ต้าผสมดินขาวที่มีความละเอียดต่ำและมอร์ต้าผสมซิลิกาฟูม แต่ในระยะยาว 90-180 วัน ค่ากำลังอัดจะมีความแตกต่างกันน้อย ซึ่งสอดคล้องกับรายงานอื่น (Zhang and Malhotra, 1995) และ (Wild et al., 1995-1996) และจากการวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธี Differential Thermal Analysis เทียบกับระยะเวลาการบ่มเพื่อตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก พบว่าดินขาวที่มีความละเอียดสูงมีความไวในการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกับซิลิกาฟูม นอกจากนี้ยังพบว่าดินขาวที่มีความละเอียดสูงยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เร็วขึ้นด้วย

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารปอซโซลานเหล่านั้น เช่น ซิลิกาฟูมจัดเป็นสารปอซโซลานที่มีความไวในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกสูง (High Pozzolanic Activity) ทำให้มีความร้อนจากปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่

เถาลอยเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกช้าในช่วงต้น (Low Initial Pozzolanic Activity) จึงให้ผลในทางตรงกันข้าม การเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วอาจมีผลเสียต่อความคงทนของมอร์ต้าและคอนกรีต เพราะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เช่น การหดตัว การเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro crack) มีรายงานผลการศึกษาเปรียบเทียบการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของมอร์ต้าที่ผสมดินขาว ผสมเถาลอย และผสมซิลิกาฟูม (Frias et al., 2000) ที่แสดงว่ามอร์ต้าผสมดินขาวให้ความร้อนใกล้เคียงกับมอร์ต้าผสมซิลิกาฟูม และสูงกว่ามอร์ต้าควบคุม แต่มอร์ต้าผสมซิลิกาฟูมจะเกิดความร้อนสูงสุดเร็วกว่า มอร์ต้าผสมเถาลอยให้ความร้อนลดลง และอาจสรุปได้ว่าซิลิกาฟูมและดินขาวจะมีพฤติกรรมทำให้ความร้อนใกล้เคียงกัน คือเพิ่มความร้อนให้กับปฏิกิริยา ขณะที่เถาลอยมีผลต่อการลดความร้อน และโดยทั่วไปดินขาวมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่ำกว่าซิลิกาฟูม แต่จะสูงกว่าเถาลอย

Frias and Cabrera (2002) ศึกษาผลของอุณหภูมิการบ่ม 20 และ 60 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาวผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส ในห้องบ่มและบ่มในน้ำซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส โดยห่อตัวอย่างด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันน้ำเข้า ใช้สมการทางคณิตศาสตร์คำนวณ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิการบ่มที่ 60 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะสูงกว่าที่อุณหภูมิการบ่ม 20 องศาเซลเซียส ถึง 68 เท่า โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดของทั้งสองอุณหภูมิจะเกิดในช่วงเวลาการบ่ม 120 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะใกล้เคียงกัน และจากการตรวจสอบปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส นอกจากนี้จากการตรวจสอบชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นพบว่าที่อุณหภูมิการบ่ม 20 องศาเซลเซียส จะมีสารประกอบที่เกิดขึ้นคือ CSH, C_2ASH_8 และ C_4AH_{13} แต่ที่อุณหภูมิการบ่ม 60 องศาเซลเซียส จะมีสารประกอบ C_3ASH_6 เกิดเพิ่มขึ้น

ผลกระทบของดินขาวต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าและคอนกรีต

Wild et al. (1996) ศึกษาการใช้ดินขาวเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และบ่มตัวอย่างในน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-90 วัน พบว่าดินขาวช่วยเพิ่มกำลังอัดให้กับคอนกรีตทุกระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์และทุกช่วงอายุทดสอบ โดยดินขาวจะทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการคือ ทำหน้าที่เป็นตัวอุดแทรกช่องว่างขนาดเล็ก ซึ่งมีผลทันทีหลังการผสม

เป็นตัวเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันภายใน 24 ชั่วโมงแรก และเป็นสาระสำคัญสำหรับปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีอัตราการเกิดสูงสุดในช่วง 7-14 วันแรก และพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้กำลังอัดในระยะยาวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

Poon et. al. (2001) ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเพสต์ผสมดินขาวโดยศึกษาการพัฒนากำลังอัด ความพรุน ระดับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Degree of Pozzolan Reaction) และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับเพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมและเพสต์ผสมเถ้าลอย พบว่าที่ระดับการแทนที่เดียวกัน เพสต์ผสมดินขาวมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าเพสต์ผสมซิลิกาฟูมหรือเพสต์ผสมเถ้าลอย จึงทำให้เพสต์ผสมดินขาวมีการพัฒนากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้น 3-7 วัน แต่ในระยะยาว 90 วัน มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน และพบว่าความพรุนของเพสต์ผสมดินขาวมีค่าต่ำกว่าและช่องว่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าทั้งในเพสต์ควบคุมและเพสต์ผสมซิลิกาฟูมที่ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เท่ากันทุกอายุทดสอบ ซึ่งแสดงว่าดินขาวมีประสิทธิภาพสูงกว่าซิลิกาฟูมและเถ้าลอยในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค

Sayamipuk and Nimityongskul (2000) รายงานผลการนำดินขาวดิบจากแหล่งจังหวัดระนองมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยศึกษาการพัฒนากำลังอัดและความคงทนในด้านต่างๆของมอร์ต้า พบว่ามอร์ต้าที่ผสมดินขาวทุกอายุทดสอบให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมทุกระดับการแทนที่ซีเมนต์ และที่ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด และที่อายุการบ่ม 7 วัน มอร์ต้าผสมดินขาวที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4 ที่มีระดับการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ต้าควบคุมที่อายุการบ่ม 90 วัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Wild et al., 1996) ซึ่งอธิบายการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วว่า เป็นผลกระทบของดินขาวในการช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ในช่วงอายุต้นๆ นอกจากนี้ยังพบว่า มอร์ต้าผสมดินขาวมีค่าการซึมผ่านน้ำต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุม โดยมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลง และพบว่าดินขาวช่วยให้มอร์ต้ามีความต้านทานการกัดกร่อนของกรดเพิ่มขึ้น และลดการหดตัวของมอร์ต้าอีกด้วย

Sabir (1998) ได้ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานและอุณหภูมิการบ่มต่อการอัดตัวของคอนกรีตผสมดินขาว พบว่าการบ่มโดยใช้อุณหภูมิสูงทำให้การอัดในช่วงต้นเพิ่มขึ้น แต่ในช่วงปลายการอัดจะลดลง และยังพบว่า การเติมดินขาวในส่วนผสมคอนกรีตทำให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลงตามปริมาณดินขาวที่เพิ่มขึ้น

ปริมาณการแทนที่ด้วยดินขาว และระยะเวลาการบ่มมีผลกระทบต่อความพรุนและการกระจายของช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ Wild and Khatib (1996) พบว่าความพรุนในเนื้อซีเมนต์เพสต์ลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ของดินขาวและระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น โดยปริมาณของช่องว่างขนาดใหญ่ (รัศมีมากกว่า 20 นาโนเมตร) ลดลง และปริมาณของช่องว่างขนาดเล็ก (รัศมีน้อยกว่า 20 นาโนเมตร) มีจำนวนเพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาตรช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวจะเพิ่มในช่วง 14–28 วัน แต่หลังจากนั้นจะลดลงตามอายุการบ่ม

Frias and Cabrera (2000) ศึกษาผลของดินขาวที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์โดยใช้ดินขาวแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0-25 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.55 บ่มในน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 1-360 วัน พบว่าความพรุนทั้งหมด (Total Porosity) ลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 1-56 วัน หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มคงที่ โดยในเพสต์ควบคุมจะมีค่าความพรุนทั้งหมดน้อยกว่าเพสต์ผสมดินขาว ในขณะที่ Capillary Pore ในเพสต์ผสมดินขาวมีค่าน้อยกว่าเพสต์ควบคุม ส่วนปริมาณ Gel Pore ในเพสต์ผสมดินขาวจะเพิ่มขึ้นในช่วง 7-90 วัน ในขณะที่ปริมาณในเพสต์ควบคุมจะคงที่ และนักวิจัยได้เสนอว่าปริมาณดินขาวที่เหมาะสมในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของเพสต์ให้มีความพรุนลดลง และลดขนาดโดยเฉลี่ยของรูพรุน (Pore) ก็คือร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก การปรับปรุงขนาดช่องว่างและลดความพรุนของมอร์ต้าและคอนกรีตส่งผลถึงความซึมผ่านได้ของคอนกรีต ดังรายงานของ Saad et al. (1997) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และตรวจวัดการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของเพสต์ที่ผสมดินขาว โดยมีปริมาณการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนที่แตกต่างกัน พบว่าดินขาวมีส่วนช่วยลดความพรุน และปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้กับเพสต์เนื่องจากปริมาณสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมินไฮเดรตเพิ่มขึ้นจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิก ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของเพสต์ลดลง และจากการศึกษานี้ยังพบว่าดินขาวมีผลต่อการยืดเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) ของเพสต์ด้วย

Balaguru (2001) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมดินขาวที่อยู่ในสภาพสดและสภาพที่แข็งตัวแล้ว โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวร้อยละ 5 และ 9 โดยน้ำหนัก และบ่มตัวอย่างคอนกรีตใน 2 ลักษณะคือบ่มขึ้น และบ่มในน้ำร้อน พบว่าปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ดังกล่าวไม่มีผลที่ชัดเจนต่อการลดค่ายุบตัวของคอนกรีตที่และปริมาณอากาศในคอนกรีต (Air Content) สำหรับคอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้ว พบว่าดินขาวช่วยพัฒนากำลังอัดให้กับคอนกรีตเร็วมาก ทั้งคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งคอนกรีตคอนกำลังสูงมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และ 15 ส่วนคอนกรีตปกติเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 และ 30 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 3 ตามลำดับ การบ่มตัวอย่างในน้ำร้อนช่วยให้คอนกรีตที่ผสมดินขาวมีการพัฒนากำลังอัดที่อายุทดสอบ 1 วัน เพิ่มขึ้นเร็วมาก นอกจากนี้ดินขาวยังมีผลทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงเป็นอย่างมาก แต่ช่วยเพิ่มค่าโมดูลัสการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ให้กับคอนกรีตเพียงเล็กน้อย และไม่มีผลต่อค่าโมดูลัสการแตกหัก (Modulus of Rupture) ที่ชัดเจน

การดูดซึม การซึมผ่านและการแพร่ผ่าน เป็นช่องทางหลักที่สารซึ่งมีผลต่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเช่น คลอไรด์ ซัลเฟตและกรดชนิดต่างๆเข้าไปทำลายเนื้อคอนกรีตส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ดังรายงานของ Cabrera and Nwaubani (1998) ที่ศึกษาผลของการใช้ดินขาวและเถ้าลอยผสมในซีเมนต์เพสต์โดยวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์ไอออน และตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานให้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมอลูมินาไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ ซึ่งช่วยลดจำนวนปริมাত্রูพรุนทั้งหมดและผลิตรูพรุนที่ขนาดเล็ก ทำให้การแพร่ผ่านของคลอไรด์ไอออนเป็นไปได้ยากขึ้น

เจริญวุฒิ (2546) ได้ทำการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของระยะเวลาการบด ความสะดวกและกำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาว โดยนำดินขาวดิบจากแหล่งดินจังหวัดระนองมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วบดโดยแปรผันระยะเวลาบด 1, 1.5, 2 และ 2.5 ชั่วโมง และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Blaine Specific Surface) อยู่ในช่วง 8,500-11,500 ตร.ซม./ก. และพิจารณาร่วมกับค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวที่มีระดับการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อใช้เวลาในการบดเพิ่มขึ้น ดินขาวจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น ค่ากำลังอัดและกำลังอัดสัมพัทธ์ก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับรายงานอื่น (Wild et al., 1997; Sayamipuk, 2000)

เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะมีผลทำให้ความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาวสูงขึ้น รวมถึงอิทธิพลของการอุดแทรกช่องว่างของอนุภาคดินขาว และเมื่อผันแปรปริมาณการแทนที่ มอร์ต้าผสมดินขาวจะมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุมในช่วงต้น 1-3 วัน แต่ในระยะ 7-28 วัน มอร์ต้าผสมดินขาวมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุม ทุกระดับการแทนที่ และให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งตรงกันกับรายงานของ (Sayamipuk, 2000) อย่างไรก็ตามดินขาวไม่มีผลชัดเจนต่อการเพิ่มการรับแรงดึงและแรงดัด แต่เมื่อระดับการแทนที่สูงเกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้คุณสมบัติดังกล่าวลดลง ส่วนคุณสมบัติในการปรับปรุงการยึดเกาะกับพื้นผิวเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าควบคุมไม่เห็นผลต่างที่ชัดเจน แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงความขรุขระน้อยกว่ามอร์ต้าควบคุมเมื่อบ่มตัวอย่างทดสอบในอากาศปกติ นอกจากนี้ มอร์ต้าผสมดินขาวยังมีระดับค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำมากถึงไม่มีการซึมผ่านเลย เมื่อเทียบกับมอร์ต้าควบคุมซึ่งมีค่าการซึมผ่านอยู่ในระดับสูง

ในการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมดินขาวจากแหล่งดินขาวเดียวกัน (จิรวรรณ, 2546) พบว่า คอนกรีตมีค่าความยุบตัวลดลงและมีอัตราสูญเสียค่ายุบตัวสูงกว่าคอนกรีตควบคุม โดยเฉพาะเมื่อระดับการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากลักษณะอนุภาคของดินขาวที่เป็นแผ่นและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้คอนกรีตผสมดินขาวมีความต้องการน้ำสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ค่ายุบตัวเดียวกัน แต่ดินขาวมีผลดีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพที่แห้งตัว ในด้านการพัฒนากำลังอัด กำลังดัด และการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ คอนกรีตที่ผสมดินขาวมีกำลังอัดและกำลังดัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกช่วงอายุทดสอบและที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในช่วงอายุทดสอบที่ 3-56 วัน และพบว่าค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงเมื่อระดับการแทนที่ด้วยดินขาวเพิ่มขึ้น โดยจัดอยู่ในระดับต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับคำแนะนำตามมาตรฐาน ASTM C1202

Batis et. al (2004) ศึกษาผลของดินขาวต่อคุณสมบัติด้านความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กที่ฝังในมอร์ต้าซึ่งใช้ดินขาวแทนที่ซีเมนต์หรือแทนที่ทรายที่ระดับต่างๆ และแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นเวลา 8 เดือน โดยตรวจสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยวิธีทดสอบศักย์ไฟฟ้า (Half Cell Potential Test) ทุกๆเดือน และวัดน้ำหนักเหล็กที่หายไปจากการกัดกร่อนที่อายุทดสอบ 5 และ 8 เดือน จากการศึกษาพบว่า การใช้ดินขาวแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก หรือใช้แทนที่ทรายร้อยละ 20 โดยน้ำหนักจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทาน

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในมอร์ต้าได้ดีที่สุด แต่เมื่อระดับการแทนที่ซีเมนต์หรือทรายสูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานการเกิดสนิมลดลง

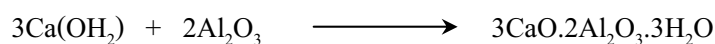
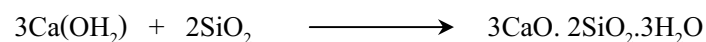
เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอย มีลักษณะเป็นผงสีเทา เทาดำ หรือน้ำตาล ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานโรงไฟฟ้าถ่านหิน และถูกดักจับเก็บไว้ด้วยอุปกรณ์ดักจับตามขนาดอนุภาคแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอชโซลานสังเคราะห์ประเภทหนึ่ง มีส่วนประกอบหลักเป็นอันรุธของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์เมื่ออยู่ในสภาพแห้งจะไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานระหว่างอนุภาค แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและสัมผัสกับความชื้นที่เพียงพอภายใต้อุณหภูมิปกติจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน โดยคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ในการเผาดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยส่วนหนึ่งจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C168 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C โดยเถ้าลอย Class F มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก โดยทั่วไปได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซด์หรือบิทูมินัส ขณะที่เถ้าลอย Class C มีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก มักได้จากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์หรือซับบิทูมินัส

ปฏิกิริยาปอชโซลานิกของเถ้าลอย

ปฏิกิริยาปอชโซลานิกของเถ้าลอยคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาปอชโซลานิกของดินขาว คือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำปฏิกิริยากับสารประกอบหลักคือ ซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ ซึ่งมีในสารปอชโซลานทั้งสองชนิด แต่เนื่องจากเถ้าลอยเป็นสารปอชโซลานที่มีความไวต่อปฏิกิริยาปอชโซลานิกในช่วงต้นต่ำ และมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานิกของเถ้าลอยจึงช้ากว่าดินขาว และคอนกรีตหรือมอร์ต้าที่ผสมเถ้าลอยจึงมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นต่ำ โดยปฏิกิริยาปอชโซลานิกของเถ้าลอยที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับเถ้าลอย



ผลกระทบของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้าและคอนกรีต

การนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตในลักษณะแทนที่ปูนซีเมนต์ (Replacement Method) หรือ ใช้ในลักษณะการผสมเพิ่ม (Addition Method) ส่งผลให้คุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีตเปลี่ยนไปทั้งคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสดและสภาพที่แข็งตัวแล้ว ซึ่งจะกล่าวเฉพาะคุณสมบัติสำคัญๆ ดังนี้

1. ความสามารถในการทำงานได้ (Workability)

เถ้าลอยมักมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในน้ำหนักที่เท่ากัน หรือมากกว่าจะทำให้ปริมาตรโดยรวมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ทำให้สภาพความเป็นพลาสติกและคุณสมบัติการยึดเกาะดีขึ้น และจากลักษณะของอนุภาคที่เล็กและกลม เถ้าลอยจึงทำหน้าที่เสมือน Bearing Ball ทำให้การใช้น้ำในคอนกรีตลดลงโดยยังคงค่าความยุบตัวเท่าเดิม ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มความสามารถในการเทได้ให้กับคอนกรีต แต่เถ้าลอยชนิดหยาบที่มีปริมาณคาร์บอนสูงและมีรูพรุนมากหรือบางชนิดที่มีรูปร่างอนุภาคเป็นเหลี่ยมมักต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพื่อให้มีความสามารถในการเทเท่ากัน

2. การเยิ้ม (Bleeding)

การใช้เถ้าลอยในคอนกรีตช่วยลดการเยิ้ม ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาตรส่วนละเอียดที่เพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำที่ลดลง นอกจากนี้ส่วนละเอียดที่มีอยู่ในเถ้าลอยยังสามารถช่วยทดแทนปริมาณมวลรวมละเอียดที่อาจมีไม่เพียงพอ และยังช่วยปิดกั้นช่องทางน้ำที่เยิ้มอีกด้วย

3. ความสามารถในการปั๊ม (Pumpability)

เถ้าลอยจะทดแทนมวลรวมละเอียดส่วนที่ขาดไป ทำให้คอนกรีตหรือมอร์ต้ามีการยึดเกาะกันมากขึ้น ลดโอกาสที่จะเกิดการแยกตัว และจากลักษณะที่กลมตันหรือกลวงของอนุภาคเถ้าลอย

ยังช่วยลดความถี่ระหว่างอนุภาคของมวลรวม และลดความถี่ระหว่างคอนกรีตกับผิวภายในท่อ ปัมจึงทำให้การปัมทำได้ง่ายขึ้น

4. ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)

โดยทั่วไปแล้วลอยจะยึดเวลาการก่อตัวของคอนกรีตออกไปเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งลอย Class F ขณะที่ Class C อาจมีหรือไม่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวมากนัก (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2544) ซึ่งมีรายงานการวิจัยว่าลอย Class F และ Class C จะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และหากลอยมีปริมาณคาร์บอนสูงจะทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นระยะเวลาการก่อตัวจึงเพิ่มขึ้นด้วย

5. กำลังอัดและการพัฒนากำลัง (Compressive Strength)

คอนกรีตผสมลอยจะมีกำลังอัดเท่ากับหรือต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุต้นๆ และยิ่งต่ำมากหากใช้ปริมาณลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงๆ (วรเดช, 2546) เนื่องจากกำลังอัดในช่วงต้นของคอนกรีตผสมลอยได้มาจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยลอยสูงขึ้นก็จะทำให้การปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง แต่ในระยะยาวคอนกรีตผสมลอยอาจมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเท่ากับหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิก

6. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม (Bond Strength Between Concrete and Reinforcement)

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวเหล็กที่สัมผัสคอนกรีต ตำแหน่งของเหล็กเสริมและความหนาแน่นของคอนกรีต การใช้ลอยมีผลในการเพิ่มปริมาณเพสต์และลดการเยิ้ม ดังนั้นในบริเวณผิวด้านล่างของเหล็กซึ่งเป็นบริเวณที่มักมีการสะสมของน้ำเยิ้มจะมีผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดการเยิ้มน้ำลงจึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น

7. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่ (Bond Strength of Old-to-New Concrete Concrete)

มีรายงานว่าในระยะยาว (1-3 ปี) ลอยช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่ให้ดีขึ้น แต่ไม่เป็นผลดีในระยะสั้น (28 วัน) ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของลอยช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต (Gengying, 2003)

8. ความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion Resistance)

ปัจจัยสำคัญที่ควบคุมความทนทานต่อแรงขัดสีของคอนกรีตได้แก่ กำลังอัด การบ่ม คุณสมบัติของมวลรวม การตกแต่งผิว และวิธีการทดสอบ (Tarun et al., 2002) รายงานว่าคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดสูงจะมีค่าความต้านทานการขัดสีสูง และแนะนำว่าความทนทานต่อแรงขัดสีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์สูงกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 944

9. การซึมผ่านน้ำ (Water Permeability)

เถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่ให้กำลังแก่คอนกรีต และจากการอุดแทรกช่องว่างของอนุภาคเถ้าลอยทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยจึงมีการซึมผ่านน้ำต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

10. การซึมผ่านของคลอไรด์ (Chloride Permeability) คลอไรด์ไอออนในคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายของฟิล์มออกไซด์ของเหล็ก ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ที่เคลือบผิวเหล็กเสริมซึ่งมีผลต่อการป้องกันการเกิดสนิม (Nevill, 1996) การผสมเถ้าลอยในคอนกรีตมีผลทำคอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้นช่องว่าง Capillary มีขนาดเล็กลงมีผลทำให้การซึมผ่านหรือแพร่ผ่านของคลอไรด์ไอออนลดลง

การศึกษาการประยุกต์ใช้เถ้าลอยจากแหล่งในประเทศในงานก่อสร้างเริ่มต้นมาตั้งแต่ พ.ศ. 2523 โดยประจิต (2523) ได้ศึกษาค่าความชื้นเหลว เวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และการขยายตัวในสภาวะที่อบไอน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าบางกรวย โดยใช้เถ้าลอยผสมในปริมาณร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความชื้นเหลว เวลาการก่อตัว และการขยายตัวในสภาวะที่อบไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นส่วนค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึงที่อายุเริ่มต้นจะลดลงเมื่อจำนวนเถ้าลอยที่ใช้ผสมเพิ่มขึ้น แต่ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมเถ้าลอย

สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นช้า ดังนั้นการพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกจึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นการผสมเถ้าลอยในคอนกรีตจึงช่วยลดความต้องการปริมาณน้ำ

ทำให้สามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเพื่อชดเชยการพัฒนากำลังในช่วงต้นของคอนกรีต (ประจิต, 2523; สมชัย, 2542) เช่นเดียวกันกับรายงานการวิจัยของ ปริญาและอิทธิชัย (2528) ที่รายงานว่ากำลังอัดระยะแรกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิกยังไม่เกิดขึ้น และเมื่อเวลามากขึ้นกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และมีข้อเสนอแนะให้ใช้ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ได้

กำลังรับแรงอัดคอนกรีตจะสัมพันธ์กับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าลอย และระยะเวลาการบ่ม ดังรายงานการวิจัยของ สุภกิจและสิทธิพร (2536) ที่ศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะ พบว่าปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยที่ทำให้กำลังสูงสุดคือร้อยละ 10-30 และร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก สำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีกำลังรับแรงอัดที่ 210 กก./ตร.ซม. และ 250 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยที่มีอายุการบ่มมากกว่า 28 วัน จะให้กำลังมากกว่าที่กำหนดทุกตัวอย่างทดสอบ

กรกฎ (2530) ศึกษาการใช้เถ้าลอยแม่เมาะเพื่อปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด พบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จะช่วยปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากลักษณะอนุภาคที่กลมของเถ้าที่ทำหน้าที่เสมือน Bearing Ball ที่เพิ่มความสามารถในการเทได้ และเติมประสานช่องว่างคอนกรีต ป้องกันการเยิ้ม นอกจากนี้อนุภาคเถ้าลอยขนาดเล็กยังสามารถดูดซับบนผิวอนุภาคซีเมนต์ ช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคซีเมนต์ ทำให้ปริมาณน้ำส่วนที่ถูกกัก (Entrapped Water) โดยซีเมนต์ลดลง ทำให้มีปริมาณน้ำในการหล่อลื่นมากขึ้น ความต้องการน้ำจึงลดลง แต่เมื่อเถ้าลอยมีปริมาณที่มากเกินไป (มากกว่าร้อยละ 20) ความสามารถในการลดน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก (Helmuth, 1987)

นอกจากนี้การออกแบบส่วนผสมโดยการนำเถ้าลอยซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าซีเมนต์ และทรายมาใช้ในการผสมแทนที่โดยน้ำหนัก ยังส่งผลทำให้ปริมาตรของเฟสเพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตสดมีความสามารถในการเทและความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มความสามารถในการเทได้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ มีรายงานว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงกว่าร้อยละ 10 และมีขนาดอนุภาคใหญ่เป็นเหลี่ยมมุม จะลดความสามารถเทได้ (CUR, 1991; ACI 226

, 1987) นอกจากนี้อนุภาคคาร์บอนบนผิวถ้ำลอยยังดูดซับสารกักกระจายฟองอากาศ (Gao et al., 1997) ทำให้ปริมาณฟองอากาศลดลงด้วย

มีรายงานการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมถ้ำลอยที่อายุ 1 ปี เพิ่มขึ้นจากกำลังอัดที่อายุ 28 วันถึง ร้อยละ 50 ขณะที่กำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 30 เท่านั้น และนักวิจัยแนะนำว่าควรใช้ถ้ำลอยที่คัดขนาดและมีความละเอียดสูง แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตสูงสุด (ธีรราช และ ชัย, 2542)

มนตรี (2542) รายงานผลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและขนาดอนุภาคของถ้ำลอยภายในประเทศต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตในด้านการซึมผ่านของคลอไรด์ โดยใช้ถ้ำลอยขนาด และคัดขนาดจากโรงงาน และบ่มที่อุณหภูมิห้อง 40 และ 60 องศาเซลเซียส แปรผันระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอย 3 ระดับ คือร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมถ้ำลอย และที่ระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก คอนกรีตจะมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดสำหรับถ้ำลอยทุกชนิดและทุกอายุการบ่ม

Wongjeeraphat (2002) ศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตผสมถ้ำลอยจากแม่เมาะ โดยแช่ตัวอย่างทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นระยะเวลา 1, 3 และ 9 เดือน ทำการพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด (Silvernitrate) 0.1N เพื่อวัดระยะซึมลึกของคลอไรด์และเจาะเก็บผงมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ พบว่าถ้ำลอยสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ และการเพิ่มปริมาณการแทนที่ช่วยลดระดับความลึกของการซึมผ่านได้ โดยแนะนำปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนัก และยังพบว่าผลกระทบจากปริมาณการแทนที่ซีเมนต์มีความสำคัญต่อการลดการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่าผลกระทบจากการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

สุวิมล และ ประเสริฐ (2545) ศึกษาผลกระทบของคอนกรีตผสมถ้ำลอยที่มีต่อความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ทำการศึกษากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยในปริมาณร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนัก และแช่ก้อนตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% และในน้ำทะเลสังเคราะห์ที่จำลองสภาวะน้ำขึ้นและน้ำลง จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของถ้ำลอยสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ เมื่อปริมาณ

เถ้าลอยเพิ่มขึ้นสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้เพิ่มขึ้น และยังพบว่าคอนกรีตผสมของเถ้าลอยที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 มีการแทรกซึมเร็วกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เล็กน้อย

วรเดช (2546) ศึกษาการซึมผ่านได้ของคลอไรด์และความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง โดยแทนที่ตั้งแต่ระดับร้อยละ 0-65 โดยน้ำหนัก พบว่าการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลงเมื่อระดับปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีการซึมผ่านของคลอไรด์อยู่ในระดับต่ำมาก ส่วนคอนกรีตควบคุมมีการซึมผ่านของคลอไรด์อยู่ระดับปานกลางถึงสูงมาก ในด้านความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเสริม พบว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง ให้ความน่าจะเป็นของการเกิดการกัดกร่อนต่ำสุด ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 50 และ 65 โดยน้ำหนัก ให้ผลแตกต่างกันไม่ชัดเจน และระดับการแทนที่ร้อยละ 35 เปอร์เซนต์ ให้ความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนอยู่ในช่วงกลางถึงต่ำ ส่วนคอนกรีตควบคุมจะเกิดสนิมในเหล็กเสริมอย่างรุนแรง

คุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในงานซ่อมโดยเฉพาะในกรณีของการซ่อมแซมผิวจราจร คือ คุณสมบัติในด้านความต้านทานการขัดสี ซึ่งปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อค่าความต้านทานการขัดสีของคอนกรีต ได้แก่ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวคอนกรีต คุณสมบัติของมวลรวม วิธีการตกแต่งผิว และวิธีการทดสอบ (Witte and Backstrom, 1951; Cabrera, 1985; Hadchti and Carrasquillo, 1988; Sadeyzadeh et al., 1987; Gjorv et al., 1990 ; ACI 1992; Metha and Monteiro, 1993; Naik et al., 1994)

มีรายงานการวิจัยจำนวนมากที่แสดงว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีการพัฒนาคุณสมบัติด้านนี้ได้ดีขึ้นในบางกรณีดังต่อไปนี้

Tarun et al. (1944) ศึกษาความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C944 โดยใช้เถ้าลอย Class C แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนัก พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้งสองระดับมีค่าความต้านทานการขัดสีต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ต่อมาในปี ค.ศ. 2002 นักวิจัยกลุ่มเดิมได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณและแหล่งผลิตเถ้าลอยต่อค่าความต้านทานการขัดสี โดยใช้เถ้าลอย Class C จากแหล่งที่ต่างกัน 3 แหล่ง แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก และทดสอบที่อายุ 28, 91 และ 365 วัน พบว่าค่า

ความต้านทานการขัดสีเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานการขัดสีมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก คอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีค่าความต้านทานการขัดสีใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม (Tarun et al., 2002) อย่างไรก็ตามก็ยังมียางวิจัยหลายชิ้นที่ให้ผลแตกต่างจากงานวิจัยข้างต้นเมื่อพิจารณาจากปัจจัยอื่นๆประกอบ

Cengiz Duran Atis (2002) ศึกษาความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตตามมาตรฐาน BSI 1993 ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูง โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนัก พบว่าความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง (> 40 Mpa) แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความต้านทานการขัดสีสูงกว่าที่ระดับร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และสูงกว่าคอนกรีตควบคุม

Rafat Siddique (2003) ศึกษาความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตผสมเถ้าลอย มาตรฐาน IS 1237 โดยใช้เถ้าลอย Class F แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก และบ่มตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 0-365 วัน พบว่ากำลังอัดและความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าลอยและอายุการบ่มเพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีระดับการแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานการขัดสีสูงกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 40

การใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอย

จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้ดินขาว หรือเถ้าลอยเป็นสารปอซโซลานในงานคอนกรีตมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน ดังนั้นการใช้ดินขาวและเถ้าลอยร่วมกันจึงมีแนวโน้มที่จะช่วยปรับปรุงจุดเด่นและจุดด้อยของวัสดุแต่ละชนิด เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในด้านต่างๆดียิ่งขึ้นซึ่งเป็นแนวทางในงานวิจัยนี้โดยใช้ดินขาวและเถ้าลอยที่ผ่านการบดแยกและบดรวมกัน แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของการบดในแต่ละลักษณะ ทั้งนี้มีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการบดวัสดุปอซโซลานร่วมกับปูนซีเมนต์ ที่แสดงว่าการบดรวมกันช่วยเพิ่มมวลละเอียดและพื้นที่ผิวจำเพาะให้วัสดุดีกว่า ซึ่งส่งผลต่อการเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก ช่วยให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นและช่วงปลายดีขึ้น ช่วยอุดช่องว่างขนาดเล็กลดขนาดของรูพรุนและปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค ทำให้คอนกรีตมีค่าความซึมผ่านต่ำและกำลังอัดดีขึ้น (Paya et al., 1995; Jaturapitakkul, 1996; Justnes et al., 2004)

เนื่องจากงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยในงานคอนกรีตยังมีจำกัดดังนั้นจึงนำรายงานการวิจัยที่ใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย เพื่อใช้อ้างอิงและเป็นแนวทางในการศึกษาดังต่อไปนี้

Bai et al. (1999) ศึกษาถึงผลกระทบของดินขาวผสมเถ้าลอยต่อความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต โดยทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) , สัดส่วนการอัดแน่น (Compacting Factor) และทดสอบวีบี (Vebe Test) โดยใช้คอนกรีตที่มีระดับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวผสมเถ้าลอยร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และแปรผันปริมาณดินขาวร้อยละ 0-15 ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 0-40 ในส่วนผสมดินขาวกับเถ้าลอย พบว่าความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะอนุภาคของดินขาวที่มีลักษณะเป็นแผ่นมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจึงทำให้ต้องการปริมาณน้ำมาก แต่อาจแก้ไขปัญหาการสูญเสียความสามารถในการทำงานได้โดยเติมเถ้าลอยลงในส่วนผสม โดยมีปัจจัยที่สำคัญได้แก่ ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ของดินขาวผสมเถ้าลอย อัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอย และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และนักวิจัยกลุ่มเดิม (Bai et al., 2000) รายงานผลกระทบจากการผันแปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 3 ระดับคือ 0.40, 0.50 และ 0.60 ว่าคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่ำ และมีอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยสูงจะมีกำลังอัดในช่วงต้นสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่มีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์สูง และมีอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยต่ำจะทำให้กำลังอัดในช่วงปลายสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และสรุปว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของดินขาวจะพัฒนากำลังรับแรงอัดได้เร็วในช่วงแรกถึงช่วงกลาง (7-28 วัน) ส่วนคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจะพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงปลาย (90 วัน) และการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตจะช่วยให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่องตลอดทุกช่วงอายุทดสอบ และพบว่าที่ระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวและเถ้าลอยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณของดินขาวและเถ้าลอยร้อยละ 7.5 และ 2.5 ตามลำดับ จะให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงสุดในทุกช่วงอายุทดสอบ

ในปี 2003 นักวิจัยกลุ่มเดิม (Bai et al., 2003) ศึกษาการสูญเสียกำลังอัดและตรวจสอบค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยและดินขาว เมื่อแช่ตัวอย่างในน้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าดินขาวและเถ้าลอยช่วยลดระดับความลึกของการซึมผ่านคลอไรด์เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนโดยระดับความลึกจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น และจากการผันแปรอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอย

แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้น ระดับความลึกของการซึมผ่านคลอไรด์และค่าความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงในช่วงต้นของอายุทดสอบ 2 และ 6 เดือน และเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ระดับความลึกของการซึมผ่านคลอไรด์และค่าความเข้มข้นของคลอไรด์จะลดลงเช่นกัน เมื่อทดสอบตัวอย่างในช่วงอายุ 18 เดือน เมื่อพิจารณาการสูญเสียกำลังอัดพบว่าคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม หรือคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว

มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อนที่เพิ่มขึ้นในมอร์ต้าหรือคอนกรีตที่ผสมดินขาวมากกว่าส่วนผสมปกติ ซึ่งอาจนำไปสู่การแตกร้าวในงานคอนกรีตเหล่านี้ได้ จากรายงานของ Bai and Wild (2002) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความร้อนในมอร์ต้าที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย พบว่าเถ้าลอยช่วยลดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในมอร์ต้าผสมดินขาว จากการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในมอร์ต้าที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณดินขาวและเถ้าลอยร้อยละ 10 และ 10 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับมอร์ต้าควบคุม และพบว่าดินขาวผสมเถ้าลอยทำให้การเกิดอุณหภูมิสูงสุดของมอร์ต้ายืดยาวออกไปด้วย

Bai et. al. (2002) ศึกษาการพัฒนากำลังอัด การเกิดคาร์บอนเนชัน (Carbonation) และการเปลี่ยนแปลงการดูดซึมน้ำ (Sorptivity) ของคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่บ่มในน้ำและบ่มในอากาศ พบว่าดินขาวมีผลเชิงบวกในการพัฒนากำลังอัดในช่วง 28 วันแรก ส่วนเถ้าลอยจะหน่วงการพัฒนากำลังอัดในช่วงดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลจากการบ่มพบว่า การบ่มคอนกรีตในอากาศให้กำลังอัดต่ำกว่าการบ่มในน้ำ และความแตกต่างจะยิ่งมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย การบ่มในอากาศจะให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าการบ่มน้ำเป็นอย่างมาก สำหรับคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยพบว่าความแตกต่างระหว่างกำลังอัดที่บ่มในอากาศ และในน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณดินขาวในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่าการดูดซึมของคอนกรีตควบคุม เมื่อบ่มในน้ำคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยอย่างเดียวมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และการบ่มในอากาศทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น การตรวจสอบการเกิดคาร์บอนเนชันพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีระดับความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชันเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสมเพิ่มขึ้น แต่ในคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยร่วมกันพบว่าระดับความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชันจะลดลงเมื่อปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้น

Vu and Stroven (2002) ได้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดและกำลังค้ำของมอร์ต้าและคอนกรีตผสมดินขาวร่วมกับเถ้าแกลบ โดยมีอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าแกลบ 70/30, 50/50 และ 30/70 และใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมมอร์ต้าจะควบคุมค่าการไหลแผ่ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 โดยวิธีแปรผันปริมาณน้ำ และส่วนผสมคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน 0.61 และใช้สารลดน้ำจำนวนมากเพื่อควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 30-50 มม. จากการศึกษาพบว่าดินขาวและเถ้าแกลบช่วยปรับปรุงกำลังอัดและกำลังค้ำของมอร์ต้า โดยเฉพาะที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าแกลบต่ำๆ และได้แนะนำว่าที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าแกลบ 50/50 จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับปรุงด้านกำลังอัด โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก จะช่วยปรับปรุงกำลังอัดและกำลังค้ำของมอร์ต้าให้ดีขึ้นทุกอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าแกลบของทุกอายุทดสอบ และที่อายุทดสอบ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวร่วมกับเถ้าแกลบจะสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเฉพาะดินขาวและยังแนะนำให้ใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าแกลบให้ประสิทธิภาพสูงมากในการปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตในระยะยาว 180 วัน

การใช้ขุณภูมิสูงเร่งการบ่มสำหรับงานคอนกรีตแข็งตัวเร็ว ส่งผลให้คอนกรีตมีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลง ซึ่ง Hooton and Titherington (2004) ได้ศึกษาผลกระทบของการใช้ซิลิกาฟูมร่วมกับกากจากการถลุงเหล็ก (Ground Granulate Blast-furnace Slag) ต่อค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตแข็งตัวเร็วเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยบ่มที่อุณหภูมิ 23 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าคอนกรีตควบคุมมีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ลดลงเมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และซิลิกาฟูมมีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตควบคุมแม้จะบ่มที่อุณหภูมิสูง และการใช้ซิลิกาฟูมร่วมกับกากจากการถลุงเหล็กทำให้คอนกรีตมีค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงสุด นอกจากนี้การใช้กากจากการถลุงเหล็กในส่วนผสมยังช่วยให้การเทเข้าแบบและตกแต่งผิวทำได้สะดวกกว่าคอนกรีตที่ผสมเฉพาะซิลิกาฟูมเพียงอย่างเดียว

Thomas et al. (1999) ได้รวบรวมและรายงานการวิจัยเกี่ยวกับผลของการใช้ซิลิกาฟูมร่วมกับเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ พบว่าคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูมและเถ้าลอยในส่วนผสมจะมีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วางขึ้น จนถึงช่วงปลายของอายุทดสอบและเมื่อเปรียบเทียบกับ พบว่าการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเฉพาะซิลิกาฟูมมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยล้วนในช่วงต้นของอายุทดสอบแต่ในระยะยาวไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน

ส่วนในคอนกรีตที่ผสมทั้งซิลิกาฟูมและเถ้าลอยค่าการซึมผ่านคลอไรด์จะลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดอายุทดสอบและมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเฉพาะซิลิกาฟูมหรือเถ้าลอย

งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงว่าการใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอยมีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆทั้งในด้านกำลังและความทนทานของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ดินขาวช่วยให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นให้ดีขึ้น ส่วนเถ้าลอยช่วยพัฒนากำลังอัดในช่วงกลางและปลาย ในด้านความทนทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ พบว่าระดับความลึกของการซึมขึ้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอยและระยะเวลาการบ่ม โดยระดับความลึกของการซึมในช่วงต้นของอายุทดสอบ (2-6 เดือน) จะลดลงเมื่อปริมาณดินขาวเพิ่มขึ้น ส่วนในระยะยาว (18 เดือน) ระดับความลึกของการซึมจะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการใช้ดินขาวเพียงอย่างเดียวมีผลต่ออุณหภูมิและความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งหากมีค่าสูงเกินไปอาจนำไปสู่ปัญหาการแตกร้าวในคอนกรีตหรือมอร์ต้าได้ ดังนั้นการใช้เถ้าลอยในส่วนผสมจะช่วยลดอุณหภูมิและความร้อนลงได้ แต่การใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอยงานคอนกรีตยังต้องพัฒนาและวิจัยในด้านอื่นๆต่อไป เพื่อให้การใช้ทรัพยากรธรรมชาติเกิดประโยชน์และคุ้มค่ามากที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. ดินขาวดิบจากแหล่งดิน จ.ระนอง
3. เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง
4. มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 4
5. มวลรวมหยาบ ใช้หินปูนย่อยขนาดโตสุด 3/8 นิ้ว
6. น้ำประปา
7. น้ำทะเลสังเคราะห์ (สารละลายเกลือทำน้ำทะเล ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์)

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เตาเผาไฟฟ้า (Electric Furnace) ขนาดความจุ 13 ลิตร ควบคุมอุณหภูมิสูงสุด 1200 องศาเซลเซียส
2. เครื่องบดวัสดุแบบ (Ball Mill) ขนาดความจุ 5 ลิตร
3. เครื่อง Los Angeles และแท่ง Rod Mill ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.25 x 46.5 ซม.
4. อุปกรณ์หาค่าความละเอียดโดยการวัดค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface) ด้วยวิธี Air Blaine Permeability และอุปกรณ์หาความถ่วงจำเพาะ
5. ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาปริมาณอากาศ และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในคอนกรีต
6. เครื่องถ่ายภาพกำลังขยายสูง (Scanning Electron Microscope)
7. เครื่องวิเคราะห์หาสถานะของผลึก (X-Ray Diffractometer)
8. เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence Spectroscopy)
9. เครื่องผสมซีเมนต์มอร์ต้า (Mechanical Mixer) ควบคุมความเร็วรอบได้ไม่น้อยกว่า 140-290 รอบต่อนาที
10. โต๊ะทดสอบการไหลมอร์ต้า (Flow Table)
11. เครื่องผสมคอนกรีตแบบ Tilt ขนาด 0.15ลบ.ม. และชุดทดสอบการยุบตัว(Slump Test)

12. เครื่องทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้า ขนาด 15 ตัน
13. เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต ขนาด 75 ตัน
14. เครื่องทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ (Rapid Chloride Permeability)
15. เครื่องทดสอบความต้านทานการขัดสี ความเร็วรอบในการขัด 200 รอบ/นาที
16. เครื่องทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าแบบ Copper-coper Sulfate Half Cell
17. ชุดอุปกรณ์เร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริม
18. แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 5.0 x 5.0 x 5.0 ซม., 7.5 x 7.5 x 7.5 ซม. และแบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. และเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม., แบบหล่อคอนกรีตขนาด 15 x 15 x 7.5 ซม. และแบบหล่อรูปทรงคานขนาด 6.25 x 6.25 x 30 ซม.

วิธีการทดลอง

1. การศึกษาเบื้องต้น

1.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุ

ในการศึกษานี้ได้ใช้ผลการศึกษาที่ผ่านมา (เจริญวุฒิ, 2546; จิรวัดน์, 2546) เป็นพื้นฐานในการเลือกวัสดุ ช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาในการบด โดยนำดินขาวจากแหล่งดิน จ.ระนอง มาปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยเตาเผาไฟฟ้า ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข1 จากนั้นนำดินขาวมาบดด้วยเครื่องบดวัสดุแบบ Ball Mill โดยบดใน 2 ลักษณะคือ

1. บดเฉพาะดินขาวและเฉพาะเถ้าลอย
2. บดดินขาวร่วมกับเถ้าลอยโดยแปรผันส่วนผสมดินขาวต่อเถ้าลอย 5 ระดับคือ
20:0, 15:5, 10:10, 5:15, 0:20

1.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพของการบดเพื่อหาเวลาการบดที่เหมาะสม

บดดินขาวล้วนและดินขาวร่วมกับเถ้าลอย โดยแปรผันเวลาที่ใช้ในการบดคือ 1, 1½, 2.0 และ 2½ ชั่วโมง และตรวจสอบค่าความละเอียดโดยวัดพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี Air Blaine Permeability ให้ได้ความความละเอียดอยู่ในช่วง 10,000-11,000 ตร.ซม./ ก.

