



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

กำลังและความคงทนของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอย



ศาโรจน์ ดำรงศิลป์ และคณะ

20 มีนาคม 2551 เสร็จโครงการ

สัญญาเลขที่ _____

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

กำลังและความคงทนของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอย

คณะผู้วิจัย

1. นายสาโรจน์ ดำรงค์สีล
2. นายรณกร เทพวงษ์

สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

งบประมาณผลประโยชน์ ประจำปี 2550

สนับสนุนโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
(ความเห็นรายงานนี้เป็นของผู้วิจัยมหาวิทยาลัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)



ร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

กำลังและความคงทนของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอย



ศาโรจน์ ดำรงศิลป์ และคณะ

20 มีนาคม 2551 เสร็จโครงการ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัย และ บริษัทด้านช่าง ไปโอ-เอ็นเนอร์ยี จำกัด ที่อนุเคราะห์เก้าอี้ที่ใช้งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ และหัวหน้าสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สาโรจน์ ดำรงค์สีล
หัวหน้าโครงการวิจัย



กำลังและความคงทนของ mortars ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอย
Strength and Durability of Mortar Containing Bagasse Ash and Fly Ash

ศาโรจน์ ดำรงศีล *

Sarote Dumrongsil

รณกร เทพวงษ์ *

Ronnakron Thepwong

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษากำลังและความคงทนของ mortars ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอย ได้แก่ กำลังอัด กำลังดัด การหดตัวแห้ง การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักของ mortars จากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก ตัวแปรในการทดสอบคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนเท่ากับร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่า mortars ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยมีกำลังอัดในช่วงแรกที่มีอายุ 7 วัน ต่ำกว่า mortars ควบคุม แต่สามารถพัฒนา กำลังสูงขึ้นในระยะยาวโดยมีกำลังที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน สูงกว่า mortars ควบคุม การหดตัวแห้งของ mortars ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงกับ mortars ควบคุม นอกจากนี้ mortars ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยยังมีค่าการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตและการสูญเสียน้ำหนักจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกต่ำกว่า mortars ควบคุมอีกด้วย ดังนั้นการใช้เถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยจึงสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของ mortars ทั้งด้านกำลังและความคงทนได้

คำสำคัญ: mortars เถ้าชานอ้อย เถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย กำลัง ความคงทน

* อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ABSTRACT

This research was to study the strength and durability of mortar containing bagasse ash and fly ash. Strength such as compressive and flexural strength was investigated. Durability tested was drying shrinkage, sulfate expansion, and weight loss of mortar by acid attacks. Throughout the experiment, the percentage replacement of cement by bagasse ash and fly ash was 30% by weight of cementitious material. The ratio of bagasse ash to fly ash of 50:50 by weight was used in this study. The test results showed that the mortar containing bagasse ash and fly ash had lower strength at 7 days than the control mortar. However, at the age of 28 and 60 days, the mortar with bagasse ash and fly ash showed higher strength than the control mortar. The drying shrinkage of mortar containing bagasse ash and fly ash was comparable to the control mortar. The sulfate expansion, and weight loss by acid attacks of mortar containing bagasse ash and fly ash were lower than the control mortar. The use of bagasse ash and fly ash resulted the quality improvement both strength and durability of mortar.

Keywords: Mortar, Bagasse ash, Fly ash, Strength, Durability



Executive Summary

ชื่อโครงการ กำลังและความคงทนของมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอย
นายสาโรจน์ ดำรงค์ศีล และ นายรณกร เทพวงษ์
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ระยะเวลาทำวิจัย 1 ปี ระหว่างวันที่ 1 มีนาคม 2550 ถึง 29 กุมภาพันธ์ 2551

ขอบเขตการวิจัยและวิธีการที่ได้ข้อมูล

ทดสอบกำลังอัด กำลังดัด การหดตัวแห้ง การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต และการสูญเสีย น้ำหนักของมอร์ตาร์จากการกักกรองของกรดซัลฟูริก โดยมีตัวแปรในการทดสอบคือการแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และเถ้าขานอ้อย ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม

ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัย

มอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยมีกำลังอัดในช่วงแรกที่ยังอายุ 7 วัน ต่ำกว่ามอร์ตาร์ ควบคุม แต่สามารถพัฒนากำลังสูงขึ้นในระยะยาวโดยมีกำลังที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน สูงกว่ามอร์ตาร์ ควบคุม การหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ ควบคุม นอกจากนี้มอร์ตาร์ผสมเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยยังมีค่าการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตและการสูญเสีย น้ำหนักจากการกักกรองของกรดซัลฟูริกต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมอีกด้วย

สรุปสาระสำคัญของผลที่ได้จากการวิจัย

เถ้าขานอ้อยผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนเท่ากับร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุปอชโซลานสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยช่วยปรับปรุงคุณสมบัติ ด้านกำลังและความคงทนของมอร์ตาร์ได้

การนำไปใช้ประโยชน์และข้อเสนอแนะ

การพัฒนาอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และการผลิตวัสดุก่อสร้างทั่วไป เช่น คอนกรีต เป็นต้น โดยใช้เถ้าขานอ้อยผสมเถ้าลอยเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนอันเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าขานอ้อยซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

Executive Summary

Project Title: Strength and Durability of Mortar Containing Bagasse Ash and Fly Ash

Investigation: Sarote Dumrongsil and Ronnakron Thepwong

Faculty of Engineering and Architecture

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Project Period: 1 year from March 1, 2007, to February 29, 2008

Objectives: To investigate the strength and durability of mortar containing bagasse ash and fly ash which the percentage replacement of cement by bagasse ash and fly ash was 30% by weight of cementitious material.

Methodology: Testing of strength and durability of mortar containing bagasse ash and fly ash were investigated in accordance with ASTM standard.

Results: The test results showed that the mortar containing bagasse ash and fly ash had lower strength at 7 days than the control mortar. However, at the age of 28 and 60 days, the mortar with bagasse ash and fly ash showed higher strength than the control mortar. The drying shrinkage of mortar containing bagasse ash and fly ash was comparable to the control mortar. The sulfate expansion, and weight loss by acid attacks of mortar containing bagasse ash and fly ash were lower than the control mortar.

Conclusion: The use of bagasse ash and fly ash resulted the quality improvement both strength and durability of mortar.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
Executive Summary	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาในการศึกษาวิจัย	1
1.2 ประเด็นปัญหา	1
1.3 วัตถุประสงค์	2
1.4 ขอบเขตในการศึกษาวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วัสดุพอลิไซลิกและประเภทของพอลิไซลิก	3
2.2 ปฏิกริยาพอลิไซลิก	4
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 วิธีการศึกษาวิจัย	7
3.1 แผนการทดสอบ	7
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	7
3.3 รายละเอียดวิธีการทดสอบ	8
3.4 ตัวแปรในการทดสอบและสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	10
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัยและการวิเคราะห์ผล	11

4.1 ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ ของเก้าชานอ้อยและถั่วลอ่ย	11
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของมอร์ตาร์	13
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ	18
5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย	18
5.2 ข้อเสนอแนะ	18
บรรณานุกรม	19
ภาคผนวก	21



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.1 ถ้ำซานอ้อยบริเวณบ่อพักของโรงไฟฟ้า	8
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ ถ้ำซานอ้อย และถ้ำซานอ้อยผสมถ้ำลอย	12
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ ถ้ำซานอ้อย และถ้ำซานอ้อยผสมถ้ำลอย	12
รูปที่ 4.3 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์	14
รูปที่ 4.4 การหดตัวแห้งของมอร์ตาร์	15
รูปที่ 4.5 การขยายตัวของมอร์ตาร์	16
รูปที่ 4.6 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์จากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก	17



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ วัสดุพอลิโพรพิลีน ASTM C 618	3
ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าชานอ้อย และเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย	11
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าชานอ้อย เถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย	11
ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบประเภทของพอลิโพรพิลีน	13
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงของมอร์ตาร์	13
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์	15
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์	16
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ จากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก	17



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาในการศึกษาวิจัย

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลเป็นอุตสาหกรรมเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย ปัจจุบันมีพื้นที่เพาะปลูกอ้อยซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาลมากกว่า 6 ล้านไร่ และมีปริมาณอ้อยดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำตาล 60 ล้านตันต่อปี (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2548) หลังการหีบอ้อยในกระบวนการผลิตน้ำตาลจะเหลือชานอ้อยประมาณ 13 ล้านตัน ซึ่งชานอ้อยส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าและไอน้ำในโรงงานน้ำตาลส่งผลให้เหลือเถาชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ปริมาณเถาชานอ้อยยังมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานแห่งชาติมีนโยบายสนับสนุนการใช้พลังงานหมุนเวียนโดยใช้เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าไฟฟ้าพลังงานชีวมวล (สำนักงานนโยบายพลังงานแห่งชาติ, 2548) โดยกำหนดให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยรับซื้อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ โรงงานน้ำตาลหลายแห่งได้เข้าร่วมโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวลทำให้มีปริมาณเถาชานอ้อยเหลืออยู่เป็นจำนวนมากและกลายเป็นภาระที่โรงงานต้องกำจัดทิ้งเพื่อมิให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม แนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการนำเถาชานอ้อยเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ จากงานวิจัยเบื้องต้นพบว่าเถาชานอ้อยเป็นวัสดุปศุสัตว์ที่สามารถใช้แทนที่ปุ๋ยซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตได้ (สุวิมล และคณะ, 2547)

1.2 ประเด็นปัญหา

ถึงแม้ว่าเถาชานอ้อยจะเป็นวัสดุปศุสัตว์ที่สามารถใช้แทนที่ปุ๋ยซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตได้ แต่ก็มีผลกระทบต่อความต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น หน่วงเวลาก่อตัวของคอนกรีต และการหดตัวของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น (ณพงศธร และคณะ 2548) ดังนั้นการนำเถาชานอ้อยมาใช้ในการคอนกรีตจึงควรคำนึงถึงข้อดีของคุณสมบัติเหล่านี้ เถาลอยหรือเถาถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถาลอยจากแหล่งใหญ่ของประเทศมีลักษณะกลมและเป็นวัสดุปศุสัตว์ ขอดีของการใช้เถาลอยแทนที่ปุ๋ยซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีตคือช่วยเพิ่มความสามารถในการเทได้ ลดการหดตัว และลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต (ปริญญา และคณะ, 2547) รายงานวิจัยด้านผลกระทบของเถาลอยภายในประเทศต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ (Chindaprasirt, 2004) ชี้ว่าเถาลอยช่วยลดการหดตัวแห้งและเพิ่มความต้านทานซัลเฟตได้ สารจอร์น และคณะ (2549) พัฒนาวัสดุประสานจากปุ๋ยซีเมนต์ผสมเถาชานอ้อย