1.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี

1.3.1 สุ่มตัวอย่างดินขาวเพื่อทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะโดยใช้ขวดแก้วทดสอบความถ่วงจำเพาะ Le Chaterlier ตามมาตรฐาน ASTM C 168

1.3.2 สุ่มตัวอย่างดินขาวเพื่อทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)

1.3.3 สุ่มตัวอย่างดินขาวเพื่อทดสอบหาสถานะทางผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

1.3.4 สุ่มตัวอย่างดินขาวและดินขาวบดร่วมกับเถ้าลอยเพื่อตรวจสอบรูปร่างและลักษณะอนุภาคโดยใช้เครื่องถ่ายภาพกำลังขยายสูง Scanning Electron Microscope (SEM)

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติของเพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอย

2.1 เตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์โดยใช้ดินขาวบดร่วมกับเถ้าลอยที่ผ่านการบดในช่วงเวลาที่เหมาะสมซึ่งผันแปรอัตราส่วนผสมดินขาวต่อเถ้าลอย 5 ระดับ คือ 20:0, 15:5, 10:10, 5:15, 0:20 และใช้แทนที่ซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

2.2 การทดสอบสถานะทางผลึกตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28 และ 91 วัน

2.3 การทดสอบภาพถ่ายกำลังขยายสูงตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 91 วัน

3. การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอย

3.1 เตรียมตัวอย่างมอร์ต้าโดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75 โดยแบ่งการเตรียมตัวอย่างมอร์ต้าเป็น 2 ชุดคือ

1. ตัวอย่างมอร์ต้าที่เตรียมจากดินขาวหรือเถ้าลอยที่ผ่านการบดแยกในช่วงเวลาที่เหมาะสมผสมกับเถ้าลอยด้วยเครื่องผสมซีเมนต์มอร์ต้า
2. ตัวอย่างมอร์ต้าที่เตรียมจากดินขาวและเถ้าลอยที่ผ่านการบดรวมกันในช่วงเวลาที่เหมาะสม

โดยมอร์ต้าทั้ง 2 ชุดจะผันแปรอัตราส่วนระหว่างดินขาวต่อเถ้าลอย 5 ระดับ คือ 20:0, 15:5, 10:10, 5:15, 0:20 และใช้แทนที่ซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอย แสดงในตารางผนวกที่ ก1

3.2 การทดสอบค่าการไหลของมอร์ต้าโดยโตะทดสอบการไหลตามมาตรฐาน ASTM C 230 ควบคุมการไหลแผ่นของมอร์ต้าให้อยู่ในช่วงร้อยละ 110 ± 5 โดยแปรผันปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมเพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่นตามต้องการ

3.3 ทดสอบดัชนีกำลังจากการทำปฏิกิริยาร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Strength Activity Index) ตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าควบคุมกับมอร์ต้าที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยทั้ง 2 ชุดทดสอบที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

4. การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย

4.1 การเตรียมตัวอย่างและออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตควบคุมตามมาตรฐาน ACI ให้มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 300-350 กก./ตร.ซม. และควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 7.5 ± 2.5 ซม. ส่วนคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย จะใช้ดินขาวและเถ้าลอยที่ผ่านการบดรวมกันในช่วงเวลาที่เหมาะสม แทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แปรผันอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอย 5 ระดับคือ 20:0, 15:5, 10:10, 5:15, 0:20 โดยอัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงในตารางที่ 1

4.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยในสภาพสด

4.2.1 การทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) เป็นการทดสอบวัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตสดตามมาตรฐาน ASTM C 143

4.2.2 การทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) เป็นการวัดค่าการยุบของคอนกรีตสดตามเวลา โดยทดสอบหาค่ายุบตัวของคอนกรีตสดทุกๆช่วงเวลา 15 นาทีจนคอนกรีตไม่มีค่ายุบตัว นำผลทดสอบมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัวกับเวลาเปรียบเทียบกับระหว่างคอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

4.2.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของคอนกรีต

4.2.4 การทดสอบปริมาณอากาศในคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C231

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมสำหรับคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

ประเภท ส่วนผสม	W/B	PC (Kg/m ³)	MK (Kg/m ³)	FA (Kg/m ³)	Water (Kg)	Lime Stone (Kg/m ³)	Sand (Kg/m ³)
คอนกรีตควบคุม	0.48	433	0	0	208	915	761
MK:FA/20:0	0.52	346	87	0	225	915	697
MK:FA/15:5	0.51	346	65	22	221	915	709
MK:FA/10:10	0.48	346	43	43	208	915	745
MK:FA/5:15	0.46	346	22	65	199	915	769
MK:FA/0:20	0.44	346	0	87	189	915	798

4.3 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยที่แข็งตัวแล้ว

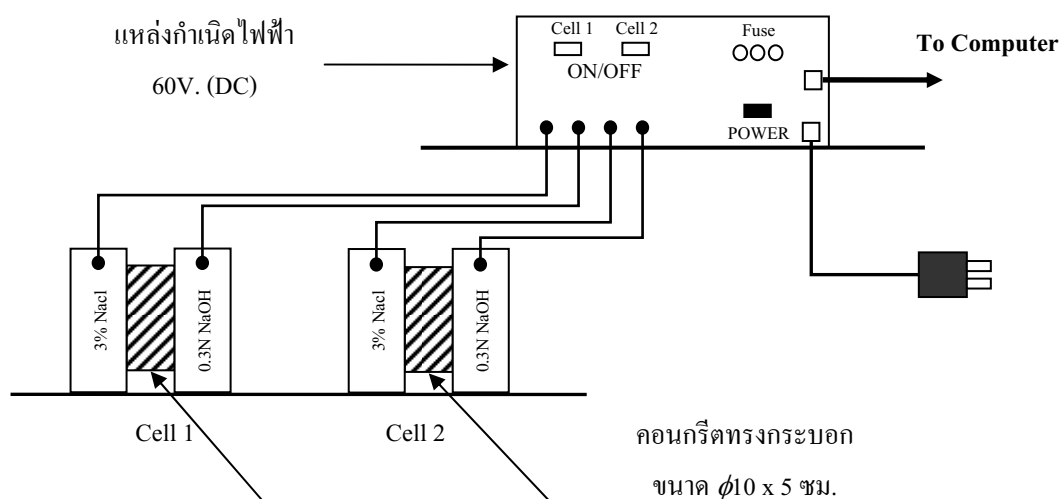
4.3.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength Test) ตามมาตรฐาน BS 1881:PART 4 เตรียมตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 7.5x7.5x7.5 ซม. เทคอนกรีตให้เต็มแบบ ทำการอัดแน่นด้วยโต๊ะเขย่า แต่งผิวหน้าตัวอย่างให้เรียบและคลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้นระเหยออกจากคอนกรีต ถอดแบบหลังจากหล่อแล้ว 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องปกติ ทดสอบกำลังอัดเมื่อคอนกรีตอายุได้ 24 ชั่วโมงหลังจากการหล่อ และที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน โดยวางก้อนตัวอย่างให้ตรงศูนย์กลางของแท่นกด ให้น้ำหนักกดด้วยอัตราสามเท่าเสมอจนก้อนตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้และวัดพื้นที่หน้าตัดรับน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่ากำลังอัดเฉลี่ย

4.3.2 การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีต (Flexural Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM C78 เตรียมตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อรูปคานขนาด 6.25 x 6.25 x 30 ซม. เทคอนกรีตให้เต็มแบบ ทำการอัดแน่นด้วยโต๊ะเขย่า แต่งผิวหน้าตัวอย่างให้เรียบและคลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้นระเหยออกจากคอนกรีต ถอดแบบหลังจากหล่อแล้ว 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องปกติ ทดสอบกำลังดัดเมื่อคอนกรีตอายุได้ 24 ชั่วโมง หลังจากการหล่อ และที่อายุการบ่ม 7, 28, 56 และ 91 วัน

4.3.3 การทดสอบความต้านทานการขัดสี (Abrasion Resistance Test) ทดสอบโดยเครื่องมือทดสอบเทียบเท่ามาตรฐาน ASTM C944-90a เตรียมตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อขนาด 15x15x7.5 ซม. เทคอนกรีตให้เต็มแบบ ทำการอัดแน่นด้วยโต๊ะเขย่า แต่งผิวหน้าตัวอย่างให้เรียบและคลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้นระเหยออกจากคอนกรีต ถอดแบบหลังจากหล่อแล้ว 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องปกติ ทดสอบความต้านทานการขัดสีที่อายุการบ่ม 28 และ 56 วัน โดยชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบละเอียดถึง 0.1 กรัม เติมน้ำหนักเครื่องขัดสีซึ่งมีน้ำหนักกด 10 ± 0.1 กก. ครั้งละ 2 นาที จำนวน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งให้เป่าคอนกรีตที่ถูกขัดออกให้สะอาด เมื่อสิ้นสุดการขัดให้ชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่างเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียไปจากการขัด

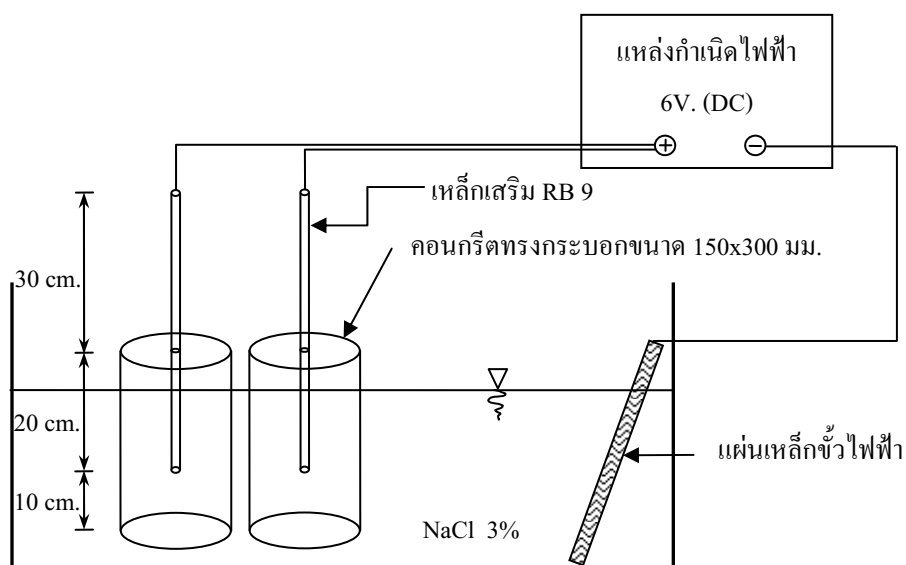
4.3.4 การทดสอบความซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธี Rapid Chloride Permeability Test ตามมาตรฐาน ASTM C1202 เตรียมตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. เทคอนกรีตให้เต็มแบบ ทำการอัดแน่นด้วยโต๊ะเขย่า แต่งผิวหน้าตัวอย่างให้เรียบและคลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้นระเหยออกจากคอนกรีต ถอดแบบหลังจากหล่อแล้ว 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องปกติ ทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ที่อายุการบ่ม 28 และ 56 วัน โดยตัดชิ้นตัวอย่างให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 5 ซม. นำมาวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปยังชิ้นตัวอย่างเทียบกับเวลา เพื่อหาค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมด

ในหน่วยคลอมปี เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยผลรวมของประจุที่ไหลผ่านตัวอย่างมีความสัมพันธ์กับความซึมได้ของคลอไรด์ไอออน และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานว่ามีความซึมผ่านได้ของคลอไรด์มากน้อยเพียงใด เครื่องมือทดสอบแสดงดังภาพที่ 1

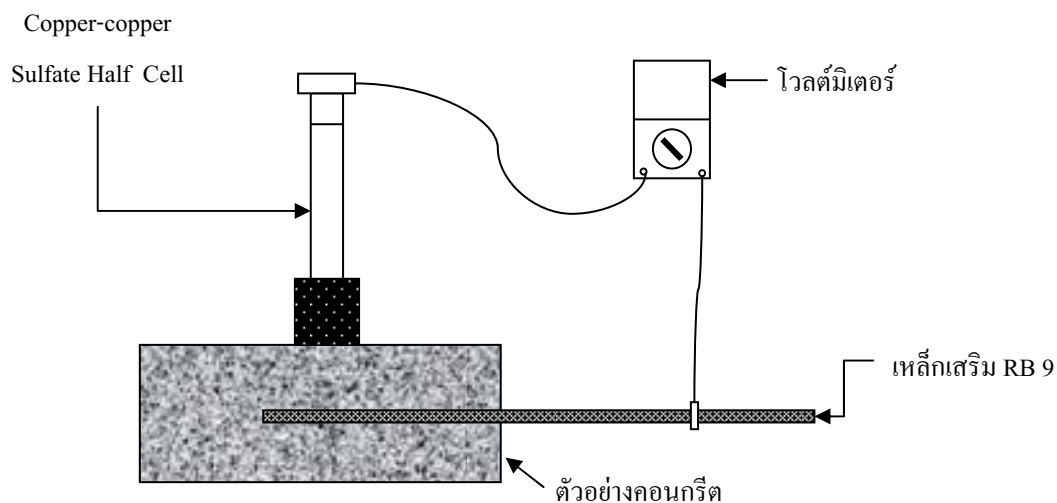


ภาพที่ 1 เครื่องมือทดสอบหาค่าความซึมผ่านของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1202

4.3.5 การทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้า (Half Cell Potential Test) ด้วยเครื่องมือวัดค่าศักย์ไฟฟ้าแบบ Copper-copper Sulfate Half Cell ตามมาตรฐาน ASTM C876 เตรียมตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. แบ่งเทคอนกรีตลงในแบบเป็น 3 ชั้น อัดแน่นด้วยเหล็กกระทุ้งโดยกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง แล้วฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. ในเนื้อคอนกรีตลึก 20 ซม. และยื่นออกมาเป็นระยะ 30 ซม. ถอดแบบหลังจากหล่อแล้ว 24 ชั่วโมง แล้วบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องปกติเป็นเวลา 27 วัน จากนั้นนำมาแช่ในสารละลาย NaCl 3% ดังภาพที่ 2 เร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยการให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ความต่างศักย์ 6 โวลต์ และนำตัวอย่างขึ้นมาวัดค่า Half Cell Potential ที่ระยะ 5, 10 และ 15 ซม. จากปลายบนของตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ยดังภาพที่ 3 โดยวัดทุกๆ 3 วันใน 30 วันแรก และทุกๆ 7 วันใน 60 วันต่อมา รวมระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างในสารละลาย NaCl 3% ทั้งหมด 91 วัน



ภาพที่ 2 กระบวนการเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยไฟฟ้า



ภาพที่ 3 จำลองการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า (Half Cell Potential Test)

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ตัวอย่างมอร์ต้าในการทดสอบจำนวน 66 ตัวอย่างและตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 258 ตัวอย่าง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาเบื้องต้น

คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ดินขาว

ดินขาวได้จากปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบด้วยความร้อน โดยดินขาวดิบก่อนการปรับปรุงคุณภาพจะมีลักษณะเป็นก้อนมีสีขาวครีม ดังภาพที่ 4(ก) หลังจากผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงและบดในระยะเวลาที่เหมาะสม วัสดุจะเปลี่ยนเป็นสีส้มอมชมพูมีลักษณะเป็นผงฝุ่นมากขึ้น ดังในภาพที่ 4(ข) และจากการถ่ายภาพกำลังขยายสูงด้วยเครื่อง SEM พบว่าอนุภาคดินขาวจะมีลักษณะเป็นแผ่นมีรูพรุน จับตัวกันเป็นก้อน ดังแสดงในภาพที่ 5(ก)

เถ้าลอย

เถ้าลอยหลังผ่านการบดจะมีลักษณะเป็นผงฝุ่นสีดําอมเขียว ดังภาพที่ 4(ฉ) และจากการถ่ายภาพกำลังขยายสูงพบว่าเถ้าลอยส่วนใหญ่จะมีลักษณะอนุภาคทรงกลม ดังแสดงในภาพที่ 5(ข)

ดินขาว:เถ้าลอย

เมื่อบดดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าสีของวัสดุผสมจะเข้มขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4(ค)-4(จ) ที่แสดงลักษณะสีของดินขาวผสมเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆ

ค่าความถ่วงจำเพาะของดินขาวมีค่าเท่ากับ 2.51 และเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 2.64 ซึ่งต่ำกว่าปูนซีเมนต์ 3.15 ทั้งนี้เป็นผลจากลักษณะอนุภาค โดยอนุภาคของปูนซีเมนต์มีรูปร่างเป็นผลึกมีเนื้อแน่น ในขณะที่อนุภาคดินขาวมีรูปร่างเป็นแผ่น มีรูพรุนและเกาะกันอยู่อย่างหลวมๆ และอนุภาคเถ้าลอยมีรูปร่างลักษณะทั้งแบบทรงกลมกลวงและทรงกลมตัน โดยค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมีค่ามากเมื่อมีปริมาณอนุภาคทรงกลมตันเป็นองค์ประกอบมาก ส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ จะมีค่าความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุทั้งสองชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2



(ก)

ดินขาวดิบ (Kaolin)



(ข)

ดินขาวหลังบด (Metakaolin)



(ค)

MK:FA/15:5



(ง)

MK:FA/10:10



(จ)

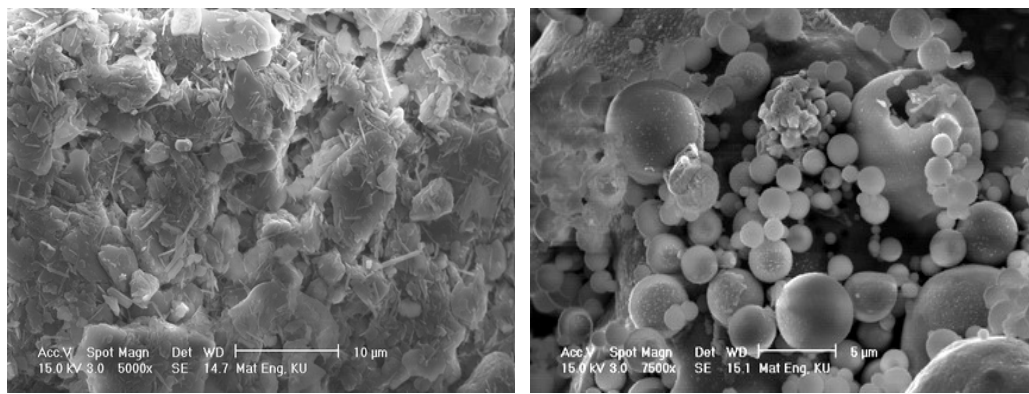
MK:FA/5:15



(ฉ)

เถ้าลอย Fly Ash (FA)

ภาพที่ 4 ลักษณะดินขาวดิบ ดินขาวหลังการบด เถ้าลอย และดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ



(ก)

อนุภาคดินขาว

(ข)

อนุภาคเถ้าลอย

ภาพที่ 5 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของอนุภาค (ก)ดินขาว และ (ข)เถ้าลอย

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)

ตารางที่ 2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ

วัสดุ	ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	3.15
ดินขาว	2.51
ดินขาวต่อเถ้าลอย (MK:FA/15:5)	2.54
ดินขาวต่อเถ้าลอย (MK:FA/10:10)	2.58
ดินขาวต่อเถ้าลอย (MK:FA/5:15)	2.62
เถ้าลอย	2.64

ค่าความละเอียดของวัสดุ ทดสอบด้วยวิธีวัดพื้นที่ผิวจำเพาะแบบ Air Blaine Permeability โดยจะใช้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเป็นเกณฑ์เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบด จากการบดดินขาวและเถ้าลอยด้วยเครื่องบดแบบ Ball Mill ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข2 โดยมีอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่แตกต่างกัน 5 ระดับ และใช้ระยะเวลาการบด 1, 1½, 2 และ 2½ ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าค่าความละเอียดของวัสดุไม่ได้ตามขอบเขตของการศึกษา ซึ่งกำหนดค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุให้อยู่ระหว่าง 10,000-11,000 ตร.ซม./ก ดังนั้นจึงเปลี่ยนวิธีการบดโดยใช้เครื่องบดแบบ Rod Mill ดังภาพผนวกที่ ข3 ซึ่งให้ค่าความละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าเมื่อเวลาการ

บดเพิ่มขึ้นวัสดุจะมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความละเอียดของวัสดุจากอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยพบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้จากการใช้เครื่องบดแบบ Rod Mill ยังไม่ได้ตามขอบเขตของการศึกษาเช่นกันทั้งนี้ คาดว่ามีสาเหตุจากขีดจำกัดของเครื่องมือ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้วัสดุที่ผ่านการบดเป็นระยะเวลา $2\frac{1}{2}$ ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าความละเอียดสูงสุดเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3 ความละเอียดของวัสดุดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการบดด้วยเครื่อง Ball Mill

เวลาการบด (ชม.)	พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธี Blaine ($\text{cm}^2/\text{g.}$)				
	ส่วนผสม				
	MK	MK:FA/15:5	MK:FA/10:10	MK:FA/5:15	FA
1	*	*	*	*	*
$1\frac{1}{2}$	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*
$2\frac{1}{2}$	7,777	*	*	*	2,864

ตารางที่ 4 ความละเอียดของวัสดุดินขาวผสมเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ โดยการบดด้วยเครื่อง los Angeles

เวลาการบด (ชม.)	พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธี Blaine ($\text{cm}^2/\text{g.}$)				
	ส่วนผสม				
	MK	MK:FA/15:5	MK:FA/10:10	MK:FA/5:15	FA
1	8,769	*	*	*	*
$1\frac{1}{2}$	9,852	*	*	*	*
2	10,863	9,984	8,973	6,794	3,205
$2\frac{1}{2}$	13,890	11,615	9,983	5,892	4,045

หมายเหตุ *: ไม่ได้ทำการทดสอบเนื่องจากคาดว่าความละเอียดของวัสดุมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวและเถ้าลอยแสดงในตารางที่ 5 พบว่าดินขาวมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นสารองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณร้อยละ 58.26 และ 35.18 ตามลำดับ และเถ้าลอยมีสารทั้งสองชนิด เป็นสารองค์ประกอบหลักเช่นกัน โดยมีปริมาณร้อยละ 47.65 และ 18.51 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบตามการแบ่งประเภทของวัสดุปอชโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 168 ดังแสดงในตารางที่ 6 ดินขาวที่ใช้ในงานวิจัยนี้อาจจัดได้ว่าเป็นวัสดุปอชโซลาน Class N เนื่องจากผลรวมร้อยละของซิลิกาออกไซด์, อลูมินาออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับ 94.41 มีปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ในขณะที่เถ้าลอยที่มีปริมาณของออกไซด์ของสารประกอบหลักดังกล่าวทั้ง 3 ชนิดรวมกันเท่ากับร้อยละ 76.45 และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 11.94

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ดินขาวและเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี (ปริมาณร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ประเภท 1	ดินขาว	เถ้าลอย
SiO_2	21.16	58.26	47.65
Al_2O_3	5.09	35.18	18.51
Fe_2O_3	3.01	0.97	10.29
CaO	66.22	0.03	11.94
MgO	1.27	0.04	1.70
K_2O	0.25	1.48	3.14
Na_2O	0.04	4.02	4.08
SO_3	2.42	0.03	2.69
LOI	0.98	1.20	0.5

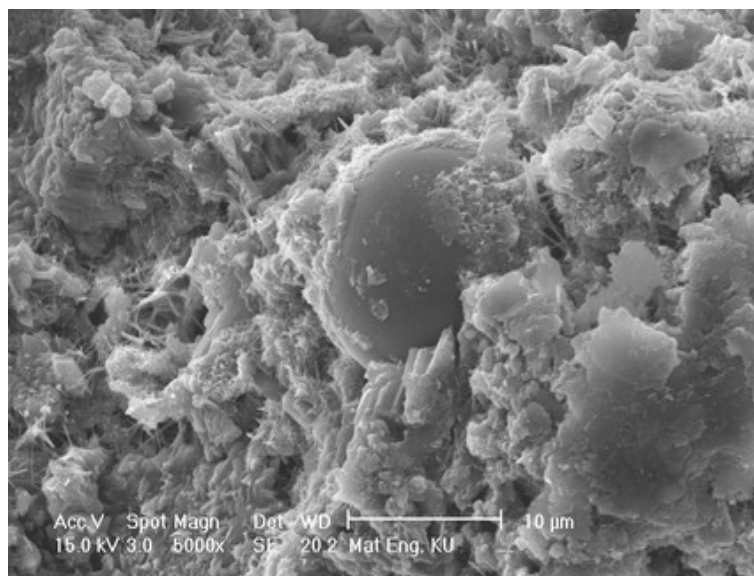
ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวและเถ้าลอยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618

คุณสมบัติ	ประเภท			ดินขาว	เถ้าลอย (หลังการบด)
	N	F	C		
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ไม่น้อยกว่า (%)	70	70	50	94.41	76.45
SO_3 ไม่เกิน (%)	4	5	5	0.03	2.69
Moisture content ไม่เกิน (%)	3	3	3	-	-
Loss on ignition (LOI) ไม่เกิน (%)	10	6	6	1.20	0.5
Specific gravity	2.10 - 2.58			2.51	2.64
Blaine fineness , cm^2/g	2,400-4,800			13,890	4,045

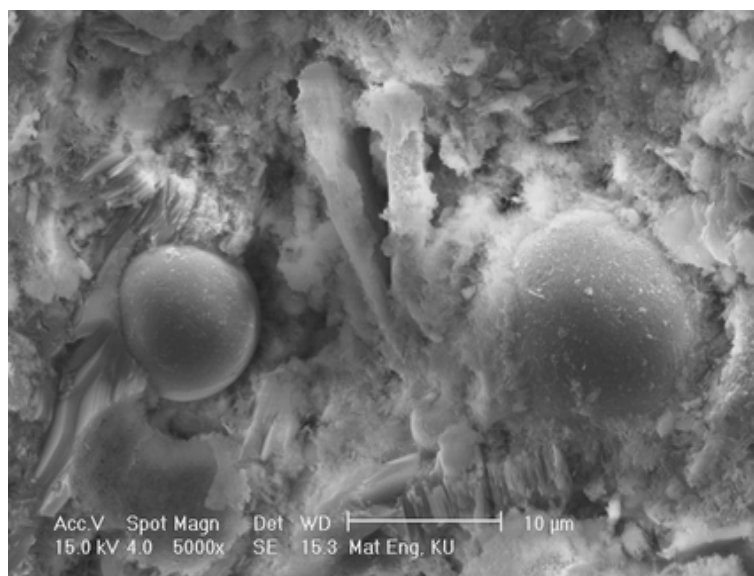
การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ผสมดินขาวและเถ้าลอย

จากการถ่ายภาพกำลังขยายสูงตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ด้วยเครื่อง (SEM) แสดงในภาพที่ 6-10 ที่อายุทดสอบ 3 วัน ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยมีช่องว่างมาก มีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์และสามารถมองเห็นดินขาวและเถ้าลอยที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ชัดเจน เมื่ออายุซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นเป็น 7 และ 14 วัน จะพบว่าลักษณะเป็นแผ่นพรุนของดินขาวลดลง โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นมากขึ้น ที่อายุซีเมนต์เพสต์ 28 วัน ไม่ปรากฏอนุภาคดินขาวให้เห็นมากนักซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และที่อายุซีเมนต์เพสต์ 91 วัน ไม่พบอนุภาคดินขาวเลย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าดินขาวเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับเถ้าลอยที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่อเนื่องโดยผิวอนุภาคเถ้าลอยมีผลิตภัณฑ์ปกคลุมชัดเจน เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นและได้สารที่มีคุณสมบัติยึดประสาน ทำให้โครงสร้างจุลภาคซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ช่วยลดปริมาณช่องว่างและรูพรุน ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังและความทนทานสูงขึ้น



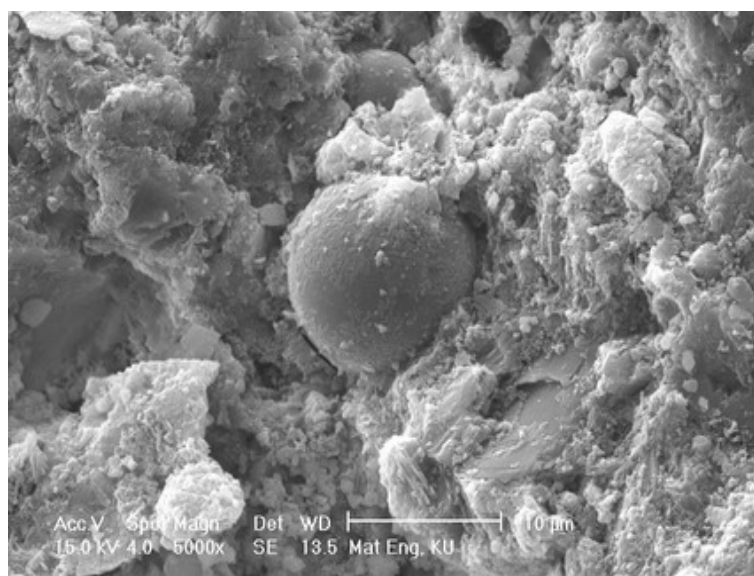
ภาพที่ 6 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย MK:FA/10:10 ที่อายุ 3 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



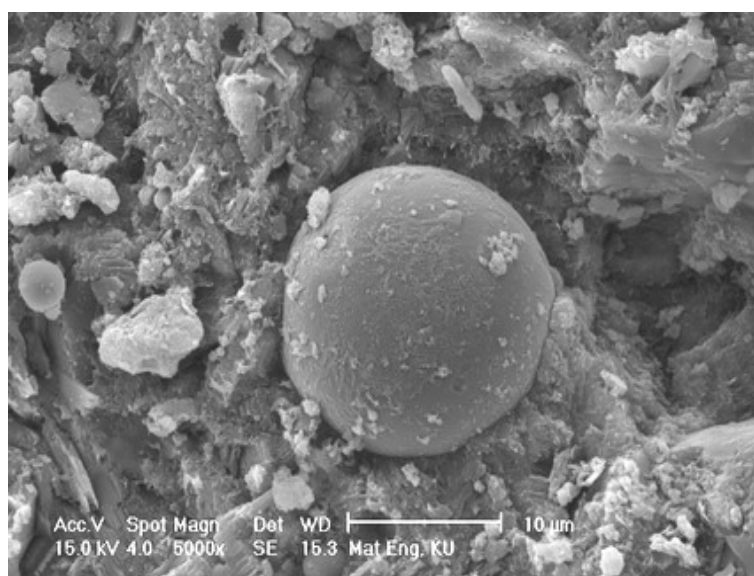
ภาพที่ 7 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย MK:FA/10:10 ที่อายุ 7 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



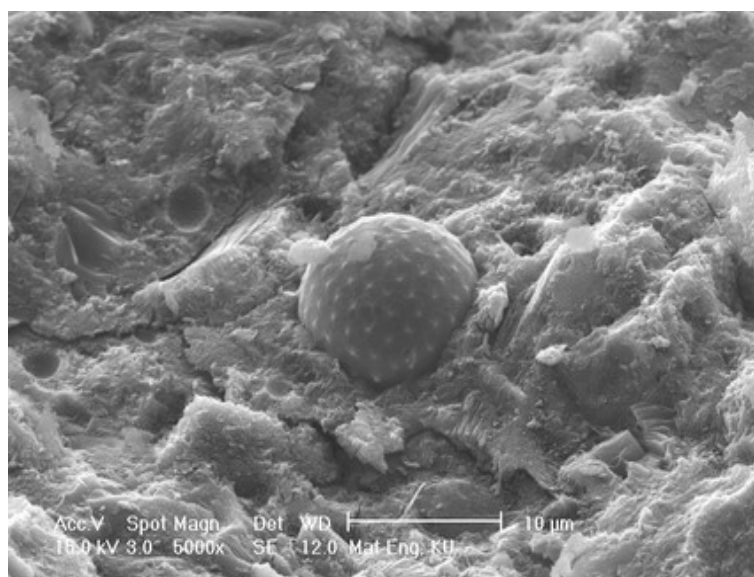
ภาพที่ 8 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เฟสท์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย MK:FA/10:10 ที่อายุ 14 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



ภาพที่ 9 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เฟสท์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย MK:FA/10:10 ที่อายุ 28 วัน

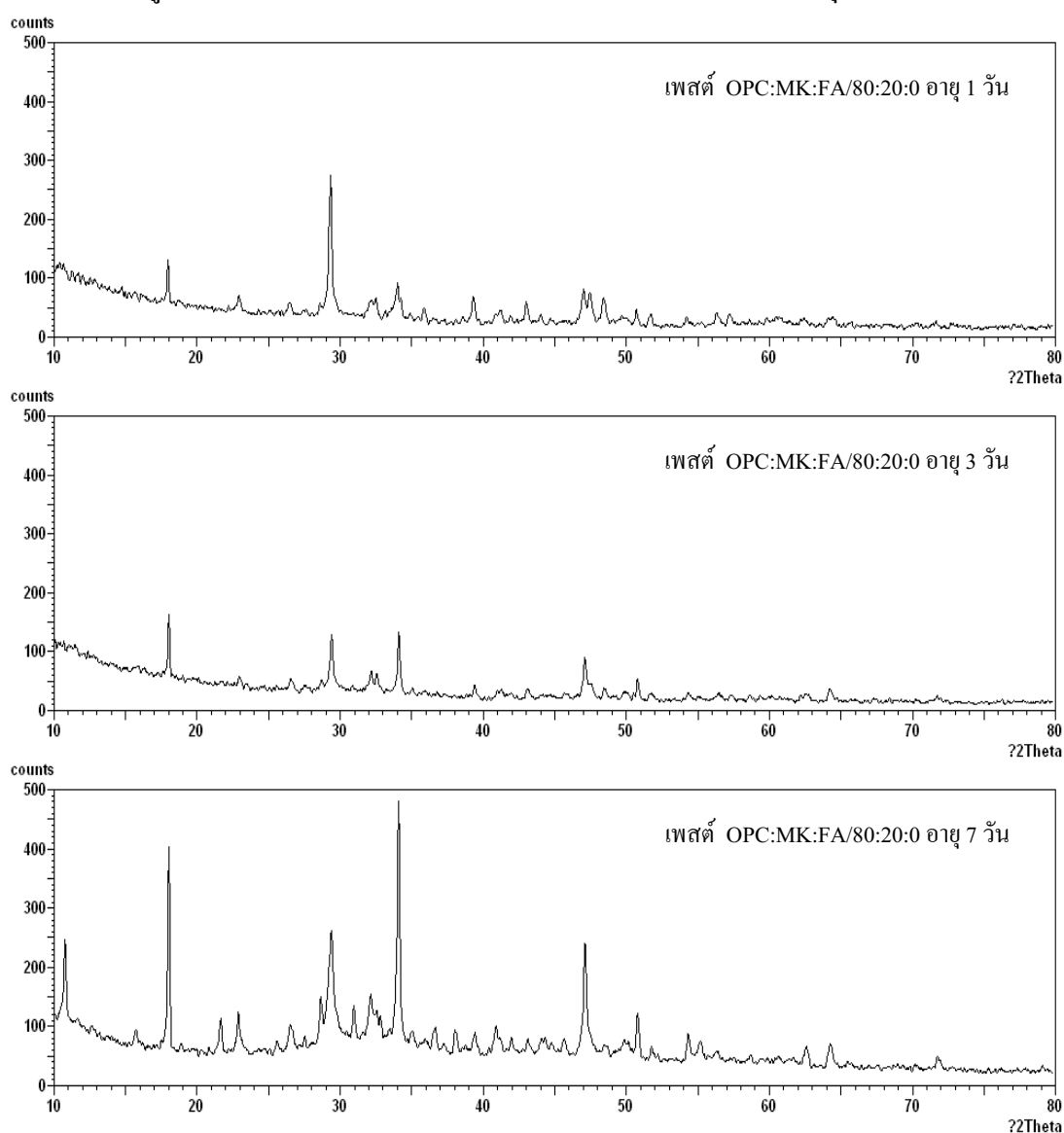
ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



ภาพที่ 10 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย MK:FA/10:10
ที่อายุ 91 วัน

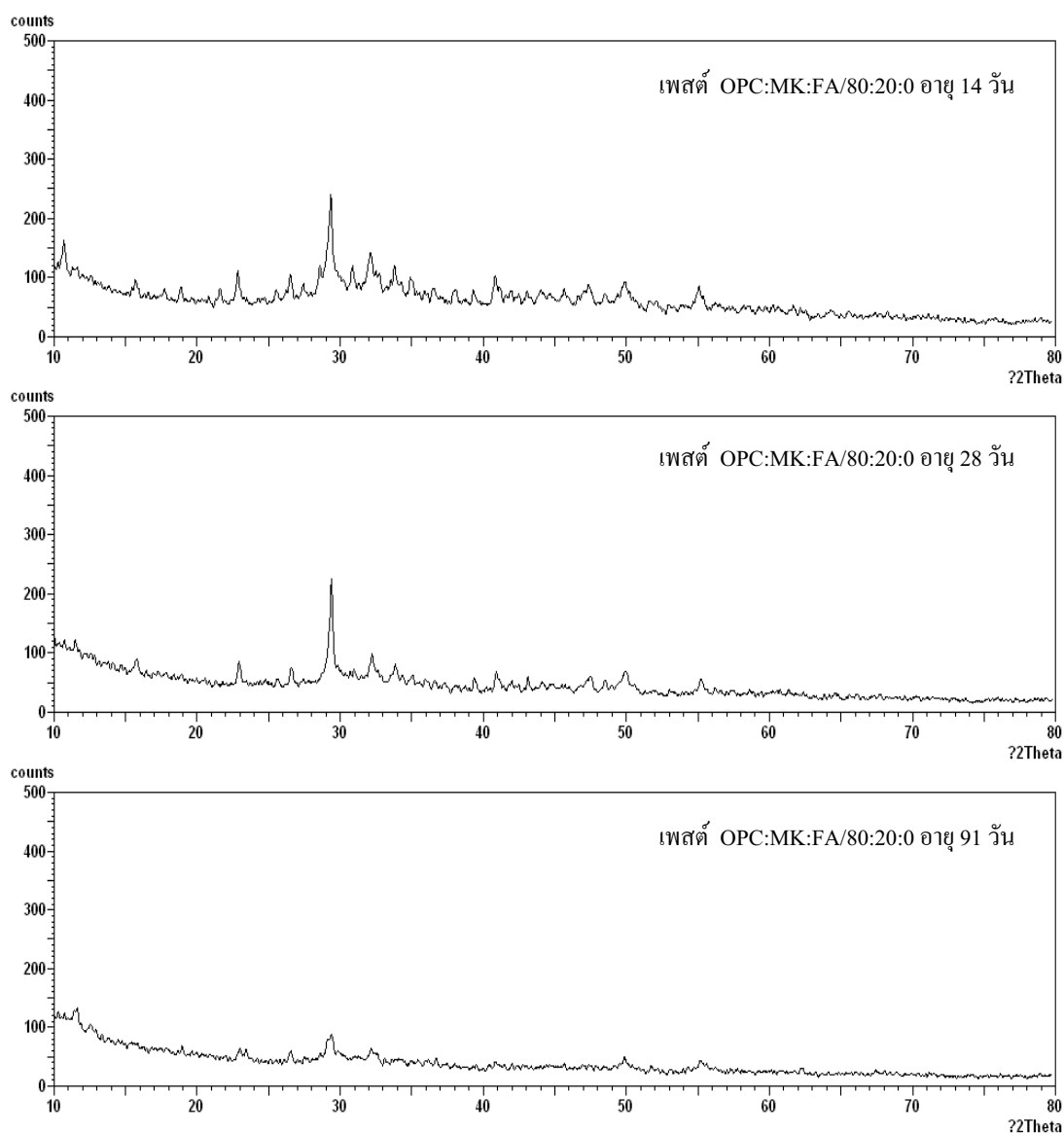
ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)

จากการวิเคราะห์สถานะทางผลึกตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยด้วยเครื่อง XRD โดยพิจารณาค่าความเข้ม (Intensity) ของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ตำแหน่งมุม 2 Theta เท่ากับ 18, 34 และ 47 องศา ของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) ดังภาพที่ 11 พบว่าในช่วงอายุ 1-7 วัน มีค่าความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่เมื่ออายุเพิ่มขึ้นค่าความเข้มจะมีแนวโน้มลดลงโดยมีค่าลดลงอย่างมากที่อายุ 14 วัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าดินขาวในงานวิจัยครั้งนี้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกสูงสามารถดึงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากระบบได้มากที่อายุทดสอบดังกล่าว



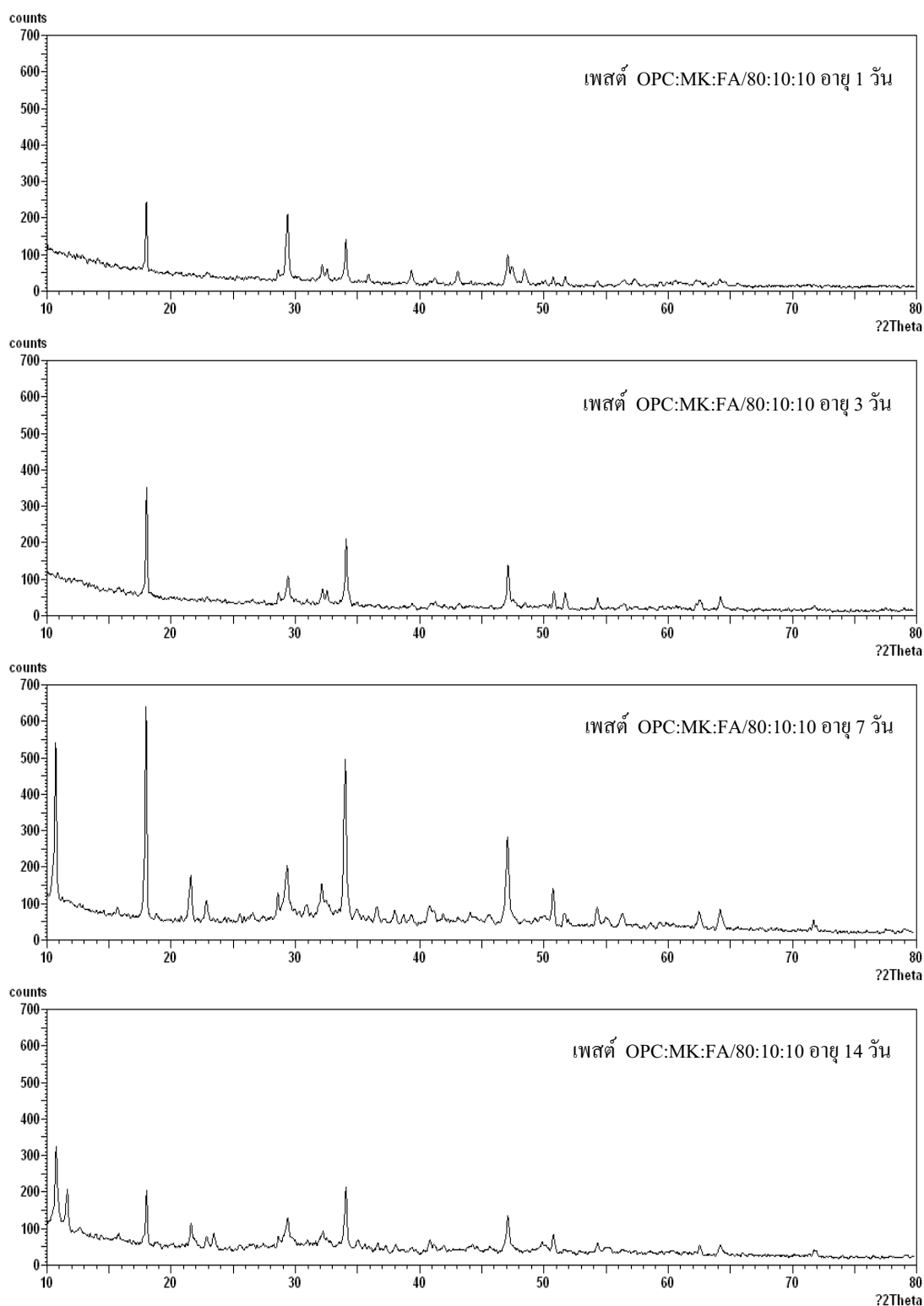
ภาพที่ 11 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน MK:FA/20:0 ที่อายุต่างๆ

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



ภาพที่ 11 (ต่อ)

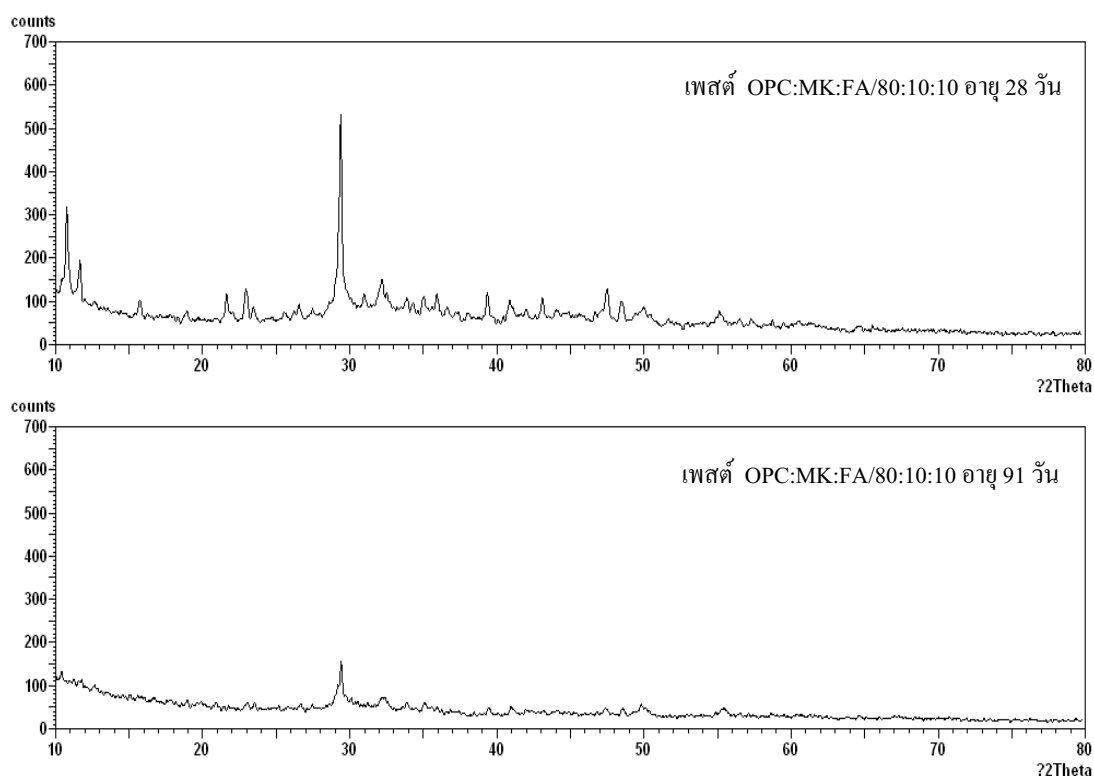
เมื่อพิจารณาตัวอย่างซีเมนต์เฟสผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ดังภาพที่ 12 พบว่าในช่วงอายุ 1-7 วัน ค่าความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ที่อายุทดสอบ 14 วัน ค่าความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เฟสผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 จะมีค่าสูงกว่าซีเมนต์เฟสผสมดินขาวล้วน ดังในภาพที่ 11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในส่วนผสมการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเพื่อตั้งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากระบบจะช้าลง เนื่องจากเถ้าลอยหน่วงการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว



ภาพที่ 12 การวิเคราะห์XRD ของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน

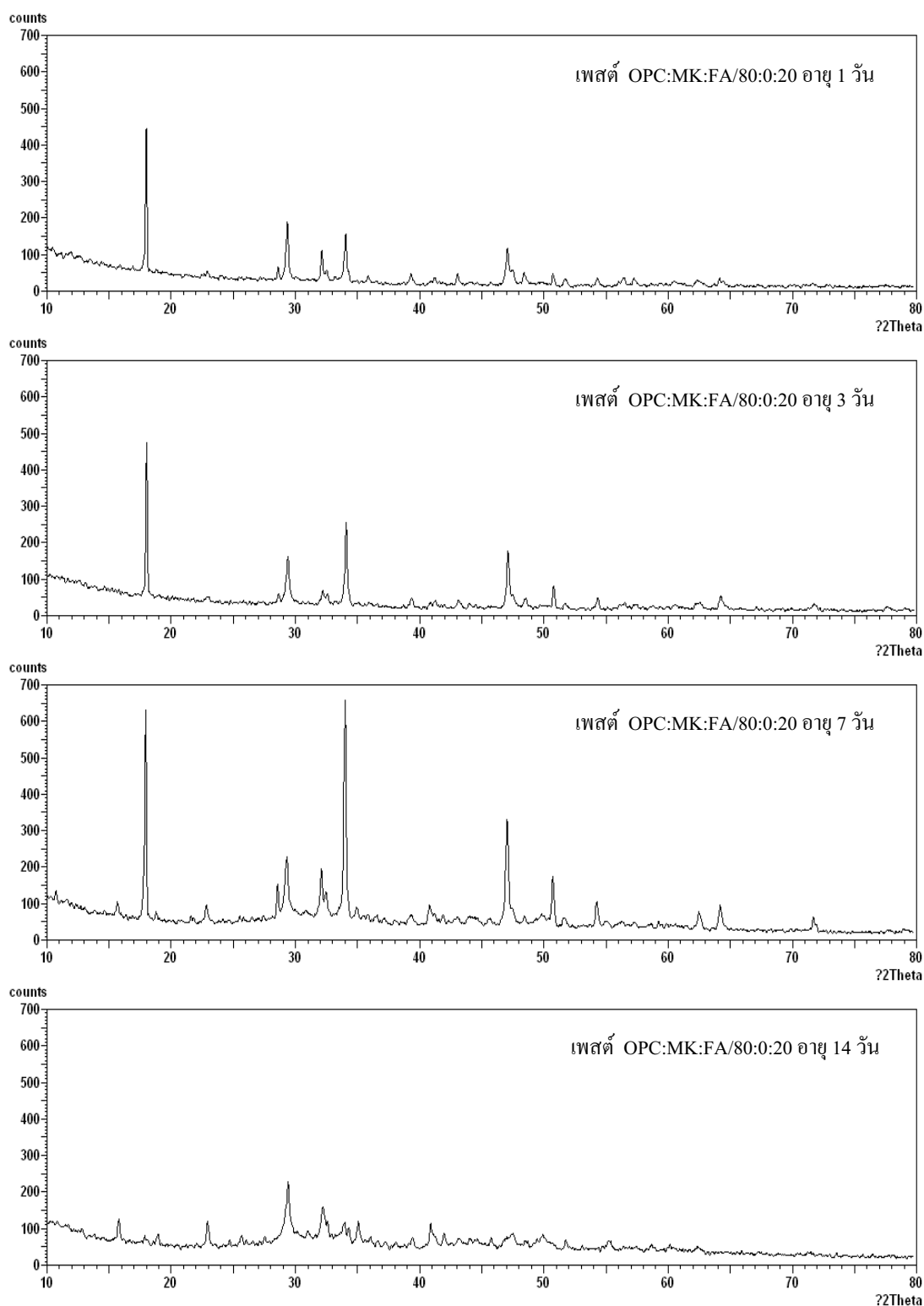
MK:FA/10:10 ที่อายุต่างๆ

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



ภาพที่ 12 (ต่อ)

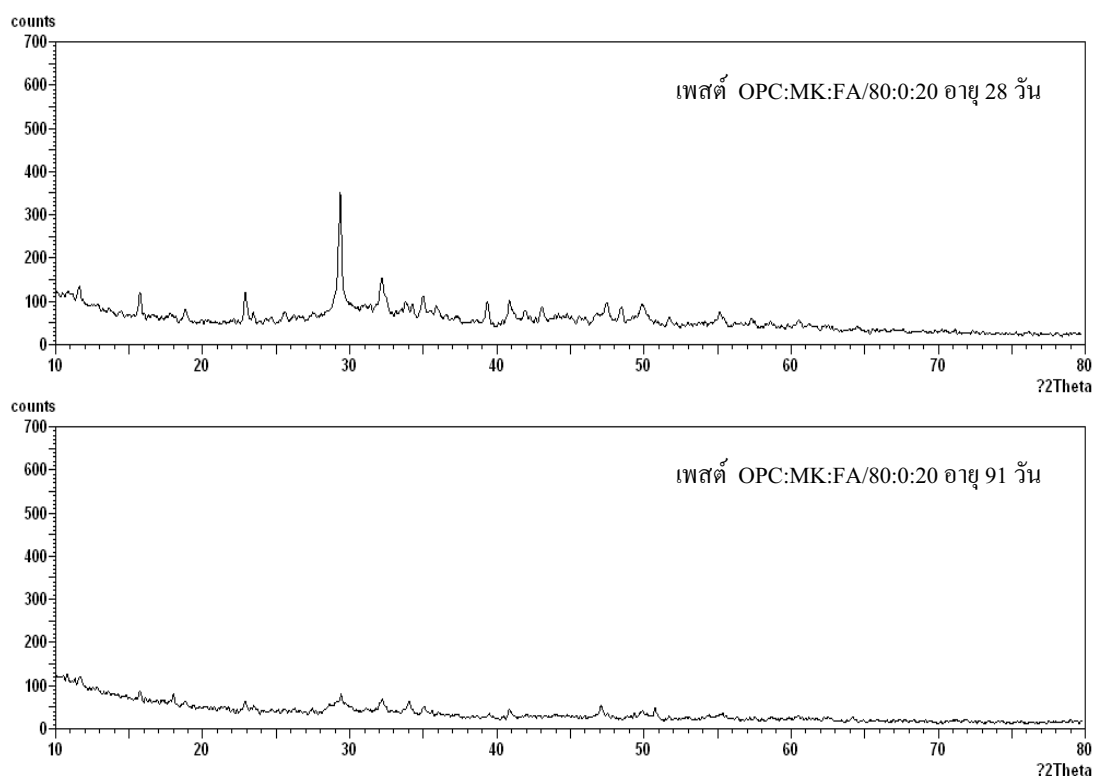
และการวิเคราะห์ XRD ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20) แสดงในภาพที่ 13 พบว่าในช่วง 1-7 วัน ค่าความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่เมื่อพิจารณาที่อายุทดสอบ 14 วัน ค่าความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยล้วนมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยในอัตราส่วน 10:10 ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าที่อายุ 14 วัน การใช้เถ้าลอยล้วนในการทดลองนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกคิงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกจากระบบได้เร็วกว่าการใช้ดินขาวผสมเถ้าลอยในอัตราส่วน 10:10



ภาพที่ 13 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เฟสค์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน

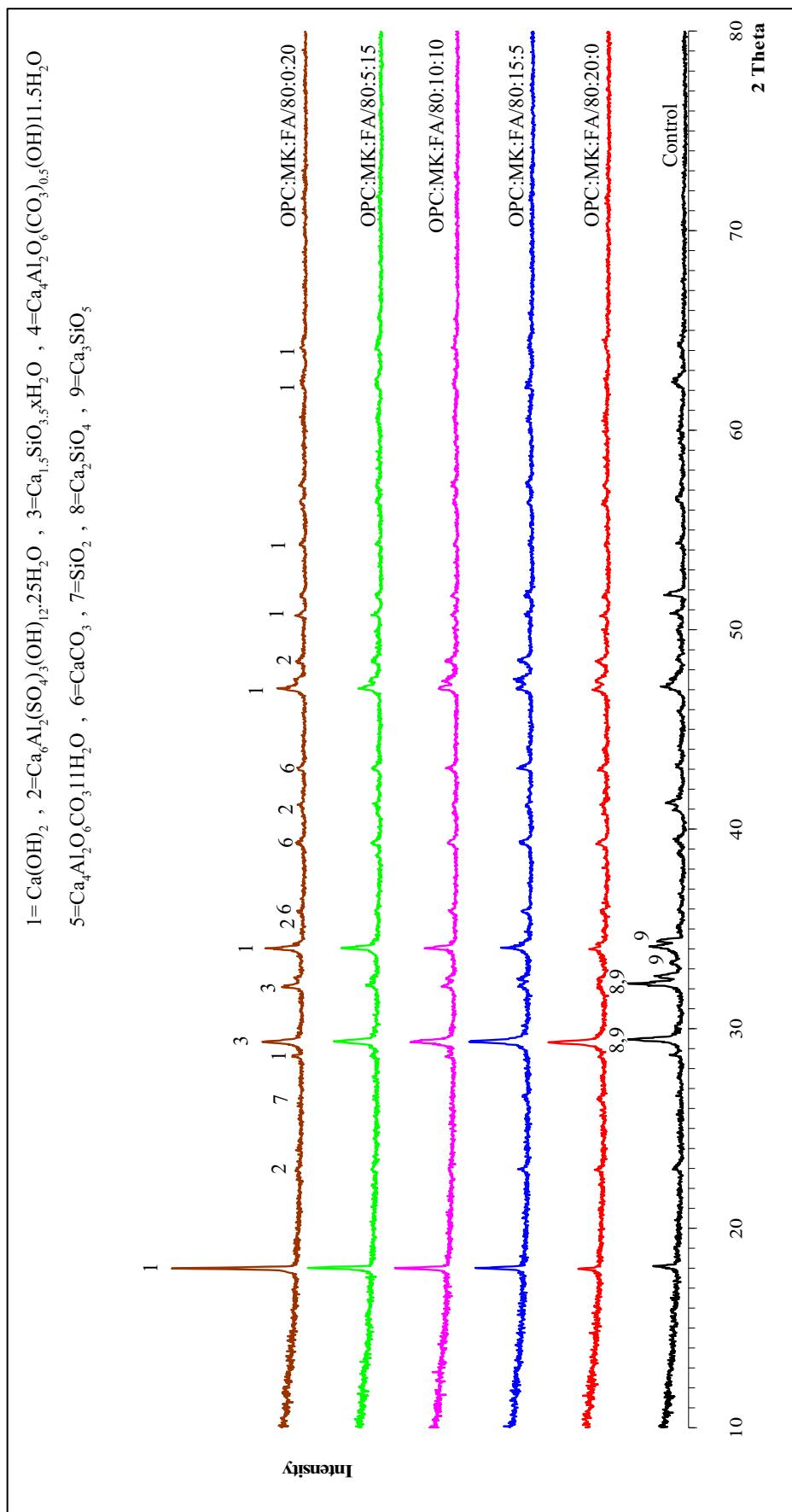
MK:FA/0:20 ที่อายุต่างๆ

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)

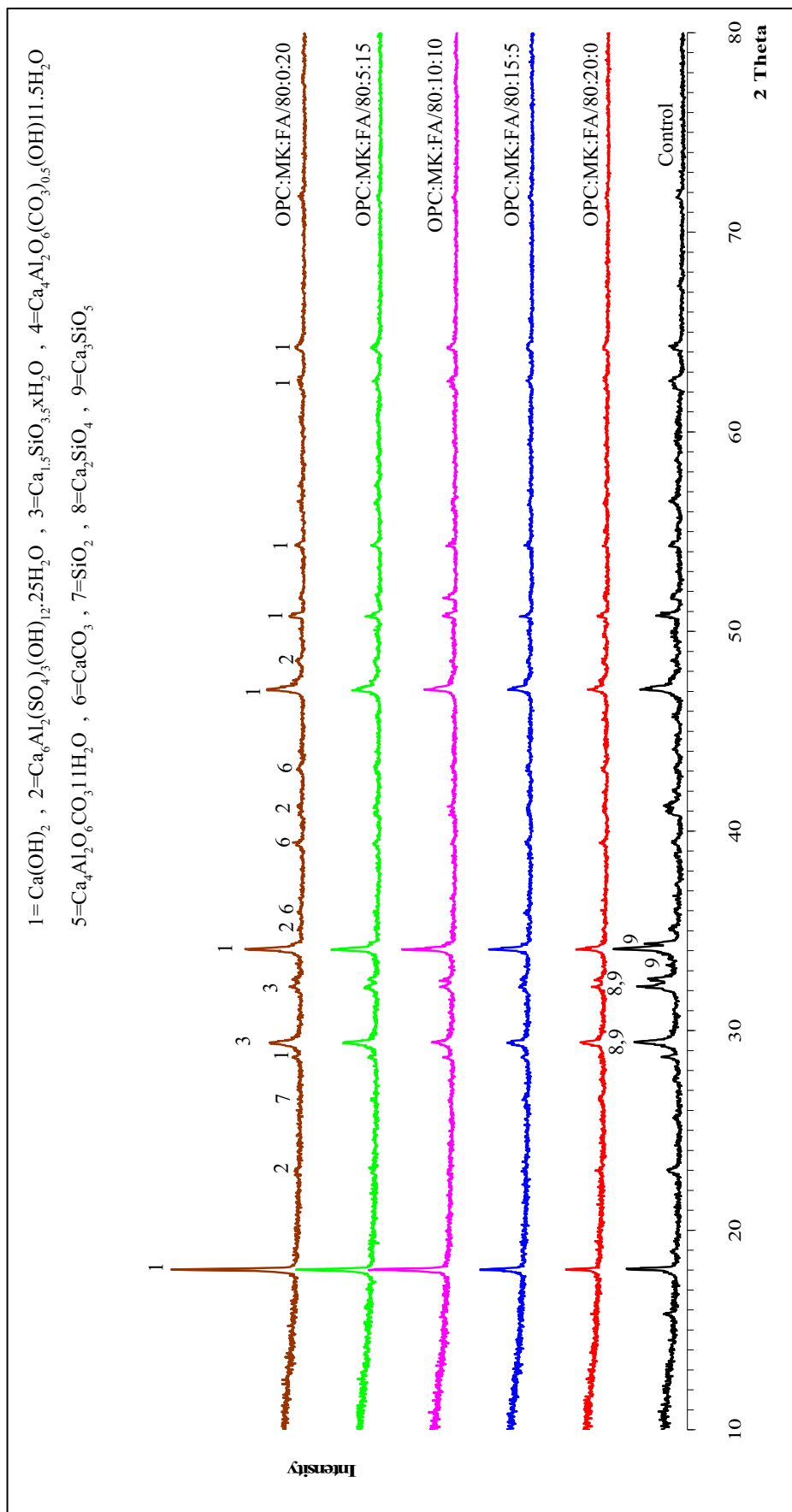


ภาพที่ 13 (ต่อ)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยต่างๆที่อายุทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28 และ 91 วัน โดยพิจารณาค่าความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในภาพที่ 14-19 พบว่าในช่วง 1-3 วัน ซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยล้วนมีความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงสุด เมื่ออายุทดสอบ 7 วัน อัตราส่วนอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15 มีค่าความเข้มสูงสุดดังแสดงในภาพที่ 16 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นอัตราส่วนที่ดินขาวต่อเถ้าลอยที่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในช่วงอายุ 7 วัน ได้ช้าที่สุดและที่อายุทดสอบดังกล่าวซีเมนต์เพสต์ที่มีดินขาวในส่วนผสมจะพบว่า มีสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนียมออกไซด์คาร์บอเนตไฮดรอกไซด์ไฮเดรต (Calcium aluminum oxide carbonate hydroxide hydrate ; $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{CO}_3)_{0.5}(\text{OH})_{11.5}\text{H}_2\text{O}$) และสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนียมออกไซด์คาร์บอเนตไฮเดรต (Calcium aluminum oxide carbonate hydrate; $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{CO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$) เกิดขึ้น โดยสังเกตจากตำแหน่ง 2 Theta Angle ที่ 10.5 และ 23 องศา ส่วนในซีเมนต์เพสต์ควบคุมและซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยล้วนจะไม่มีสารประกอบทั้งสองชนิดดังกล่าวเกิดขึ้น และพบว่าซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 จะมีค่าความเข้มของสารประกอบดังกล่าวสูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆตั้งแต่อายุทดสอบ 7 วัน และค่าความเข้มจะลดลงเมื่ออายุทดสอบเพิ่มขึ้นและหายไป ในที่สุดซึ่งอาจกล่าวได้ว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นทั้งสองชนิดมีความไม่เสถียร

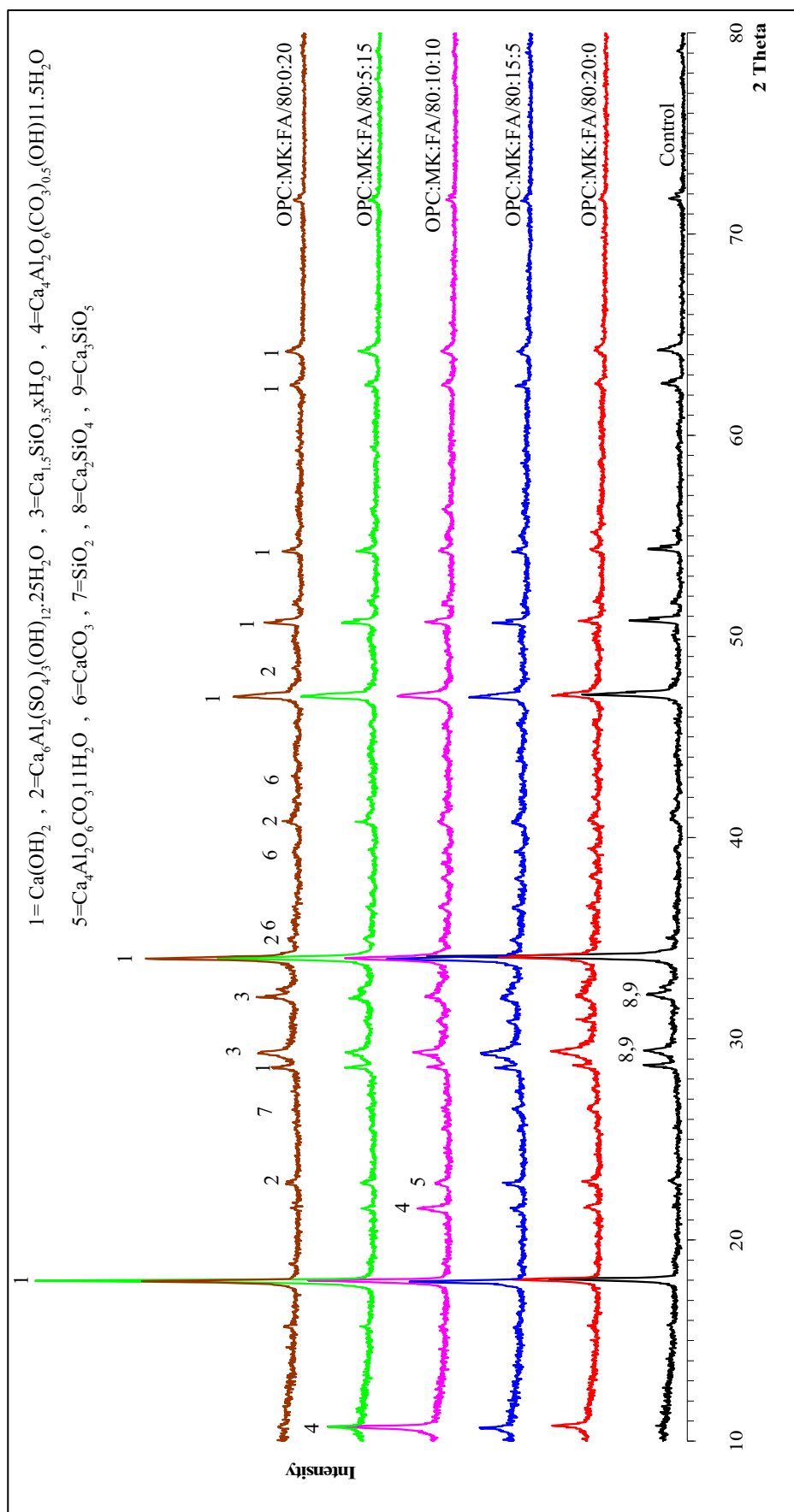


ภาพที่ 14 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆที่อายุ 1 วัน
 ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)

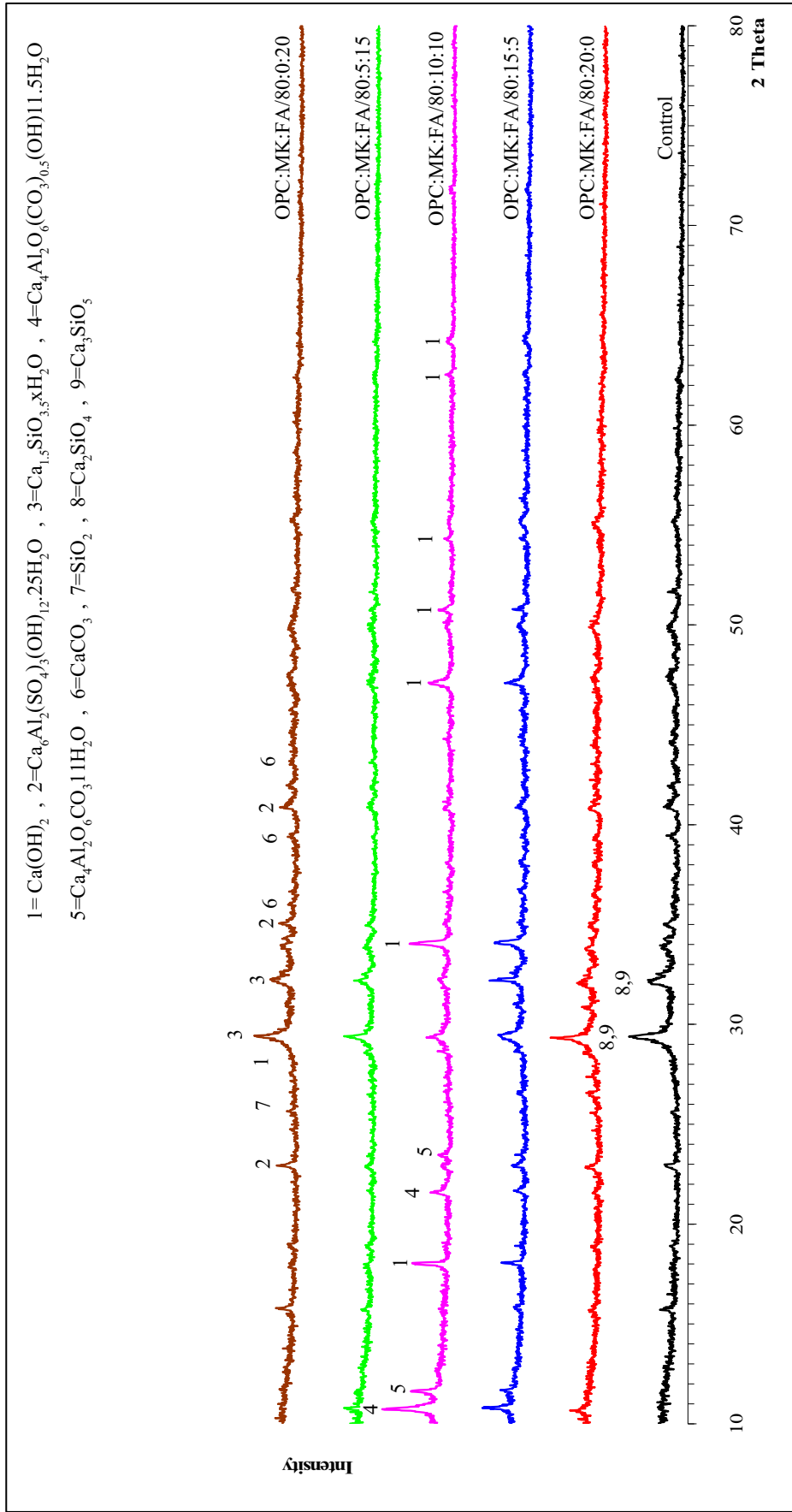


ภาพที่ 15 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆที่อายุ 3 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)

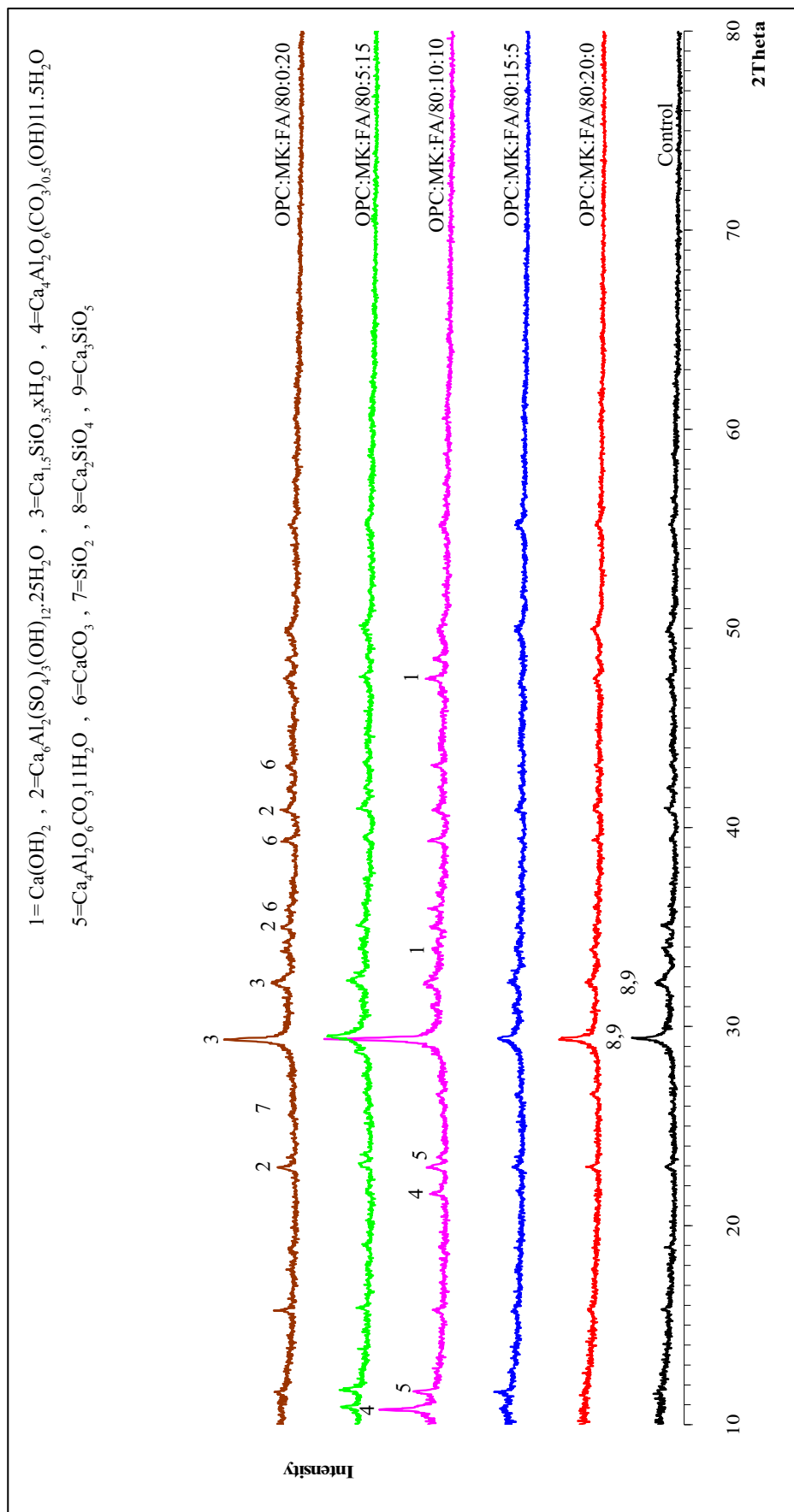


ภาพที่ 16 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆที่อายุ 7 วัน
ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



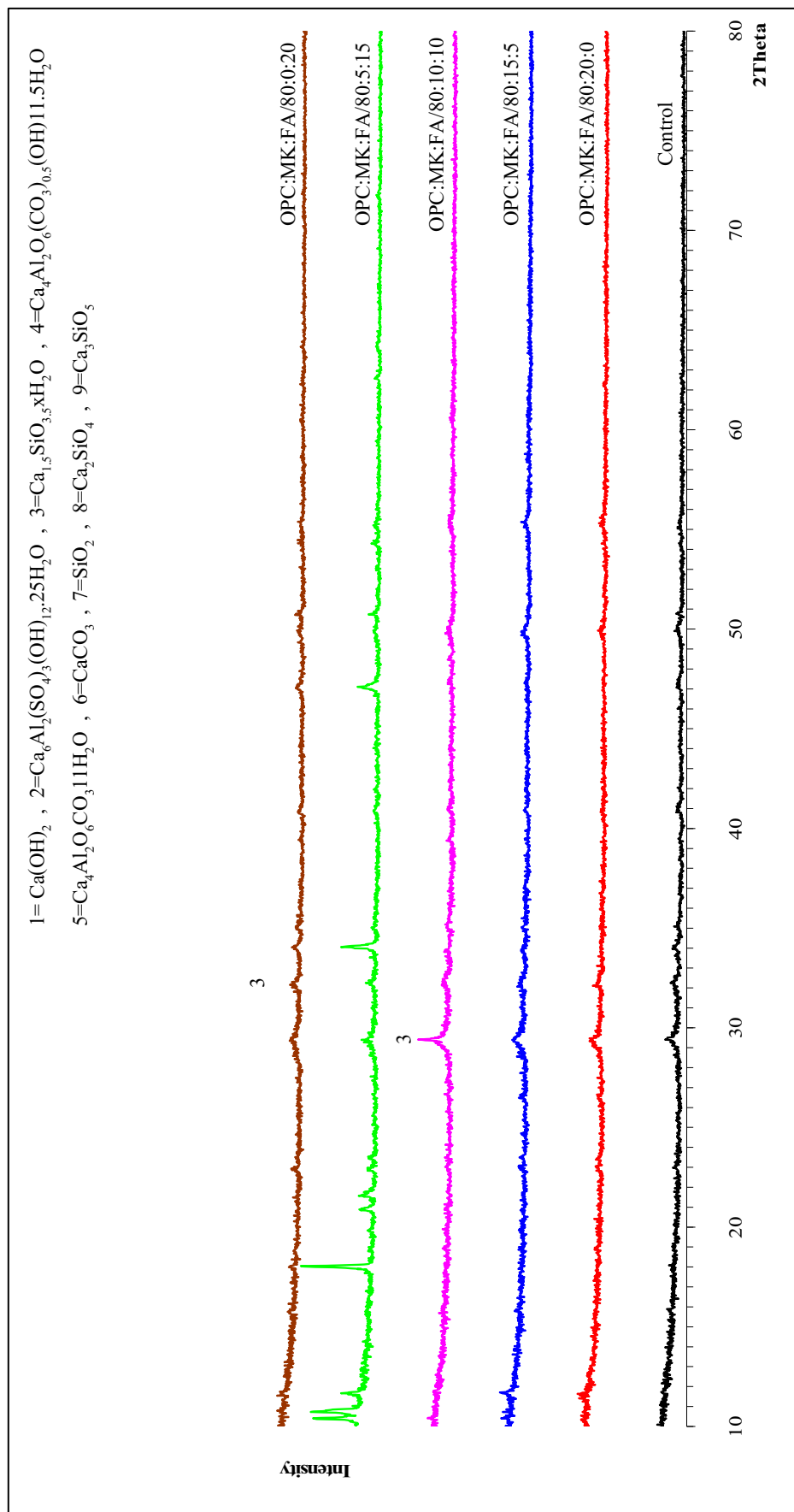
ภาพที่ 17 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆที่อายุ 14 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



ภาพที่ 18 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆที่อายุ 28 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)



ภาพที่ 19 การวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างๆที่อายุ 91 วัน

ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2548)

คุณสมบัติของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอย

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ ค่าการไหล และลักษณะการบดวัสดุ

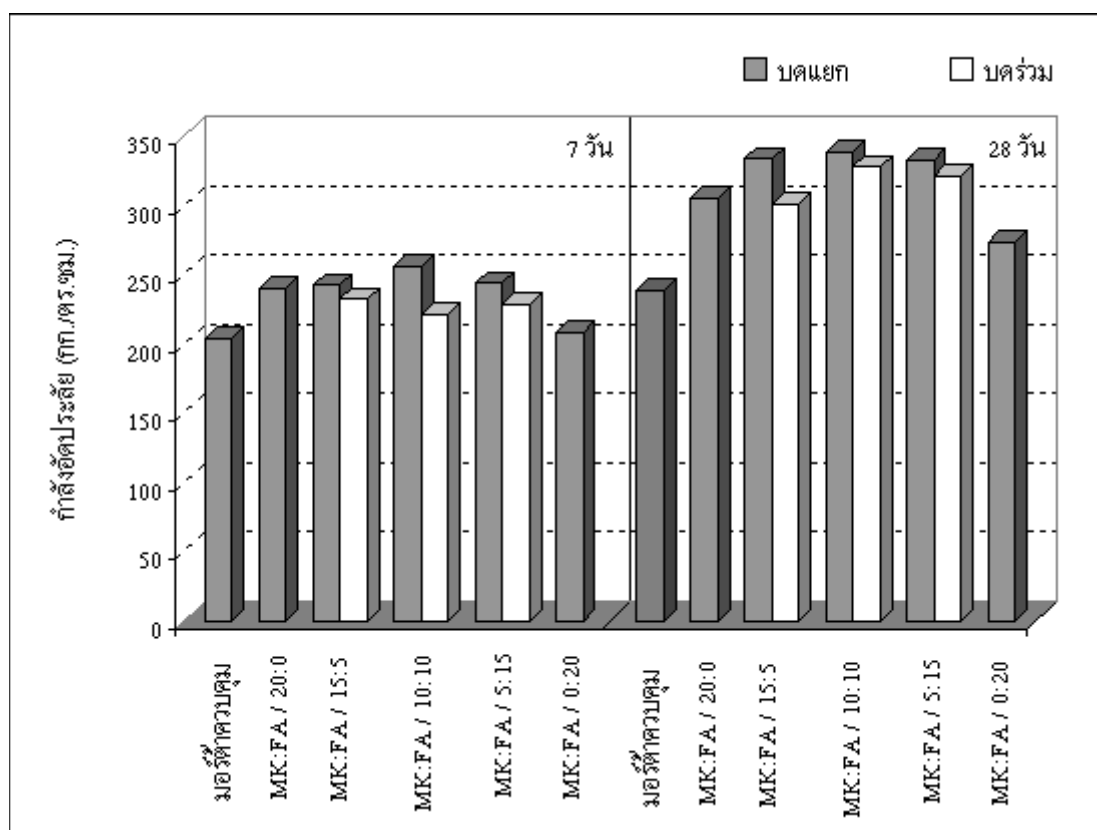
การศึกษาผลกระทบของการบดวัสดุปอซโซลานทั้งสองลักษณะคือ บดแยกกันและบดร่วมกัน พบว่าในการศึกษานี้ลักษณะการบดวัสดุที่แตกต่างกันไม่มีผลกระทบต่อความต้องการน้ำและค่าการไหลของมอร์ต้าที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยเปรียบเทียบกับมอร์ต้าควบคุม ซึ่งแสดงในตารางผนวกที่ ก1 พบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 ซึ่งสูงกว่ามอร์ต้าควบคุม (0.6) เพื่อให้ได้ค่าการไหลเดียวกัน เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของดินขาวที่มีรูปร่างไม่แน่นอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมีการดูดซึมน้ำสูง และเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในส่วนผสมมีผลทำให้ความต้องการน้ำลดลง โดยพิจารณาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5, 10:10, 5:15 และ 0:20 ใช้ W/B เท่ากับ 0.68, 0.65, 0.62 และ 0.58 ตามลำดับ) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของอนุภาคเถ้าลอยที่มีขนาดเล็กและกลมเถ้าลอยจึงทำหน้าที่เสมือน Bearing Ball ช่วยลดความฝืดระหว่างอนุภาคทำให้การไหลดีขึ้นและความต้องการน้ำของมอร์ต้าลดลง

ตารางที่ 7 กำลังอัดและกำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยบดแยกและบดรวมที่อัตราส่วนต่างๆ

ประเภท ส่วนผสม	ลักษณะ การบด	W/B	กำลังอัดประลัย		ดัชนีกำลังอัด	
			(กก./ตร.ซม.)		(%)	
			7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน
มอร์ต้าควบคุม	-	0.60	204	239	100	100
MK:FA/20:0	-	0.70	240	305	118	128
MK:FA/15:5	บดแยก	0.68	242	334	119	140
	บดรวม		232	301	114	126
MK:FA/10:10	บดแยก	0.65	256	339	126	142
	บดรวม		221	328	108	137
MK:FA/5:15	บดแยก	0.62	244	333	120	139
	บดรวม		228	321	112	134
MK:FA/0:20	-	0.58	208	274	102	115

กำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอย

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าดังในตารางที่ 7 และภาพที่ 20 แสดงให้เห็นว่าที่อายุทดสอบ 7 วัน มอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมประมาณร้อยละ 2-26 และที่อายุทดสอบ 28 วัน กำลังอัดจะสูงกว่าประมาณร้อยละ 15-42 โดยกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากดินขาวและเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กไปอุดแทรกช่องว่าง และการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคทำให้มอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยมีความทึบแน่นมากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น โดยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด คือ 10:10 และเมื่อพิจารณาจากลักษณะการบดพบว่ามอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยที่ผ่านการบดรวมจะมีกำลังอัดต่ำกว่าการบดแยก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะดินขาวผสมเถ้าลอยที่ผ่านการบดรวมมีความละเอียดต่ำกว่ากรณีที่แยกบดเฉพาะดินขาวหรือเถ้าลอยล้วน จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและการทำหน้าที่เป็นวัสดุอุดแทรกไม่ดีเท่าที่ควร



ภาพที่ 20 กำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยบดแยกและบดรวมที่อัตราส่วนต่างๆที่อายุ 7 และ 28 วัน

คุณสมบัติของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยในสภาพสด

ปริมาณอากาศในคอนกรีต

ตารางที่ 8 ปริมาณอากาศของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ

ปริมาณอากาศในคอนกรีต (%)					
ประเภทส่วนผสม					
คอนกรีตควบคุม	MK:FA/20:0	MK:FA/15:5	MK:FA/10:10	MK:FA/5:15	MK:FA/0:20
2.8	1.7	1.6	1.6	1.5	1.8

จากการทดสอบการวัดปริมาณอากาศในคอนกรีตสด ดังแสดงในตารางที่ 8 พบว่าคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยมีปริมาณอากาศต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยและในงานวิจัยนี้อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าการใช้ดินขาวและเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ปริมาณอากาศในคอนกรีตลดลงเนื่องจากอนุภาคของดินขาวและเถ้าลอยทำหน้าที่อุดแทรกช่องว่างในคอนกรีตทันทีหลังการผสมทำ โดยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่ต่างกัน ไม่ส่งผลชัดเจนต่อความแตกต่างของปริมาณอากาศที่วัดได้

ค่ายุบตัวและการสูญเสียค่ายุบตัว



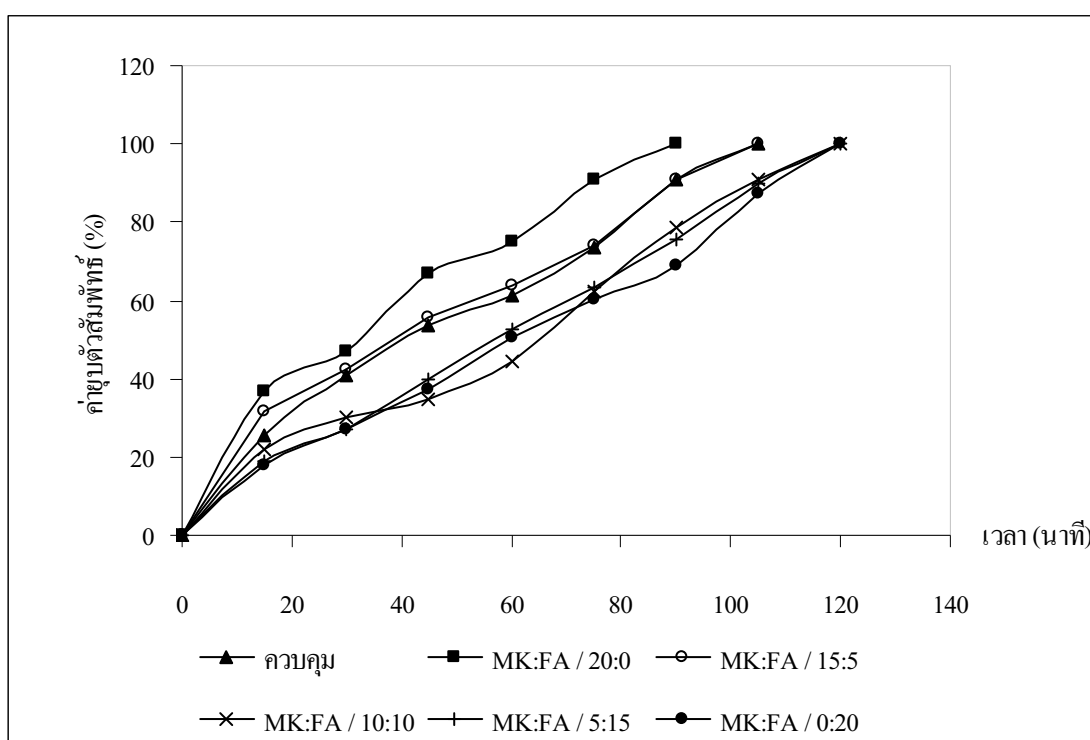
ภาพที่ 21 การทดสอบค่าการยุบตัวโดยควบคุมค่ายุบตัวที่ 7.5 ± 2.5 ซม.

จากการทดสอบความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยต่างๆเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมโดยการวัดค่ายุบตัวและการสูญเสียค่ายุบตัว ซึ่งคอนกรีตทุกส่วนผสมจะควบคุมค่ายุบตัวเริ่มต้นในช่วง 7.5 ± 2.5 ซม. ดังในภาพที่ 21 โดยแปรผันปริมาณน้ำที่เติมลงในส่วนผสมเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวดังกล่าว ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 9 พบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของดินขาว มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และเมื่อใช้เถ้าลอยร่วมกับดินขาวจะช่วยลดความต้องการน้ำของคอนกรีต โดยพิจารณาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0 และ 15:5 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม โดยค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.52 และ 0.51 ตามลำดับ และที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 จะมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับคอนกรีตควบคุมคือ 0.48 และอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15 และ 0:20 จะมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.46 และ 0.44 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ดังนั้นอาจกล่าวโดยสรุปว่าค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินขาว และลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบค่าการไหลของมอร์ต้า

ตารางที่ 9 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ

เวลา (นาทีก)	ค่าการยุบตัว (ควบคุมค่ายุบตัวเริ่มต้นในช่วง 7.5 ± 2.5 ซม.)					
	ประเภทส่วนผสม					
	ควบคุม	MK:FA 20:0	MK:FA 15:5	MK:FA 10:10	MK:FA 5:15	MK:FA 0:20
W/B	0.48	0.52	0.51	0.48	0.46	0.44
0	8.2	8.1	8.1	8.3	8.2	8.4
15	6.1	5.1	5.6	6.5	6.7	6.9
30	4.8	4.3	4.7	5.8	6.0	6.1
45	3.8	2.7	3.6	5.4	5.0	5.3
60	3.2	2.0	3.0	4.6	3.9	4.2
75	2.2	0.8	2.1	3.1	3.0	3.3
90	0.8	0.0	0.8	1.8	2.0	2.6
105	0.0		0.0	0.8	0.9	1.1
120				0.0	0.0	0.0

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวสัมพัทธ์กับเวลาดังภาพที่ 22 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมดินขาวล้วนสูญเสียค่ายุบตัวเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม และใช้เวลาในการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วที่สุดตามด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5 ซึ่งใช้เวลาในการสูญเสียค่ายุบตัวจะใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และในกลุ่มอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10, 5:15 และ 0:20 จะใช้เวลาสูญเสียค่ายุบตัวใกล้เคียงกันและจากตารางที่ 9 ยังพบว่าการใช้เถ้าลอยร้อยละ 10 ถึง 20 ในส่วนผสมมีผลต่อการยืดเวลาการสูญเสียค่ายุบตัวออกไปประมาณ 15-30 นาที ซึ่งการที่เถ้าลอยช่วยลดการสูญเสียค่ายุบตัว เป็นผลเนื่องมาจากเถ้าลอยช่วยคงสภาพความเป็นพลาสติกให้กับคอนกรีตและยังช่วยหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกด้วย (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2544)



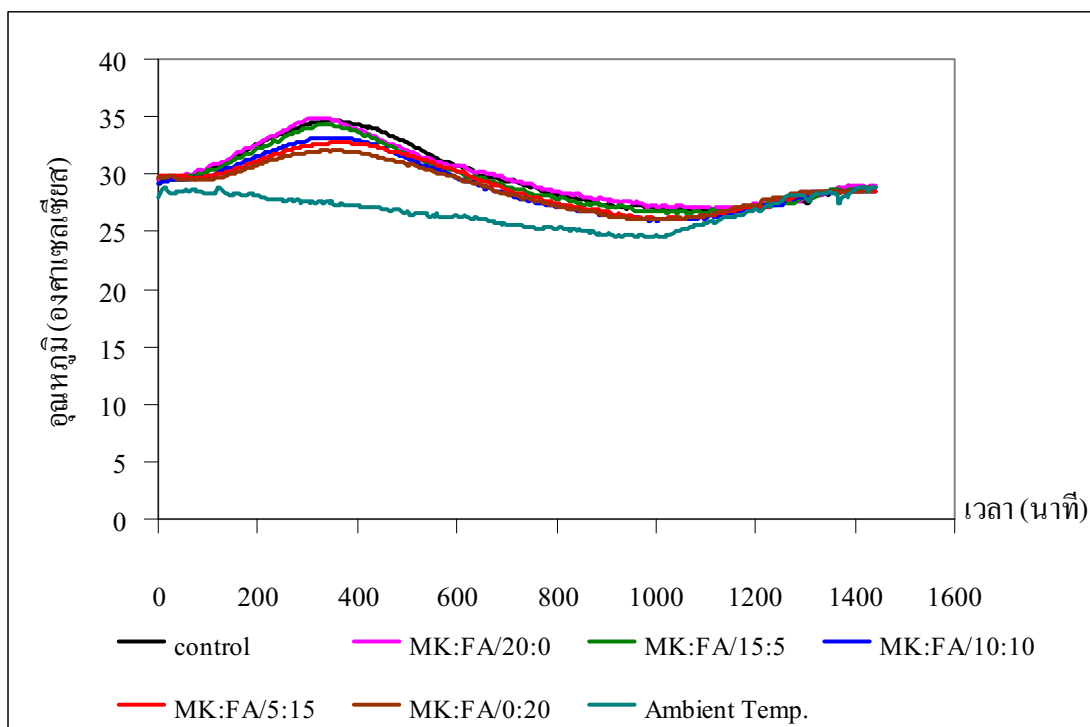
ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัวสัมพัทธ์กับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในคอนกรีต

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมดังแสดงในภาพที่ 23 โดยผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 24 และตารางที่ 10 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของคอนกรีตทุกส่วนผสมจะมีกราฟเป็นรูปประฆังคว่ำ โดยอุณหภูมิของคอนกรีตควบคุมจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ 34.8 องศาเซลเซียส และคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0, 15:5, 10:10, 5:15 และ 0:20 มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 34.9, 34.4, 33.2, 32.9 และ 32.1 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่อุณหภูมิของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดพบว่า คอนกรีตที่ผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) ใช้เวลาสั้นที่สุดหลังจากผสมคือ 5.15 ชม. ตามด้วยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5 เมื่อระยะเวลาผ่านไป 5.40 ชม. ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 และคอนกรีตควบคุมใช้เวลาเท่ากันคือ 5.50 ชม. และคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20) อุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป 5.55 ชม. ลำดับสุดท้ายคืออัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดเมื่อระยะเวลาผ่านไป 6.10 ชม. หลังจากผสม จากผลการทดสอบอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า เมื่อใช้ดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตจะทำให้ช่วงเวลาการเกิดอุณหภูมิสูงสุดสั้นลง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากดินขาวช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่เมื่อมีเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในส่วนผสมระยะเวลาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจุดสูงสุดจะยืดออกไป ทั้งนี้เนื่องจากผลของการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าลอยนั่นเอง



ภาพที่ 23 เครื่องมือสำหรับบันทึกอุณหภูมิและการติดตั้งเทอร์โมคอปเปิ้ลในตัวอย่างคอนกรีต



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยกับเวลา

ตารางที่ 10 อุณหภูมิสูงสุดที่เวลาต่างๆหลังการผสมของคอนกรีต

ประเภท ส่วนผสม	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาที่เกิด อุณหภูมิสูงสุด (ชั่วโมง)
มอร์ต้าควบคุม	34.8	27.6	7.2	5.50
MK:FA/20:0	34.9	27.6	7.4	5.15
MK:FA/15:5	34.4	27.6	6.8	5.40
MK:FA/10:10	33.2	27.6	5.6	5.50
MK:FA/5:15	32.9	27.5	5.4	6.10
MK:FA/0:20	32.1	27.3	4.8	5.55

คุณสมบัติของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยในสภาพแข็งตัว

กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

จากการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย และคอนกรีตควบคุม ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 7.5x7.5x7.5 ซม. ได้ค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 11 และเมื่อคูณด้วยค่าปรับแก้ในตารางที่ 12 ซึ่งได้จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมทรงกระบอกเทียบกับทรงลูกบาศก์ขนาด 7.5x7.5x7.5 ซม. ที่อายุต่างๆ เพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยเทียบเท่าคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. แสดงในตารางที่ 13 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยและอายุทดสอบได้ดังภาพที่ 25

ตารางที่ 11 กำลังอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 7.5x7.5x7.5 ซม. ที่อายุทดสอบต่างๆ

ประเภทส่วนผสม	W/B	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)				
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
คอนกรีตควบคุม	0.48	256	370	478	490	507
MK:FA/20:0	0.52	257	418	537	549	553
MK:FA/15:5	0.51	232	414	491	513	520
MK:FA/10:10	0.48	227	393	496	565	627
MK:FA/5:15	0.46	253	337	462	510	533
MK:FA/0:20	0.44	245	355	447	577	579

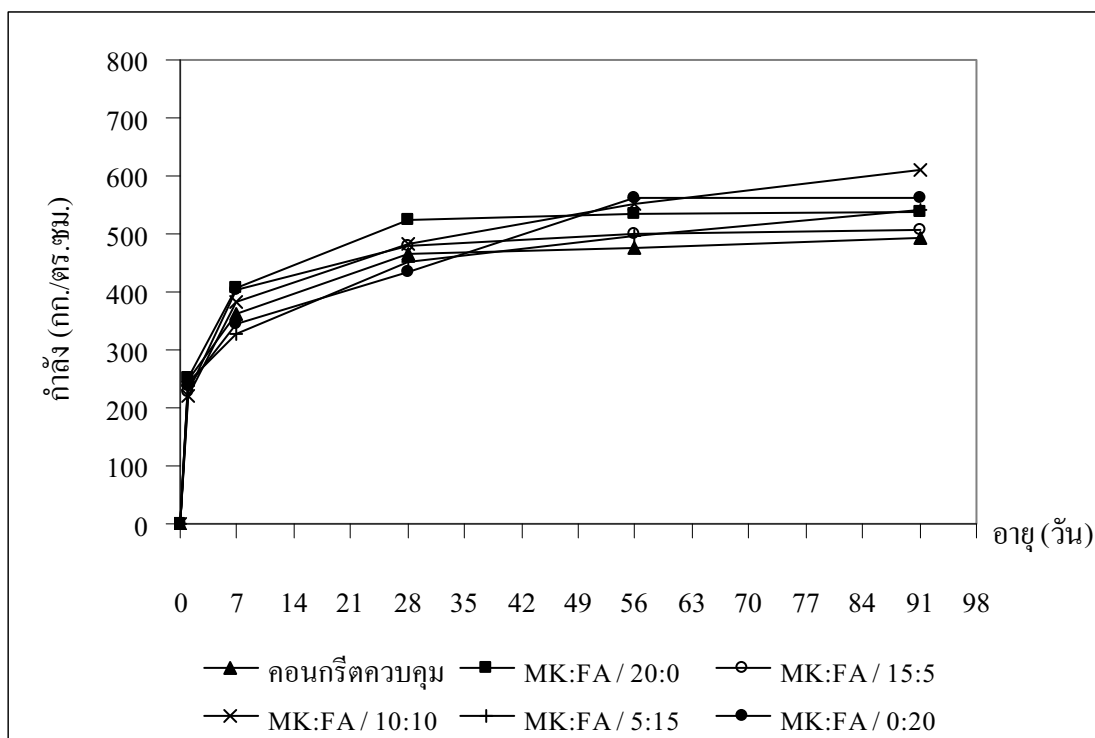
ตารางที่ 12 ตัวคูณปรับแก้ค่ากำลังอัดเทียบเท่าของคอนกรีตรูปทรงกระบอก

อายุ (วัน)	กำลังอัดเฉลี่ย ทรงกระบอก	กำลังอัดเฉลี่ย รูปลูกบาศก์	อัตราส่วนกำลังอัดทรง กระบอกต่อทรงลูกบาศก์	ตัวคูณปรับแก้
1	206	256	0.804	
7	400	370	1.080	
28	448	478	0.937	0.974
56	488	490	0.997	
91	531	507	1.049	

พบว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) จะสูงกว่าคอนกรีตควบคุมตลอดช่วงอายุทดสอบ 1-91 วัน ซึ่งการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุเริ่มต้น 1-7 วัน ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมีส่วนหนึ่งจากอนุภาคขนาดเล็กของดินขาว ทำหน้าที่อุดแทรกช่องว่างขนาดเล็กในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น และจากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าดินขาวยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เร็วขึ้น และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Wild, 1996) ทำให้คอนกรีตผสมดินขาล้วนมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกช่วงอายุทดสอบการใช้เถ้าลอยในส่วนผสมมีผลต่อกำลังอัดคอนกรีตในช่วงต้น โดยคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5 และ 10:10 มีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเฉพาะที่อายุทดสอบ 1 วัน แต่ที่อายุทดสอบหลังจากนั้นจะมีกำลังอัดสูงกว่า เมื่อพิจารณาคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยซึ่งมีเถ้าลอยร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนักในส่วนผสมจะมีกำลังอัดในช่วงอายุ 1-28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่ในช่วงอายุ 56-91 วัน จะพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นสูงกว่าคอนกรีตควบคุมซึ่งการพัฒนา กำลังอัดเป็นผลจากการอุดแทรกช่องว่างของอนุภาคเถ้าลอย และจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ของเถ้าลอยในช่วงอายุหลังจาก 28 วัน และพบว่าคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุทดสอบ 91 วัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกหลังจากอายุทดสอบดังกล่าว

ตารางที่ 13 กำลังอัดเทียบเท่าทรงกระบอกของคอนกรีตที่อายุทดสอบต่างๆ

ประเภทส่วนผสม	W/B	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)				
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
คอนกรีตควบคุม	0.48	249	360	466	477	493
MK:FA/20:0	0.52	250	407	523	535	538
MK:FA/15:5	0.51	226	403	478	499	507
MK:FA/10:10	0.48	221	383	483	550	610
MK:FA/5:15	0.46	246	328	450	496	542
MK:FA/0:20	0.44	239	346	435	562	563



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุทดสอบของคอนกรีตส่วนผสมต่างๆ

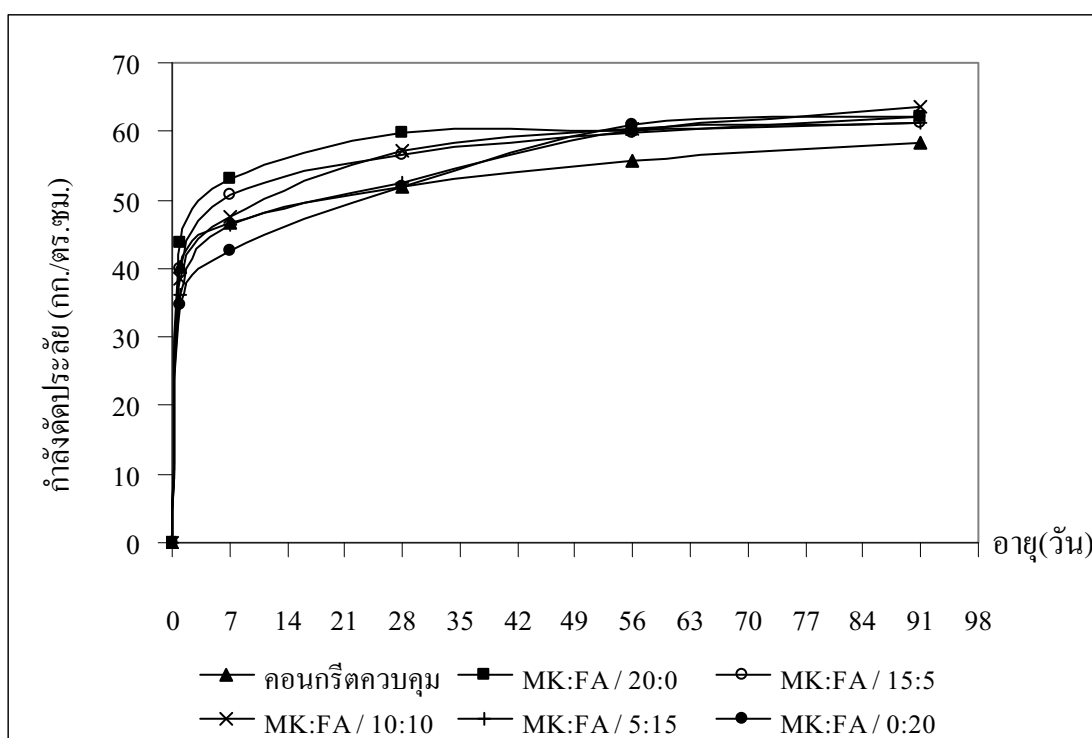
กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

กำลังอัดของคอนกรีตแต่ละส่วนผสมแสดงในตารางที่ 14 และภาพที่ 26 พบว่าดินขาวและเถ้าลอยมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยมีผลไปในลักษณะเช่นเดียวกันกับกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งคอนกรีตผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) จะมีกำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตควบคุมตลอดช่วงอายุทดสอบ 1-91 วัน และที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5 และ 10:10 ที่อายุทดสอบ 1 วัน กำลังอัดจะต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่หลังจากอายุทดสอบ 7 วัน การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดังกล่าวจะสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสม ที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15 และ 0:20 จะพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยในช่วงอายุทดสอบ 1-7 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และจะเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมที่ 28 วัน หลังจากนั้นกำลังอัดที่ทดสอบได้จะมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม จากผลการทดสอบอาจกล่าวได้ว่าเมื่อใช้ดินขาวและเถ้าลอยผสมในคอนกรีต โดยมีดินขาวร้อยละ 15-20 มีผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้น 1-7 วัน และเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15-20 ในส่วนผสมมีผลให้กำลังอัดในช่วงต้นลดลงแต่ในช่วงปลายกำลังอัด

ของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่อายุทดสอบ 91 วัน เช่นเดียวกันกับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 14 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุทดสอบต่างๆ

ประเภทส่วนผสม	W/B	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)				
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
คอนกรีตควบคุม	0.48	40.2	46.9	52.0	55.7	58.4
MK:FA/20:0	0.52	43.6	53.0	59.7	60.0	62.1
MK:FA/15:5	0.51	40.1	50.8	56.5	59.8	61.1
MK:FA/10:10	0.48	38.5	47.5	57.1	60.4	63.7
MK:FA/5:15	0.46	36.1	46.4	52.4	60.0	61.3
MK:FA/0:20	0.44	34.8	42.6	51.8	60.9	62.1



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยกับอายุทดสอบของคอนกรีตส่วนผสมต่างๆ

ความต้านทานการกัดสีของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

จากการทดสอบความต้านทานการกัดสีตามมาตรฐาน ASTM C944-90a โดยใช้เครื่องมือทดสอบเทียบเท่ามาตรฐานที่ดัดแปลงจากเครื่องเจาะดังแสดงภาพผนวกที่ ข8 โดยพิจารณาความต้านทานการกัดสีจากน้ำหนักที่หายไปของก้อนตัวอย่างต่อพื้นที่การกัด ผลการทดสอบการกัดสีแสดงดังตารางที่ 15 พบว่าคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกส่วนผสมมีค่าน้ำหนักที่หายไปต่อพื้นที่การกัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม แสดงว่าคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วน มีความต้านทานการกัดสีสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุการทดสอบ โดยที่อายุ 28 วัน ค่าความต้านทานการกัดสีของคอนกรีตผสมดินขาวผสมเถ้าลอยแต่ละอัตราส่วนมีค่าไม่แตกต่างกันชัดเจน และมีความสูงกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 28-34 ส่วนที่อายุทดสอบ 56 วัน ค่าความต้านทานการกัดสีของคอนกรีตผสมดินขาวผสมเถ้าลอยมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 39-54 และคอนกรีตที่มีค่าความต้านทานการกัดสีสูงสุดที่อายุทดสอบ 28 และ 56 วัน คือคอนกรีตผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0)

เมื่อพิจารณาถึงสาเหตุที่ทำให้ค่าความต้านทานการกัดสีของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม พบว่าค่าความต้านทานการกัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดและอายุการบ่มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามก็กำลังอัดไม่ได้เป็นปัจจัยโดยตรงต่อความต้านทานการกัดสี แต่เป็นผลชัดเจนจากคุณลักษณะของเพสต์ที่บีบแน่นและมีช่องว่างขนาดเล็กมากขึ้น (Frias and Cabrera, 2000) ดังจะเห็นได้จากความต้านทานการกัดสีที่อายุทดสอบ 28 วัน ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยล้วนมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมแม้ว่ากำลังอัดจะต่ำกว่าก็ตามและพบว่าอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานไม่มีผลกระทบที่ชัดเจนต่อค่าต้านทานการกัดสี

ตารางที่ 15 น้ำหนักที่หายไปจากการกัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตแต่ละส่วนผสม

ประเภทส่วนผสม	W/B	น้ำหนักที่หายไป / พื้นที่การกัด (ก./ตร.ซม.)	
		28 วัน	56 วัน
คอนกรีตควบคุม	0.48	0.0776	0.0755
MK:FA/20:0	0.52	0.0511	0.0344
MK:FA/15:5	0.51	0.0516	0.0405
MK:FA/10:10	0.48	0.0551	0.0463
MK:FA/5:15	0.46	0.0556	0.0450
MK:FA/0:20	0.44	0.0541	0.0362

ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย

การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์

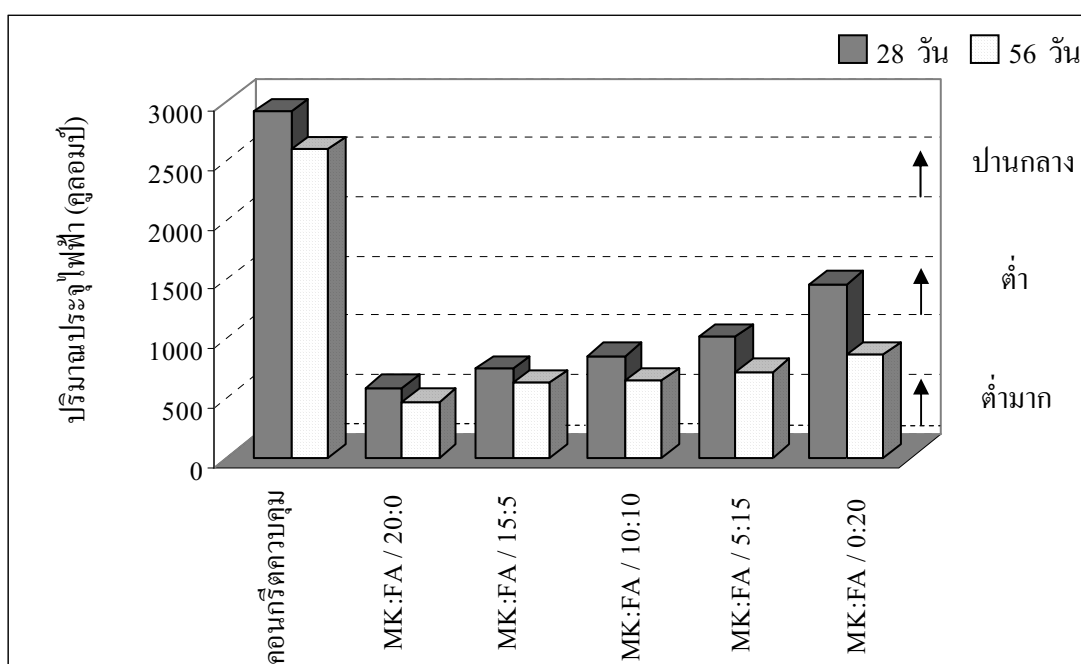
จากการทดสอบหาค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยวิธี Rapid Chloride Permeability Test ดังแสดงในตารางที่ 16 พบว่าคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนมีปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างชัดเจน หากพิจารณาเปรียบเทียบในกลุ่มคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย คอนกรีตผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) จะมีปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านต่ำสุด โดยปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยพร้อมกับลดปริมาณดินขาว

ตารางที่ 16 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 28 และ 56 วัน

ประเภท ส่วนผสม	W/B	ปริมาณดินขาว (%)	ปริมาณเถ้าลอย (%)	ปริมาณประจุ (คูลอมป)	
				28 วัน	56 วัน
คอนกรีตควบคุม	0.48	0	0	2916	2595
MK:FA / 20:0	0.55	20	0	585	467
MK:FA / 15:5	0.52	15	5	743	626
MK:FA / 10:10	0.49	10	10	851	644
MK:FA / 5:15	0.46	5	15	1015	720
MK:FA / 0:20	0.43	0	20	1453	859

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตกับระดับความซึมผ่านของคลอไรด์กับมาตรฐาน ASTM C1202 ในตารางที่ 17 ซึ่งแสดงผลดังภาพที่ 27 พบว่าคอนกรีตควบคุมมีระดับความซึมผ่านของคลอไรด์อยู่ในระดับปานกลางทุกอายุทดสอบ และคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยตั้งแต่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0 จนถึง 5:15 มีระดับความซึมผ่านของคลอไรด์อยู่ในระดับต่ำมากทุกอายุทดสอบเช่นกัน ส่วนคอนกรีตที่ผสมเฉพาะเถ้าลอย (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20) จะมีระดับความซึมผ่านของคลอไรด์ที่อายุทดสอบ 28 วัน อยู่ในระดับต่ำ

และเมื่ออายุทดสอบ 56 วัน ระดับความซึมผ่านของคลอไรด์จะลดลงมาที่ระดับต่ำมาก โดยระดับการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตผสมดินขาวมีค่าลดลงอย่างมากเป็นผลเนื่องจาก อนุภาคดินขาวและเถ้าลอยทำหน้าที่อุดแทรกช่องว่างทันทีหลังการผสม และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้น โดยในช่วงก่อนอายุทดสอบ 28 วัน จะเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินขาวเป็นส่วนใหญ่ และหลังจากนั้นจะเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย



ภาพที่ 27 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่อายุ 28 และ 56 วัน

ตารางที่ 17 ปริมาณประจุไฟฟ้าและระดับความซึมผ่านของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1202

ปริมาณประจุ (คูลอมป์)	ความซึมผ่านของคลอไรด์
> 4,000	สูง
2,000-4,000	ปานกลาง
1,000-2,000	ต่ำ
100-1,000	ต่ำมาก
< 100	ไม่มีการซึมผ่าน

การทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Half Cell Potential Test)

งานวิจัยนี้ใช้การทดสอบการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากก้อนตัวอย่างที่ผ่านการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าให้เหล็กเสริมที่ฝังในตัวอย่างคอนกรีตเกิดสนิมซึ่งเป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากรายงานอื่น (สุวิมล และ ประเสริฐ, 2545) แม้ว่าได้กำหนดระยะเวลาการทดสอบไว้ที่ 91 วัน แต่ในการทดสอบจริงได้ดำเนินการต่อเนื่องจนถึง 140 วัน โดยนำค่าความต่างศักย์ที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แสดงถึงความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนจากสนิมของเหล็กเสริม ที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C876 ในตารางที่ 18 ซึ่งผลการทดสอบแสดงในลักษณะความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะเวลาทดสอบในภาพที่ 28 แสดงว่าคอนกรีตควบคุมมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงจนมีค่าติดลบมากกว่า -350 มิลลิโวลต์ ที่ระยะเวลาทดสอบ 8 วัน ซึ่งแสดงว่าเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตควบคุมมีค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมมากกว่าร้อยละ 90 และเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงตามเวลาจนมีค่าประมาณ -600 ถึง -700 มิลลิโวลต์ ตัวอย่างทดสอบจะเริ่มแตกตามแนวร้าวที่ระยะเวลาทดสอบ 69 วัน ดังแสดงในตารางสรุปที่ 19

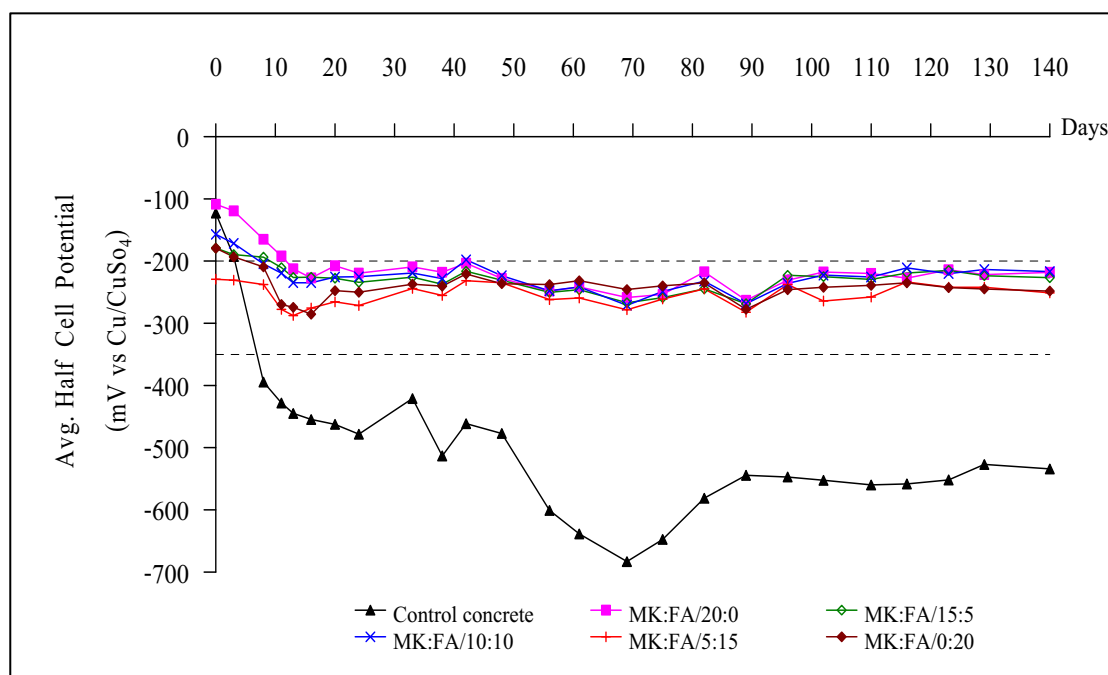
โดยการแตกร้าวของคอนกรีตควบคุมเป็นผลจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมอย่างรุนแรงทำให้ปริมาตรของเหล็กเพิ่มมากขึ้นจนเกิดแรงดันภายในเพียงพอที่จะทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว โดยรอยแตกจะกว้างมากขึ้นและมีน้ำสนิมไหลซึมตามรอยแตกเมื่อระยะทดสอบนานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 29 เมื่อพิจารณาในกลุ่มของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยพบว่าแนวโน้มของการลดลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นไปในทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง -200 ถึง -300 มิลลิโวลต์ ตลอดช่วงระยะเวลาการทดสอบ 140 วัน และไม่ปรากฏการแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบ มีเพียงน้ำสนิมเกิดขึ้นด้านบนของตัวอย่างทดสอบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 30 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับตารางที่ 18 พบว่าตั้งแต่ช่วงอายุทดสอบ 10-140 วัน คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยมีค่าความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนจากสนิมที่ไม่แน่นอนแม้ว่าอาจมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนได้ และพบว่าอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่ต่างกัน ไม่แสดงผลกระทบต่อความแตกต่างของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ชัดเจน

แม้ว่าข้อมูลจากผลการทดสอบวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าแปรผันขึ้นลงในบางช่วงเนื่องจากค่าความต่างศักย์ที่วัดด้วยวิธี Half Cell Potential ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น แต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้อย่าง

หนึ่งถึงความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนเนื่องจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าดินขาวและเถ้าลอยสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้านความต้านทานการกัดกร่อนให้ดีขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของดินขาวและเถ้าลอยที่ช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตให้มีความพรุนลดลง ความทึบแน่นเพิ่มขึ้น ทำให้ออกซิเจน ความชื้น และคลอไรด์เคลื่อนที่ผ่านเนื้อคอนกรีตเข้าไปสู่เหล็กเสริมได้ยากขึ้นนอกจากนี้เถ้าลอยยังทำหน้าที่ยึดจับคลอไรด์ที่อาจซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตจึงช่วยลดโอกาสที่จะเกิดการกัดกร่อนของสนิมในเหล็กเสริมได้ด้วย

ตารางที่ 18 การเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์และความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนจากสนิมตามมาตรฐาน ASTM C876

ค่าความต่างศักย์ (mV)	ความน่าจะเป็นของการเกิดการกัดกร่อน
ติดลบมากกว่า -350	ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมมากกว่า 90%
ระหว่าง -200 ถึง -350	ไม่แน่นอน (มีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนได้)
ติดลบน้อยกว่า -200	ค่าความน่าจะเป็นของการไม่เกิดสนิมมากกว่า 90%



ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะเวลาทดสอบ



เร่งสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าระยะเวลา 75 วัน



เร่งสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าระยะเวลา 91 วัน

ภาพที่ 29 การเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตควบคุมที่อายุต่างๆ



เร่งสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าระยะเวลา 120 วัน



เร่งสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าระยะเวลา 140 วัน

ภาพที่ 29 (ต่อ)

ตารางที่ 19 ระยะเวลาทดสอบที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมากกว่า 90% และเริ่มเห็นรอยแตกร้าว

ประเภทส่วนผสม	ระยะเวลาที่ค่าความต่างศักย์ถึง -350 mV (วัน)	ระยะเวลาที่คอนกรีตเริ่มเห็นรอยแตก (วัน)	ความต่างศักย์ที่เริ่มเห็นรอยแตก (mV)
คอนกรีตควบคุม	8	69	-600 ถึง -700
MK:FA / 20:0	NA*	NA*	NA*
MK:FA / 15:5	NA*	NA*	NA*
MK:FA / 10:10	NA*	NA*	NA*
MK:FA / 5:15	NA*	NA*	NA*
MK:FA / 0:20	NA*	NA*	NA*

หมายเหตุ NA* : ไม่สามารถวัดค่าได้หรือยังไม่ปรากฏค่าในช่วงระยะเวลาทดสอบ 140 วัน



คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยเร่งสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าระยะเวลา 91 วัน



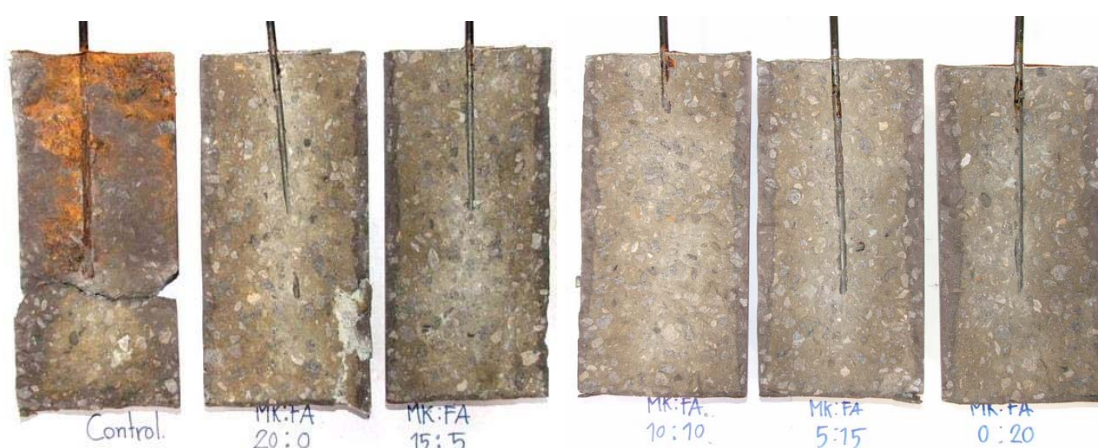
คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยเร่งสนิมด้วยกระแสไฟฟ้าระยะเวลา 140 วัน

ภาพที่ 30 ตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆที่อายุ 91 และ 140 วัน

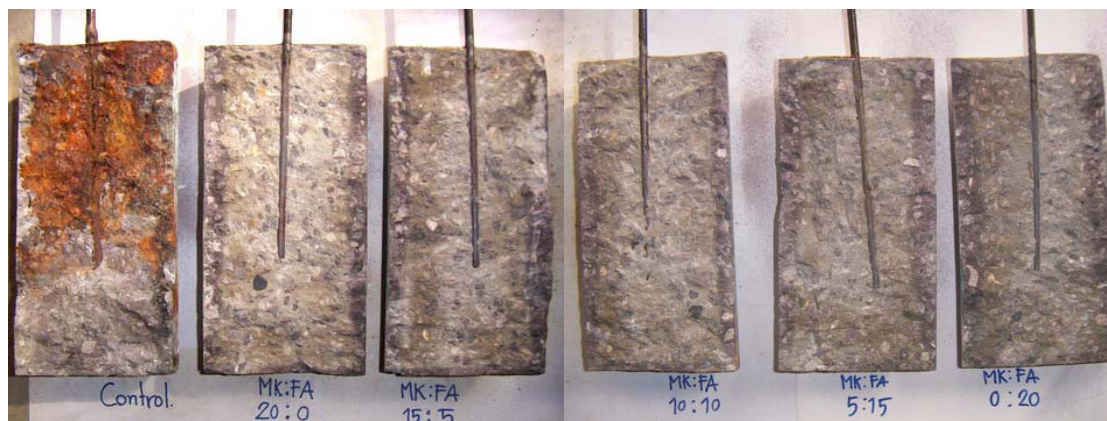
สภาพการเกิดสนิมเหล็กและการวัดระดับความลึกของคลอไรด์โดยการฟั่นสารละลาย

ซิลเวอร์ไนเตรด (Silver Nitrate; AgNO_3)

การวัดระดับความลึกของคลอไรด์ด้วยการฟั่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดและวัดระดับความลึกของขอบเขตสีที่แตกต่างกัน โดยใช้ตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการเร่งการเกิดสนิมและวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะเวลา 91 และ 140 วัน กดให้แตกตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางออกเป็นสองส่วน และฉีดฟั่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดบนผิวด้านในของตัวอย่างคอนกรีต สารละลายซิลเวอร์ไนเตรดสามารถทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ให้สีม่วงดำจึงทำให้มองเห็นแถบสีม่วงดำในเนื้อคอนกรีต ซึ่งแสดงถึงการซึมผ่านเนื้อคอนกรีตของคลอไรด์ ดังภาพที่ 31-32 ระยะความลึกของคลอไรด์ที่วัดได้สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติด้านความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ ที่มองเห็นด้วยตาได้ โดยระยะซึมลึกเฉลี่ยของคลอไรด์ที่วัดได้แสดงในภาพที่ 33-34 และสรุปผลในตารางที่ 20 พบว่าคอนกรีตควบคุมมีระยะซึมลึกเฉลี่ยที่ระยะเวลาทดสอบ 91 และ 140 วัน มากกว่า 7 ซม. ทำให้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเนื้อคอนกรีตควบคุมไปถึงเหล็กเสริม จนเกิดการกัดกร่อนของสนิมอย่างรุนแรง ซึ่งแตกต่างจากคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยอย่างชัดเจน โดยคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยจะมีระยะซึมลึกเฉลี่ยไม่เกิน 1.9 และ 2.3 ซม. สำหรับระยะเวลาทดสอบ 91 และ 140 วัน ตามลำดับ และพบว่าอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่แตกต่างกันไม่มีผลกระทบต่อความแตกต่างของระยะซึมลึกเฉลี่ยที่ชัดเจนมากนัก

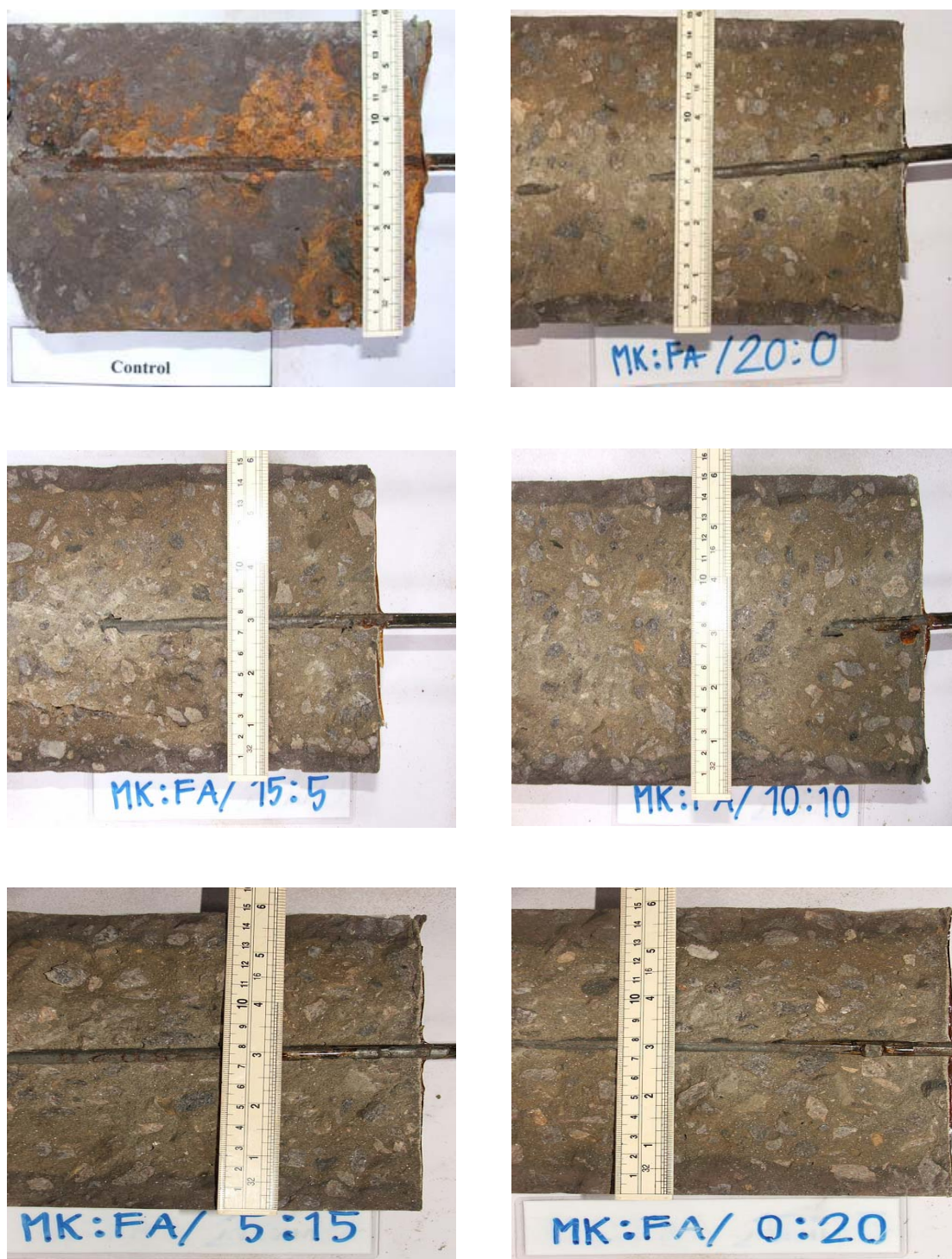


ภาพที่ 31 ตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่ฟั่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุ 91 วัน

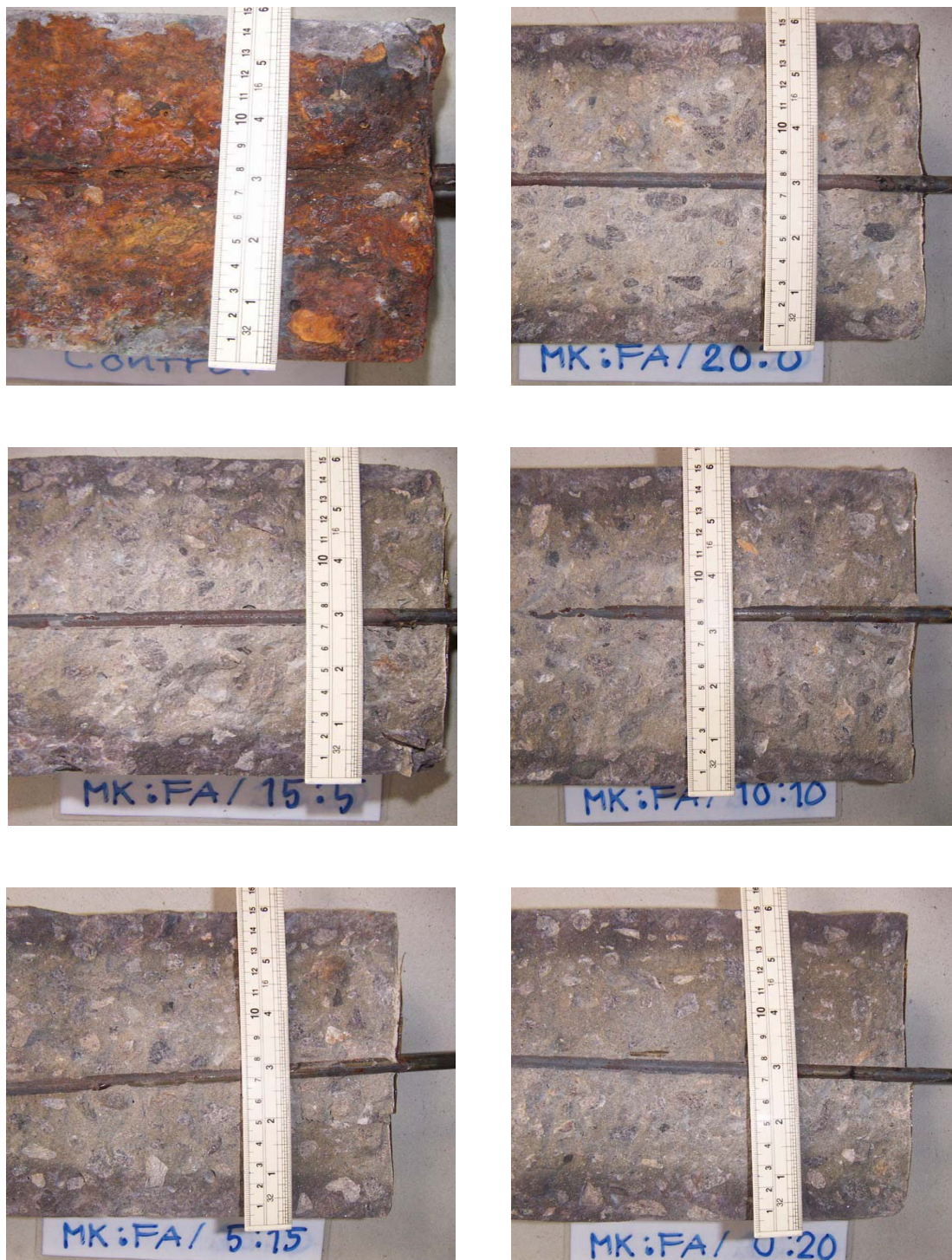


ภาพที่ 32 ตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสมที่พ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุ 140 วัน

ผลการทดสอบการวัดระดับความลึกของคลอไรด์ด้วยการพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดมีความสอดคล้องกับการทดสอบวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและสามารถสรุปได้ว่าดินขาวและเถ้าลอยช่วยปรับปรุงคุณลักษณะของเพสต์และเนื้อคอนกรีตให้ทึบแน่นขึ้น ทำให้คุณสมบัติด้านความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์และความต้านทานการเกิดสนิมในเหล็กเสริมดีขึ้น



ภาพที่ 33 การวัดระดับความลึกการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตด้วยการฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุ 91 วัน



ภาพที่ 34 การวัดระดับความลึกการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตด้วยการฉีดพ่นด้วยสารละลาย
ซิลเวอร์ไนเตรด ที่อายุ 140 วัน

ตารางที่ 20 ระยะซึมลึกเฉลี่ยของคลอไรด์จากการฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด
ที่อายุทดสอบ 91 และ 140 วัน

ประเภทส่วนผสม	ระดับความลึกเฉลี่ยของคลอไรด์ (ซ.ม.)	
	91 วัน	140 วัน
คอนกรีตควบคุม	> 7	> 7
MK:FA / 20:0	1.2	1.9
MK:FA / 15:5	1.1	1.8
MK:FA / 10:10	1.2	1.7
MK:FA / 5:15	1.3	2.1
MK:FA / 0:20	1.9	2.3

จากการประเมินความเสียหายของเหล็กเสริมหลังจากกดก้อนตัวอย่างทดสอบให้แตกออก แล้วแยกเหล็กเสริมออกจากคอนกรีตนำมาประเมินความเสียหายโดยเปรียบเทียบระดับความรุนแรงของการเกิดสนิมตามแนวทางการวิจัยก่อนหน้านี้ (สุวิมล และ ประเสริฐ, 2545) ดังแสดงในตารางที่ 21 ซึ่งจะแบ่งความเสียหายออกเป็น 5 ระดับ และผลการประเมินในการทดลองนี้สรุปได้ดังตารางที่ 22 พบว่าที่ระยะเวลาทดสอบ 91 วัน ระดับความเสียหายของเหล็กเสริมในคอนกรีตควบคุมอยู่ในช่วงเสียหายรุนแรงปานกลาง ถึง รุนแรงมาก โดยเหล็กเสริมจะถูกกัดกร่อนจากสนิมจนพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมหายไปประมาณร้อยละ 20-80 ในขณะที่ระดับความเสียหายของเหล็กเสริมในคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยจัดอยู่ในช่วงรุนแรงน้อยมาก หรือไม่ปรากฏโดยลักษณะผิวของเหล็กยังอยู่ในสภาพดีหรือปรากฏร่องรอยสนิมเพียงเล็กน้อย พื้นที่หน้าตัดเหล็กลดลงประมาณร้อยละ 0-5 สำหรับที่ระยะเวลาทดสอบ 140 วัน ระดับความความเสียหายของเหล็กเสริมในคอนกรีตควบคุมจะเพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับเสียหายรุนแรงมากที่สุด โดยเนื้อเหล็กจะเสียหายมากกว่าร้อยละ 80 ส่วนในคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยจะมีระดับความเสียหายเพิ่มขึ้นเป็นระดับ 4 ถึง 5 คือรุนแรงน้อยถึงรุนแรงน้อยมากหรือไม่ปรากฏความเสียหายเลย

ตารางที่ 21 การจำแนกระดับความรุนแรงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม
ที่มา : สุวิมล และ ประเสริฐ (2545)

ระดับ	ความรุนแรง	ลักษณะที่ปรากฏ	ลักษณะ
1	รุนแรงมากที่สุด	สนิมกัดกร่อนจนเนื้อเหล็ก หายไปมากกว่า 80%	
2	รุนแรงมาก	สนิมกัดกร่อนอย่างรุนแรง จนพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม หายไปประมาณ 40-80%	
3	รุนแรงปานกลาง	สนิมกัดกร่อนจน พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม หายไปประมาณ 20-40% หรือน้อยกว่า	
4	รุนแรงน้อย	ปรากฏร่องรอยของสนิม ชัด การกัดกร่อนอาจทำให้ พื้นที่หน้าตัดเหล็กลดลง ประมาณ 5-20%	
5	รุนแรงน้อยมาก หรือไม่ปรากฏ	ผิวเหล็กยังอยู่ในสภาพดี หรือปรากฏร่องรอยสนิม เพียงเล็กน้อย พื้นที่หน้าตัด เหล็กลดลงประมาณ 0-5%	