และถั่วลอ่ยในลักษณะสารผสม โดยศึกษาผลกระทบของวิธีการผสมถั่วลอ่ยกับถั่วลอ่ยต่อ กำลังอัดและการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ พบว่าการผสมถั่วลอ่ยกับถั่วลอ่ยด้วยวิธีบดร่วมมี ประสิทธิภาพต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ และถั่วลอ่ยผสมถั่วลอ่ยในอัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 30 โดยที่มอร์ตาร์ยังคงมีกำลังอัดที่อายุ 28 วันเทียบเท่ากับ มอร์ตาร์ควบคุม นอกจากนี้ยังลดการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ได้อีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ถั่วลอ่ย อ้อยผสมกับถั่วลอ่ยในลักษณะบดร่วมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุประสานให้ดีขึ้นโดยศึกษาถึง ผลกระทบของการใช้ถั่วลอ่ยผสมถั่วลอ่ยต่อกำลังและความคงทนของมอร์ตาร์

1.3 วัตถุประสงค์

ศึกษาถึงผลกระทบของการใช้ถั่วลอ่ยผสมถั่วลอ่ยต่อกำลังและความคงทนของมอร์ตาร์ เพื่อเป็นฐานข้อมูลงานวิจัยในการสนับสนุนให้เกิดการใช้ประโยชน์จากถั่วลอ่ยเป็นวัสดุประสานในการทำวัสดุก่อสร้าง

1.4 ขอบเขตในการศึกษาวิจัย

โครงการได้กำหนดขอบเขตดังต่อไปนี้ คือ

1.4.1 ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ผสมถั่วลอ่ยและถั่วลอ่ย ได้แก่ กำลังอัดที่ อายุ 3, 7, 28 และ 60 วัน และการทดสอบแรงดัดที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน

1.4.2 ศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของมอร์ตาร์ผสมถั่วลอ่ยและถั่วลอ่ย ได้แก่ การ หดตัวแห้ง การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต และการต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริก

1.4.3 มอร์ตาร์ผสมถั่วลอ่ยและถั่วลอ่ยมีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถั่วลอ่ย ผสมถั่วลอ่ยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

1.4.4 ถั่วลอ่ยผสมถั่วลอ่ยด้วยวิธีบดร่วมในอัตราส่วนถั่วลอ่ยต่อถั่วลอ่ยเท่ากับ ร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 ทราบถึงคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของมอร์ตาร์ผสมถั่วลอ่ยและถั่วลอ่ย ได้แก่ กำลังอัด กำลังดัด การหดตัวแห้ง การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต และการต้านทานการกัด กร่อนจากกรดซัลฟูริก

1.5.2 การเพิ่มมูลค่าให้กับถั่วลอ่ยซึ่งเป็นของเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

1.5.3 แนวทางในการพัฒนาอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ด้านการใช้วัสดุทดแทน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุปอชโซลานและประเภทของปอชโซลาน

วัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอชโซลานอาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้

วัสดุปอชโซลานมีทั้งชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและแบบดัดแปลง วัสดุปอชโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้แก่ เศษถ้ำภูเขาไฟ (Tuff) ขี้ถ้ำภูเขาไฟ (Volamic ash) พูมิไซต์ (Pumicite) หินแข็งสีเหลือง (Opaline charts) ดินเหนียวบางชนิด (Clays) และหินดินดาน (Shales) เป็นต้น วัสดุปอชโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาตินี้จะต้องนำมาบดให้ละเอียดก่อนนำมาใช้ ในส่วนของวัสดุปอชโซลานแบบดัดแปลงซึ่งได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น ขี้ถ้ำลอย (Fly ash) ตะกรันเหล็ก (Shag) และผงซิลิกา (Silica fume) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ASTM C 618 ได้จำแนกประเภทของวัสดุปอชโซลานเป็น 3 ประเภท คือ ประเภท N ประเภท F และ ประเภท C โดยปริมาณส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพวัสดุปอชโซลาน ASTM C 618

ส่วนประกอบทางเคมี	วัสดุปอชโซลานประเภท		
	N	F	C
ซิลิกอนไดออกไซด์+อลูมิเนียมออกไซด์+ไอออนออกไซด์ ต่ำสุดร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) สูงสุดร้อยละ	4.0	5.0	5.0
อัลคาไลต์ สูงสุดร้อยละ	1.5	1.5	1.5
ปริมาณความชื้น สูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา สูงสุดร้อยละ	10.0	6.0	6.0
คุณสมบัติทางกายภาพ	วัสดุปอชโซลานประเภท		
	N	F	C
ความละเอียด:ปริมาณค้ำตะแกรงเบอร์ 325 สูงสุดร้อยละ	34	34	34
ความอยู่ตัว:การขยายตัวหรือหดตัว โดยการทดสอบบอโตเซลฟ	0.8	0.8	0.8
ความต้องการปริมาณน้ำ สูงสุดร้อยละ	115	105	105
ดัชนีกำลัง (Strength activity index)			
ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อายุ 7 วัน ต่ำสุดร้อยละ	75	75	75
ผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อายุ 28 วัน ต่ำสุดร้อยละ	75	75	75

(ที่มา: ASTM Volume 04.02, 1995)

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำวัสดุก่อสร้าง เช่น คอนกรีต เนื่องจากวัสดุปอซโซลานจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาพสดและที่แข็งตัวแล้ว เช่น ลดการแยกตัว การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตดีขึ้น และสามารถต้านทานต่อสารเคมีจำพวกกรดหรือซัลเฟตได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตามวัสดุปอซโซลานแต่ละประเภทอาจมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี ลักษณะอนุภาคและความละเอียดของวัสดุปอซโซลานอันเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน

2.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ/หรืออลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นส่วนประกอบหลักทางเคมี ทั้งนี้วัสดุปอซโซลานอาจจะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่จะต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) กล่าวคือเมื่อผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุปอซโซลาน แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งเป็นสารประกอบประเภทออกไซด์กลุ่มหลักในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) นี้เองที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) ซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาทั้งสองนี้รวมเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ดังสรุปเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้ คือ



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ ($2\text{Al}_2\text{O}_3$) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้ คือ



2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถ้าชานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตน้ำตาล และ/หรือจากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้า งานวิจัย

เบื้องต้นเป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเถ้าชานอ้อยมาใช้ประโยชน์ ซึ่งงานวิจัยของ Srinivasan (1986) รายงานศักยภาพความเป็นสารปอชโซลันของเถ้าชานอ้อย ระบุว่าเถ้าชานอ้อยมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลักทางเคมีประมาณร้อยละ 60 ถึงร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก เมื่อนำเถ้าชานอ้อยมาบดละเอียดแล้วผสมกับปูนซีเมนต์มีผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้นได้ ต่อมา Shahriar (1987) ศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยเป็นสารปอชโซลัน โดยนำชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบดละเอียด ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0, 35 และร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่าเถ้าชานอ้อยมีคุณสมบัติเป็นสารปอชโซลันประเภท N ตามมาตรฐาน ASTM สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยจะมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในช่วงแรกที่ยังอายุ 7 วัน และ 28 วัน แต่ที่อายุ 60 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยจะมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมและปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อกำลังอัด

Martirena Hernandez และคณะ (1998) ศึกษาความเป็นสารปอชโซลันของเถ้าชานอ้อย โดยทดสอบเถ้าชานอ้อยที่เหลือจากการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตน้ำตาล เปรียบเทียบเถ้าชานอ้อยที่ได้จากการนำชานอ้อยมาเผาแบบเปิดโล่ง ผสมกับปูนขาวที่อัตราส่วนเถ้าชานอ้อยต่อปูนขาวเท่ากับ 70 ต่อ 30 โดยน้ำหนัก ทำการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับเถ้าชานอ้อยด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) และวิธี Thermogravimetric Analysis (TGA) นอกจากนี้ยังสังเกตผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาจากภาพถ่ายขยายขนาด Scanning Electron Microscope (SEM) ผลจากการศึกษาสรุปว่าเถ้าชานอ้อยที่เหลือจากการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานน้ำตาลเป็นสารปอชโซลันที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยาทางเคมี เนื่องจากมีคาร์บอนและเศษชานอ้อยที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ปนอยู่ ในขณะที่เถ้าชานอ้อยที่ได้จากการนำชานอ้อยมาเผาแบบเปิดโล่งเป็นสารปอชโซลันที่มีความไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีได้ดีเทียบเท่ากับเถ้าแกลบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Singh และคณะ (2000) แสดงผลการศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าชานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาล โดยมีปริมาณเถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20, และร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าเถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับสารปอชโซลัน เนื่องจากสามารถลด Lime อิสระได้ และปฏิกิริยาปอชโซลันสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น โดยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนักให้กำลังอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนตลอดอายุทดสอบ ผลกระทบของการใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์คือเวลาก่อตัวเพิ่มขึ้น

ประเทศไทยงานวิจัยเพื่อนำเถาซานอ้อยซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลมาใช้ ประโยชน์ สุวิมล (2546) ศึกษาผลกระทบของเถาซานอ้อยในลักษณะวัสดุประสาน ทำการทดสอบ กำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยนำเถาซานอ้อยมาบดละเอียดแล้วแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 20, 30, และ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อใช้เถาซานอ้อยแทนที่ ปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น มอร์ตาร์ที่มีเถาซานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้ม ให้ผลดีที่สุดซึ่งกำลังอัดที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปกติ และความละเอียด ของเถาซานอ้อยมีผลต่อการพัฒนากำลังอัด โดยเถาซานอ้อยที่มีความละเอียดค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ระหว่างร้อยละ 2-12 โดยน้ำหนัก ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน เท่ากับร้อยละ 98-104 และที่อายุ 28 วัน มีค่าดัชนีกำลังเท่ากับร้อยละ 102-108 เมื่อเทียบกับ กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน เถาซานอ้อยจึงมีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็น วัสดุประสานได้ (สุวิมล และคณะ, 2547) สอดคล้องกับงานวิจัยของสุชีรา และคณะ (2548) ศึกษา ถึงผลกระทบของเถาซานอ้อยต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ระบุว่ากำลังอัดของมอร์ ตาร์มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถาซานอ้อยที่เพิ่มขึ้นและต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมใน ช่วงแรกที่ยังการบ่ม 3 วัน และ 7 วัน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปที่ยังทดสอบ 28 วัน และ 90 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถาซานอ้อยมีแนวโน้มสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม นอกจากนี้ระยะเวลาก่อตัว การขยายตัว และการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของเถาซานอ้อยที่ เพิ่มขึ้น