ตารางที่ 22 การจำแนกระดับความรุนแรงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่ระยะเวลาทดสอบ 91 และ 140 วัน

ประเภทส่วนผสม		ระยะเวลาทดสอบ (วัน) / ระดับความรุนแรง
คอนกรีตควบคุม	91 วัน	ความรุนแรงระดับ 2-3 
	140 วัน	ความรุนแรงระดับ 1 
MK:FA / 20:0	91 วัน	ความรุนแรงระดับ 5 
	140 วัน	ความรุนแรงระดับ 4-5 
MK:FA / 15:5	91 วัน	ความรุนแรงระดับ 5 
	140 วัน	ความรุนแรงระดับ 4-5 
MK:FA / 10:10	91 วัน	ความรุนแรงระดับ 5 
	140 วัน	ความรุนแรงระดับ 4-5 
MK:FA / 5:15	91 วัน	ความรุนแรงระดับ 5 
	140 วัน	ความรุนแรงระดับ 4-5 
MK:FA / 0:20	91 วัน	ความรุนแรงระดับ 5 
	140 วัน	ความรุนแรงระดับ 4-5 

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

คุณสมบัติของวัสดุ

1. ดินขาวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน และบดในช่วงเวลาที่เหมาะสมจะมีลักษณะอนุภาคที่ไม่แน่นอนส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นแผ่นมีรูปทรงแท่งและมีค่าความละเอียดสูงซึ่งโดยจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาและวิธีในการบด เมื่อทดสอบโดยวิธีวัดพื้นที่ผิวจำเพาะจะมีค่า 13,890 ตร.ซม./ก. (Rod Mill) และมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.51 และจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C168

2. เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคทรงกลมหลังจากผ่านการบดมีค่าความละเอียดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย วัดพื้นที่ผิวจำเพาะได้ 4,045 ตร.ซม./ก. (Rod Mill) และมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.64

3. ดินขาวและเถ้าลอยที่ผ่านการบดร่วมกันแต่ละอัตราส่วน จะมีค่าความละเอียดลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในส่วนผสม ส่วนค่าความถ่วงจำเพาะจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย

คุณสมบัติของมอร์ต้า

1. ดินขาวมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีผลทำให้มอร์ต้าผสมดินขาวมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ค่าการไหลเท่ากับมอร์ต้าควบคุม แต่สามารถลดความต้องการน้ำลงได้โดยเติมเถ้าลอยลงในส่วนผสม โดยผลกระทบของดินขาวและเถ้าลอยต่อค่าการไหลทั้งกรณีบดแยกและบดรวมไม่แตกต่างกันชัดเจน

2. จากการศึกษาหาค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยจากกรณีการบดรวมมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ต้าที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยจากกรณีการบดแยกโดยที่อายุทดสอบ 7 วัน มอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยกรณีการบดรวมมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมประมาณร้อยละ 8-14 ในขณะที่กรณีบดแยกมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมประมาณร้อยละ 18-26 และที่อายุทดสอบ 28 วัน มอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยกรณีการบดรวมมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมประมาณร้อยละ 26-37

และกรณีใบแคมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ต้าควมประมาณร้อยละ 15-42 และอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือ 10:10

คุณสมบัติของคอนกรีต

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวและเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 20 ในส่วนผสมทำให้ปริมาณอากาศในคอนกรีตลดลงโดยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของปริมาณอากาศที่ชัดเจน

2. ดินขาวมีผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ผสมดินขาวจะมีค่ายุบตัวลดลงและมีอัตราการสูญเสียสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่สามารถชดเชยความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตโดยการเติมเถ้าลอยลงในส่วนผสม

3. การใช้ดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตมีผลต่อการลดระยะเวลาการเกิดอุณหภูมิสูงสุดให้สั้นลง แต่การเติมเถ้าลอยในส่วนผสม มีผลต่อการยืดระยะเวลาการเกิดอุณหภูมิสูงสุดโดยมีค่าใกล้เคียงหรือนานกว่าคอนกรีตควบคุม

4. คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนผสมมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกอายุทดสอบหลังจาก 28 วัน โดยปริมาณดินขาวในส่วนผสม 15-20 เปอร์เซ็นต์ มีผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุ 1-7 วันแรกสูงกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่อปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสมเพิ่มขึ้นเป็น 15-20 เปอร์เซ็นต์ กำลังอัดในช่วงอายุ 1-28 วัน จะต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่ในช่วงอายุ 56-91 วันคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยจะพัฒนากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม

5. คอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ให้กำลังอัดสูงสุดที่อายุทดสอบ 91 วัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกอย่างต่อเนื่อง

6. กำลังคัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยมีผลในลักษณะเช่นเดียวกับกำลังอัดของคอนกรีต เมื่อใช้ดินขาวและเถ้าลอยผสมในคอนกรีตโดยมีดินขาวร้อยละ 15-20 มีผลดีต่อการพัฒนากำลังคัดในช่วงต้น 1-7 วัน เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15-20 ในส่วนผสม

มีผลให้กำลังคดในช่วงต้นลดลงแต่ในช่วงปลายกำลังคดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วน ดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 ให้ค่ากำลังคดสูงที่อายุทดสอบ 91 วัน

7. ดินขาวและเถ้าลอยช่วยเพิ่มความต้านทานการขีดสีให้กับคอนกรีตจากการปรับปรุง คุณสมบัติของเพสต์ ทำให้คอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยมีค่าความต้านทานการขีดสีสูงกว่า คอนกรีตควบคุม ซึ่งค่าความต้านทานการขีดสีเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดและอายุทดสอบเพิ่มขึ้น

8. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวและเถ้าลอยในคอนกรีตปริมาณร้อยละ 20 สามารถ ลดการซึมผ่านของคลอไรด์ลงได้อย่างชัดเจน ซึ่งระดับความซึมผ่านจัดอยู่ในระดับต่ำถึงต่ำมากตาม มาตรฐาน ASTM C1202 โดยคอนกรีตผสมดินขาวล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0) จะมี ระดับความซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยล้วน (อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20)

9. ดินขาวและเถ้าลอยช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านความต้านทานการเกิดสนิมในเหล็ก เสริมให้ดีขึ้น โดยเป็นผลมาจากการปรับปรุงความทึบแน่นของโครงสร้างจุลภาค ทำให้คอนกรีต ผสมของดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนมีระดับความต้านทานการกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกันเมื่อ พิจารณาจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะซึมลึกของคลอไรด์และระดับความรุนแรงในการเกิดสนิม ในเหล็กเสริมทั่วได้

หากพิจารณาในด้านการพัฒนากำลังอัดที่ต่อเนื่อง ความต้านทานการขีดสี ความต้านทาน การซึมผ่านของคลอไรด์ และความต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริม มีความเป็นไปได้ในการ ใช้คอนกรีตผสมดินขาวร่วมกับเถ้าลอยเพื่อเป็นวัสดุสำหรับงานซ่อมชนิดเทบาง ทั้งนี้ควรมี การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุในด้านอื่นๆเพิ่มเติม

ข้อเสนอแนะ

1. ความละเอียดของดินขาวและเถ้าลอยมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาพอซโซลานิก ดังนั้นควรเลือกอุปกรณ์และวิธีการบดวัสดุที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความละเอียดตามต้องการ

2. การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสำหรับการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตค่อนข้างมีความผันผวนของข้อมูลเนื่องจากปัจจัยจากสถานะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ดังนั้นเพื่อต้องการลดความผันผวนดังกล่าวควรใช้วิธีเก็บข้อมูลเป็นจำนวนมาก

3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุซ่อมในด้านอื่นๆ เช่น ความคงตัวของมิติ (Dimensional Stability) คาร์บอนเนชั่น (Carbonation) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties) และสถานะการใช้งาน (Application of Service Conditions) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของกระบวนการบดรวมและบดแยกของวัสดุทั้งสองชนิดโดยใช้เครื่องบดแบบ Ball Mill ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) และนำวัสดุดังกล่าวทำการทดสอบหาค่าความละเอียด กำลังอัดของมอร์ต้า แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของมอร์ต้า (Bond Strength) และการทดสอบ Ring Test ซึ่งการทดสอบได้แสดงในภาคผนวก ก

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรกฎ วิจิตรพงศ์. 2530. การใช้เถ้าลอยแม่เมาะในการปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ของ
คอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. 2543. ความคงทนของคอนกรีต. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. 2544. การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

จิรวัดน์ สุวรรณพฤษ. 2546. ผลของดินขาวต่อกำลังและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

เจริญวุฒิ ปัญญาสุรณกิจ. 2546. การปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าโดยใช้ดินขาวสำหรับงานซ่อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล., สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย., และ วราภรณ์ คุณาวานากิจ. 2542. คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและกายภาพของเถ้าลอย, น. 7-19 ใน เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ธีรราช ลีศิริติกุล และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2542 การประยุกต์ใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตกำลังสูง, น. 50-64 ใน เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ประจित จิรปภา. 2523. การศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์ของซีเถ้าลอยจากการเผาถ่านในเตาแม่เมาะในโรงไฟฟ้า, น. 195-205. ใน การประชุมวิชาการเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาชนบท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

ประจิต จิรปภา. 2526. **คอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ**, น. 4-114 – 4-159. ใน การการประชุม
วิชาการเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาชนบท. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อิศรชัย หอวิจิตร. 2528. **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าลอย
แม่เมาะ**. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

สุวิมล สัจจานิชย์ และ ประเสริฐ สุวรรณวิทยา. 2545. **โครงการวิจัยคุณสมบัติระยะยาวของ
คอนกรีตผสมเถ้าลอย**. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

มนตรี นิธิกุล. 2542. **ผลของขนาดเถ้าลอยแม่เมาะกับคุณสมบัติที่มีต่อการพัฒนากำลังอัดและความ
ทนทานของคอนกรีต**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

วรเดช สีดา. 2546. **การศึกษาความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง**.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ศุภกิจ นนทนนันท์ และ สิทธิพร หว่างเทียน. 2536. **การคัดเลือกเถ้าลอยลิกไนต์สำหรับงาน
คอนกรีต**, น. 7-1 – 7-14. ใน เอกสารการสัมมนาทางวิชาการเรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอย
ลิกไนต์มาใช้ประโยชน์. 27-28 เมษายน 2536. สำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ. การ
ไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, นนทบุรี

สมชัย กกกำแหง. 2542. **การใช้เถ้าลอยในงานก่อสร้างของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย**,
น. 65-79. ใน เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. วิศวกรรม
สถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

อนุพงศ์ สุวรรณ 2543 **การใช้ดินขาวเพื่อเพิ่มความต้านทานลฟตของมอร์ต้า**.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

American Concrete Institute. 1996. Concrete Repair Guide. ACI 546R-96.

ACI Manual of Concrete Practice, Farmington Hills, MI, 2004.

American Concrete Institute. 1996. Cement and Concrete Terminology. ACI 116R-00.

ACI Manual of Concrete Practice, Farmington Hills, MI, 2004.

Bai, S. Wild, B.B. Sabir and J.M. Kinuthia. 1999. Workability of Concrete Incorporating

Pulverized Fuel Ash and Metakaolin. **Mag. Concr. Res.** 51(3) : 207-216

Bai, S. Wild, B.B. Sabir and J.M. Kinuthia. 2000. Strength Development in Concrete

Incorporating PFA and Metakaolin. **Mag. Concr. Res.** 52(3) : 153-162

Bai, J. and S. Wild. 2002. Investigation of The Temperature Change and Heat Evolution of

Mortar Incorporating PFA and Metakaolin. **Mag. Concr. Res.** 24(2) : 201-209

Bai J., S. Wild and B.B. Sabir. 2003. Chloride Ingress and Strength Loss in Concrete with

Different PC-PFA-MK Binder Compositions Exposed to Synthetic Seawater.

Mag. Concr. Res. 33(3) : 353-362

Balaguru , P. 2001. Properties of Normal and High-Strength Concrete Containing Metakaolin, pp.

737-756. *In* V.M. Malthotra ed. **Fly Ash , Silica Fume , Slag&Natural Pozzolans in**

Cocrete, Proceeding Seventh CANMET/ACI Internationnal Conference. Bangkok

Batis, G. P. Pantazopoulou , S. Tsivilis and E. Badogiannis. 2005. The Effect of Metakaolin on

The Corrosion Behavior of Cement Mortar. **Mag. Concr. Res.** 27(1) :125-130

Cabrera, J. G. 1985. The Use of Pulverised Fuel Ash to Produce DurableConcrete. Proc.,pp 21–

37, **2nd CANMET/ACI Int. Conf.** on High-Performance Concrete and Performance and

Quality of Concrete Structures, American Concrete Institute, Detroit.

- Cabrera, J.G. and S.O. Nwaubani. 1998. The Microstructure and chloride Ion Diffusion Characteristic of Cement Containing Metakaolin and Fly Ash, pp. 385-400. *In* V.M. Malthotra ed. **Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings Sixth CANMET/ACI International Concrete conference.** Bangkok.
- Cengiz Duran Atis. 2002. High Volume Fly Ash Abrasion Resistant Concrete. **ASCE. Mat. in Civ.**14(3) : 274-277
- CUR. 1991. **Fly Ash as Addition to Concrete.** A.A. Balkema, Rotterdam. 99p.
- Curico, F.,B.A. De angelis and S. Pagliolico. 1998. Metakaolin as a Pozzolanic Microfiller for High-Performance Mortars. **Cem. Concr. Res.** 28(6) : 803-809
- Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation. 1999. Materials and Procedures for Rapid Repair of Partial-Depth Spalls in Concrete Pavements. FHWA Report No. FHWA-RD-99-152. **FHWA Manual of Practice.** Washington D.C.
- Gangying Li. 2003. A New Way to Increase the long-term Bond Strength of New-to-Old Concrete By The Use of Fly Ash. **Cem. Concr. Res.** 33(6) : 799-806
- Gjorv, O. E., Baerland, T., and Ronning, H. R 1990. Abrasion Resistance of High Strength Concrete Pavements. **Concr. Int.** 12(1): 45–48.
- Guojie Wang and Jianlan Zheng. 2005. The Influence of Cementitious Systems to Cracking Sensitivity of Self-Compacting Concrete, pp.457-464. **First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Compacting Concrete.** Changsha, Hunan, Chaina.

- Hadchti, K. M., and Carrasquillo, R. L. 1988. Abrasion Resistance and Scaling Resistance of Concrete Containing Fly Ash. **Research Rep.** 481–3, Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, Univ. of Texas at Austin, Austin, Tex.
- Hengsadeekul, T. 1995. **Use of Metakaolin from Lampang Province as a Pozzolan.** M.Eng. Thesis, Asian Inst. Technol.
- Helmuth, R. 1987. Fly ash in Cement and Concrete, p.654. *Cite by* A.M. Neville. 1995. **Properties Of Concrete.** 4th ed., Addison Wesley Longman Ltd., London. 844p.
- Hooton, R.D. and M.P. Titherington. 2004. Chloride Resistance of High-performance Concrete Subjected to Accelerate Curing. **Cem. Concr. Res.** 34 (9):1561-1567
- Jaturapitakkul, C., A. Siripanichgorn and k. Kiattikol. 1996. Effect of Superplasticizers and Fly Ash on Corrosion Resistance of Mortar. **Proceedings of The International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in The 21st Century.** Asian Inst. Technol. Bangkok.
- Justnes, H., Lennart Elfgrén and Vladimir Ronin. 2004. Mechanism for Performance of Energetically Modified Cement Versus Corresponding Blended Cement. **Cem. Concr. Res.** *Article in Press.*
- Kostuch, J.A., G.V. Walters and T.R. Jones. 1993. High-performance Concrete incorporating Metakaolin - A review, **Concrete 2000. University of Dundee.** 1799-1811
- Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. M. 1993. **Concrete structure, properties, and materials.** 2nd ed. Prentice-Hall, Englewood Cliff, N.J.
- Mindess, S and Young, J.F. 1981. **Concrete.** Prentice-Hall, Inc, New Jersey

- Moises Frias, and Joseph Cabrera. 2000. Pore Size Distribution and Degree of Hydration of Metakaolin Cement Pastes. **Cem. Concr. Res.** 30 (4): 561-569
- Moises Frias, M.I. Sanchez de Rojas. and J. Cabrera. 2000. The Effect that the Pozzolanic Reaction of Metakaolin has on The Heat Evolution in Metakaolin Cement mortar. **Cem. Concr. Res.** 30(2):209-216
- Moises Frias Rojas. and J. Cabrera. 2002. The Temperature on The Hydration Rate and Stability of The Hydration Phases of Metakaolin-Lime-Water systems. **Cem. Concr. Res.** 32(1): 133-138
- Murat M. 1983. I.Preliminary Investigation on Metakaolinite. **Cem. Concr. Res.** 13(2): 259-266
- Murat ,M. and C. Comel. 1983. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals III. Influence of calcination process of kaolinite on mechanical strengths of hardened metakaolinite. **Cem. Concr. Res.** 13(5): 631-637
- Naik, T. R., Singh, S. S., and Hossain, M. M. 1994. Abrasion Resistance of Concrete as Influenced By Inclusion of Fly Ash. **Cem. Concr. Res.** 24(2): 303–312.
- Neville, A.M. 1996. **Proprties of Concrete.** 4th ed. Addison Wesley Longman Ltd.,England.
- Oriol , M. and J. Pera. 1995. Pozolanic activity of metakaolin under microwave treatment. **Cem. Concr. Res.** 25(2) : 265-270
- Paya. J., J. Monzo, M.V. Borrachero and E. Peris-Mora. 1995. Mechanica Treatment of Fly Ashed. Part I: Physico-Chemical Characterization of Ground Fly Ashed. **Cem. Concr. Res.** 25(7) :1469-1479.

- Pera J., and J. Ambroise. 1998. Pozzolanic Properties of Metakaolin Obtained from Paper Sludge, pp. 1007-1020. *In* V.M. Malhotra ed. **Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary papers, Proceedings Sixth CANMET/ACI International Concrete conference.** Bangkok.
- Poon , C.S., L.Lam, S.C.Kou, Y.L. Wong and Ron Wong. 2001. Rate of Pozzolanic Reaction of Metakaolin in High-Performance Cement paste. **Cem. Concr. Res.** 31(9) : 1301-1306
- Rafat Siddique. 2003. Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the abrasion resistance of concrete. **Cem. Concr. Res.** 33(11) : 1877-1881
- Saad Morsy. M., S.A.Abo Ei-Enein and G.B.Hanna. 1997. Microstructure and Hydration Characteristic of Artificial pozzolana-Cement Paste Containing Burnt Kaolinite Clay. **Cem. Concr. Res.** 27(9) : 1307-1312
- Sabir, B.B. 1998. The Effect of Curing Temperature and Water/Binder Ratio on the strength of metakaolin Concrete, pp. 493-506 *In* V.M. Malhotra ed. **Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary papers, Proceedings Sixth CANMET/ACI International Concrete conference.** Bangkok.
- Sadeyzadeh, M., Page, C. L., and Kettle, R. J. 1987. Surface Microstructure and Abrasion Resistance of Concrete. **Cem. Concr. Res.** 17(4): 581–590
- Sayamipuk, S. 2000. **High Durability Mortar Containing Metakaolin.** AIT-Dissertation, Ph.D. Thesis, Asian Inst. Technol.
- Sayamipuk, S. 2000. **Development of Durability Mortar and Concrete Incorporating Metakaolin from Thailand.** Ph.D. Thesis, Asian Inst. Technol.

- Sayamipuk, S. and P. Nimityongskul. 2000. Strength and Durability of Mortars **Containing Metakaolin from Thailand**. Asian Inst. Technol.
- Thomas, M.D.A., M.H. Shehata, S.G. Shaahi prakash, D.S. Hopkins, K. Cail. 1999. Use Ternary Cementitious Systems Containing Silica Fume and Fly Ash in Concrete. **Cem. Concr. Res.** 29(8) : 1207-1214
- Troxell, G.E., H.E. Davis and J.W. Kelly. 1968. **Composition and Properties of Concrete**. 2nd ed. McGraw-Hill, Inc., Mexico.
- Tarun R. Naik, Shiw S. Singh and Mohammad M. Hossain. 1994. Abrasion resistance of Concrete as Influenced by Inclusion of Fly Ash. **Cem. Concr. Res.** 24(2) : 303-312
- Tarun R. Naik, Shiw S. Singh, and Bruce W. Ramme. 2002. Effect of Source of Fly Ash on Abrasion Resistance of Concrete. **ASCE. Mat. in Civ.** 14(5): 417-426
- Vu D.D. and Stroven P. 2002. Strength of Metakaolin and Rice Husk Ash Blended Mortar and Concrete, pp. 253-259. In: **Proceedings of The NOCMAT/3-Vietnam 3rd International Conference of Non-Conventional Materials and Technologies**. Vietnam.
- Wangjeeraphat. R. 2002. **Effect of Fly Ash on Chloride Ingress**. Kasetsart University Thailand. Master Thesis
- Wild, S. B.B. Sabir. And J.M. Khatib, 1995. Factors Influencing strength Development of Concrete Containing Silica Fume. **Cem. Concr. Res.** 25 (7):1567-1580
- Wild, S., J.M. Khatib and A. Jones. 1996. Relative Strength, Pozzolanic Activity and Cement Hydration in Superplasticised Metakaolin Concrete. **Cem. Concr. Res.** 26(10) : 1537-1544

Wild, S. and J.M. Khatib. 1997. Portlandite consumption in metakaolin cement paste and mortars.

Cem. Concr. Res. 27(1) : 137-146

Witte, L. P., and Backstrom, J. E. 1951. Some Properties Affecting The Abrasion Resistance of Air-trained Concrete. **ASTM Proceedings.** 51:1141–1155.

Zhang, M.H., and V.M. Malhotra. 1995. Characteristics of a Thermally Activated Alumino Silicate Pozzolan Material and its Use in Concrete **Cem. Concr. Res.** 25(8):1713-1725

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ก1 สัดส่วนผสมของมอร์ต้าและค่าการไหล

ประเภท ส่วนผสม	ลักษณะ การบด	W/B	OPC (g)	MK (g)	FA (g)	Sand (g)	Water (g)	Mean Dia. (cm)	Flow %
มอร์ต้าควบคุม	-	0.60	500	0	0	1375	300	21.0	110.0
MK:FA/20:0	-	0.70	400	100	0	1375	350	21.0	110.0
MK:FA/15:5	บดแยก	0.68	400	75	25	1375	340	20.5	105.0
	<u>บดรวม</u>		400			1375	340	20.5	105.0
MK:FA/10:10	บดแยก	0.65	400	50	50	1375	325	20.5	105.3
	<u>บดรวม</u>		400			1375	325	20.5	105.5
MK:FA/5:15	บดแยก	0.62	400	25	75	1375	310	20.5	105.0
	<u>บดรวม</u>		400			1375	310	20.5	105.0
MK:FA/0:20	-	0.58	400	0	100	1375	290	20.5	105.0

ตารางผนวกที่ ก2 กำลังอัดมอร์ต้ำส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 7 วัน

ประเภท ส่วนผสม	ลักษณะ การบด	ตัวอย่าง ที่	ขนาด (ซม.)		แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
			กว้าง	ยาว			
มอร์ต้ำ ควบคุม	-	1	5.12	5.12	6,000	229.2	204.3
		2	5.14	5.11	5,000	190.5	
		3	5.15	5.15	5,125	193.3	
MK:FA 20:0	-	1	5.14	5.14	5,875	222.0	240.1
		2	5.16	5.06	6,750	258.5	
		3	5.06	5.15	6,250	239.7	
MK:FA 15:5	บดแยก	1	5.07	5.21	6,375	241.0	241.9
		2	5.24	5.12	6,500	242.1	
		3	5.09	5.16	6,375	242.7	
	<u>บดรวม</u>	1	5.06	5.13	6,000	<u>231.4</u>	232.0
		2	5.03	5.15	5,875	<u>226.7</u>	
		3	5.12	5.14	6,250	<u>237.8</u>	
MK:FA 10:10	บดแยก	1	5.12	5.07	6,500	250.3	256.2
		2	5.18	5.12	7,125	268.5	
		3	5.13	5.07	6,500	249.8	
	<u>บดรวม</u>	1	5.15	5.07	6,000	<u>229.7</u>	221.0
		2	5.12	5.17	5,625	<u>212.6</u>	
		3	5.12	5.13	5,800	<u>220.6</u>	
MK:FA 5:15	บดแยก	1	5.09	5.18	6,500	246.8	243.9
		2	5.14	5.06	6,750	259.7	
		3	5.06	5.16	5,875	225.2	
	<u>บดรวม</u>	1	5.23	5.11	8,800	<u>329.4</u>	321.5
		2	5.22	5.09	8,350	<u>314.1</u>	
		3	5.16	5.14	8,500	<u>321.0</u>	
MK:FA/0:20	-	1	5.10	5.17	5,375	203.7	208.4
		2	5.16	5.09	5,625	214.2	
		3	5.16	5.14	5,500	207.3	

ตารางผนวกที่ ก3 กำลังอัดมอร์ต้ำส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 28 วัน

ประเภท ส่วนผสม	ลักษณะ การบด	ตัวอย่าง ที่	ขนาด (ซม.)		แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
			กว้าง	ยาว			
มอร์ต้ำ ควบคุม	-	1	5.12	5.11	6,250	239.1	239.2
		2	5.10	5.14	6,250	238.3	
		3	5.11	5.11	6,275	240.4	
MK:FA 20:0	-	1	5.12	5.06	8,125	313.7	305.2
		2	5.13	5.13	8,000	303.8	
		3	5.17	5.11	7,875	298.2	
MK:FA 15:5	บดแยก	1	5.12	5.11	8,125	310.8	333.7
		2	5.12	5.13	8,750	333.0	
		3	5.20	5.12	9,500	357.1	
	<u>บดรวม</u>	1	5.25	5.08	8,000	300.0	301.4
		2	5.13	5.08	7,875	302.2	
		3	5.19	5.07	7,950	302.1	
MK:FA 10:10	บดแยก	1	5.11	5.09	9,375	360.8	338.7
		2	5.15	5.11	8,375	318.1	
		3	5.18	5.08	8,875	337.4	
	<u>บดรวม</u>	1	5.22	5.07	8,000	302.2	327.5
		2	5.15	5.08	9,125	348.5	
		3	5.15	5.05	8,625	332.0	
MK:FA 5:15	บดแยก	1	5.12	5.10	8,800	336.9	333.1
		2	5.11	5.14	8,850	337.0	
		3	5.23	5.07	8,625	325.3	
	<u>บดรวม</u>	1	5.23	5.11	8,800	329.4	321.5
		2	5.22	5.09	8,350	314.1	
		3	5.16	5.14	8,500	321.0	
MK:FA/0:20	-	1	5.20	5.06	7,000	265.9	273.6
		2	5.18	5.05	7,375	282.0	
		3	5.18	5.09	7,200	273.0	

ตารางผนวกที่ ก4 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตควบคุม

เวลา (นาทีก)	ค่าการยุบตัว (เซนติเมตร)		
	คอนกรีตควบคุม		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	8.0	8.3	8.2
15	6.0	6.1	6.1
30	4.6	5.0	4.8
45	3.9	3.7	3.8
60	3.3	3.0	3.2
75	2.3	2.0	2.2
90	0.7	0.8	0.8
105	0.0	0.0	0.0
120	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก5 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย
อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0

เวลา (นาทีก)	ค่าการยุบตัว (เซนติเมตร)		
	ดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	8.0	8.1	8.1
15	5.0	5.2	5.1
30	4.5	4.0	4.3
45	2.8	2.5	2.7
60	2.2	1.8	2.0
75	0.8	0.7	0.8
90	0.0	0.0	0.0
105	-	-	-
120	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก6 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย
อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5

เวลา (นาที)	ค่าการยุบตัว (เซนติเมตร)		
	ดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	8.0	8.2	8.1
15	5.5	5.6	5.6
30	4.7	4.6	4.7
45	3.5	3.7	3.6
60	2.9	3.0	3.0
75	2.0	2.2	2.1
90	0.7	0.8	0.8
105	0.0	0.0	0.0
120	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก7 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย
อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10

เวลา (นาที)	ค่าการยุบตัว (เซนติเมตร)		
	ดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	8.0	8.5	8.3
15	6.3	6.6	6.5
30	5.7	5.8	5.8
45	5.5	5.3	5.4
60	4.5	4.7	4.6
75	3.0	3.2	3.1
90	1.5	2.0	1.8
105	0.7	0.8	0.8
120	0.0	0.0	0.0

ตารางผนวกที่ ก8 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย
อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15

เวลา (นาที)	ค่าการยุบตัว (เซนติเมตร)		
	ดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	8.0	8.4	8.2
15	6.5	6.8	6.7
30	6.0	6.0	6.0
45	5.0	4.9	5.0
60	4.0	3.8	3.9
75	3.0	3.0	3.0
90	2.0	2.0	2.0
105	0.8	0.9	0.9
120	0.0	0.0	0.0

ตารางผนวกที่ ก9 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย
อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20

เวลา (นาที)	ค่าการยุบตัว (เซนติเมตร)		
	ดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	8.0	8.7	8.4
15	6.7	7.0	6.9
30	6.0	6.2	6.1
45	5.2	5.3	5.3
60	4.3	4.0	4.2
75	3.5	3.1	3.3
90	2.7	2.5	2.6
105	1.0	1.1	1.1
120	0.0	0.0	0.0

ตารางผนวกที่ ก10 การพัฒนาอุณหภูมิของคอนกรีตส่วนผสมต่างๆ

อายุคอนกรีต (นาที)	อุณหภูมิ (C°)						
	ห้อง	คอนกรีต	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA
	อ้างอิง	ควบคุม	20:0	15:5	10:10	5:15	0:20
0	28.0	29.6	29.6	29.2	29.2	29.7	29.5
5	28.3	29.6	29.7	29.3	29.2	29.8	29.7
10	28.9	29.7	29.7	29.5	29.4	29.9	29.8
15	28.6	29.7	29.7	29.5	29.4	29.9	29.7
20	28.5	29.7	29.7	29.5	29.4	30.0	29.8
25	28.4	29.8	29.8	29.5	29.5	29.9	29.7
30	28.3	29.5	29.8	29.5	29.5	29.8	29.8
35	28.3	29.7	29.9	29.6	29.5	29.9	29.8
40	28.4	29.6	29.8	29.5	29.5	29.8	29.7
45	28.5	29.8	29.8	29.5	29.5	29.9	29.5
50	28.5	29.7	29.8	29.6	29.5	29.8	29.5
55	28.6	29.7	29.8	29.7	29.5	29.8	29.5
60	28.5	29.7	30.0	29.8	29.5	29.7	29.5
65	28.5	29.7	30.0	29.8	29.6	29.7	29.5
70	28.6	29.7	30.1	29.8	29.7	29.6	29.5
75	28.5	29.9	30.2	29.8	29.7	29.6	29.6
80	28.5	30.0	30.2	29.9	29.7	29.7	29.5
85	28.4	30.0	30.3	30.0	29.8	29.8	29.5
90	28.3	30.1	30.3	30.1	29.8	29.7	29.6
95	28.4	30.2	30.5	30.2	29.8	29.8	29.6
100	28.3	30.3	30.6	30.3	29.8	29.9	29.6
105	28.4	30.3	30.7	30.4	29.9	29.9	29.5
110	28.3	30.5	30.9	30.3	30.0	29.9	29.6
115	28.4	30.6	30.9	30.4	30.1	29.9	29.6
120	28.6	30.8	30.9	30.4	30.1	30.0	29.7
125	28.8	30.9	31.0	30.6	30.3	30.0	29.7
130	28.6	31.0	31.1	30.7	30.4	30.0	29.7
135	28.3	31.0	31.2	30.9	30.4	30.1	29.8
140	28.3	31.1	31.3	31.0	30.5	30.2	29.9

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ1)

อายุคอนกรีต (นาที)	อุณหภูมิ (C°)						
	ห้อง	คอนกรีต	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA
	อ้างอิง	ควบคุม	20:0	15:5	10:10	5:15	0:20
145	28.2	31.2	31.4	31.1	30.6	30.3	29.9
150	28.3	31.3	31.6	31.2	30.6	30.3	30.0
155	28.3	31.4	31.7	31.3	30.8	30.4	30.1
160	28.3	31.5	31.9	31.4	30.8	30.5	30.1
165	28.2	31.7	32.0	31.5	31.0	30.6	30.2
170	28.1	31.9	32.1	31.6	31.0	30.6	30.3
175	28.1	32.0	32.2	31.7	31.1	30.7	30.3
180	28.2	32.2	32.3	31.7	31.2	30.8	30.4
185	28.3	32.3	32.4	31.8	31.3	30.9	30.5
190	28.1	32.4	32.5	32.0	31.4	31.0	30.6
195	28.1	32.5	32.5	32.0	31.5	31.1	30.5
200	28.2	32.6	32.6	32.2	31.5	31.1	30.7
205	27.9	32.7	32.8	32.3	31.6	31.2	30.7
210	27.9	32.8	32.9	32.3	31.8	31.2	30.9
215	27.9	33.0	33.0	32.4	31.8	31.4	30.9
220	27.8	33.0	33.1	32.5	31.9	31.5	31.0
225	27.9	33.1	33.3	32.7	32.0	31.5	31.1
230	27.8	33.2	33.4	32.7	32.1	31.6	31.2
235	27.8	33.2	33.4	32.9	32.1	31.8	31.2
240	27.8	33.4	33.5	32.9	32.1	31.8	31.3
245	27.9	33.5	33.6	33.0	32.3	31.8	31.3
250	27.7	33.5	33.7	33.2	32.3	31.9	31.4
255	27.7	33.6	33.8	33.3	32.4	31.9	31.5
260	27.7	33.7	33.9	33.3	32.4	32.0	31.6
265	27.8	33.8	34.1	33.4	32.6	32.2	31.6
270	27.8	33.8	34.2	33.5	32.6	32.2	31.6
275	27.6	33.9	34.3	33.6	32.6	32.2	31.7
280	27.8	34.1	34.4	33.7	32.8	32.3	31.7

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ2)

อายุคอนกรีต (นาที)	อุณหภูมิ (C°)						
	ห้อง	คอนกรีต	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA
	อ้างอิง	ควบคุม	20:0	15:5	10:10	5:15	0:20
285	27.6	34.1	34.5	33.9	32.8	32.4	31.8
290	27.6	34.2	34.6	33.8	32.9	32.5	31.8
295	27.7	34.3	34.6	33.9	32.9	32.5	31.8
300	27.6	34.4	34.8	34.0	33.0	32.5	31.8
305	27.5	34.3	34.8	34.0	33.1	32.5	31.9
310	27.6	34.4	34.9	34.1	33.1	32.5	31.9
315	27.6	34.5	34.9	34.2	33.1	32.6	31.9
320	27.7	34.5	34.9	34.3	33.1	32.6	31.9
325	27.6	34.6	34.9	34.3	33.2	32.7	31.9
330	27.6	34.6	34.9	34.3	33.2	32.6	32.0
335	27.5	34.6	34.9	34.3	33.2	32.7	32.1
340	27.6	34.7	34.9	34.4	33.1	32.7	32.1
345	27.4	34.7	34.8	34.3	33.2	32.8	32.1
350	27.6	34.8	34.7	34.3	33.2	32.7	32.0
355	27.3	34.6	34.7	34.2	33.2	32.8	32.1
360	27.3	34.7	34.6	34.1	33.2	32.8	32.0
365	27.4	34.7	34.6	34.1	33.2	32.7	32.1
370	27.5	34.6	34.4	34.0	33.1	32.9	32.1
375	27.3	34.6	34.3	34.0	33.2	32.8	32.0
380	27.4	34.5	34.2	34.0	33.1	32.8	32.0
385	27.3	34.5	34.2	33.9	33.1	32.8	32.0
390	27.2	34.4	34.1	33.8	33.1	32.7	32.0
395	27.3	34.4	34.0	33.9	33.0	32.7	32.0
400	27.3	34.3	33.9	33.7	33.0	32.7	32.0
405	27.2	34.3	33.8	33.7	32.9	32.7	31.9
410	27.1	34.2	33.9	33.5	32.9	32.6	31.9
415	27.2	34.2	33.7	33.3	32.8	32.6	31.8
420	27.2	34.1	33.6	33.4	32.7	32.6	31.8

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ3)

อายุคอนกรีต (นาที)	อุณหภูมิ (C°)						
	ห้อง	คอนกรีต	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA
	อ้างอิง	ควบคุม	20:0	15:5	10:10	5:15	0:20
425	27.2	34.2	33.4	33.3	32.6	32.5	31.7
430	27.1	34.1	33.4	33.2	32.6	32.5	31.7
435	27.1	34.0	33.3	33.1	32.6	32.4	31.6
440	27.1	33.8	33.2	32.8	32.4	32.4	31.6
445	27.1	33.8	33.0	32.8	32.4	32.3	31.5
450	26.9	33.6	32.9	32.7	32.3	32.3	31.4
455	27.0	33.6	32.8	32.7	32.2	32.2	31.4
460	27.0	33.5	32.7	32.5	32.1	32.2	31.3
465	26.8	33.4	32.7	32.5	32.0	32.0	31.3
470	26.9	33.3	32.6	32.4	31.9	32.0	31.3
475	26.9	33.2	32.5	32.3	31.8	31.9	31.2
480	27.0	33.1	32.4	32.2	31.7	32.0	31.2
485	27.0	33.0	32.4	32.0	31.6	31.9	31.1
490	26.8	33.0	32.2	31.9	31.6	31.7	31.0
495	26.6	32.8	32.2	31.8	31.5	31.7	31.1
500	26.7	32.9	32.0	31.7	31.4	31.6	31.0
505	26.6	32.7	32.0	31.6	31.3	31.7	30.9
510	26.5	32.6	31.9	31.5	31.3	31.6	30.8
515	26.6	32.3	31.8	31.4	31.1	31.4	30.8
520	26.7	32.3	31.8	31.3	31.0	31.5	30.7
525	26.7	32.2	31.6	31.3	30.8	31.4	30.7
530	26.6	32.1	31.5	31.3	30.8	31.3	30.6
535	26.6	31.9	31.4	31.1	30.8	31.2	30.6
540	26.6	31.8	31.5	30.9	30.6	31.2	30.5
545	26.4	31.7	31.4	30.8	30.6	31.2	30.4
550	26.5	31.6	31.3	30.8	30.5	31.0	30.4
555	26.3	31.5	31.1	30.8	30.4	30.9	30.3
560	26.5	31.5	31.1	30.7	30.4	30.8	30.2

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ4)

อายุคอนกรีต (นาที)	อุณหภูมิ (C°)						
	ห้อง	คอนกรีต	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA
	อ้างอิง	ควบคุม	20:0	15:5	10:10	5:15	0:20
565	26.4	31.3	31.0	30.6	30.3	30.8	30.1
570	26.3	31.1	30.9	30.6	30.3	30.6	30.1
575	26.3	31.1	30.9	30.5	30.2	30.5	30.1
580	26.3	31.1	30.9	30.4	30.1	30.5	30.0
585	26.3	31.0	30.8	30.4	30.0	30.6	30.0
590	26.3	30.9	30.8	30.4	29.9	30.4	30.0
595	26.4	30.8	30.7	30.4	29.8	30.3	29.9
600	26.4	30.7	30.7	30.3	29.6	30.3	29.7
605	26.4	30.8	30.8	30.2	29.5	30.3	29.8
610	26.3	30.6	30.7	30.0	29.5	30.2	29.7
615	26.4	30.6	30.6	29.9	29.4	30.0	29.4
620	26.4	30.5	30.5	29.8	29.4	30.0	29.5
625	26.3	30.6	30.4	29.7	29.4	29.8	29.4
630	26.2	30.4	30.3	29.7	29.4	29.7	29.4
635	26.3	30.2	30.2	29.8	29.2	29.7	29.2
640	26.3	30.1	30.1	29.8	29.2	29.6	29.2
645	26.1	30.0	30.2	29.6	29.0	29.5	29.2
650	26.2	29.8	30.2	29.6	29.1	29.4	29.1
655	26.1	29.8	30.3	29.7	28.9	29.4	29.0
660	26.0	29.8	30.1	29.5	28.8	29.3	28.9
665	26.0	29.8	30.1	29.3	28.8	29.3	29.0
670	25.9	29.7	30.0	29.3	28.7	29.1	28.8
675	25.7	29.6	29.9	29.3	28.5	29.1	28.7
680	25.7	29.7	29.9	29.1	28.5	29.1	28.5
685	25.8	29.5	29.8	29.1	28.4	29.0	28.5
690	25.6	29.4	29.7	29.0	28.5	28.8	28.4
695	25.8	29.4	29.7	29.0	28.3	28.7	28.4
700	25.6	29.4	29.5	28.9	28.3	28.6	28.3

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ5)

อายุคอนกรีต (นาที)	อุณหภูมิ (C°)						
	ห้อง อ้างอิง	คอนกรีต ควบคุม	MK:FA 20:0	MK:FA 15:5	MK:FA 10:10	MK:FA 5:15	MK:FA 0:20
705	25.5	29.4	29.5	28.8	28.3	28.4	28.3
710	25.6	29.5	29.4	28.8	28.2	28.5	28.2
715	25.6	29.5	29.3	28.8	28.1	28.4	28.3
720	25.6	29.4	29.3	28.6	27.9	28.4	28.2
725	25.6	29.2	29.3	28.7	27.9	28.4	28.1
730	25.6	29.1	29.2	28.7	27.8	28.3	28.1
735	25.5	29.1	29.2	28.6	27.8	28.3	27.9
740	25.4	29.1	29.2	28.5	27.8	28.1	27.9
745	25.5	28.9	29.2	28.4	27.7	28.0	28.0
750	25.4	28.9	29.2	28.3	27.8	28.0	27.8
755	25.5	29.0	29.0	28.2	27.6	28.0	27.8
760	25.3	28.8	28.9	28.2	27.6	28.0	27.7
765	25.3	28.7	28.8	28.1	27.5	28.0	27.6
770	25.2	28.6	28.7	28.2	27.5	27.8	27.6
775	25.3	28.5	28.7	28.2	27.4	27.7	27.6
780	25.4	28.4	28.8	28.2	27.4	27.7	27.5
785	25.4	28.3	28.7	28.1	27.4	27.6	27.4
790	25.4	28.3	28.5	28.0	27.3	27.6	27.3
795	25.3	28.3	28.6	27.9	27.3	27.6	27.3
800	25.2	28.2	28.5	27.9	27.2	27.5	27.3
805	25.4	28.2	28.5	27.9	27.3	27.4	27.2
810	25.3	28.2	28.3	27.9	27.2	27.4	27.1
815	25.2	28.1	28.4	28.0	27.3	27.3	27.2
820	25.3	28.1	28.4	27.8	27.1	27.3	27.1
825	25.2	27.9	28.3	27.7	27.0	27.3	27.0
830	25.1	27.9	28.4	27.7	27.0	27.2	26.9
835	25.2	28.0	28.2	27.7	27.0	27.1	27.0
840	25.1	27.9	28.3	27.5	26.8	27.1	26.9

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ6)

อายุคอนกรีต (นาที)	อุณหภูมิ (C°)						
	ห้อง	คอนกรีต	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA
	อ้างอิง	ควบคุม	20:0	15:5	10:10	5:15	0:20
845	25.2	27.9	28.2	27.6	26.8	27.1	26.9
850	25.0	27.8	28.2	27.5	26.8	27.1	26.7
855	25.1	27.8	28.0	27.4	26.8	27.0	26.8
860	25.1	27.7	28.0	27.4	26.7	26.9	26.7
865	25.1	27.7	28.0	27.4	26.8	26.8	26.8
870	24.9	27.6	27.9	27.3	26.8	26.9	26.8
875	25.0	27.5	27.8	27.4	26.7	26.9	26.7
880	24.8	27.4	27.8	27.4	26.7	26.9	26.7
885	24.8	27.4	27.9	27.4	26.7	26.8	26.7
890	24.7	27.4	27.9	27.3	26.5	26.8	26.6
895	24.7	27.4	27.8	27.3	26.6	26.8	26.4
900	24.7	27.4	27.8	27.2	26.6	26.8	26.5
905	24.9	27.4	27.7	27.2	26.6	26.6	26.4
910	24.8	27.4	27.8	27.1	26.6	26.5	26.4
915	24.7	27.3	27.7	27.1	26.5	26.5	26.3
920	24.6	27.2	27.6	27.1	26.5	26.5	26.3
925	24.7	27.3	27.6	27.1	26.5	26.5	26.3
930	24.6	27.2	27.5	27.2	26.5	26.4	26.3
935	24.8	27.2	27.7	27.2	26.3	26.5	26.3
940	24.6	27.0	27.7	27.1	26.3	26.3	26.2
945	24.7	27.1	27.7	27.1	26.2	26.5	26.1
950	24.6	27.1	27.7	27.1	26.3	26.4	26.2
955	24.6	27.3	27.6	26.9	26.2	26.3	26.1
960	24.6	27.3	27.7	26.8	26.2	26.2	26.0
965	24.6	27.2	27.5	26.7	26.2	26.3	26.1
970	24.7	27.2	27.4	26.8	26.1	26.2	26.1
975	24.5	27.2	27.3	26.9	26.1	26.1	26.1
980	24.6	27.2	27.2	26.8	26.2	26.2	26.1

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ7)

อายุคอนกรีต (นาที)	อุณหภูมิ (C°)						
	ห้อง	คอนกรีต	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA
	อ้างอิง	ควบคุม	20:0	15:5	10:10	5:15	0:20
985	24.5	27.1	27.2	26.8	26.1	26.2	26.1
990	24.6	27.1	27.3	26.7	26.0	26.2	26.1
995	24.5	27.1	27.3	26.8	26.1	26.1	26.1
1000	24.7	27.0	27.2	26.8	26.0	26.2	26.1
1005	24.5	27.1	27.1	26.7	25.9	26.2	26.0
1010	24.6	27.0	27.2	26.7	26.1	26.2	26.1
1015	24.5	26.9	27.2	26.7	26.1	26.1	26.2
1020	24.6	27.0	27.1	26.7	26.1	26.1	26.1
1025	24.7	27.0	27.1	26.6	26.1	26.2	26.1
1030	24.8	27.0	27.1	26.7	26.1	26.3	26.1
1035	24.8	26.9	27.1	26.7	26.2	26.2	26.0
1040	25.0	27.0	27.1	26.7	26.0	26.2	26.1
1045	25.0	27.0	27.2	26.6	26.1	26.1	26.1
1050	25.1	27.0	27.2	26.7	26.0	26.1	26.2
1055	25.2	26.9	27.2	26.8	26.2	26.2	26.2
1060	25.3	27.0	27.2	26.6	26.1	26.3	26.2
1065	25.3	27.0	27.2	26.6	26.1	26.3	26.2
1070	25.4	27.0	27.1	26.6	26.2	26.2	26.3
1075	25.4	27.1	27.0	26.7	26.1	26.2	26.3
1080	25.6	27.0	27.0	26.8	26.1	26.3	26.3
1085	25.6	26.9	27.1	26.7	26.1	26.4	26.3
1090	25.6	26.9	27.2	26.7	26.3	26.3	26.3
1095	25.6	26.9	27.2	26.6	26.3	26.3	26.4
1100	25.7	26.9	27.1	26.6	26.2	26.4	26.3
1105	25.8	27.0	27.1	26.7	26.3	26.4	26.4
1110	25.8	27.0	27.0	26.9	26.4	26.5	26.4
1115	25.9	26.9	27.0	26.8	26.3	26.4	26.5
1120	25.8	26.8	27.0	26.8	26.3	26.4	26.6

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ8)

อายุคอนกรีต (นาที)	อุณหภูมิ (C°)						
	ห้อง	คอนกรีต	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA
	อ้างอิง	ควบคุม	20:0	15:5	10:10	5:15	0:20
1125	26.0	26.8	27.2	26.8	26.3	26.6	26.7
1130	26.0	26.8	27.1	26.8	26.5	26.6	26.7
1135	26.3	26.9	27.1	26.8	26.5	26.7	26.8
1140	26.3	27.0	27.1	26.8	26.6	26.7	26.8
1145	26.3	26.9	27.1	26.7	26.6	26.7	26.8
1150	26.3	26.9	27.1	26.8	26.6	26.7	26.9
1155	26.3	27.0	27.0	26.9	26.5	26.8	27.0
1160	26.3	26.9	27.1	26.9	26.7	26.8	27.1
1165	26.4	26.9	27.2	26.9	26.8	26.9	27.1
1170	26.5	26.9	27.2	26.9	26.9	26.9	27.2
1175	26.4	26.9	27.1	27.0	27.0	27.1	27.2
1180	26.6	27.0	27.2	27.0	26.8	27.1	27.2
1185	26.7	27.1	27.2	27.1	26.9	27.1	27.3
1190	26.7	27.1	27.2	27.1	27.0	27.1	27.3
1195	26.8	27.1	27.3	27.1	27.0	27.2	27.3
1200	27.0	27.1	27.4	27.1	27.2	27.2	27.3
1205	26.8	27.2	27.4	27.2	27.2	27.2	27.3
1210	26.9	27.3	27.4	27.2	27.3	27.2	27.3
1215	27.0	27.4	27.4	27.3	27.2	27.2	27.5
1220	27.1	27.3	27.5	27.2	27.2	27.2	27.8
1225	27.4	27.4	27.5	27.4	27.3	27.2	27.8
1230	27.2	27.4	27.5	27.4	27.3	27.5	27.8
1235	27.4	27.4	27.6	27.4	27.3	27.7	27.9
1240	27.4	27.5	27.6	27.3	27.3	27.7	27.9
1245	27.5	27.6	27.6	27.4	27.3	27.7	28.0
1250	27.6	27.6	27.6	27.4	27.3	27.7	28.0
1255	27.7	27.6	27.6	27.4	27.3	27.9	27.9
1260	28.0	27.6	27.6	27.4	27.6	27.8	28.0

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ9)

อายุคอนกรีต (นาที)	อุณหภูมิ (C°)						
	ห้อง	คอนกรีต	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA
	อ้างอิง	ควบคุม	20:0	15:5	10:10	5:15	0:20
1265	28.1	27.6	27.6	27.4	27.9	27.8	28.1
1270	28.2	27.6	27.6	27.4	27.9	27.8	28.2
1275	28.1	27.7	27.6	27.4	27.8	28.0	28.3
1280	28.1	27.7	27.6	27.5	27.9	28.0	28.3
1285	28.1	27.7	27.6	27.8	28.1	28.2	28.4
1290	28.1	27.7	27.6	27.9	28.0	28.2	28.4
1295	28.1	27.7	27.8	27.9	28.1	28.2	28.4
1300	28.1	27.7	28.0	27.9	28.0	28.3	28.5
1305	27.7	27.5	28.0	28.1	28.1	28.3	28.5
1310	27.8	27.8	28.0	28.1	28.3	28.4	28.5
1315	28.2	28.1	28.1	28.0	28.4	28.4	28.4
1320	28.2	28.1	28.3	27.9	28.5	28.4	28.4
1325	28.3	28.1	28.3	28.2	28.5	28.4	28.4
1330	28.3	28.2	28.1	28.3	28.5	28.4	28.5
1335	28.3	28.4	28.2	28.4	28.4	28.5	28.4
1340	28.4	28.4	28.3	28.5	28.5	28.5	28.5
1345	28.6	28.1	28.4	28.5	28.5	28.6	28.5
1350	28.5	28.3	28.6	28.5	28.4	28.5	28.5
1355	28.4	28.4	28.7	28.6	28.4	28.5	28.5
1360	28.3	28.6	28.7	28.7	28.4	28.5	28.6
1365	27.7	28.8	28.7	28.8	28.4	28.6	28.5
1370	27.5	28.8	28.8	28.6	28.5	28.5	28.5
1375	27.9	28.8	28.9	28.6	28.5	28.5	28.4
1380	28.2	28.8	28.9	28.6	28.5	28.5	28.5
1385	28.1	28.8	29.0	28.6	28.4	28.6	28.5
1390	28.3	29.0	28.9	28.6	28.5	28.5	28.5
1395	28.6	28.9	29.0	28.7	28.5	28.6	28.5
1400	28.6	28.9	29.0	28.7	28.5	28.5	28.5

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ10)

อายุคอนกรีต (นาที)	อุณหภูมิ (C°)						
	ห้อง	คอนกรีต	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA	MK:FA
	อ้างอิง	ควบคุม	20:0	15:5	10:10	5:15	0:20
1405	28.8	28.8	29.0	28.7	28.5	28.5	28.5
1410	28.8	28.9	29.0	28.7	28.6	28.6	28.6
1415	28.9	28.8	29.0	28.8	28.5	28.6	28.5
1420	28.8	28.8	28.9	28.8	28.5	28.6	28.5
1425	28.6	28.8	28.9	28.9	28.5	28.6	28.5
1430	28.6	28.8	28.9	28.9	28.6	28.6	28.6
1435	28.8	28.9	29.0	28.9	28.5	28.6	28.6
1440	28.8	28.9	29.0	28.9	28.6	28.6	28.6

ตารางผนวกที่ ก11 กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม.
สูง 15 ซม.