สั๊กนาท และคณะ (2548) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตผสมเถา ซานอ้อย โดยใช้เถาซานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20, 30, และร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน พบว่าค่ายุบตัว หน่วยน้ำหนัก และกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถาซานอ้อยที่เพิ่มขึ้น และคอนกรีต ผสมเถาซานอ้อยร้อยละ 20, 30, และร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 97, 95, และร้อยละ 87 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ผลกระทบของการใช้เถาซานอ้อย ในงานคอนกรีตทำให้ระยะเวลาก่อตัวเพิ่มขึ้น แต่จะช่วยลดความร้อนหรือช่วยให้อุณหภูมิในคอนกรีต มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถาซานอ้อยที่เพิ่มขึ้น (คารวี และคณะ, 2549)

การพัฒนาวัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ผสมเถาซานอ้อยโดยใช้เถาลอยผสมรวมในลักษณะ สารผสมเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุประสานให้ดีขึ้น สาโรจน์ และคณะ (2549) ศึกษา ผลกระทบของปูนซีเมนต์ผสมเถาซานอ้อยและเถาลอยต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยใช้เถาซานอ้อย ผสมเถาลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และมีอัตรา ส่วนผสมเถาซานอ้อยต่อเถาลอยเท่ากับ 80:20 และ 60:40 โดยน้ำหนัก เป็นตัวแปรหลักในการ

ทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าปริมาณเถาซานอ้อยในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นมีผลกระทบต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ในช่วงแรกทำให้กำลังอัดลดลงแต่กำลังอัดจะสูงขึ้นในระยะยาวเทียบได้กับกำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม นอกจากนี้วิธีการผสมเถาซานอ้อยกับเถาลอยด้วยวิธีบดรวมมีผลกระทบต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ในช่วงแรกทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงขึ้นแต่จะไม่มีผลในระยะยาว ดังนั้นการผสมเถาซานอ้อยกับเถาลอยด้วยวิธีการบดรวมจึงมีประสิทธิภาพต่อกำลังของมอร์ตาร์ได้ดีกว่าการผสมด้วยวิธีคลุกเคล้า และมอร์ตาร์ผสมเถาซานอ้อยร่วมกับเถาลอยมีค่าการหดตัวแห้งน้อยกว่ามอร์ตาร์ผสมเถาซานอ้อยเพียงอย่างเดียวอีกด้วย (สาโรจน์ และคณะ, 2549)



บทที่ 3

วิธีการศึกษาวิจัย

3.1 แผนการทดสอบ

แผนการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

3.1.1 การทดสอบคุณสมบัติของเก้าชานอ้อยและเก้าชานอ้อยผสมถั่วลอถอย

การทดสอบในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเก้าชานอ้อยและเก้าชานอ้อยผสมถั่วลอถอย ขนาดและลักษณะอนุภาคของเก้าชานอ้อยผสมถั่วลอถอย ความละเอียดและค่าความถ่วงจำเพาะของเก้าชานอ้อยผสมถั่วลอถอย เพื่อเปรียบเทียบกับส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปอชโซลานประเภทต่าง ๆ

3.1.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ ได้แก่ กำลังอัด และกำลังดัดของมอร์ตาร์

3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านความคงทนของมอร์ตาร์

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติด้านความคงทนของมอร์ตาร์ ได้แก่ การหดตัวแห้ง การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต และการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 ปูนซีเมนต์ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.2.2 มวลรวมละเอียด เป็นทรายหยาบที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.60 และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.0 โดยมีขนาดละเอียดไปตามมาตรฐาน ASTM C 778

3.2.3 เก้าชานอ้อย เป็นวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานชีวมวลโดยใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงหลักและใช้เชื้อเพลิงเสริมอย่างใดอย่างหนึ่งได้แก่ แกลบ ใบอ้อย และเปลือกไม้ โดยสัดส่วนผสมเชื้อเพลิงหลักต่อเชื้อเพลิงเสริมในเชิงความร้อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 85 ต่อ 15 เก้าชานอ้อยที่ใช้ศึกษาวิจัยนี้เก็บจากบริเวณบ่อพักของโรงไฟฟ้า บริษัท ด้านช้าง ไบโอ-เอ็นเนอร์ยี จำกัด ตำบลหนองมะค่าโมง อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เก้าชานอ้อยเป็นผงสีดำและเปียกชื้นก่อนทำการศึกษาจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 ± 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 60 ซึ่งมีขนาดช่องเปิด 250 ไมครอน เพื่อกำจัดเศษชานอ้อยขนาดใหญ่ที่เผาไหม้ไม่หมดออก

3.2.4 ถ้าวาลย ใช้ถ้าวาลยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัตลำปาง อนุภาคมีสีเหลืองปนน้ำตาล มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.12 และมีความละเอียดค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 29 โดยน้ำหนัก

3.2.5 ถ้าวาลยผสมถ้าวาลย ได้จากการนำถ้าวาลยที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 60 ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 250 ไมครอน และถ้าวาลยผสมรวมกันในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก แล้วบดรวมกันด้วยเครื่องบดที่ดัดแปลงจากเครื่องลอสแองเจลีส์โดยใช้เหล็กเส้นกลมเป็นตัวบด ใช้เวลาในการบด 120 นาที จะได้ถ้าวาลยผสมถ้าวาลยที่มีความละเอียดค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