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาด (ซม.)		น้ำหนัก (กก.)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ม. ³)	แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		เส้นผ่าน ศูนย์กลาง	สูง					
1	1	15.15	29.80	12.710	2,366	37,168	206	206
	2	15.09	30.00	12.700	2,367	37,168	208	
	3	15.07	30.00	12.660	2,366	36,143	203	
7	1	15.15	29.95	12.850	2,380	76,121	422	400
	2	15.09	30.00	12.900	2,404	74,071	414	
	3	15.07	29.90	12.800	2,400	64,845	364	
28	1	15.20	30.40	13.200	2,393	64,845	357	448
	2	15.17	30.00	12.910	2,382	82,272	455	
	3	15.21	30.30	13.145	2,386	80,221	441	
56	1	15.22	30.30	13.200	2,396	87,397	481	488
	2	15.22	30.20	13.175	2,398	91,497	503	
	3	15.20	30.50	13.150	2,376	87,397	482	
91	1	15.20	30.20	13.167	2,404	98,673	544	531
	2	15.23	30.30	13.235	2,398	96,623	531	
	3	15.22	30.30	13.215	2,397	94,573	520	

ตารางผนวกที่ ก12 กำลังอัดของคอนกรีตควบคุม

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาด (ซม.)			น้ำหนัก	หน่วยน้ำหนัก	แรงกด	กำลังอัด	เฉลี่ย
		กว้าง	ยาว	สูง	(กก.)	(กก./ม. ³)	(กก.)	(กก./ซม. ²)	(กก./ซม. ²)
1	1	7.58	7.68	7.65	1.084	2,434	15,436	265	256
	2	7.67	7.59	7.66	1.076	2,414	14,001	241	
	3	7.64	7.69	7.69	1.064	2,359	13,181	225	
	4	7.65	7.57	7.59	1.072	2,438	16,666	288	
	5	7.70	7.65	7.61	1.080	2,411	15,333	260	
7	1	7.70	7.55	7.79	1.081	2,387	19,026	327	370
	2	7.82	7.53	7.61	1.070	2,388	22,099	376	
	3	7.66	7.52	7.64	1.051	2,388	21,074	366	
	4	7.63	7.57	7.69	1.051	2,366	23,021	399	
	5	7.66	7.55	7.79	1.070	2,367	22,201	384	
28	1	7.78	7.65	7.83	1.108	2,377	27,839	468	478
	2	7.66	7.69	7.70	1.086	2,393	29,377	499	
	3	7.68	7.73	7.62	1.073	2,371	27,942	470	
	4	7.63	7.78	7.69	1.084	2,374	27,839	469	
	5	7.64	7.70	7.66	1.080	2,392	28,557	485	
56	1	7.73	7.69	7.62	1.081	2,387	25,482	429	490
	2	7.48	7.61	7.86	1.059	2,371	27,122	477	
	3	7.55	7.67	7.61	1.044	2,368	29,992	518	
	4	7.46	7.61	7.74	1.059	2,411	28,659	505	
	5	7.60	7.65	7.66	1.066	2,395	30,197	520	
91	1	7.76	7.69	7.67	1.089	2,379	30,095	504	507
	2	7.73	7.76	7.67	1.094	2,378	28,967	483	
	3	7.58	7.62	7.67	1.058	2,388	28,557	494	
	4	7.62	7.71	7.69	1.075	2,379	30,300	516	
	5	7.70	7.60	7.69	1.077	2,393	31,325	535	

ตารางผนวกที่ ก13 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย

20:0

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาด (ซม.)			น้ำหนัก (กก.)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ม. ³)	แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		กว้าง	ยาว	สูง					
1	1	7.69	7.65	7.61	1.030	2,299	15,333	261	257
	2	7.66	7.79	7.52	1.034	2,304	15,026	252	
	3	7.67	7.76	7.60	1.041	2,301	14,206	239	
	4	7.62	7.73	7.70	1.033	2,277	14,001	238	
	5	7.65	7.78	7.65	1.040	2,290	17,691	297	
7	1	7.59	7.63	7.67	1.035	2,331	24,252	419	418
	2	7.54	7.60	7.84	1.049	2,336	23,636	413	
	3	7.56	7.65	7.69	1.039	2,337	24,764	428	
	4	7.70	7.67	7.79	1.075	2,339	23,739	402	
	5	7.65	7.62	7.66	1.050	2,356	24,867	427	
28	1	7.73	7.66	7.63	1.059	2,343	32,145	543	537
	2	7.64	7.70	7.67	1.073	2,378	32,042	545	
	3	7.66	7.70	7.71	1.073	2,360	32,657	554	
	4	7.70	7.67	7.66	1.053	2,331	31,837	539	
	5	7.66	7.79	7.69	1.070	2,332	30,197	506	
56	1	7.63	7.61	7.69	1.035	2,318	33,580	578	549
	2	7.57	7.59	7.75	1.048	2,356	33,887	590	
	3	7.67	7.65	7.62	1.054	2,355	31,017	528	
	4	7.55	7.71	7.77	1.053	2,328	30,300	520	
	5	7.61	7.69	7.63	1.057	2,368	31,017	530	
91	1	7.64	7.64	7.63	1.054	2,367	32,042	549	553
	2	7.65	7.70	7.69	1.052	2,322	33,067	561	
	3	7.59	7.67	7.70	1.044	2,329	32,760	563	
	4	7.60	7.65	7.66	1.038	2,331	31,735	546	
	5	7.68	7.66	7.75	1.080	2,369	32,042	545	

ตารางผนวกที่ ก14 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย

15:5

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาด (ซม.)			น้ำหนัก (กก.)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ม. ³)	แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		กว้าง	ยาว	สูง					
1	1	7.74	7.75	7.71	1.073	2,320	13,488	225	232
	2	7.71	7.53	7.62	1.028	2,326	14,616	252	
	3	7.74	7.64	7.68	1.064	2,343	13,898	235	
	4	7.77	7.67	7.68	1.054	2,305	12,361	208	
	5	7.58	7.64	7.60	1.028	2,336	14,001	242	
7	1	7.66	7.72	7.68	1.060	2,334	28,352	480	414
	2	7.67	7.69	7.69	1.070	2,361	23,842	404	
	3	7.74	7.81	7.50	1.066	2,352	20,356	337	
	4	7.57	7.61	7.68	1.039	2,349	28,147	489	
	5	7.63	7.62	7.70	1.058	2,364	20,971	361	
28	1	7.54	7.59	7.66	1.044	2,383	30,095	526	491
	2	7.63	7.70	7.70	1.069	2,365	28,659	488	
	3	7.60	7.73	7.52	1.059	2,396	29,582	503	
	4	7.58	7.68	7.80	1.075	2,369	26,712	459	
	5	7.59	7.55	7.80	1.056	2,363	27,532	481	
56	1	7.56	7.65	7.70	1.043	2,342	28,044	485	513
	2	7.68	7.68	7.70	1.078	2,373	33,477	568	
	3	7.67	7.60	7.76	1.067	2,360	28,557	490	
	4	7.71	7.70	7.79	1.103	2,384	30,402	512	
	5	7.79	7.64	7.70	1.074	2,345	30,402	511	
91	1	7.67	7.58	7.77	1.073	2,375	29,685	511	520
	2	7.65	7.62	7.75	1.063	2,353	32,555	558	
	3	7.67	7.78	7.68	1.092	2,383	22,816	382	
	4	7.66	7.66	7.72	1.078	2,380	30,915	527	
	5	7.68	7.72	7.77	1.085	2,355	28,762	485	

ตารางผนวกที่ ก15 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย

10:10

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาด (ซม.)			น้ำหนัก (กก.)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ม. ³)	แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		กว้าง	ยาว	สูง					
1	1	7.64	7.67	7.67	1.049	2,333	12,156	207	227
	2	7.69	7.62	7.68	1.045	2,324	12,976	222	
	3	7.63	7.79	7.65	1.059	2,333	14,616	246	
	4	7.75	7.75	7.67	1.059	2,299	14,206	236	
	5	7.70	7.54	7.66	1.050	2,353	12,976	224	
7	1	7.61	7.47	7.84	1.062	2,382	22,509	396	393
	2	7.64	7.58	7.68	1.054	2,367	24,072	415	
	3	7.60	7.69	7.78	1.076	2,368	32,657	559	
	4	7.66	7.60	7.67	1.063	2,380	22,611	388	
	5	7.61	7.66	7.65	1.060	2,369	21,791	374	
28	1	7.56	7.58	7.77	1.071	2,408	30,607	535	496
	2	7.65	7.75	7.64	1.072	2,366	26,302	444	
	3	7.64	7.73	7.68	1.074	2,370	27,429	465	
	4	7.59	7.69	7.75	1.066	2,358	32,042	549	
	5	7.65	7.67	7.69	1.060	2,346	28,659	488	
56	1	7.57	7.73	7.76	1.061	2,339	29,172	499	565
	2	7.72	7.62	7.77	1.076	2,356	40,038	681	
	3	7.65	7.66	7.74	1.082	2,387	35,425	605	
	4	7.66	7.80	7.56	1.073	2,375	34,092	571	
	5	7.70	7.71	7.64	1.067	2,352	27,942	471	
91	1	7.65	7.67	7.66	1.078	2,398	36,143	616	627
	2	7.73	7.65	7.80	1.111	2,409	36,553	618	
	3	7.68	7.76	7.66	1.092	2,392	37,168	624	
	4	7.68	7.66	7.69	1.074	2,374	36,348	618	
	5	7.59	7.64	7.67	1.060	2,383	38,193	659	

ตารางผนวกที่ ก16 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย

5:15

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาด (ซม.)			น้ำหนัก (กก.)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ม. ³)	แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		กว้าง	ยาว	สูง					
1	1	7.67	7.62	7.64	1.038	2,325	12,771	219	253
	2	7.66	7.75	7.79	1.090	2,359	14,411	243	
	3	7.69	7.57	7.68	1.051	2,352	15,846	272	
	4	7.69	7.70	7.70	1.076	2,358	14,411	243	
	5	7.66	7.55	7.77	1.050	2,339	16,666	288	
7	1	7.58	7.68	7.61	1.061	2,395	15,641	269	337
	2	7.62	7.63	7.77	1.078	2,387	22,099	380	
	3	7.61	7.66	7.72	1.066	2,369	18,921	325	
	4	7.64	7.68	7.62	1.069	2,391	21,996	375	
	5	7.66	7.63	7.55	1.070	2,419	19,741	338	
28	1	7.65	7.79	7.66	1.088	2,385	25,559	429	462
	2	7.66	7.66	7.71	1.085	2,398	15,846	270	
	3	7.59	7.72	7.68	1.082	2,406	31,145	532	
	4	7.59	7.70	7.64	1.067	2,388	25,789	441	
	5	7.67	7.73	7.62	1.070	2,370	26,507	447	
56	1	7.63	7.45	7.87	1.059	2,365	27,634	486	510
	2	7.62	7.66	7.74	1.071	2,373	28,557	490	
	3	7.62	7.67	7.68	1.084	2,417	29,992	513	
	4	7.64	7.58	7.78	1.079	2,396	29,787	514	
	5	7.67	7.69	7.78	1.090	2,374	32,145	545	
91	1	7.65	7.69	7.67	1.081	2,396	31,427	534	556
	2	7.71	7.68	7.72	1.081	2,365	32,042	541	
	3	7.72	7.74	7.61	1.097	2,412	22,816	382	
	4	7.65	7.63	7.76	1.073	2,369	36,450	624	
	5	7.69	7.71	7.62	1.071	2,371	31,120	525	

ตารางผนวกที่ ก17 กำลังอัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย
0:20

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาด (ซม.)			น้ำหนัก (กก.)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ม. ³)	แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		กว้าง	ยาว	สูง					
1	1	7.73	7.78	7.67	1.084	2,347	13,898	231	245
	2	7.66	7.81	7.71	1.084	2,350	16,871	282	
	3	7.70	7.68	7.70	1.073	2,357	17,486	296	
	4	7.57	7.72	7.68	1.064	2,370	12,258	210	
	5	7.64	7.69	7.70	1.060	2,342	12,156	207	
7	1	7.67	7.61	7.65	1.071	2,398	19,024	326	355
	2	7.57	7.65	7.62	1.066	2,418	21,791	377	
	3	7.64	7.69	7.65	1.070	2,383	19,946	340	
	4	7.49	7.64	7.67	1.060	2,415	21,074	368	
	5	7.65	7.69	7.73	1.084	2,385	21,484	365	
28	1	7.72	7.61	7.64	1.074	2,391	37,168	632	447
	2	7.72	7.73	7.65	1.098	2,406	27,942	468	
	3	7.69	7.68	7.81	1.090	2,359	27,532	466	
	4	7.61	7.64	7.77	1.077	2,384	23,431	403	
	5	7.58	7.72	7.63	1.074	2,403	26,302	449	
56	1	7.64	7.72	7.68	1.086	2,398	35,425	601	577
	2	7.61	7.83	7.50	1.068	2,388	34,297	575	
	3	7.48	7.78	7.66	1.067	2,395	30,095	517	
	4	7.68	7.72	7.69	1.101	2,415	35,630	601	
	5	7.66	7.67	7.67	1.086	2,413	34,707	591	
91	1	7.70	7.50	7.63	1.063	2,412	36,245	628	579
	2	7.60	7.66	7.69	1.080	2,412	31,120	535	
	3	7.68	7.51	7.68	1.058	2,388	37,475	650	
	4	7.68	7.62	7.60	1.076	2,419	34,605	591	
	5	7.61	7.64	7.80	1.092	2,408	28,454	489	

ตารางผนวกที่ ก18 กำลังดัขของคอนกรีตคววม

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาดคาน (ซม.)			แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		กว้าง	ลึก	ช่วงคาน			
1	1	6.37	6.728	19.50	605	40.9	40.2
	2	6.47	6.68	19.50	595	40.2	
	3	6.27	6.72	19.50	575	39.5	
7	1	6.45	6.76	19.50	685	45.3	46.8
	2	6.39	6.69	19.50	705	48.0	
	3	6.59	6.76	19.50	725	47.0	
28	1	6.41	6.53	19.50	765	54.5	52.0
	2	6.48	6.65	19.50	725	49.4	
	3	6.39	6.64	19.50	750	52.0	
56	1	6.46	6.63	19.50	810	55.6	55.7
	2	6.43	6.72	19.50	825	55.5	
	3	6.46	6.63	19.50	815	55.9	
91	1	6.37	6.55	19.50	840	59.9	58.4
	2	6.37	6.65	19.50	855	59.3	
	3	6.47	6.70	19.50	835	56.0	

ตารางผนวกที่ ก19 กำลังตัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาดคาน (ซม.)			แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		กว้าง	ลึก	ช่วงคาน			
1	1	6.41	6.66	19.50	620	42.6	
	2	6.37	6.73	19.50	655	44.3	43.6
	3	6.45	6.68	19.50	650	44.0	
7	1	6.39	6.50	19.50	775	56.0	
	2	6.42	6.64	19.50	785	54.0	53.0
	3	6.37	6.81	19.50	740	48.9	
28	1	6.33	6.75	19.50	865	58.5	
	2	6.39	6.67	19.50	855	58.7	59.7
	3	6.41	6.68	19.50	910	62.0	
56	1	6.28	6.68	19.50	860	59.9	
	2	6.28	6.67	19.50	870	60.7	60.0
	3	6.44	6.58	19.50	850	59.3	
91	1	6.32	6.63	19.50	905	63.5	
	2	6.34	6.69	19.50	920	63.1	62.1
	3	6.61	6.64	19.50	890	59.6	

ตารางผนวกที่ ก20 กำลังดัขของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย
15:5

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาดคาน (ซม.)			แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		กว้าง	ลึก	ช่วงคาน			
1	1	6.39	6.68	19.50	585	40.0	40.1
	2	6.39	6.60	19.50	570	39.9	
	3	6.42	6.56	19.50	570	40.3	
7	1	6.37	6.52	19.50	715	51.4	50.8
	2	6.52	6.59	19.50	715	49.2	
	3	6.41	6.56	19.50	730	51.6	
28	1	6.32	6.75	19.50	825	55.9	56.5
	2	6.35	6.60	19.50	815	57.4	
	3	6.35	6.69	19.50	820	56.3	
56	1	6.39	6.52	19.50	875	62.7	59.8
	2	6.52	6.64	19.50	900	61.1	
	3	6.48	6.68	19.50	825	55.7	
91	1	6.38	6.66	19.50	855	58.9	61.1
	2	6.19	6.51	19.50	875	65.1	
	3	6.43	6.65	19.50	865	59.4	

ตารางผนวกที่ ก21 กำลังดัขของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย
10:10

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาดคาน (ซม.)			แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		กว้าง	ลึก	ช่วงคาน			
1	1	6.37	6.61	19.50	585	41.0	
	2	6.37	6.63	19.50	535	37.3	38.5
	3	6.37	6.57	19.50	525	37.3	
7	1	6.42	6.63	19.50	625	43.2	
	2	6.39	6.48	19.50	665	48.3	47.5
	3	6.36	6.51	19.50	705	51.0	
28	1	6.32	6.60	19.50	850	60.1	
	2	6.40	6.64	19.50	800	55.3	57.1
	3	6.39	6.61	19.50	800	55.9	
56	1	6.50	6.50	19.50	865	61.4	
	2	6.44	6.68	19.50	860	58.4	60.4
	3	6.32	6.50	19.50	840	61.5	
91	1	6.50	6.54	19.50	925	64.9	
	2	6.65	6.55	19.50	910	62.2	63.7
	3	6.23	6.62	19.50	895	64.0	

ตารางผนวกที่ ก22 กำลังตัดของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย
5:15

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาดคาน (ซม.)			แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		กว้าง	ลึก	ช่วงคาน			
1	1	6.26	6.65	19.50	475	33.5	36.1
	2	6.49	6.43	19.50	500	36.4	
	3	6.43	6.58	19.50	550	38.5	
7	1	6.35	6.63	19.50	690	48.3	46.4
	2	6.40	6.62	19.50	650	45.2	
	3	6.36	6.65	19.50	660	45.7	
28	1	6.37	6.69	19.50	750	51.3	52.4
	2	6.42	6.62	19.50	760	52.8	
	3	6.40	6.58	19.50	755	53.1	
56	1	6.41	6.74	19.50	860	57.6	60.0
	2	6.28	6.58	19.50	865	62.1	
	3	6.36	6.60	19.50	855	60.2	
91	1	6.45	6.62	19.50	910	62.8	61.3
	2	6.48	6.62	19.50	835	57.3	
	3	6.40	6.61	19.50	915	63.8	

ตารางผนวกที่ ก23 กำลังดัขของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย
0:20

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	ขนาดคาน (ซม.)			แรงกด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)	เฉลี่ย (กก./ซม. ²)
		กว้าง	ลึก	ช่วงคาน			
1	1	6.40	6.61	19.50	485	33.8	
	2	6.37	6.51	19.50	500	36.1	34.8
	3	6.38	6.49	19.50	475	34.5	
7	1	6.42	6.56	19.50	615	43.4	
	2	6.33	6.66	19.50	575	40.0	42.6
	3	6.38	6.64	19.50	640	44.4	
28	1	6.41	6.52	19.50	715	51.3	
	2	6.44	6.45	19.50	705	51.3	51.8
	3	6.41	6.59	19.50	755	52.9	
56	1	6.38	6.54	19.50	860	61.4	
	2	6.34	6.60	19.50	845	59.6	60.9
	3	6.44	6.51	19.50	865	61.8	
91	1	6.44	6.57	19.50	830	58.3	
	2	6.29	6.51	19.50	875	64.0	62.1
	3	6.44	6.64	19.50	935	64.2	

ตารางผนวกที่ ก24 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตควบคุม

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	นน. ก่อน ทดสอบ (กรัม)	นน. หลัง ทดสอบ (กรัม)	นน. ที่หายไป (กรัม)	พ.ท.การ ขัดสี (ตร.ซม.)	นน./ พท.	ค่าเฉลี่ย (กรัม/ตร.ซม.)
28	1	2967.8	2963.4	4.4	52.33	0.0841	0.0776
	2	2788.1	2784.4	3.7	52.33	0.0707	
	3	2856.8	2853.0	3.8	52.33	0.0732	
	4	2776.5	2772.2	4.3	52.33	0.0823	
56	1	2622.1	2618.3	3.8	52.33	0.0726	0.0755
	2	2675.1	2671.0	4.1	52.33	0.0783	
	3	2767.9	2764.0	3.9	52.33	0.0750	
	4	2851.3	2847.3	4.0	52.33	0.0761	

ตารางผนวกที่ ก25 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย
อัตราส่วน 20:0

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	นน. ก่อน ทดสอบ (กรัม)	นน. หลัง ทดสอบ (กรัม)	นน. ที่หายไป (กรัม)	พ.ท.การ ขัดสี (ตร.ซม.)	นน./ พท.	ค่าเฉลี่ย (กรัม/ตร.ซม.)
28	1	2559.8	2556.9	2.9	52.33	0.0554	0.0511
	2	2653.3	2650.8	2.5	52.33	0.0478	
	3	2739.1	2736.4	2.7	52.33	0.0516	
	4	2551.6	2549.0	2.6	52.33	0.0495	
56	1	2447.7	2446.1	1.6	52.33	0.0306	0.0344
	2	2565.1	2563.2	1.9	52.33	0.0363	
	3	2639.2	2637.2	2.0	52.33	0.0382	
	4	2731.3	2729.6	1.7	52.33	0.0325	

ตารางผนวกที่ ก26 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย
อัตราส่วน 15:5

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	นน. ก่อน ทดสอบ (กรัม)	นน. หลัง ทดสอบ (กรัม)	นน. ที่หายไป (กรัม)	พ.ท.การ ขัดสี (ตร.ซม.)	นน./ พท.	ค่าเฉลี่ย (กรัม/ตร.ซม.)
28	1	2665.6	2662.8	2.8	52.33	0.0535	0.0516
	2	2454.2	2451.5	2.7	52.33	0.0516	
	3	2554.4	2551.8	2.6	52.33	0.0497	
	4	2638.4	2635.7	2.7	52.33	0.0516	
56	1	2610.8	2608.5	2.3	52.33	0.0440	0.0405
	2	2655.0	2653.1	1.9	52.33	0.0363	
	3	2463.7	2461.6	2.1	52.33	0.0397	
	4	2748.1	2745.9	2.2	52.33	0.0420	

ตารางผนวกที่ ก27 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย
อัตราส่วน 10:10

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	นน. ก่อน ทดสอบ (กรัม)	นน. หลัง ทดสอบ (กรัม)	นน. ที่หายไป (กรัม)	พ.ท.การ ขัดสี (ตร.ซม.)	นน./ พท.	ค่าเฉลี่ย (กรัม/ตร.ซม.)
28	1	2557.3	2554.4	2.9	52.33	0.0554	0.0551
	2	2642.8	2640.0	2.8	52.33	0.0531	
	3	2545.6	2542.7	2.9	52.33	0.0553	
	4	2493.2	2490.2	3.0	52.33	0.0564	
56	1	2625.5	2623.2	2.3	52.33	0.0440	0.0463
	2	2679.1	2676.7	2.4	52.33	0.0459	
	3	2521.7	2519.4	2.3	52.33	0.0440	
	4	2763.2	2760.5	2.7	52.33	0.0514	

ตารางผนวกที่ ก28 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย
อัตราส่วน 5:15

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	นน. ก่อน ทดสอบ (กรัม)	นน. หลัง ทดสอบ (กรัม)	นน. ที่หายไป (กรัม)	พ.ท.การ ขัดสี (ตร.ซม.)	นน./ พท.	ค่าเฉลี่ย (กรัม/ตร.ซม.)
28	1	2621.5	2618.6	2.9	52.33	0.0554	0.0556
	2	2687.1	2684.3	2.8	52.33	0.0535	
	3	2583.2	2580.3	2.9	52.33	0.0563	
	4	2681.6	2678.6	3.0	52.33	0.0573	
56	1	2536.8	2534.5	2.3	52.33	0.0447	0.0450
	2	2447.3	2445.1	2.2	52.33	0.0419	
	3	2672.7	2670.3	2.4	52.33	0.0453	
	4	2550.3	2547.8	2.5	52.33	0.0481	

ตารางผนวกที่ ก29 ความต้านทานการขัดสีผิวด้านบนของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอย
อัตราส่วน 0:20

อายุ (วัน)	ตัวอย่าง	นน. ก่อน ทดสอบ (กรัม)	นน. หลัง ทดสอบ (กรัม)	นน. ที่หายไป (กรัม)	พ.ท.การ ขัดสี (ตร.ซม.)	นน./ พท.	ค่าเฉลี่ย (กรัม/ตร.ซม.)
28	1	2793.1	2790.4	2.7	52.33	0.0516	0.0541
	2	2662.7	2659.8	2.9	52.33	0.0554	
	3	2573.2	2570.3	2.9	52.33	0.0558	
	4	2498.6	2495.8	2.8	52.33	0.0538	
56	1	2695.1	2693.3	1.8	52.33	0.0344	0.0362
	2	2689.6	2687.7	1.9	52.33	0.0363	
	3	2545.8	2543.8	2.0	52.33	0.0386	
	4	2762.1	2760.2	1.9	52.33	0.0356	

ตารางผนวกที่ ก30 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.			10 ซม.			15 ซม.			
0	1	-147	-147	-143	-143	-147	-150	-151	-148	-145	-122.85
	2	-100	-102	-101	-105	-109	-105	-103	-100	-104	
	3	-120	-115	-119	-115	-116	-119	-120	-118	-125	
3	1	-231	-223	-235	-206	-215	-221	-221	-208	-219	-192.52
	2	-168	-191	-191	-159	-177	-172	-151	-178	-179	
	3	-191	-202	-188	-173	-170	-187	-170	-187	-185	
8	1	-430	-445	-425	-437	-429	-431	-410	-425	-399	-394.52
	2	-373	-378	-369	-372	-359	-375	-360	-371	-369	
	3	-388	-400	-389	-389	-392	-395	-372	-389	-381	
11	1	-420	-435	-447	-427	-430	-449	-450	-445	-451	-428.19
	2	-405	-415	-420	-410	-397	-416	-380	-425	-420	
	3	-440	-440	-445	-431	-435	-442	-432	-425	-429	
13	1	-475	-482	-480	-444	-475	-475	-476	-479	-480	-444.89
	2	-426	-420	-427	-421	-435	-430	-441	-439	-447	
	3	-420	-436	-415	-421	-435	-430	-424	-441	-438	
16	1	-478	-447	-450	-466	-449	-476	-473	-450	-455	-454.70
	2	-446	-455	-441	-450	-451	-453	-456	-458	-455	
	3	-450	-440	-452	-468	-442	-456	-461	-450	-449	
20	1	-502	-505	-526	-498	-519	-493	-509	-490	-500	-462.48
	2	-450	-450	-453	-430	-446	-439	-454	-453	-445	
	3	-430	-440	-430	-450	-440	-433	-437	-431	-434	
24	1	-500	-513	-515	-507	-504	-508	-520	-503	-514	-478.33
	2	-460	-471	-479	-475	-450	-465	-470	-461	-466	
	3	-458	-496	-460	-465	-464	-463	-428	-460	-440	
33	1	-485	-483	-476	-498	-503	-505	-522	-516	-520	-420.96
	2	-387	-393	-387	-370	-371	-375	-362	-370	-376	
	3	-391	-420	-390	-381	-400	-376	-383	-384	-342	

ตารางผนวกที่ ก30 (ต่อ1)

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.			10 ซม.			15 ซม.			
38	1	-597	-623	-591	-580	-590	-580	-585	-580	-592	-513.26
	2	-455	-453	-459	-444	-450	-457	-469	-467	-455	
	3	-538	-500	-524	-498	-475	-488	-489	-446	-473	
42	1	-628	-610	-580	-580	-586	-570	-619	-602	-565	-461.33
	2	-444	-372	-381	-450	-371	-404	-393	-398	-407	
	3	-374	-428	-435	-367	-346	-430	-366	-359	-391	
48	1	-485	-543	-532	-440	-494	-510	-444	-495	-525	-477.11
	2	-444	-496	-410	-409	-459	-460	-455	-480	-494	
	3	-501	-498	-504	-501	-478	-445	-501	-449	-430	
55	1	-664	-673	-665	-660	-634	-648	-635	-665	-627	-600.81
	2	-577	-582	-630	-580	-534	-575	-597	-591	-573	
	3	-605	-583	-619	-553	-548	-560	-555	-580	-509	
61	1	-653	-665	-698	-630	-630	-670	-658	-632	-665	-638.59
	2	-684	-690	-688	-650	-610	-632	-650	-620	-620	
	3	-616	-634	-610	-594	-618	-585	-597	-620	-623	
68	1	-657	-670	-660	-650	-647	-670	-638	-623	-650	-683.04
	2	-755	-730	-718	-715	-718	-726	-705	-699	-694	
	3	-688	-728	-685	-654	-697	-681	-630	-668	-686	
75	1	-634	-577	-571	-553	-640	-596	-550	-560	-547	-647.37
	2	-713	-705	-695	-695	-708	-690	-690	-669	-707	
	3	-665	-702	-680	-670	-650	-667	-665	-635	-645	
83	1	-590	-569	-539	-491	-479	-510	-500	-485	-510	-581.26
	2	-602	-604	-604	-624	-588	-591	-606	-620	-569	
	3	-690	-635	-644	-621	-600	-607	-608	-595	-613	
91	1	-564	-530	-535	-453	-486	-463	-457	-447	-465	-544.30
	2	-536	-538	-567	-594	-548	-577	-549	-529	-570	
	3	-591	-595	-622	-573	-587	-590	-555	-585	-590	
96	1	-585	-545	-594	-485	-475	-481	-489	-486	-472	-547.00
	2	ตัวอย่างทดสอบกคแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-590	-569	-569	-595	-583	-560	-578	-595	-595	

ตารางผนวกที่ ก30 (ต่อ2)

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซ.ม.			10 ซ.ม.			15 ซ.ม.			
102	1	-525	-517	-520	-561	-569	-563	-559	-568	-565	-552.33
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-565	-552	-564	-545	-573	-578	-507	-563	-548	
110	1	-583	-555	-605	-580	-522	-568	-552	-542	-562	-559.89
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-561	-576	-578	-525	-572	-535	-575	-555	-532	
116	1	-521	-532	-557	-570	-560	-553	-551	-545	-514	-558.22
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-598	-585	-622	-590	-522	-556	-575	-541	-556	
123	1	-546	-551	-545	-552	-561	-533	-542	-565	-574	-551.72
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-580	-549	-549	-567	-530	-547	-555	-526	-559	
130	1	-529	-575	-562	-548	-502	-523	-522	-505	-538	-526.89
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-530	-496	-532	-535	-476	-530	-546	-500	-535	
140	1	-528	-556	-560	-549	-561	-536	-570	-517	-538	-534.14
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-520	-530	-527	-517	-513	-537	-516	-517	-523	

ตารางผนวกที่ ก31 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน
ดินขาวต่อเถ้าลอย 20:0

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.ม.			10 ซม.ม.			15 ซม.ม.			
0	1	-114	-110	-112	-106	-109	-113	-109	-114	-115	-108.70
	2	-100	-102	-110	-105	-111	-106	-106	-102	-104	
	3	-109	-110	-116	-109	-108	-109	-110	-109	-107	
3	1	-125	-127	-126	-119	-131	-124	-121	-127	-123	-119.41
	2	-115	-112	-114	-125	-113	-118	-118	-114	-117	
	3	-118	-113	-120	-117	-120	-117	-116	-119	-115	
8	1	-164	-149	-160	-152	-140	-155	-153	-155	-160	-165.04
	2	-170	-175	-173	-172	-178	-169	-168	-168	-171	
	3	-164	-163	-167	-175	-170	-174	-164	-168	-179	
11	1	-196	-198	-198	-190	-190	-192	-205	-195	-197	-192.00
	2	-195	-200	-198	-198	-196	-195	-198	-205	-202	
	3	-180	-182	-191	-180	-177	-185	-185	-176	-180	
13	1	-221	-217	-220	-220	-220	-219	-215	-230	-225	-212.59
	2	-205	-224	-210	-206	-209	-211	-219	-205	-216	
	3	-204	-206	-209	-201	-206	-200	-211	-205	-206	
16	1	-229	-241	-235	-238	-240	-230	-230	-227	-235	-227.19
	2	-237	-231	-235	-235	-220	-229	-235	-220	-242	
	3	-212	-210	-210	-222	-220	-219	-220	-215	-217	
20	1	-200	-210	-215	-195	-206	-217	-191	-204	-210	-207.63
	2	-204	-224	-215	-215	-221	-215	-213	-225	-208	
	3	-210	-191	-204	-191	-199	-204	-196	-211	-212	
24	1	-220	-225	-200	-215	-220	-215	-231	-215	-210	-219.33
	2	-219	-229	-220	-220	-234	-227	-238	-235	-241	
	3	-225	-205	-208	-210	-200	-211	-210	-220	-219	
33	1	-205	-210	-210	-209	-212	-213	-207	-217	-220	-209.41
	2	-230	-231	-221	-228	-229	-242	-240	-238	-233	
	3	-203	-213	-209	-200	-204	-210	-220	-200		

ตารางผนวกที่ ก31 (ต่อ1)

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.			10 ซม.			15 ซม.			
38	1	-220	-220	-221	-209	-225	-223	-208	-221	-230	-218.04
	2	-242	-245	-238	-230	-248	-236	-238	-240	-242	
	3	-226	-214	-186	-192	-174	-200	-197	-151	-211	
42	1	-199	-193	-195	-189	-190	-195	-199	-190	-210	-203.48
	2	-213	-201	-233	-207	-209	-220	-211	-201	-210	
	3	-204	-200	-202	-207	-193	-200	-214	-209	-200	
48	1	-232	-228	-219	-230	-216	-214	-231	-230	-206	-227.93
	2	-220	-209	-250	-230	-224	-236	-229	-234	-236	
	3	-224	-250	-230	-215	-240	-226	-230	-225	-240	
55	1	-232	-237	-245	-235	-255	-239	-242	-240	-249	-248.41
	2	-256	-258	-257	-263	-261	-248	-253	-245	-260	
	3	-255	-268	-250	-250	-239	-246	-257	-247	-220	
61	1	-225	-246	-236	-235	-228	-244	-240	-234	-237	-241.52
	2	-250	-241	-247	-244	-236	-230	-240	-239	-260	
	3	-243	-246	-249	-247	-245	-237	-244	-250	-248	
68	1	-249	-264	-260	-224	-237	-249	-253	-242	-240	-258.44
	2	-273	-311	-284	-234	-284	-293	-222	-269	-277	
	3	-278	-294	-272	-260	-247	-252	-244	-246	-220	
75	1	-278	-271	-270	-232	-248	-243	-239	-243	-255	-253.70
	2	-244	-267	-276	-249	-262	-247	-254	-266	-249	
	3	-281	-280	-266	-236	-263	-236	-233	-242	-220	
83	1	-233	-224	-241	-222	-231	-220	-246	-237	-201	-217.37
	2	-274	-254	-267	-220	-240	-224	-247	-228	-242	
	3	-253	-253	238	-213	-231	-227	-218	-231	-230	
91	1	-238	-240	-269	-268	-247	-242	-263	-253	-275	-262.96
	2	-279	-287	-300	-261	-263	-263	-264	-258	-279	
	3	-278	-272	-282	-252	-247	-242	-258	-262	-258	
96	1	-230	-214	-262	-228	-219	-218	-237	-242	-226	-230.67
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครั้งที่อายุ 91 วัน									
	3	-236	-233	-230	-238	-212	-207	-243	-230	-247	

ตารางผนวกที่ ก31 (ต่อ2)

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.			10 ซม.			15 ซม.			
102	1	-222	-213	-212	-213	-220	-203	-210	-216	-221	-217.56
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-230	-235	-217	-216	-219	-203	-221	-225	-220	
110	1	-220	-230	-221	-213	-215	-217	-219	-219	-232	-219.89
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-232	-237	-224	-221	-204	-195	-224	-215	-220	
116	1	-255	-210	-267	-230	-202	-194	-212	-231	-205	-227.33
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-292	-268	-260	-215	-219	-192	-223	-228	-189	
123	1	-244	-232	-230	-202	-201	-200	-201	-206	-204	-214.11
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-236	-233	-246	-216	-211	-200	-200	-202	-190	
130	1	-222	-224	-252	-210	-207	-215	-211	-210	-223	-221.83
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-232	-239	-226	-217	-212	-240	-221	-215	-217	
140	1	-204	-226	-206	-205	-205	-205	-207	-215	-216	-218.22
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-227	-243	-232	-214	-228	-212	-210	-237	-236	

ตารางผนวกที่ ก32 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน
ดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.ม.			10 ซม.ม.			15 ซม.ม.			
0	1	-210	-199	-201	-212	-212	-202	-220	-205	-209	-179.15
	2	-165	-166	-177	-163	-176	-176	-152	-165	-163	
	3	-156	-164	-166	-159	-170	-167	-165	-155	-162	
3	1	-220	-218	-219	-221	-216	-223	-212	-227	-220	-189.59
	2	-176	-185	-173	-181	-176	-180	-169	-171	-187	
	3	-170	-164	-172	-168	-173	-180	-177	-174	-167	
8	1	-271	-255	-262	-269	-240	-258	-263	-242	-253	-193.63
	2	-181	-183	-187	-180	-162	-175	-182	-158	-171	
	3	-153	-141	-157	-149	-145	-150	-146	-148	-147	
11	1	-235	-245	-240	-230	-263	-241	-231	-233	-237	-210.63
	2	-240	-238	-238	-234	-232	-235	-241	-238	-239	
	3	-157	-155	-160	-157	-152	-155	-154	-145	-162	
13	1	-241	-260	-256	-223	-256	-246	-236	-261	-240	-226.48
	2	-247	-251	-250	-254	-247	-246	-248	-249	-245	
	3	-167	-195	-187	-162	-178	-180	-183	-208	-199	
16	1	-242	-250	-247	-239	-246	-265	-241	-249	-244	-226.00
	2	-245	-231	-234	-248	-229	-237	-241	-239	-235	
	3	-201	-187	-190	-189	-195	-189	-196	-200	-193	
20	1	-244	-249	-256	-260	-242	-257	-250	-241	-248	-227.67
	2	-225	-227	-213	-220	-226	-217	-212	-217	-214	
	3	-204	-210	-214	-220	-217	-220	-215	-209	-220	
24	1	-269	-240	-257	-250	-255	-260	-247	-240	-261	-234.22
	2	-232	-223	-215	-230	-227	-214	-215	-235	-215	
	3	-222	-221	-225	-220	-225	-229	-224	-243	-230	
33	1	-230	-241	-258	-228	-226	-261	-236	-230	-241	-226.04
	2	-213	-230	-224	-214	-202	-222	-221	-211	-220	
	3	-229	-225	-215	-223	-220	-222	-217	-220	-224	

ตารางผนวกที่ ก32 (ต่อ1)

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.			10 ซม.			15 ซม.			
38	1	-264	-242	-261	-240	-253	-273	-243	-258	-250	-237.15
	2	-224	-228	-233	-212	-230	-230	-232	-220	-235	
	3	-227	-223	-223	-245	-237	-227	-225	-230	-238	
42	1	-245	-230	-221	-232	-242	-225	-224	-235	-220	-216.37
	2	-212	-220	-204	-205	-200	-209	-195	-214	-204	
	3	-217	-218	-205	-220	-206	-213	-215	-203	-208	
48	1	-235	-244	-250	-222	-220	-235	-225	-266	-264	-230.63
	2	-250	-240	-235	-223	-237	-235	-229	-242	-234	
	3	-223	-202	-231	-208	-207	-221	-209	-219	-221	
55	1	-239	-272	-278	-235	-265	-269	-240	-272	-260	-250.30
	2	-247	-245	-246	-261	-244	-234	-244	-242	-249	
	3	-246	-236	-250	-259	-254	-240	-255	-233	-243	
61	1	-269	-285	-263	-265	-284	-257	-251	-257	-247	-245.96
	2	-241	-253	-234	-222	-213	-230	-223	-213	-226	
	3	-238	-255	-254	-238	-244	-247	-246	-251	-235	
68	1	-286	-310	-293	-274	-287	-290	-247	-267	-280	-267.00
	2	-255	-272	-273	-225	-252	-255	-220	-255	-241	
	3	-278	-282	-287	-249	-274	-266	-259	-262	-270	
75	1	-305	-319	-270	-267	-301	-257	-264	-271	-249	-258.78
	2	-252	-242	-249	-232	-208	-240	-220	-222	-216	
	3	-306	-277	-268	-282	-254	-251	-265	-258	-242	
83	1	-293	-292	-274	-270	-273	-250	-261	-266	-253	-244.67
	2	-254	-255	-229	-230	-210	-205	-215	-212	-206	
	3	-252	-258	-252	-242	-238	-225	-218	-233	-240	
91	1	-339	-284	-311	-306	-257	-297	-290	-248	-287	-268.56
	2	-272	-276	-259	-242	-253	-226	-252	-240	-199	
	3	-274	-292	-274	-258	-256	-258	-271	-272	-258	
96	1	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครั้งที่อายุ 91 วัน									-222.94
	2	-230	-240	-229	-193	-202	-202	-173	-201	-201	
	3	-260	-225	-250	-252	-203	-231	-264	-226	-231	

ตารางผนวกที่ ก32 (ต่อ2)

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.			10 ซม.			15 ซม.			
102	1	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									-225.06
	2	-216	-211	-240	-207	-197	-205	-198	-202	-212	
	3	-247	-255	-257	-234	-244	-227	-226	-246	-227	
110	1	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									-229.61
	2	-220	-224	-222	-213	-187	-207	-205	-185	-201	
	3	-249	-250	-250	-253	-250	-250	-251	-263	-253	
116	1	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									-219.11
	2	-236	-225	-217	-178	-189	-186	-164	-193	-179	
	3	-268	-282	-261	-217	-233	-225	-242	-212	-237	
123	1	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									-215.06
	2	-212	-224	-221	-183	-190	-195	-180	-180	-181	
	3	-247	-246	-249	-216	-234	-246	-216	-225	-226	
130	1	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									-223.50
	2	-215	-213	-224	-205	-209	-211	-229	-203	-218	
	3	-222	-234	-204	-342	-217	-218	-221	-227	-211	
140	1	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									-226.67
	2	-216	-213	-218	-204	-210	-205	-206	-200	-200	
	3	-244	-256	-243	-244	-247	-243	-239	-252	-240	

ตารางผนวกที่ ก33 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน
ดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.ม.			10 ซม.ม.			15 ซม.ม.			
0	1	-140	-145	-151	-130	-135	-139	-142	-147	-150	-157.04
	2	-136	-148	-147	-144	-136	-151	-144	-135	-152	
	3	-179	-180	-183	-185	-189	-178	-188	-196	-190	
3	1	-162	-160	-163	-171	-172	-159	-168	-163	-154	-171.59
	2	-151	-152	-155	-156	-147	-153	-149	-146	-150	
	3	-199	-200	-201	-198	-192	-205	-203	-194	-210	
8	1	-186	-194	-190	-188	-187	-191	-184	-180	-183	-204.41
	2	-181	-170	-176	-170	-171	-179	-155	-158	-169	
	3	-230	-276	-250	-255	-250	-263	-250	-264	-269	
11	1	-200	-204	-203	-190	-200	-201	-197	-192	-195	-219.56
	2	-225	-229	-224	-206	-210	-210	-209	-203	-215	
	3	-265	-236	-240	-248	-235	-239	-257	-245	-250	
13	1	-219	-198	-205	-220	-200	-211	-219	-205	-201	-234.81
	2	-248	-235	-244	-235	-230	-233	-238	-232	-241	
	3	-262	-260	-257	-251	-248	-259	-255	-269	-265	
16	1	-230	-226	-232	-239	-229	-224	-220	-233	-234	-234.74
	2	-231	-223	-229	-231	-233	-237	-223	-232	-227	
	3	-251	-247	-242	-257	-243	-239	-241	-245	-240	
20	1	-225	-220	-196	-230	-210	-194	-205	-200	-210	-225.63
	2	-222	-235	-229	-205	-222	-216	-204	-221	-217	
	3	-275	-258	-230	-260	-245	-230	-250	-245	-238	
24	1	-200	-233	-200	-226	-230	-200	-217	-216	-201	-225.26
	2	-223	-232	-226	-205	-229	-205	-218	-220	-218	
	3	-265	-230	-224	-251	-231	-244	-252	-231	-255	
33	1	-200	-225	-205	-202	-215	-201	-207	-200	-200	-219.04
	2	-217	-219	-220	-217	-218	-220	-208	-201	-200	
	3	-238	-262	-234	-228	-231	-225	-246	-234	-241	

ตารางผนวกที่ ก34 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน
ดินขาวต่อเถ้าลอย 5:15

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.			10 ซม.			15 ซม.			
0	1	-214	-216	-220	-214	-219	-217	-214	-215	-217	-229.15
	2	-263	-269	-271	-265	-266	-250	-268	-265	-264	
	3	-200	-210	-202	-208	-205	-207	-206	-210	-212	
3	1	-212	-224	-225	-220	-215	-218	-213	-210	-224	-230.70
	2	-281	-273	-280	-269	-271	-268	-270	-265	-277	
	3	-207	-204	-201	-200	-198	-201	-197	-202	-204	
8	1	-222	-231	-229	-226	-225	-219	-228	-235	-230	-237.85
	2	-299	-295	-290	-295	-290	-289	-285	-280	-289	
	3	-192	-204	-205	-199	-191	-195	-187	-196	-196	
11	1	-260	-255	-257	-260	-262	-268	-259	-264	-255	-277.67
	2	-326	-335	-321	-315	-314	-351	-334	-333	-320	
	3	-243	-234	-244	-260	-243	-245	-250	-242	-247	
13	1	-272	-271	-275	-268	-272	-270	-275	-273	-269	-287.63
	2	-321	-333	-326	-323	-329	-330	-332	-330	-328	
	3	-264	-260	-270	-260	-266	-258	-265	-269	-257	
16	1	-277	-275	-281	-274	-263	-265	-280	-272	-266	-275.48
	2	-306	-317	-302	-301	-311	-306	-286	-316	-320	
	3	-249	-249	-252	-245	-255	-239	-250	-247	-234	
20	1	-283	-280	-282	-280	-264	-260	-285	-270	-260	-265.56
	2	-290	-301	-279	-279	-304	-283	-240	-302	-299	
	3	-234	-239	-240	-230	-245	-240	-236	-235	-230	
24	1	-283	-285	-280	-296	-254	-280	-290	-261	-280	-271.48
	2	-313	-310	-286	-310	-301	-385	-300	-305	-295	
	3	-213	-220	-220	-222	-239	-241	-220	-220	-221	
33	1	-249	-275	-250	-241	-268	-233	-243	-260	-240	-244.15
	2	-263	-250	-265	-230	-250	-280	-238	-260	-287	
	3	-225	-230	-212	-235	-223	-216	-230	-216	-223	

ตารางผนวกที่ ก35 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าตัวอย่างคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน
ดินขาวต่อเถ้าลอย 0:20

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.			10 ซม.			15 ซม.			
0	1	-190	-188	-173	-177	-186	-183	-193	-191	-191	-179.26
	2	-180	-175	-189	-189	-200	-201	-203	-200	-205	
	3	-155	-157	-160	-165	-160	-162	-157	-158	-152	
3	1	-213	-212	-202	-201	-199	-202	-203	-199	-202	-193.33
	2	-217	-211	-213	-215	-220	-223	-220	-227	-225	
	3	-163	-150	-154	-162	-160	-154	-159	-163	-156	
8	1	-235	-236	-230	-225	-212	-220	-213	-207	-217	-209.37
	2	-246	-251	-250	-241	-239	-245	-236	-254	-250	
	3	-170	-171	-148	-158	-159	-153	-161	-167	-159	
11	1	-300	-294	-290	-288	-280	-284	-295	-285	-290	-269.81
	2	-325	-330	-316	-320	-325	-310	-315	-318	-317	
	3	-210	-200	-206	-200	-195	-190	-198	-201	-203	
13	1	-300	-295	-299	-289	-275	-288	-290	-304	-297	-274.33
	2	-341	-332	-336	-329	-309	-340	-316	-326	-331	
	3	-216	-206	-200	-205	-198	-195	-200	-201	-189	
16	1	-309	-308	-311	-319	-327	-300	-329	-311	-320	-285.37
	2	-333	-320	-324	-319	-320	-325	-335	-340	-328	
	3	-218	-210	-216	-216	-211	-209	-215	-212	-220	
20	1	-271	-273	-262	-275	-260	-254	-270	-265	-256	-247.56
	2	-297	-298	-291	-280	-282	-285	-287	-280	-285	
	3	-189	-205	-186	-182	-195	-181	-190	-199	-186	
24	1	-270	-282	-275	-248	-287	-273	-250	-259	-279	-250.07
	2	-298	-296	-281	-290	-291	-283	-285	-290	-281	
	3	-184	-202	-190	-195	-197	-184	-195	-200	-187	
33	1	-265	-260	-250	-255	-255	-252	-256	-240	-248	-237.07
	2	-278	-273	-276	-273	-275	-280	-260	-250	-267	
	3	-168	-197	-195	-185	-185	-190	-190	-180	-198	

ตารางผนวกที่ ก35 (ต่อ1)

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.			10 ซม.			15 ซม.			
38	1	-270	-271	-270	-260	-252	-260	-266	-247	-271	-240.37
	2	-270	-287	-298	-263	-288	-275	-252	-264	-277	
	3	-187	-184	-200	-178	-164	-178	-189	-180	-189	
42	1	-244	-232	-240	-240	-233	-241	-249	-250	-246	-220.78
	2	-252	-250	-265	-240	-232	-260	-247	-230	-239	
	3	-183	-175	-174	-181	-171	-183	-170	-160	-174	
48	1	-255	-256	-240	-250	-244	-257	-248	-260	-240	-236.26
	2	-265	-280	-272	-260	-250	-274	-255	-240	-277	
	3	-181	-209	-198	-190	-195	-200	-185	-191	-207	
55	1	-262	-254	-265	-263	-246	-239	-245	-245	-260	-237.85
	2	-277	-280	-265	-284	-270	-216	-288	-270	-282	
	3	-175	-205	-201	-180	-190	-185	-186	-192	-197	
61	1	-259	-250	-235	-250	-230	-238	-265	-235	-260	-231.67
	2	-265	-273	-260	-265	-245	-255	-271	-260	-260	
	3	-196	-210	-200	-170	-179	-180	-186	-172	-186	
68	1	-263	-245	-255	-245	-233	-228	-252	-239	-230	-245.78
	2	-296	-280	-280	-282	-260	-274	-280	-270	-277	
	3	-232	-217	-240	-194	-219	-215	-191	-218	-221	
75	1	-285	-259	-307	-241	-217	-249	-244	-221	-234	-239.78
	2	-295	-286	-276	-247	-256	-232	-229	-248	-243	
	3	-215	-228	-226	-220	-211	-205	-197	-200	-203	
83	1	-254	-262	-240	-224	-263	-213	-225	-264	-225	-235.04
	2	-263	-274	-271	-241	-257	-262	-233	-259	-245	
	3	-212	-231	-218	-214	-213	-190	-193	-196	-204	
91	1	-302	-305	-280	-300	-289	-268	-250	-289	-275	-277.48
	2	-289	-305	-297	-262	-291	-294	-281	-243	-308	
	3	-253	-273	-256	-274	-266	-240	-276	-264	-262	
96	1	-253	-243	-248	-251	-236	-257	-258	-259	-259	-245.94
	2	ตัวอย่างทดสอบกบแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-262	-241	-257	-244	-233	-212	-262	-223	-229	

ตารางผนวกที่ ก35 (ต่อ2)

ระยะ เวลา	ตัวอย่าง ที่	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวิธี Half-cell Potential (mV) / Dist. From top									เฉลี่ย
		5 ซม.			10 ซม.			15 ซม.			
102	1	-262	-281	-284	-269	-268	-258	-273	-275	-271	-242.06
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-230	-221	-214	-207	-212	-203	-211	-205	-213	
110	1	-260	-278	-271	-236	-253	-253	-241	-253	-260	-239.11
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-257	-228	-223	-215	-208	-214	-220	-224	-210	
116	1	-283	-241	-268	-250	-240	-238	-244	-226	-230	-235.00
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-245	-275	-240	-200	-219	-197	-204	-215	-215	
123	1	-279	-272	-268	-270	-258	-265	-264	-264	-258	-242.67
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-230	-224	-226	-215	-214	-216	-209	-214	-222	
130	1	-264	-250	-263	-268	-251	-263	-263	-267	-250	-244.83
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-214	-225	-241	-231	-222	-237	-241	-233	-224	
140	1	-285	-283	-285	-263	-283	-280	-282	-284	-280	-248.22
	2	ตัวอย่างทดสอบกดแบ่งครึ่งที่อายุ 91 วัน									
	3	-223	-218	-220	-217	-211	-213	-216	-213	-212	

ตารางผนวกที่ ก36 ผลการทดลองการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธี Rapid Chloride Permeability Test ของตัวอย่างคอนกรีตส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 28 วัน

เวลา (นาทึ)	ปริมาณประจุไฟฟ้า (คูลอมปี)											
	คอนกรีต		MK:FA		MK:FA		MK:FA		MK:FA		MK:FA	
	ควบคุม		20:0		15:5		10:10		5:15		0:20	
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	241	241	42	42	63	61	71	70	84	84	119	119
60	484	483	95	98	125	123	143	141	168	169	239	240
90	727	728	144	148	188	185	215	212	253	253	370	360
120	971	973	193	198	251	248	286	284	337	338	489	482
150	1214	1216	242	247	314	311	357	356	408	419	599	583
180	1457	1460	291	296	377	373	428	427	506	508	742	726
210	1700	1703	339	345	439	434	499	497	591	593	861	847
240	1943	1946	388	394	500	496	570	568	674	678	979	968
270	2186	2190	436	443	559	557	641	638	759	763	1100	1089
300	2429	2432	485	491	620	619	711	709	843	848	1221	1209
330	2672	2675	529	535	682	680	782	779	927	934	1339	1331
360	2914	2918	582	589	745	741	853	849	1011	1020	1456	1450
เฉลี่ย	2916		585		743		851		1015		1453	

ตารางผนวกที่ ก37 ผลการทดลองการซึมผ่านของคลอไรด์โดยวิธี Rapid Chloride Permeability Test ของตัวอย่างคอนกรีตส่วนผสมต่างๆที่อายุทดสอบ 56 วัน

เวลา (นาทึ)	ปริมาณประจุไฟฟ้า (คูลอมปี)											
	คอนกรีต		MK:FA		MK:FA		MK:FA		MK:FA		MK:FA	
	ควบคุม		20:0		15:5		10:10		5:15		0:20	
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	214	214	39	38	54	51	53	52	60	59	76	72
60	429	432	79	77	107	102	107	105	121	118	147	144
90	646	648	118	116	161	154	161	158	181	178	224	216
120	866	864	157	156	215	207	214	212	242	237	294	288
150	1086	1079	195	195	269	258	269	266	292	297	366	360
180	1303	1294	234	235	323	311	324	319	363	356	437	431
210	1521	1509	272	275	376	362	380	372	423	415	505	503
240	1739	1723	310	314	428	414	434	425	484	474	578	575
270	1957	1938	349	354	478	465	489	478	545	535	654	646
300	2175	2152	386	393	530	516	544	531	605	594	722	717
330	2392	2366	424	432	583	566	599	582	665	654	790	788
360	2610	2582	463	472	637	616	655	634	727	712	859	859
เฉลี่ย	2596		467		626		644		720		859	

ภาคผนวก ข
วิธีการทดสอบและเครื่องมือทดสอบ



ภาพผนวกที่ ข1 เตาเผาไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



ภาพผนวกที่ ข2 เครื่องบดวัสดุแบบ Ball Mill



ภาพผนวกที่ ข3 เครื่อง Los Angeles และ Rods สำหรับบดวัสดุ



ภาพผนวกที่ ข4 การบ่มตัวอย่างทดสอบชนิดต่างๆ



ภาพผนวกที่ ข5 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าและกำลังค้ำของคอนกรีต



ภาพผนวกที่ ข6 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต



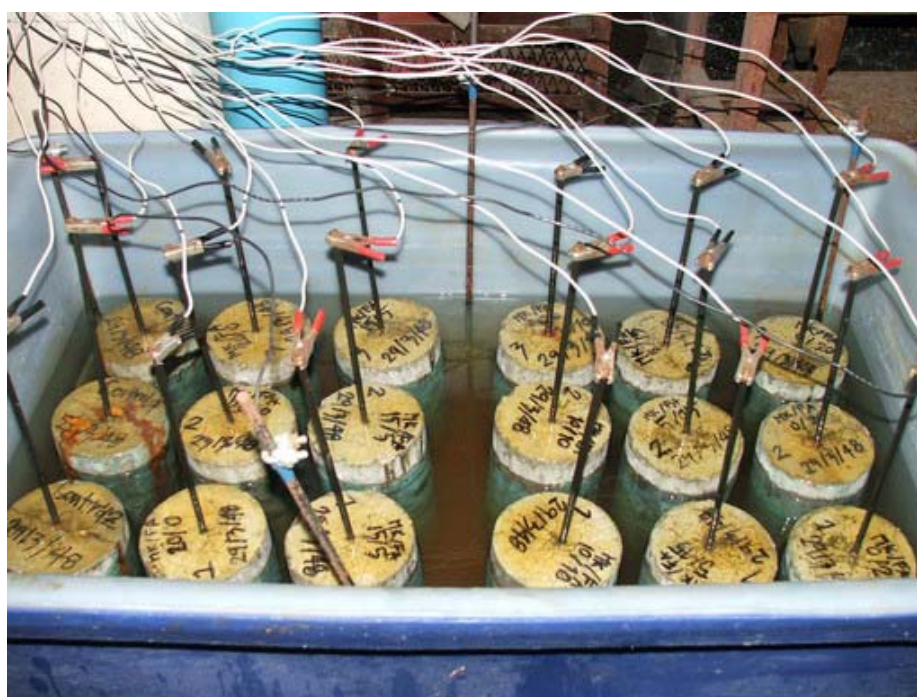
ภาพผนวกที่ ข7 ชุดอุปกรณ์การทดสอบความซึมผ่านของคลอไรด์ Rapid Chloride Permeability



ภาพผนวกที่ ข8 เครื่องมือทดสอบการอัดสี่เหลี่ยมเท่ามาตรฐาน ASTM C944-90a



ภาพผนวกที่ ข9 ชุดอุปกรณ์เร่งการเกิดสนิมด้วยไฟฟ้า



ภาพผนวกที่ ข10 การเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยไฟฟ้า



Pop-Outs



Scaling



Spalling



Corner Crack



Transverse Crack



Longitudinal Crack

ภาพผนวกที่ ข11 ความเสียหายของแผ่นพื้นคอนกรีตในลักษณะต่างๆ

ที่มา: Pavement Surface Evaluation and Rating

ภาคผนวก ค
การทดลองส่วนเพิ่มเติม

การเตรียมวัสดุ

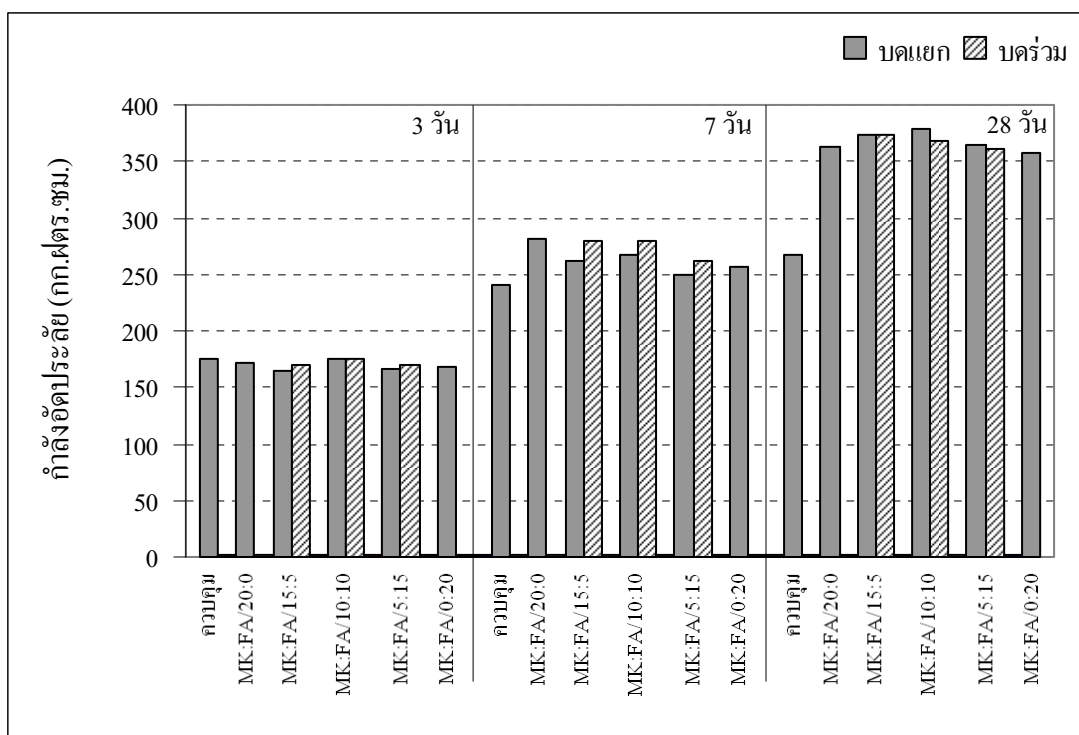
จากการบดวัสดุด้วยเครื่อง Ball Mill ในระดับเครื่องบดในห้องปฏิบัติการซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด พบว่าการบดดินขาวล้วนสามารถบดจนได้ค่าความละเอียดตามเป้าหมายได้ง่าย (10,000-11,000 ตร.ซม./ก.) โดยพิจารณาจากรอบของการบด แต่เมื่อมีเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในส่วนผสม การบดให้ได้ค่าความละเอียดตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ทำได้ยากขึ้น และเมื่อบดเฉพาะเถ้าลอยล้วนพบว่าไม่สามารถบดให้ได้ค่าความละเอียดตามเป้าหมายได้เลย แม้ว่าจะเพิ่มจำนวนรอบของการบดแล้วก็ตาม ดังนั้นการทดลองในส่วนเพิ่มเติมจึงเลือกใช้วัสดุแต่ละส่วนผสมที่มีค่าความละเอียดใกล้เคียงกัน (ค่าความละเอียดในช่วง 8,900-11,000 ตร.ซม./ก.) ส่วนเถ้าลอยล้วนเลือกใช้ที่ค่าความละเอียดที่มากที่สุด ดังแสดงในตารางผนวกที่ ค2

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอย

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วนต่างที่อายุทดสอบ 3, 7, และ 28 วัน ดังแสดงในตารางผนวกที่ ค1 และภาพผนวกที่ ค1 พบว่าที่อายุทดสอบ 3 วัน กำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยโดยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่ามอร์ต้าควบคุม ยกเว้นมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยอัตราส่วน 10:10 ที่มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ต้าควบคุม ที่อายุทดสอบ 7 วัน กำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นสูงกว่ามอร์ต้าควบคุม ประมาณร้อยละ 4-17 และที่อายุทดสอบ 28 วัน กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนโดยสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมประมาณร้อยละ 33-41 ซึ่งกำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อายุทดสอบนี้จะมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะการบดที่ต่างกันพบว่าที่อายุทดสอบ 3 วัน มอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยที่ผ่านการบดแยกมีกำลังอัดต่ำกว่าการบดรวม แต่ที่อายุทดสอบ 28 วัน กำลังอัดของการบดแยกจะเพิ่มขึ้นสูงกว่าการบดรวมเล็กน้อย ซึ่งแตกต่างจากผลของการบดด้วยเครื่องบดแบบ Rod Mill ที่ใช้เป็นหลักในการศึกษา

ตารางผนวกที่ ค1 กำลังอัดและกำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยบดแยกและบดรวมที่อัตราส่วนต่างๆ

ประเภท ส่วนผสม	ลักษณะการบด	W/B	กำลังอัดประลัย			ดัชนีกำลังอัด		
			(กก./ตร.ซม.)			(%)		
			3 วัน	7 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน
มอร์ต้าควบคุม	-	0.6	175	240	268	100	100	100
MK:FA/20:0	-	0.7	171	282	363	98	117	136
MK:FA/15:5	บดแยก	0.68	164	263	374	94	109	140
	บดรวม		170	280	373	97	116	139
MK:FA/10:10	บดแยก	0.65	175	268	379	100	111	141
	บดรวม		176	280	368	100	117	137
MK:FA/5:15	บดแยก	0.62	167	250	364	95	104	136
	บดรวม		169	262	362	97	109	135
MK:FA/0:20	-	0.58	169	257	357	96	107	133



ภาพผนวกที่ ค1 กำลังอัดของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยบดแยกและบดรวมที่อัตราส่วนต่างๆ อายุ 3, 7 และ 28 วัน

ตารางผนวกที่ ค2 ความละเอียดของวัสดุที่ได้จากการบดแบบ Ball Mill (บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด)

คินขาว

รอบการบด	พื้นที่ผิว Air Blaine (cm ²)
150	* 10,065
250	14,013
500	15,433

MK:FA/15:5

รอบการบด	พื้นที่ผิว Air Blaine (cm ²)
100	9,285
120	* 9,608

MK:FA/10:10

รอบการบด	พื้นที่ผิว Air Blaine (cm ²)
120	7,645
180	8,009
430	8,925
780	* 9,625

MK:FA/5:15

รอบการบด	พื้นที่ผิว Air Blaine (cm ²)
1500	7,887
2200	8,412
3200	* 8,918

Fly Ash

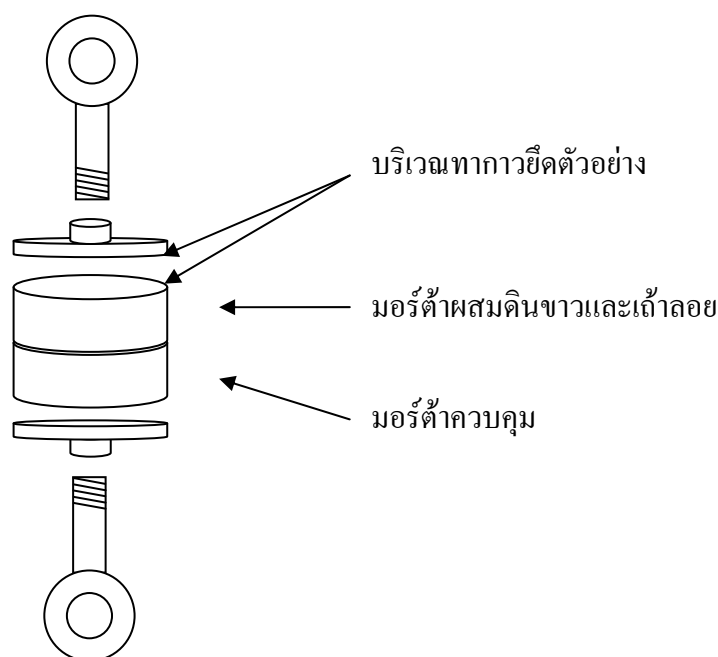
รอบการบด	พื้นที่ผิว Air Blaine (cm ²)
2000	3,008
4000	3,572
6000	* 3,886

หมายเหตุ * : ค่าความละเอียดของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบ

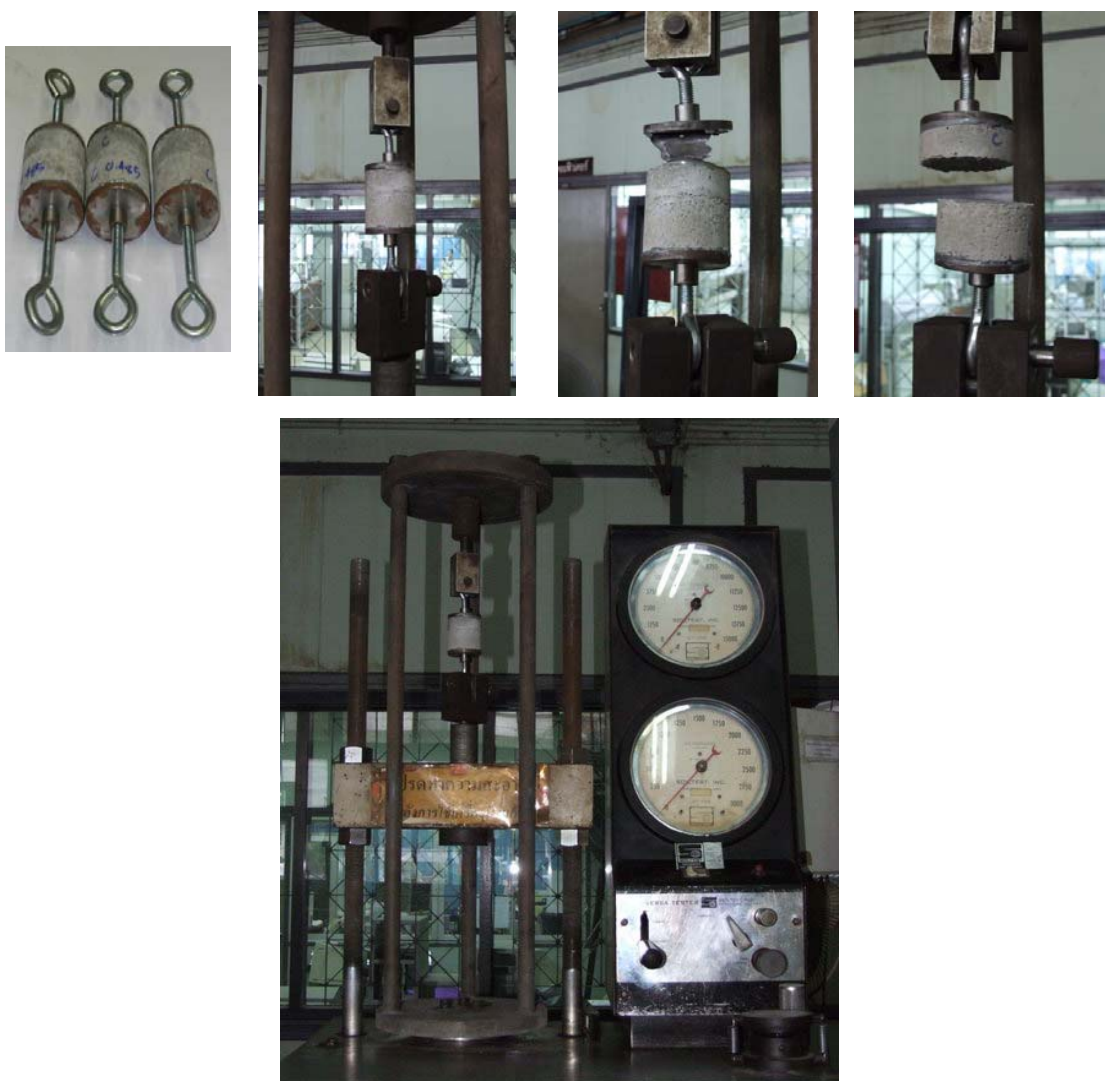
การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของมอร์ต้า (Bond Strength)

ด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของวัสดุเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของวัสดุซ่อม ดังนั้น จึงได้ทดสอบหาแรงดังกล่าวเพิ่มเติมจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของมอร์ต้าที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยทำการทดสอบโดยหล่อขึ้นตัวอย่างมอร์ต้าควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 1 นิ้ว ถอดแบบแล้วบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เพื่อเร่งการพัฒนากำลัง จากนั้นหล่อมอร์ต้าที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยทับบนตัวอย่างมอร์ต้าควบคุมดังกล่าว เมื่อมอร์ต้าแข็งตัวจึงติดชุดยึดจับตัวอย่างบริเวณหัวและท้ายของตัวอย่างทดสอบด้วยกาว (Epoxy) ดังแสดงในภาพผนวกที่ ค2 จากนั้นทดสอบแรงยึดเหนี่ยวที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน โดยเครื่องทดสอบแรงยึดเหนี่ยวที่ดัดแปลงจากชุดทดสอบแรงเฉือนของเหล็กเสริม ดังภาพผนวกที่ ค3



ภาพผนวกที่ ค2 การประกอบขึ้นทดสอบแรงยึดเหนี่ยวกับชุดยึดจับ



ภาพผนวกที่ ค3 การทดสอบแรงอัดหนึ่ง

จากการทดสอบโดยส่วนใหญ่จะพบว่าผิวหน้าบริเวณหัวและท้ายของตัวอย่างทดสอบหลุดจากอุปกรณ์ยึดจับเนื่องจากผิวของมอร์ต้ามีคุณภาพต่ำและเกิดการเอียงศูนย์กลางของแรงดึง จึงทำให้ไม่ได้ผลการทดสอบดังกล่าวดังนั้นหากต้องการทดสอบให้ได้ผลควรปรับปรุงหรือเปลี่ยนวิธีการยึดจับตัวอย่างรวมทั้งหลีกเลี่ยงการเอียงศูนย์กลางของแรงดึง

การทดสอบ Ring Test

การทดสอบ Ring Test เป็นการวัดค่าความไวในการเกิดรอยแตกร้าว (Crack Sensitivity) โดยประเมินจากอายุที่เกิดรอยแตกร้าว (Cracking Age) ของซีเมนต์เพสต์เพื่อใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์เพสต์ดังกล่าวจะเกิดการแตกร้าวขึ้นเมื่อใด (Guojie Wang and Jianlan Zheng, 2005) นั้นหมายความว่าคอนกรีตที่เลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพและมีการออกแบบส่วนผสมที่ดีย่อมมีโอกาสเกิดการแตกร้าวช้ากว่าคอนกรีตที่เลือกใช้วัสดุที่ด้อยคุณภาพ ดังนั้นสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตจึงแทรกซึมเข้าไปทำลายเนื้อคอนกรีตได้ช้ากว่าส่งผลให้คอนกรีตมีความคงทนโครงสร้างจึงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

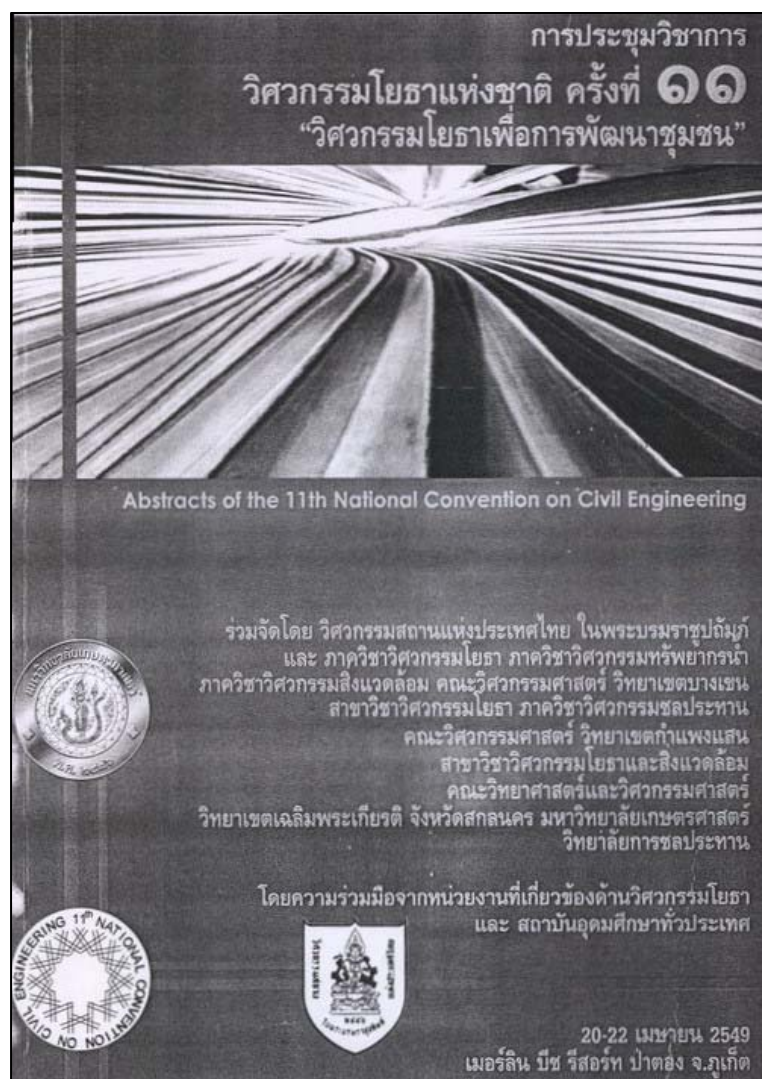
วิธีการทดสอบ Ring Test ทำโดยการเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยต่างๆเทลงในแบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 ซม. สูง 2 ซม. ซึ่งมีแกนเหล็กอยู่ภายใน ถอดแบบหลังจากหล่อครบ 24 ชั่วโมงโดยไม่ต้องถอดแกนเหล็กออกจากตัวอย่าง จากนั้นขีดเส้นด้วยดินสอ 6B ตามแนวเส้นรอบวงของตัวอย่างโดยขีดไม่ครบรอบ เชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าที่ปลายด้านหนึ่งของเส้นดินสอกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 9 โวลต์ และปลายด้านที่เหลือต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณเพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้า และเก็บข้อมูลในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยหยุดวัดค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นตามแนวเส้นรอบวงของตัวอย่าง การทดสอบ Ring Test แสดงดังภาพผนวกที่ ค4



ภาพผนวกที่ ค4 การทดสอบ Ring Test

จากการทดสอบ เมื่อมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นบริเวณขอบนอกของตัวอย่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ควรจะมีย่านลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากแนวของเส้นดินสอที่ขีดไว้ขาดออกจากกัน แต่ผลการทดสอบพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ยังมีค่าคงที่ แม้ว่าเมื่อมีรอยแตกเกิดขึ้นจนทำให้เส้นดินสอขาดออกจากกัน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ที่ใช้แปลงสัญญาณเพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้ามีความละเอียดไม่เพียงพอโดยไม่สามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึงระดับมิลลิโวลต์ เมื่อเกิดรอยแตกที่ทำให้แนวของเส้นดินสอขาดออกจากกันเพียงเล็กน้อยจึงไม่สามารถอ่านค่าความต่างศักย์ที่ลดลงได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปผลการทดสอบดังกล่าวได้ หากต้องการทดสอบให้ได้ผลควรมีปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าความต่างศักย์ให้มีความละเอียดมากขึ้น

ภาคผนวก ง
บทความสำหรับการเผยแพร่



เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ

วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ ๑๑



Abstracts of the 11th National Convention on Civil Engineering

วิศวกรรมโยธาเพื่อการพัฒนาชุมชน

Civil Engineering for Community Development

20-22 เมษายน 2549

ณ โรงแรมเมอร์ลิน บีช รีสอร์ท ป่าตอง จังหวัดภูเก็ต

20-22 April 2006

Merlin Beach Resort, Patong, Phuket, Thailand

จัดโดย

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

โดยความร่วมมือของ

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

และวิทยาลัยการชลประทาน

วิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง
CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

วันศุกร์ที่ 21 เมษายน 2549 เวลา 8.00 – 10.00 น. ห้อง Ballroom C

ประธาน : รศ.ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม

MAT - 007 PACKING EFFECT AND POZZOLANIC REACTION OF FLY ASH AND GROUND RIVER SAND ON POROSITY AND AIR PERMEABILITY OF PASTES

Theerawat Sinsiri, Chai Jaturapitakkul, Prinya Chindaprasirt

MAT - 023 ผลกระทบของการใช้เถ้าลอยผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I กับสารลดน้ำอย่างแรง
EFFECT OF USING FLY ASH PORTLAND CEMENT TYPE I MIXING WITH HIGH RANGE WATER REDUCING AGENT

วิฑูรย์ เกตุยศ, เจษฎา เกษมเศรษฐ์

MAT - 024 การเปรียบเทียบคอนกรีตผสมเถ้าลอยกำลังสูงผสมและไม่ผสมสารลดน้ำอย่างแรง
Comparison of High Strength Fly Ash Concrete with and without Superplasticizer

เจษฎาพร ศรีภักดิ์, เจษฎา เกษมเศรษฐ์

MAT - 025 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยหลังการเผาไหม้
COMPRESSIVE STRENGTH OF FLY ASH CONCRETE AFTER BEING BURNT

อุทธรณ์ สีนสุทธเศรษฐ์, ภาณุวัฒน์ รุ่งศรีทอง, นพพล จันทรมมา

MAT - 039 ผลกระทบของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าขี้เถ้าและเถ้าลอยต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์
EFFECT OF TERNARY BLENDED CEMENT CONTAINING BAGASSE ASH AND FLY ASH ON COMPRESSIVE STRENGTH OF MORTAR

สาโรจน์ คำวงศ์, สุวัฒน์ สัจจวาณิชย์

MAT - 068 ผลกระทบของการใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีต
INFLUENCE OF METAKAOLIN AND FLY ASH ON STRENGTH DEVELOPMENT OF MORTAR AND CONCRETE

วุฒิกรณ์ มาลี, สุวัฒน์ สัจจวาณิชย์

MAT - 016 ข้อเสนอปรับปรุงวิธีการออกแบบส่วนผสม สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการควบคุมตัวเป็นศูนย์ กรณีใช้ร่วมกับสารลดน้ำอย่างแรง

A PROPOSED MODIFIED MIX DESIGN METHOD FOR NO-SLUMP FLY ASH CONCRETE WITH SUPERPLASTICIZER

วุฒิพงศ์ จันทรรศ, เจษฎา เกษมเศรษฐ์

ผลกระทบของการใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าและคอนกรีต
INFLUENCE OF METAKAOLIN AND FLY ASH ON STRENGTH DEVELOPMENT
OF MORTAR AND CONCRETE

วุฒิกรณ์ มาลี (Wutikorn Malee)¹

สุวิมล สัจจานิชย์ (Suvimol Sujjavanich)²

¹ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<tao.m69@gmail.com>

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ <

fengsusa@ku.ac.th>

บทคัดย่อ : รายงานฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาวัสดุปอซโซลานสำหรับมอร์ต้าและคอนกรีตโดยใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอย ซึ่งศึกษา ความสามารถทำงานได้และการพัฒนากำลังอัด โดยแปรผันอัตราส่วนผสมดินขาวต่อเถ้าลอย 5 ระดับ คือ 20:0 , 15:5 , 10:10 , 5:15 , 0:20 และใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำการเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวผลการ ศึกษาค่าการไหลของมอร์ต้าพบว่า ส่วนผสมที่มีดินขาวต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้ค่าการไหลเท่ากับมอร์ต้าควบคุม และความต้องการน้ำลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยในส่วนผสมโดยลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นในด้านความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตพบว่า การใช้เถ้าลอยร่วมกับดินขาวช่วยลดการสูญเสียค่าการยุบตัว และดินขาวมีผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัดช่วงต้นของคอนกรีต และเถ้าลอยช่วยพัฒนากำลังอัดในระยะยาว และที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 จะทำให้มอร์ต้าและคอนกรีตมีกำลังอัดสูงสุด โดยสูงกว่าส่วนผสมควบคุมตั้งแต่ช่วงอายุ 7-91 วัน

ABSTRACT : This paper is a part of a study aimed to improve local pozzolan material for mortar and concrete, using Metakaolin (MK) incorporating Fly Ash (FA). By varying the ratio of MK to FA from 20:0 to 0:20 and used as percentage replacement of 20 % by weight of cementitious material, the studied properties were compared to of the control mix. Compared to the control samples of equal flowability, the results indicated the increasing of water requirement for MK mixes , whereas the incorporating FA enable to decrease water requirement as well as reducing slump loss of the fresh mixes. It was confirmed that MK affected the early – age strength development whereas incorporated FA influenced later-age strength gained. The ratio of MK to FA 10:10 appeared to yield the highest compressive

strength, and also is highest compressive strength, and also is higher than of the control mixes when tested samples after 7 days.