3.2.6 น้ำใช้น้ำประปาภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ศาลายา



รูปที่ 3.1 ถ้าวาลยบริเวณบ่อพักของโรงไฟฟ้า

3.3 รายละเอียดวิธีการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติของถ้าวาลย และถ้าวาลยผสมถ้าวาลย ประกอบด้วย การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีและการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด ขนาดและลักษณะของอนุภาค ความต้องการน้ำ และดัชนีกำลัง

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์

ก. กำลังอัด การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 109 ใช้ตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ส่วนผสมของมอร์ตาร์มีอัตราส่วนวัสดุ

ประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมซึ่งทดสอบจากการไหลแผ่ที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลอยู่ในช่วงร้อยละ 105–115 หลังจากตัวอย่างทดสอบมีอายุ 24 ชั่วโมงแล้ว จะถอดแบบแล้วนำไปบ่มให้ครบอายุทดสอบกำลังอัดที่ 3, 7, 28 และ 60 วัน

ข. *กำลังอัด* การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 348 ใช้ตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด 40x40x160 มิลลิเมตร ส่วนผสมของมอร์ตาร์มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมซึ่งทดสอบจากการไหลแผ่ที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลอยู่ในช่วงร้อยละ 105–115 หลังจากตัวอย่างทดสอบมีอายุ 24 ชั่วโมงแล้ว นำไปบ่มเพื่อรอทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 และ 60 วัน

3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านความคงทน

ก. *การหดตัวแห้ง* การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 596 ใช้แท่งตัวอย่างทดสอบขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแห้งมีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.0 โดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมซึ่งทดสอบจากค่าการไหลแผ่ที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลอยู่ในช่วงร้อยละ 105–115 หลังจากตัวอย่างทดสอบมีอายุ 24 ชั่วโมงแล้ว นำไปบ่มน้ำจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบมีอายุครบ 72 ชั่วโมง ต่อจากนั้น นำแท่งทดสอบมาขีดผิวให้แห้ง ชั่งน้ำหนัก และวัดความยาวตัวอย่างทดสอบ แล้วนำตัวอย่างทดสอบเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 25 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ทำการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวตัวอย่างทดสอบเมื่อมีอายุครบ 7, 14, 21, 45 และที่อายุ 60 วัน

ข. *การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต* การทดสอบใช้แท่งตัวอย่างทดสอบขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร ส่วนผสมของมอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมซึ่งทดสอบจากค่าการไหลแผ่ที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลอยู่ในช่วงร้อยละ 105–115 หลังจากตัวอย่างทดสอบมีอายุ 24 ชั่วโมงแล้ว วัดความยาวตัวอย่างทดสอบแล้วนำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แล้ววัดความยาวตัวอย่างทดสอบเมื่อมีอายุครบ 7, 14, 21, 45 และที่อายุ 60 วัน

ค. *การต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก* การทดสอบใช้ตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ส่วนผสมของมอร์ตาร์มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมซึ่งทดสอบจากการไหลแผ่ที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลอยู่ในช่วงร้อยละ 105–115 หลังจากตัวอย่างทดสอบมีอายุ 24 ชั่วโมงแล้ว นำไปบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำไปแช่สารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

ต่อจากนั้นนำตัวอย่างทดสอบไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์เนื่องจากการกัก
 กร่อนจากการแช่กรดที่อายุ 7, 14, 21, 28, 45, และที่อายุ 60 วัน

3.4 ตัวแปรในการทดสอบและสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวแปรในการทดสอบในงานวิจัยนี้คือมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าชานอ้อยผสมเถ้า
 ลอยมีปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยและเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 โดย
 น้ำหนักของวัสดุประสาน คงที่ตลอดการทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของมอร์ตาร์ควบคุม
 ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน และสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

- PC หมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- BA หมายถึงเถ้าชานอ้อย
- TA หมายถึงเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย
- CPC หมายถึงมอร์ตาร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสาน
- CBA หมายถึงมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อย
- CTA หมายถึงมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอย



บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัยและการวิเคราะห์

4.1 ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย

ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก พบว่ามีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 55.5 โดยน้ำหนัก มีปริมาณสารประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันร้อยละ 80.7 โดยน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ค่อนข้างสูงที่ร้อยละ 6.3 โดยน้ำหนัก ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย เปรียบเทียบกับเถ้าชานอ้อยและปูนซีเมนต์แสดงในตารางที่ 4.1

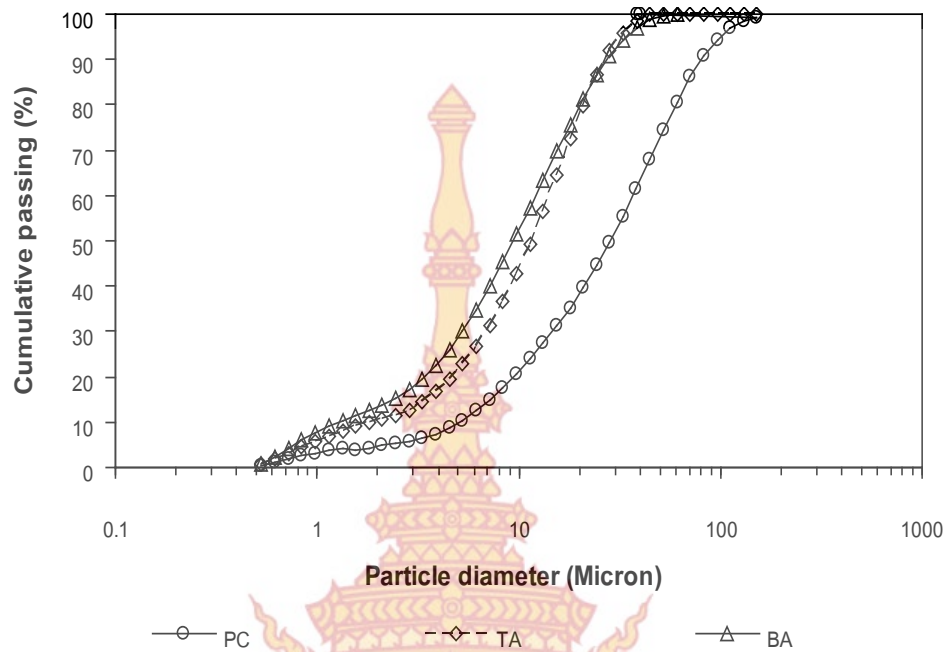
ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ เถ้าชานอ้อย และเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย

วัสดุ	ส่วนประกอบทางเคมี (%)					
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	LOI
ปูนซีเมนต์ (PC)	20.5	5.9	3.0	64.4	2.1	1.7
เถ้าชานอ้อย (BA)	70.6	3.8	0.7	2.8	0.2	15.4
เถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย (TA)	55.5	16.1	9.1	6.4	0.8	6.3

คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าชานอ้อย และเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ และความละเอียด แสดงในตารางที่ 4.2 และการกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ เถ้าชานอ้อย และเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย แสดงในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าชานอ้อย และเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย

คุณสมบัติทางกายภาพ	วัสดุ		
	PC	BA	TA
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	1.85	2.30
ความละเอียด			
ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)	-	0.4	0.5
พื้นที่ผิวจำเพาะ (แอร์เบลน) ($\text{ชม.}^2/\text{กรัม}$)	3,320	9,600	6,440
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, d_{50} (ไมโครเมตร)	22	10	12



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ เถ้าชานอ้อย และเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย

ภาพถ่ายขยายขนาดของเถ้าชานอ้อยและเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยด้วยกำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.2 ก. และ 4.2 ข. ตามลำดับ อนุภาคของเถ้าชานอ้อยมีลักษณะเป็นรูปทรงเหลี่ยม ขณะที่เถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยมีลักษณะรูปทรงเหลี่ยมหรืออาจเป็นแผ่นแบนและทรงกลมผสมกันซึ่งอนุภาคที่มีรูปทรงกลมก็คือเถ้าลอย



รูป 4.2 ก. เถ้าชานอ้อย

รูป 4.2 ข. เถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคของเถ้าชานอ้อยและเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอย

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีและการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าชานอ้อยและเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยเปรียบเทียบกับประเภทของปอชโซลันตามมาตรฐาน ASTM C 618 พบว่าเถ้าชานอ้อยและเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยจัดเป็นวัสดุปอชโซลันประเภท N เนื่องจากมีคุณสมบัติตามเกณฑ์กำหนด ยกเว้นค่า LOI ของเถ้าชานอ้อยที่สูงกว่ามาตรฐานกำหนด ผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบประเภทของปอชโซลัน

ส่วนประกอบทางเคมี	ประเภทวัสดุปอชโซลัน			BA	TA
	N	F	C		
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ ; ต่ำสุด (ร้อยละ)	70.0	70.0	50.0	75.1	80.7
SO ₃ ; สูงสุด (ร้อยละ)	4.0	5.0	5.0	0.2	0.8
LOI; สูงสุด (ร้อยละ)	10.0	6.0	6.0	15.4	6.3
ปริมาณความชื้น; สูงสุด (ร้อยละ)	3.0	3.0	3.0	1.0	1.0
คุณสมบัติทางกายภาพ	ประเภทวัสดุปอชโซลัน			BA	TA
	N	F	C		
ความละเอียด: ค้างตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)	34	34	34	0.4	0.5
ความต้องการน้ำ (ร้อยละ)	115	105	105	105	100
ดัชนีกำลัง (ร้อยละ) : ที่อายุ 7 วัน	75	75	75	89	102
	ที่อายุ 28 วัน	75	75	103	114

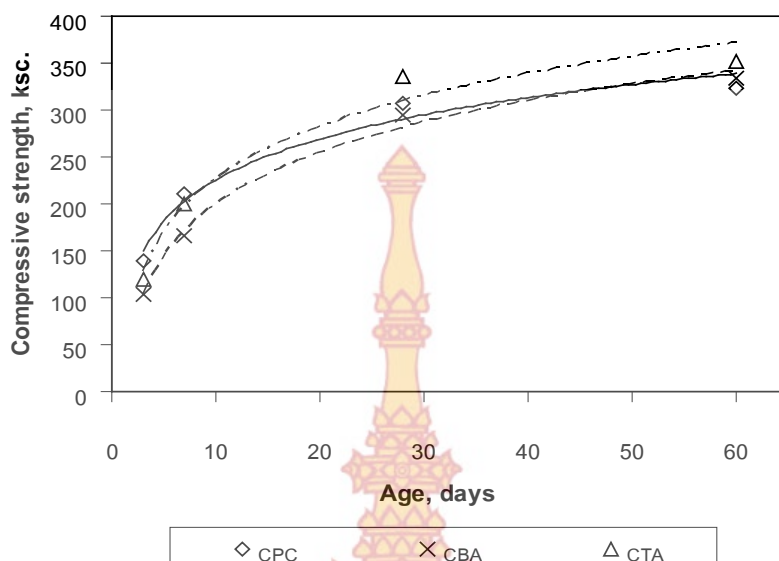
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของมอร์ตาร์