KEYWORDS : Metakaolin , Fly Ash , Compressive Strength , Slump loss

1. บทนำ

ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาการใช้เถ้าลอย (Fly Ash) จากแหล่งในประเทศผสมคอนกรีตเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างในปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นที่ยอมรับกันว่า เถ้าลอยช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งในสภาพสดและสภาพที่แข็งตัวแล้ว เช่น ช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ ลดการเย็นน้ำและการแยกตัวของส่วนผสม ช่วยเพิ่มความคงทนและกำลังอัดในระยะยาวให้กับคอนกรีต อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตปกติมีข้อด้อยบางประการคือ กำลังรับแรงอัดต่ำในช่วงอายุต้นๆ [1]

ดินขาว (Metakaolin) เป็นวัสดุปอซโซลานอีกชนิดหนึ่งได้จากการนำดินขาวดิบ (Kaolin) ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติ มาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการเผาและบดโดยใช้อุณหภูมิ และช่วงเวลาที่เหมาะสมทำให้ได้ดินขาวอนุภาคละเอียด เมื่อนำมาผสมคอนกรีตจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่นเดียวกับเถ้าลอย แม้ว่าการศึกษา และวิจัยภายในประเทศเกี่ยวกับการใช้ดินขาวกับงานคอนกรีตยังมีจำกัด เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยที่มีการ ศึกษากันอย่างแพร่หลาย แต่จากรายงานการศึกษาการใช้ดินขาว [2-4] พบว่าดินขาวมีผลกระทบต่อการพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ ที่ดีขึ้น เช่น กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้น ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้น ความต้านทานการกัดกร่อนต่อกรดเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านของน้ำลดลง และยังช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตอีกด้วย แต่การใช้ดินขาวในงานคอนกรีตยังมีข้อเสียบางประการ เช่น ดินขาวมีการดูดซึมน้ำสูง ทำให้มีผลต่อการลดความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต ค่าการยุบตัวจะลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวเพิ่มขึ้น [5]ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น อุณหภูมิ และความร้อนในคอนกรีตเพิ่มขึ้นนำไปสู่ปัญหาการแตกร้าวได้ ปัญหาเหล่านี้เป็นผลมาจากดินขาวมีอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีความไวต่อการทำปฏิกิริยา [6-7]

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาเพื่อการพัฒนาวัสดุปอซโซลานสำหรับมอร์ต้าและคอนกรีตโดยใช้ดินขาวร่วมกับเถ้าลอย โดยมีแนวคิดที่จะนำจุดด้อยและจุดเด่นของวัสดุปอซโซลานทั้งสองชนิด มาปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆของคอนกรีตทั้งที่อยู่ในสภาพสด และในสภาพที่แข็งตัวแล้วให้ดีขึ้นและสามารถพัฒนาให้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อการใช้งานจริงต่อไป

2. การทดลอง

2.1 วัสดุ

2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2.1.2 ดินขาวที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพดินขาวดิบจาก จ. ระนอง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และบดให้มีความละเอียดโดยตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะให้อยู่ในช่วง 10,000-11,000 ตร.ซม./ก. และมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 1

2.1.3 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ดินขาว (MK)	เถ้าลอย (FA)	ปูนซีเมนต์ประเภท 1
SiO ₂	58.26	47.65	21.16
Al ₂ O ₃	35.18	18.51	5.09
Fe ₂ O ₃	0.97	10.29	3.01
CaO	0.03	11.94	66.22
MgO	0.04	1.70	1.27
K ₂ O	1.48	3.14	0.25
Na ₂ O	4.02	4.08	0.04
SO ₃	0.03	2.69	2.42
LOI	1.2	0.5	0.98
คุณสมบัติทางกายภาพ			
ความถ่วงจำเพาะ	2.51	2.64	3.15
พื้นที่ผิวจำเพาะ, cm ² /g.	13890	4045	3254
% ค้างตะแกรงเบอร์ 325 [#]	4	0.7	-

ที่มา : 1. ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เกษตรศาสตร์ (2548)

2. กรมวิทยาศาสตร์บริการ (2547)

3. การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

3.1 เตรียมตัวอย่างมอร์ต้าควบคุมและมอร์ต้าที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย โดยใช้ดินขาวและเถ้าลอยแทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยแปรผันอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอย 5 ระดับคือ 20 : 0 , 15 : 5 , 10 : 10 , 5 : 15 , 0 : 20 อัตราส่วน

3.2 ทดสอบค่าการไหลของมอร์ต้าโดยโตะทดสอบการไหล ตามมาตรฐาน ASTM C 230 ควบคุมการไหลแผ่นของมอร์ต้าให้อยู่ในช่วง 110 ± 5 เปอร์เซ็นต์ โดยแปรผันปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมเพื่อให้ได้ค่าการไหลแผ่นตามต้องการ

3.3 ทดสอบดัชนีกำลังจากการทำปฏิกิริยาร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Strength Activity Index) ตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าควบคุมกับมอร์ต้าที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย ทั้ง 2 ชุดทดสอบที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

3.4 เตรียมตัวอย่างและออกแบบส่วนผสมคอนกรีตควบคุมตามมาตรฐาน ACI ให้มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 300 – 350 กก./ตร.ซม.และควบคุมค่ายุบตัวให้อยู่ในช่วง 7.5 ± 2.5 ซม. ส่วนคอนกรีตที่ผสมดินขาวและเถ้าลอย จะใช้ดินขาวและเถ้าลอยแทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยแปรผันอัตราส่วนของดินขาวต่อเถ้าลอย 5 ระดับคือ 20 : 0 , 15 : 5 , 10 : 10 , 5 : 15 , 0 : 20

3.5 ทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C143 และทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump Loss) โดยวัดค่าการยุบของคอนกรีตสดทุกๆช่วงเวลา 15 นาทีจนคอนกรีตไม่มีค่ายุบตัว

3.6 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength Test) ตามมาตรฐาน BS 1881:PART 4 ใช้แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $7.5 \times 7.5 \times 7.5$ ซม. โดยทดสอบกำลังอัดเมื่อคอนกรีตอายุได้ 24 ชั่วโมง หลังจากการหล่อ และที่อายุการบ่มน้ำ 7, 28, 56 และ 91 วัน

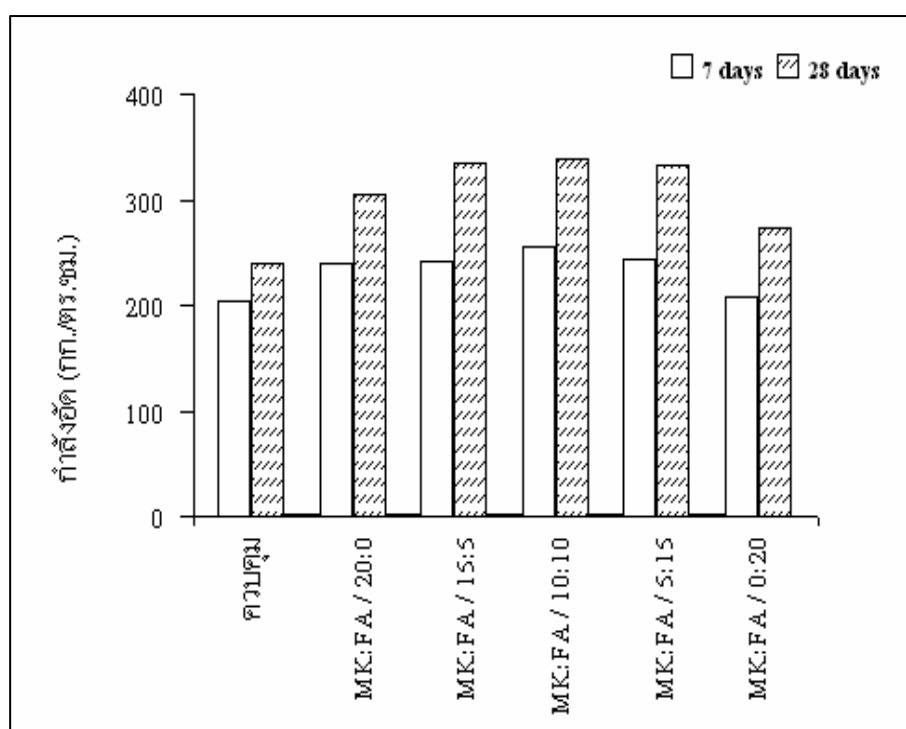
4. ผลและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดสอบค่าการไหลและกำลังอัดของมอร์ต้าแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 1 พบว่ามอร์ต้าที่ผสมดินขาวล้วน (MK:FA/20:0) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 ซึ่งสูงกว่ามอร์ต้าควบคุมเพื่อให้ได้ค่าการไหลเดียวกัน โดยเป็นผลเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของดินขาวที่มีรูปร่างไม่แน่นอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง [8] และเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในส่วนผสมมีผลให้ความต้องการน้ำลดลง โดยพิจารณาจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง จากลักษณะทางกายภาพของอนุภาคเถ้าลอยที่มีขนาดเล็กและกลม เถ้าลอยจึงทำหน้าที่เสมือน Bearing Ball ทำให้ความต้องการน้ำลดลง

ในด้านกำลังอัด พบว่ามอร์ต้าที่ผสมดินขาวและเถ้าลอยทุกอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอยมีกำลังอัดสูงกว่า มอร์ต้าควบคุมที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยที่อัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 จะให้กำลังอัดสูงสุด

ตารางที่ 2 ค่ากำลังอัดและกำลังอัดสัมพัทธ์ของมอร์ต้าผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ

ประเภท ส่วนผสม	W/B	ดัชนีกำลังอัด			
		กำลังอัดประลัย(กก./ตร.ซม.)		(%)	
		7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน
ควบคุม	0.60	204	239	100	100
MK:FA/20:0	0.70	240	305	118	128
MK:FA/15:5	0.68	242	334	119	140
MK:FA/10:10	0.65	256	339	126	142
MK:FA/5:15	0.62	244	333	120	139
MK:FA/0:20	0.58	208	274	102	115



ภาพที่ 1 แสดงกำลังอัดของมอร์ต้าที่อายุ 7 และ 28 วัน

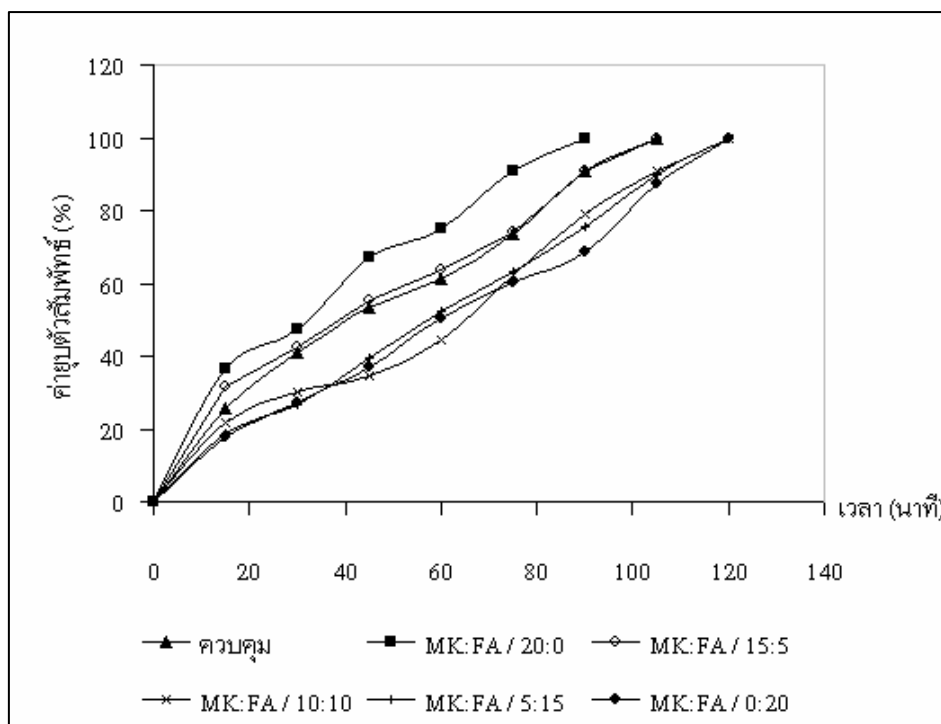
ผลการทดสอบการยุบตัวและการสูญเสียความยุบตัวของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 3 คอนกรีตที่มีส่วนผสมของดินขาวมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และเมื่อใช้เถ้าลอยร่วมกับดินขาวจะช่วย ลดความต้องการน้ำของคอนกรีตโดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนน้ำต่อ

วัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณดินขาว และลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับมอร์ต้า

ตารางที่ 3 การสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยที่อัตราส่วนต่างๆ

เวลา (นาที)	ค่าการยุบตัว (ควบคุมในช่วง 7.5 ± 2.5 ซม.)					
	ประเภทส่วนผสม					
	ควบคุม	MK:FA 20:0	MK:FA 15:5	MK:FA 10:10	MK:FA 5:15	MK:FA 0:20
W/B	0.48	0.52	0.51	0.48	0.46	0.44
0	8.2	8.1	8.1	8.3	8.2	8.4
15	6.1	5.1	5.6	6.5	6.7	6.9
30	4.8	4.3	4.7	5.8	6.0	6.1
45	3.8	2.7	3.6	5.4	5.0	5.3
60	3.2	2.0	3.0	4.6	3.9	4.2
75	2.2	0.8	2.1	3.1	3.0	3.3
90	0.8	0.0	0.8	1.8	2.0	2.6
105	0.0		0.0	0.8	0.9	1.1
120				0.0	0.0	0.0

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวสัมพัทธ์และเวลาดังภาพที่ 2 แสดงว่าคอนกรีตที่ผสมดินขาวล้วนสูญเสียค่ายุบเร็วกว่าคอนกรีตควบคุม และใช้เวลาในการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วที่สุด ตามด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 15:5 ซึ่งใช้เวลาในการสูญเสียค่ายุบตัวจะใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และในกลุ่มอัตราส่วนดินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 , 5:15 และ 0:20 จะใช้เวลาสูญเสียค่ายุบตัวใกล้เคียงกัน ตามลำดับ และจากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอย 10-20 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนผสมมีผลต่อการยืดเวลาการสูญเสียค่ายุบตัวประมาณ 30 นาที โดยการใช้เถ้าลอยที่ช่วยลดการสูญเสียค่ายุบตัวเนื่องจากการคงสภาพความเป็นพลาสติกของส่วนผสมและจากการเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่า

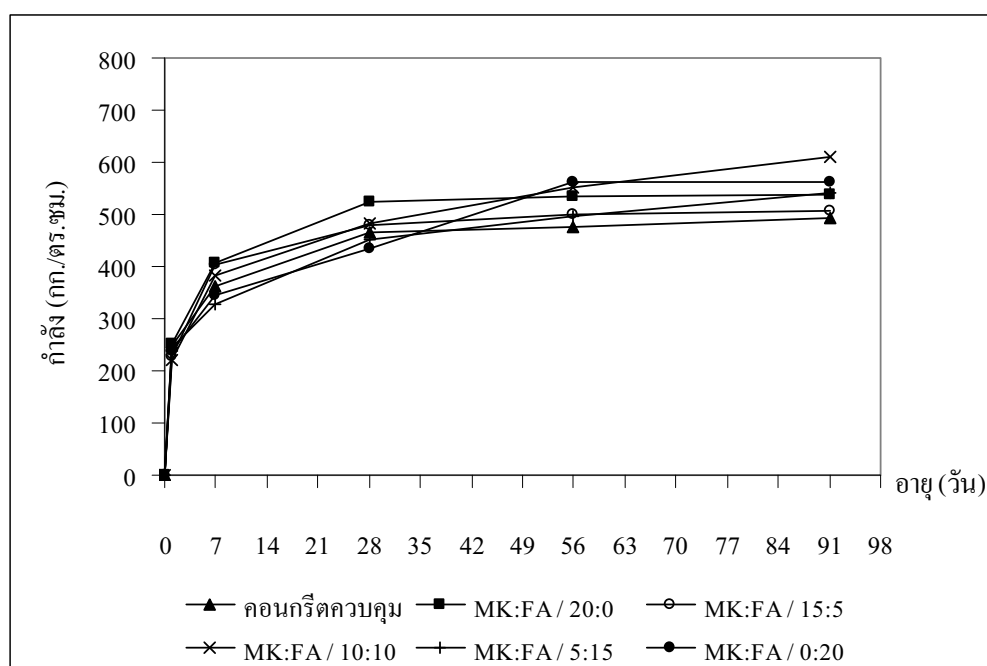


ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายุบตัวสัมพัทธ์กับเวลา

ผลของดินขาวและเถ้าลอยในด้านการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 3 ว่าการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสม MK:FA/20:0 (ดินขาวล้วน) สูงกว่าคอนกรีตควบคุมตลอดช่วงอายุทดสอบ 1-91 วัน ซึ่งการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของดินขาว ไปอุดแทรกช่องว่างขนาดเล็กใน คอนกรีต (Microfiller Effect) ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น และจากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าดินขาวยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เร็วขึ้น [9] นอกเหนือจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิก จึงทำให้คอนกรีตผสมดินขาวล้วนมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกช่วงอายุทดสอบ การใช้เถ้าลอยในส่วนผสมมีผลต่อกำลังอัดคอนกรีตในช่วงต้น โดยกำลังอัดจะลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาคอนกรีตผสมดินขาวและเถ้าลอยซึ่งมีเถ้าลอย 15-20 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนผสม จะมีกำลังอัดในช่วงอายุ 1-28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่ในช่วงอายุ 56-91 วัน จะพัฒนากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมซึ่งการพัฒนากำลังอัดเป็นผลจากการอุดแทรกช่องว่างของอนุภาคเถ้าลอย และจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย และพบว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสม MK:FA/10:10 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดแม้ว่ากำลังอัดที่อายุทดสอบ 1 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย แต่กำลังที่อายุ 7-91 วัน สูงกว่าและมีแนวโน้มที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นอีกหลัง 91 วัน

ตารางที่ 4 กำลังอัดของส่วนผสมคอนกรีตที่อายุ 1,7,28,56 และ 91 วัน

ประเภทส่วนผสม	W/B	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)				
		1 วัน	7 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
ควบคุม	0.48	249	360	466	477	493
MK:FA/20:0	0.52	250	407	523	535	538
MK:FA/15:5	0.51	226	403	478	499	507
MK:FA/10:10	0.48	221	383	483	550	610
MK:FA/5:15	0.46	246	328	450	496	542
MK:FA/0:20	0.44	239	346	435	562	563



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลา

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ดินขาวมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีผลต่อความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เพื่อให้มอร์ต้าที่ผสมดินขาวมีค่าการไหลเท่ากับมอร์ต้าควบคุม แต่สามารถลดความต้องการน้ำลงได้โดยเติมเถ้าลอยลงในส่วนผสม

2. มอร์ต้าที่คินขาวและเถ้าลอยมีค่ากำลังอัดที่ 28 วัน สูงกว่ามอร์ต้าควบคุมประมาณ 15-40 เปอร์เซ็นต์ โดยอัตราส่วนMK:FA/10:10 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด

3.คอนกรีตที่ผสมคินขาวต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ได้ค่าการยุบตัวเดียวกัน และมีอัตราการสูญเสียค่ายุบตัวที่เร็วกว่า การเติมเถ้าลอยมีผลต่อความต้องการน้ำโดยจะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และช่วยลดการสูญเสียค่าการยุบตัวอีกด้วย

4. ปริมาณคินขาวในส่วนผสม 20-15 เปอร์เซ็นต์ มีผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุ 1-7 วันแรกสูงกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่อปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสมเพิ่มขึ้นเป็น 15-20 เปอร์เซ็นต์ จะมีผลทำให้กำลังอัดในช่วงอายุ 56-91 วันสูงกว่าคอนกรีตควบคุม

5.จากการศึกษานี้พบว่าอัตราส่วนผสมคินขาวต่อเถ้าลอย 10:10 มีต่อการพัฒนากำลังของคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง และเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะเลือกนำไปศึกษาในด้านอื่นต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนัก งานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ประเสริฐ สุวรรณวิทยาและ สุวิมล สัจจาณิชย์. 2545.โครงการวิจัยคุณสมบัติระยะยาวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย.ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [2] Sayamipuk, S. 2000. Development of Durability Mortar and Concrete Incorporating Metakaolin from Thailand. Ph.D. Thesis, Asian Inst. Technol.
- [3] Sayamipuk, S. and P. Nimityongskul. 2000. Strength and Durability of Mortars Containing Metakaolin from Thailand. Asian Inst. Technology.
- [4] อนุพงศ์ สุวรรณ 2543 การใช้คินขาวเพื่อเพิ่มความต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- [5] จิรวัดน์ สุวรรณฤกษ์. 2546. ผลของคินขาวต่อกำลังและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [6] Moises Frias, M.I. Sanchez de Rojas. and J. Cabrera. 2000. The Effect that the Pozzolanic Reaction of Metakaolin has on The Heat Evolution in Metakaolin Cement mortar. Cem. Concr. Res. 30(2):209-216

- [7] Moises Frias Rojas. and J. Cabrera. 2002. The Temperature on The Hydration Rate and Stability of The Hydration Phases of Metakaolin-Lime-Water systems. Cem. Concr. Res.32(1): 133-138
- [8] เจริญวุฒิ ปัญญาเศรษฐกิจ. 2546. การปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าโดยใช้ดินขาวสำหรับงานซ่อม. วิทยานพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [9] Wild, S., J.M. Khatib and A. Jones. 1996. Relative Strength Pozzolanic Activity and Cement Hydration in Superplasticised Metakaolin Concrete. Cem. Concr. Res. 26(10) : 1537-1544



USMCA 2006
(SEIKEN SYMPOSIUM 48)

SYMPOSIUM PROGRAMME

**Fifth International Symposium on
New Technologies for Urban Safety of
Mega Cities in Asia**

**16 – 17 November 2006
Phuket, Thailand**

Organized by



**School of Engineering and Technology,
Asian Institute of Technology (AIT), Thailand**



**International Center for Urban Safety Engineering (ICUS),
Institute of Industrial Science (IIS),
The University of Tokyo, Japan**

Parallel Session: 9
Durability of Construction Materials and Special Structural Techniques

Venue: Tamarind 1

Date/Time: 17 November 2006, Friday/13:00-15:00

Session Chair: Dr. Suvimol Sujjavanich

Effect of Fly Ash on Chloride Permeability and Steel Corrosion Risk of Metakaolin Concrete

(Invited Presentation)

Sujjavanich S. and Malee V.

Analytical Research on the RC Members Containing Artificial Crack in Shear

Yasushi Tanaka and Toshiharu Kishi

Application of Compton Back-Scattered Laser Photons Beam for Radiography of Concrete

Hisashi Kanada, Hiroyuki Toyokakawa and Taketo Uomoto

Effect of Uncertainties of Prediction Model on the Maintenance Program for Concrete Structure

Pakawat Sanchaen, Yoshitaka Kato and Taketo Uomoto

Effects of Sensitivity of Difference Due to Curing Condition on Strength and Permeability

Shinichiro Okazaki, Tsubasa Yagi, Toshiharu Kishi and Tetsuji Yajima

The Effect of Environment Conditions on Concrete Carbonation (Numerical Model)

Sabet Bahador and H.C Jong

Macro-Cell Corrosion Considering Chloride Contents Along the Reinforced Bar

Ominda Nanayakkara and Yoshitaka Kato

Effect of fly ash on chloride permeability and steel corrosion risk of Metakaolin concrete

SUJJAVANICH S., MALEE V.

Department of Civil Engineering Faculty of Engineering
Kasetsart University Thailand
fengsusa@ku.ac.th

ABSTRACT

Steel corrosion problem is not uncommon in Thailand and it affects strength, durability, economic and safety of reinforced concrete structure. The interest in benefits of durability improvement from using pozzolan in concrete is increasing, from economic view point. This study investigated the effect of incorporating local fly ash, to improve workability, focusing on chloride penetration and steel corrosion risk of Metakaolin concrete with the 28 day target strength of 500 ksc and target slump of 7.5 ± 2.5 cm, under tropical climate conditions. The incorporated fly ash in mixes significantly reduced slump loss, increased workability and later age strength gain, especially for the ratio of cement to metakaolin to fly ash of 80:10:10. The results of electrically accelerated corrosion test were compared with normal, metakaolin concrete with and without fly ash. Very low level of chloride permeability was evident. However, as the percentage of fly ash increased the chloride permeability at 28 days slightly increased to low level. Under the 140 days immersion in sodium chloride solution, half-cell potential measurements indicated marked improvement of corrosion risk reduction, compared to of normal concrete which was ranked at greater than 90% probability of steel corrosion as early as 8 days of acceleration. Visual examination and chloride penetration depth indicated the effectiveness of the corrosion reduction, independent of compressive strengths. Fly ash appeared to yield strong effect on workability improvement, slump loss as well as providing marked and continuous effect on long term strength but slight on decreasing chloride deterioration, compared to the metakaolin effect.

1. INTRODUCTION

As the country grows, safety issue has become of public interest. Durable structure aspects in the sense of public safety from using defected or deteriorated structure/infrastructure are included in the wide perspectives of the issue.

Concrete deterioration from steel corrosion problem is quite common in Thailand. Several factors have influence on this distress type; material and construction quality or even the hot and high humidity of typical tropical climate of the country are widely known causes. The need of durable and effective material for both new construction

and repair purpose is currently of interest as well as the improvement in the codes of practice in the construction industry, to bring about long service life of structures and low maintenance cost. The interest in benefits of durability improvement from using pozzolan in concrete is increasing, from economic view point.

Presently, local fly ash has been introduced as pozzolan material and has significantly gained acceptance in concrete industry. In the mean time, Metakaolin from the process of heat treatment of natural local kaolin is reported as a potential quality and effective pozzolanic material (Hensadeekul 1995, Suwan 2000, Sayamipuk 2000, Suwanapruk et al.2003). The characteristic of significant strength development from both pozzolanic reaction and micro filler action is expected to improve the low early strength of fly ash. Also, the round particle shape of fly ash could suppress workability problem of plain metakaolin concrete. The beneficial properties of both materials are recognized (Kostuch et al.1993, Curcio and Pagliolico 1998, Sujjavanich et al.2005). However, the combined use for properties improvement of these local materials under local environment needs to be investigated.

This paper reports the effect of local fly ash on chloride permeability and steel corrosion risk of Metakaolin concrete. The information is essential for future development of good quality material for high performance and durable concrete structure.

2. TEST PROGRAM

2.1 Materials

Maemoh fly ash and ground Ranong metakaolin from proper heating process under 800°C for 6 hours (Sayamipuk 2000, Suwanapruk et.al 2003), were used throughout this study. The chemical compositions and physical properties are shown in Table 1.

In the first part of this study, the properties and microstructure of material and paste incorporating various ratios of metakaolin and fly ash as percentage of cement replacement of 20 were investigated, using SEM and XRD test. Both materials were added as cement replacement during concrete mixing. The second part investigated concrete strength and durability properties focused on chloride permeability and steel corrosion risk. The 28 day target strength of control concrete and Metakaolin concrete were 350 and 500 kg/cm² and the target slump was 7.5± 2.5 cm. The studied proportion of metakaolin to fly ash varied in the range of 20 to 0. Crushed limestone with maximum size of 3/8" and coarse river sand were used as coarse and fine aggregate.

2.2 Specimen Preparations

The specimen size of 7.5x7.5x7.5 cm was chosen for compressive strength test to avoid variation between mixes due to the limited capacity of mixer. For Rapid Chloride Permeability test, 10x20 cm. cylindrical mold were moist cured for 24 hours. After demolding, specimens were water cured at room temperature (28°C approx.)

until test. All chloride test specimens were continuously water cured at room temperature until the age of testing, 28 and 56 days. The samples were cut and the 5 cm. slices at the mid height were used for testing, according to ASTM C1202. To investigate corrosion risk, concrete samples with embedded steel of 9 mm. diameter 200 mm.in embedded length, were submerged in 3% NaCl solution-imitated sea water under electrically accelerated condition as shown in figure.1.

Table 1 Compositions and properties of metakaolin, cement and fly ash

Chemical composition (%)	N*	F*	C*	OPC	MK	FA
SiO ₂				21.16	58.26	47.65
Al ₂ O ₃				5.09	35.18	18.51
Fe ₂ O ₃				3.01	0.97	10.29
CaO				66.22	0.03	11.94
SO ₃	4	5	5	2.42	0.03	2.69
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ ≥ (%)	70	70	50		94.41	76.45
LOI< (%)	10	6	6	0.98	1.20	0.5
Spgr.	2.1-2.58			3.15	2.51	2.64
Blaine fineness , cm ² /g	2,400-4,800				13800	4045

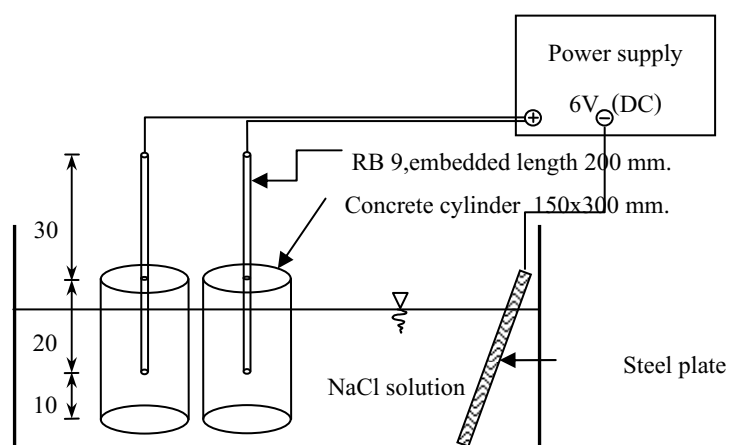


Figure 1 : Schematic diagram of accelerated test for corrosion risk

Direct current of 6 Volts was continuously applied to the end of testing time. Corrosion potential test was conducted using the Copper-copper half cell potentiometer. After accelerated test for 90 days and 140 days, specimens were broken, sprayed with silver nitrate solution and chloride penetration depth measured.

3. RESULTS

3.1 Material and microstructures

Particle shape of Mata kaolin and local fly ash are shown in figure 2. Because of their shape of rather loose and porous plate like as well as high surface area, metakaolin remarkably reduced workability (Suwanapruk et al. 2003), while the round shape of local fly ash improved workability remarkably (Jaturapitakkul et al. 1996). Microstructure of cementitious system was also investigated through the SEM results of metakaolin-flyash cement paste. The microstructure changes in 20% replacement paste with metakaolin:flyash 10:10 are shown in figure 3. As the mixture gained maturity, the dense microstructure and reduced detected CH were evident but fly ash particle was still seen with developed reaction products on its surface.

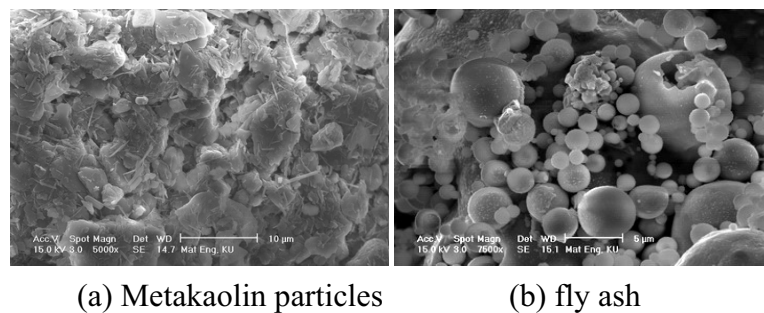


Figure 2: Microstructure of pozzolan material

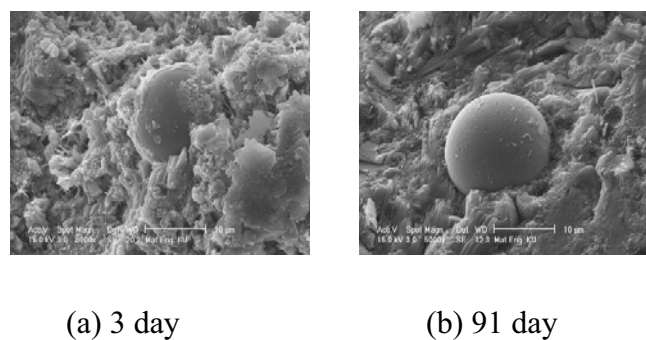


Figure 3: Structure of metakaolin-fly ash paste 10:10 at 3 day and 91 day

The XRD of the mixture with fly ash were also compared to those of metakaolin mixture at different age, ranged from 1 day to 91 day, as shown in figure 4. The significant calcium hydroxide (CH) depletion was observed during the first three days in metakaolin concrete and almost disappeared at the age of 91 days. Incorporating fly ash 10% affected calcium hydroxide intensity in the early age because of slow pozzolanic reaction. However, the XRD results were quite comparable at the later age.

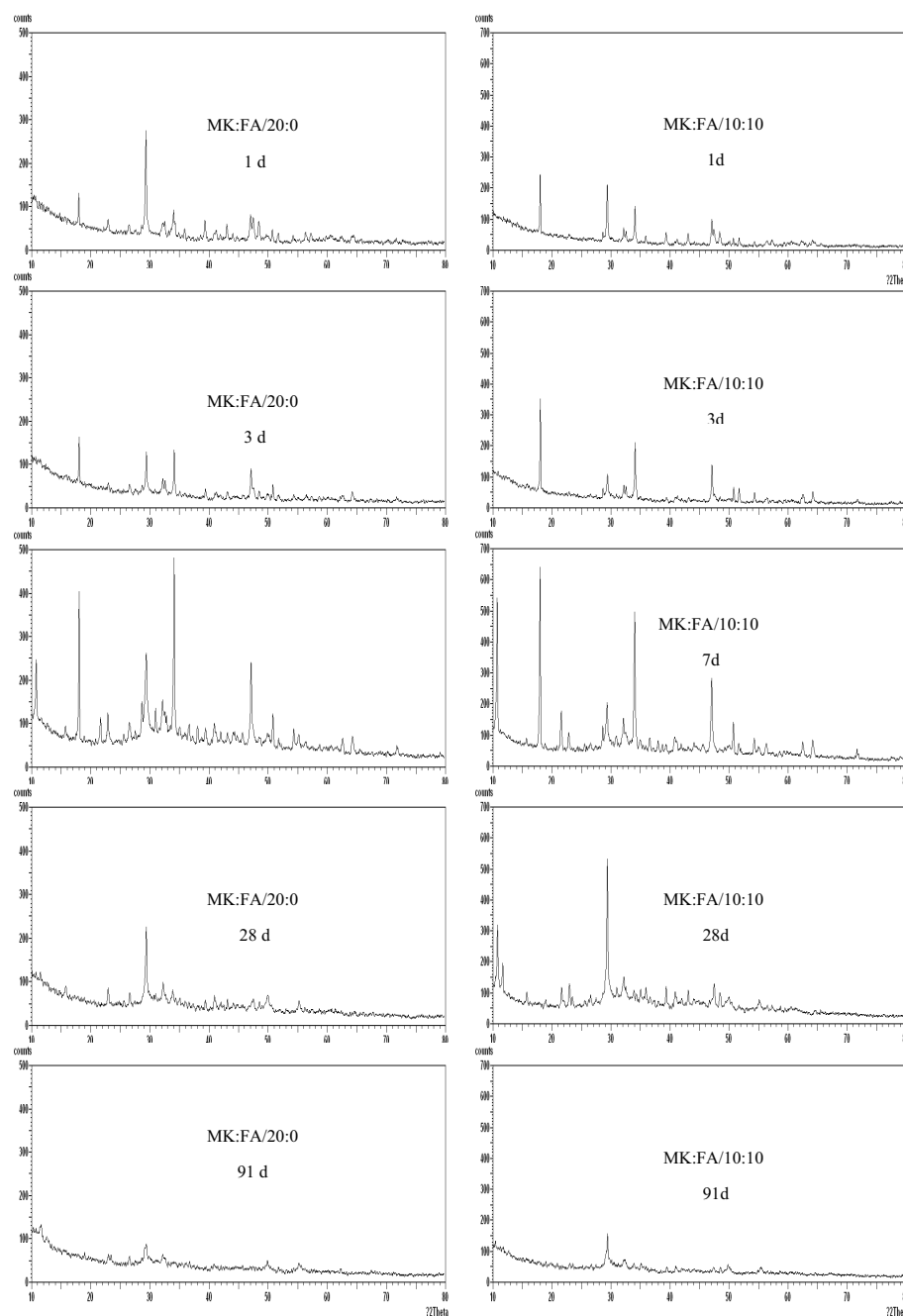


Figure 4: XRD results of metakaolin- fly ash paste of 20:0 and 10:10

3.2 Fresh concrete

Metakaolin concrete without fly ash needed more water to provide the same slump to those of control mix as well as the marked effect on slump loss was observed. However, additional fly ash produced different effects. The round shape of fly ash remarkably increased workability and reduced water requirement as shown in Table 2. The slump loss effect was decreased and more pronounce as the percentage replacement of fly ash increased.

Table 2: Workability performance of metakaolin concrete

Time (min.)	slump (cm.)					
	mixture description					
	control	MK:FA 20:0	MK:FA 15:5	MK:FA 10:10	MK:FA 5:15	MK:FA 0:20
W/B	0.48	0.52	0.51	0.48	0.46	0.44
0	8.2	8.1	8.1	8.3	8.2	8.4
15	6.1	5.1	5.6	6.5	6.7	6.9
30	4.8	4.3	4.7	5.8	6.0	6.1
45	3.8	2.7	3.6	5.4	5.0	5.3
60	3.2	2.0	3.0	4.6	3.9	4.2
75	2.2	0.8	2.1	3.1	3.0	3.3
90	0.8	0.0	0.8	1.8	2.0	2.6
105	0.0		0.0	0.8	0.9	1.1
120				0.0	0.0	0.0

3.3 Hardened concrete

3.3.1 Compressive strength

Compressive strength is shown in Table 3. Although the W/B increased, strength of Metakaolin concrete still increased of about 10-15%, both at early age and long term from direct and indirect effect as suggested by previous study (Wild,1996). Compared to Metakaolin concrete, the mixture with proper percentage fly ash-metakaolin replacement provided the greater long term strength.

Table 3: Compressive strength of concrete mixtures at different age

Mix	W/B	Compressive strength (kiss)				
		1d	7d	28d	56d	91d
control	0.48	256	370	478	490	507
MK:FA/20:0	0.52	257	418	537	549	553
MK:FA/15:5	0.51	232	414	491	513	520
MK:FA/10:10	0.48	227	393	496	565	627
MK:FA/5:15	0.46	253	337	462	510	533
MK:FA/0:20	0.44	245	355	447	577	579

3.3.2 Chloride permeability

The chloride permeability test indicated the more pronounced influence of additional pozzolan on the change of void system in long term than those of compressive strength, as shown in figure 5. Metakaolin yielded the marked effect on reducing chloride permeability in term of charge passed. The resistance of chloride ingress, slightly increased as age increased and as the percentage of fly ash replacement decreased. At 28 day the effect of fly ash on decreased permeability appeared to be less due to slow pozzolanic reaction, however, it was still classified in

the low permeability level. The permeability decreased as time passed. At 56 day age, all added- pozzolan mixture yielded the very low permeable class as suggested in ASTM C1202, compared to the moderate level of control concrete at the same age.

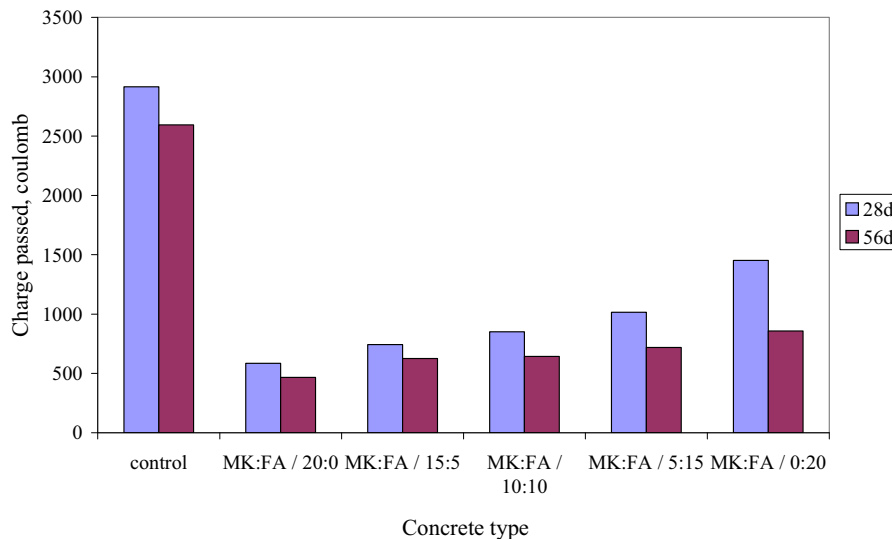


Figure 5. Resistance of chloride permeability of metakaolin concrete

3.3.3 Corrosion risk

From half cell potential test as shown in figure 6 and the investigation of chloride penetration front by silver nitrate spraying, it was found that the risk of corrosion in control mix was markedly reduced. The control mix under accelerated test reached the potential difference of -350 me suggested by ASTM C876 at 8 days. Added pozzolan increased corrosion risk resistance to lower than the threshold level through 140days of test duration, regardless of pozzolan type and percentage replacement in the studied range. No sign of crack was observed except in control concrete. The investigated penetration depths from broken specimens after 90 and a140 days of accelerated test are shown in Table 4 and figure 7. Proper additional fly ash for compressive strength and workability aspects(10:10) appeared to have no effect on the chloride front depth while the depth of fly ash concrete samples slightly increased. The embedded steel in control mix was found severely corroded at age of 90 days, compared to those of little or no corrosion at all in pozzolan mixture, as shown in fig.8, confirming the effectiveness of pozzolan addition in concrete.

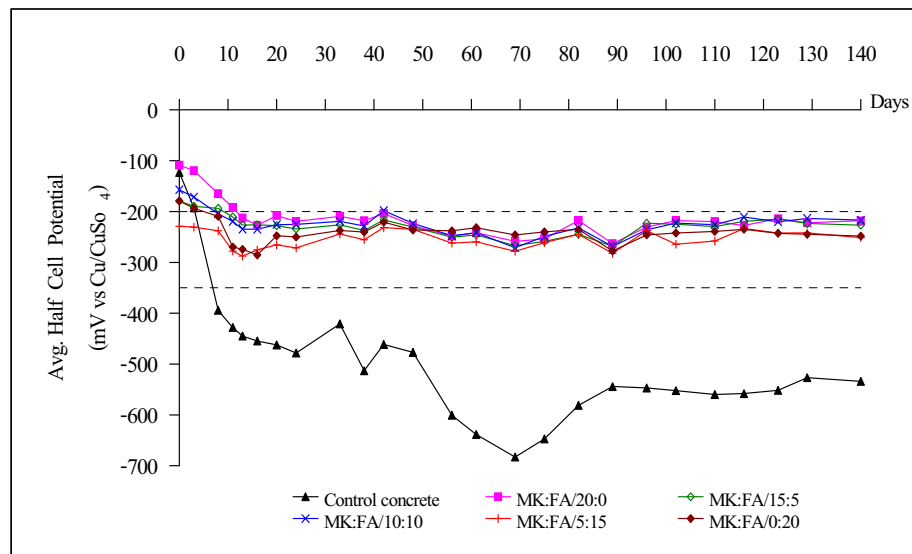


Figure 6: half cell potential reading of metakaolin concret

Table 4: Chloride penetration depth measurement

Mix	Average chloride depth from surface, mm	
	90 d	140 d
Control	> 7	> 7
MK:FA / 20:0	1.2	1.9
MK:FA / 15:5	1.1	1.8
MK:FA / 10:10	1.2	1.7
MK:FA / 5:15	1.3	2.1
MK:FA / 0:20	1.9	2.3

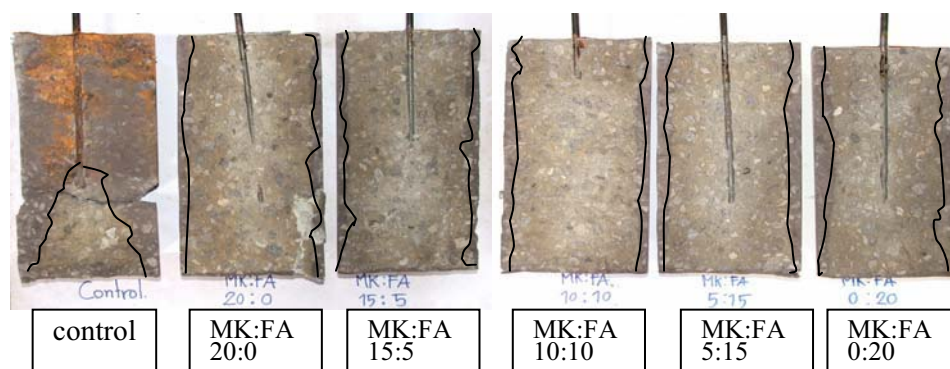


Figure.7: Chloride penetration depth of various concrete

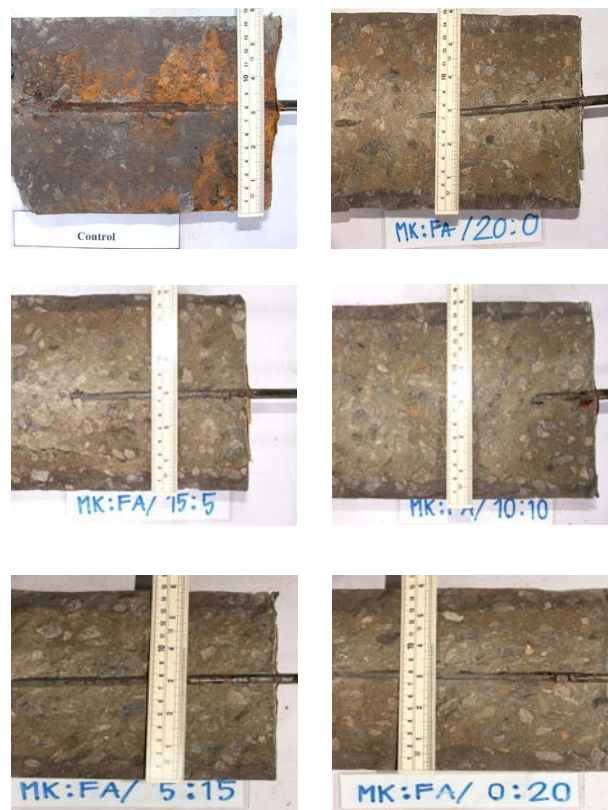


Figure 8 : Embedded steel conditions in various concrete type after 90 days of accelerated test

4. CONCLUSIONS

From this study, the followings conclusions could be drawn.

1. Additional fly ash affected calcium hydroxide depletion of metakaolin concrete at the early age because of slow pozzolanic reaction, depending on percentage replacement, but not for the later age.
2. Incorporated fly ash remarkably increased workability and later age strength gain even in mixes with slightly higher W/B ratio, slump loss behavior was also improved.
3. The replacement ratio of metakaolin to fly ash of 10:10 appeared to be most effective for strength development and workability improvement.
4. Regardless of the type of pozzolan, their effects on long term void improvement were more pronounce than those of compressive strength. This evidence was observed through the very high level of chloride ingress resistance, compared to the moderate level of high strength concrete,
5. At 28 day fly ash effect on permeability reduction was less than those of Metakaolin but continuously improved as time passed, to the level of very low permeability.
6. Under 140 days immersion in sodium chloride solution, half-cell potential measurements indicated marked improvement of corrosion risk reduction, compared to those of normal concrete which was ranked at greater than 90% probability of steel corrosion as early as 8 days of acceleration

7. Visual examination and chloride penetration depth indicated the effectiveness of the corrosion risk reduction, independent of compressive strengths and pozzolan type

8. Fly ash appeared to yield strong effect on workability improvement, slump loss as well as providing marked and continuous effect on long term strength but slight effect on reducing chloride deterioration, compared to the metakaolin effect.

9. The potential of incorporating fly ash and metakaolin as a low cost local-supplement material for high strength and durable concrete was confirmed.

ACKNOWLEDGEMENT

Funding supports from Thailand Research Fund and The Siam Cement (Public) Company and Kasetsart University are greatly appreciated.

REFERENCES

Hensadeekul , T. 1995. *Use of Metakaolin from Lampang Province as a Pozzolan*. M.Eng. Thesis, Asian Inst. Tech. , Bangkok, Thailand.

Suwan A., 2000. *Using Metakaolin for sulfate resistance of cement mortar*, Master thesis, Technology Mahanakorn, Bangkok, Thailand.

Sayamipuk, S. 2000. *High Durability Mortar Containing Metakaolin*. AIT-Dissertation, Asian Inst. Tech., Bangkok, Thailand.

Suwanapruk, J., Sujjavanich, S. and Panyanusornkij, J. 2003. *Impact of low sulfate metakaolin on strength and chloride resistance of cement mortar and high strength concrete*, Proceedings in the ISEC-02 International Structural Engineering and Construction Conferences, Rome, Italy.

Kostuch, J.A., Walters, G.V. and Jones, T.R, 1993. *High-performance Concrete incorporating Metakaolin - A review*, Concrete 2000. University of Dundee. England.

Curico, F.,B.A., De angelis and Pagliolico, S. 1998. *Metakaolin as a Pozzolan Microfiller for High-Performance Mortars*. Cem. Concr. Res. 28(6) : 803-809

Sujjavanich S., Sida V.and Suwanvitaya P., 2005, *Chloride permeability and corrosion risk of High-Volume Fly ash Concrete with mid-range water reducer*, ACI Material Journal Vol.102 No.3

Jaturapitakkul, C., A. Siripanichgorn and Kiattikomol K. 1996. *Effect of Superplasticizers and Fly Ash on Corrosion Resistance of Mortar*. Proceedings of the International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21st Century. Asian Inst. Tech. Bangkok. Thailand