4.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ กำลังอัด และกำลังดัดของมอร์ตาร์แสดงในตารางที่ 4.4 และแสดงการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ในรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบกำลังอัดและกำลังดัด

มอร์ตาร์	w/b	การไหล (ร้อยละ)	กำลังอัด, กก./ซม. ² (ร้อยละกำลัง)				กำลังดัด, กก./ซม. ² (ร้อยละกำลัง)	
			3 วัน	7 วัน	28 วัน	60 วัน	28 วัน	60 วัน
CPC	0.72	109	140 (100)	210 (100)	308 (100)	324 (100)	59 (100)	64 (100)
CBA	0.77	108	104 (74)	166 (79)	294 (95)	334 (103)	57 (96)	67 (106)
CTA	0.72	112	120 (85)	200 (95)	335 (108)	352 (110)	66 (111)	73 (114)



รูปที่ 4.3 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ใช้ในส่วนผสมมอร์ตาร์ CPC และมอร์ตาร์ CTA เท่ากับ 0.72 โดยมอร์ตาร์มีค่าการไหลเท่ากับร้อยละ 109 และร้อยละ 112 ตามลำดับ ดังนั้น ถ้าชานอ้อยผสมเข้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะไม่มีผลต่อกระทบต่อการไหลของมอร์ตาร์ และผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดมอร์ตาร์ CTA ที่อายุ 3 วัน และ 7 วัน ต่ำกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ CPC ซึ่งเป็นมอร์ตาร์ควบคุมเพียงเล็กน้อยและจะพัฒนากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ CPC ที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน นอกจากนี้มอร์ตาร์ CTA มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ CBA ตลอดอายุการทดสอบอีกด้วย มอร์ตาร์ CTA มีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 3 วัน และ 7 วัน เท่ากับร้อยละ 85 และร้อยละ 95 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ CPC ซึ่งมีกำลังอัดเท่ากับ 140 กก./ซม.² และ 210 กก./ซม.² ตามลำดับ และมอร์ตาร์ CTA มีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน เท่ากับร้อยละ 108 และร้อยละ 110 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ CPC ซึ่งมีกำลังอัดเท่ากับ 308 กก./ซม.² และ 324 กก./ซม.² ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบกำลังอัดเป็นไปในแนวทางเดียวกับกำลังอัด กล่าวคือมอร์ตาร์ CTA มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ CPC ที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าชานอ้อยผสมเข้าลอยมีผลต่อการลดกำลังของมอร์ตาร์ในช่วงแรก กำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมในช่วงแรกมีผลมาจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่ลดลง แต่การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นในเวลาต่อมา ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน ของมอร์ตาร์ CTA สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมแสดงให้เห็นถึงการปฏิกิริยาปอซโซลานของถ้าชานอ้อยผสมเข้าลอยสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (สาโรจน์ และคณะ, 2549)

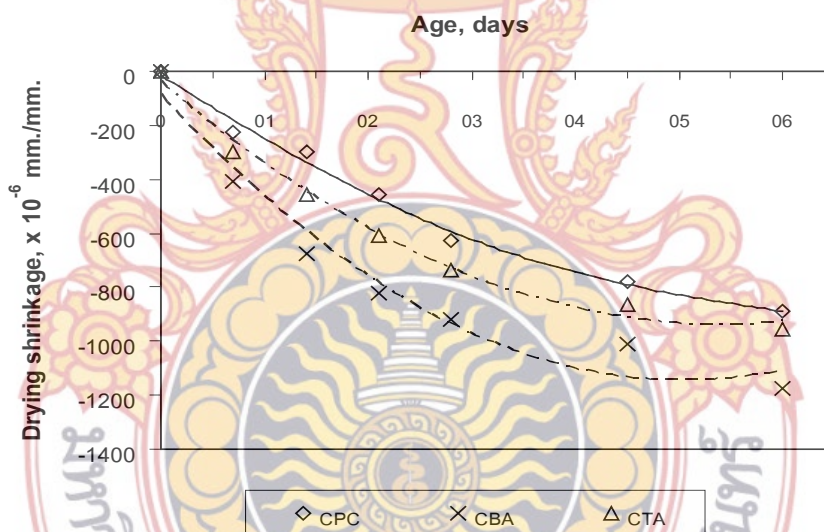
ซึ่งพบว่าถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยมีผลกระทบต่อกำลังอัดทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นในระยะยาว

4.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความคงทนของมอร์ตาร์

ก. การหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.5 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแห้งกับเวลาในรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์

มอร์ตาร์	w/b	การไหล (ร้อยละ)	ค่าการหดตัวของมอร์ตาร์; $\times 10^{-6}$ mm./mm.					
			7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน	45 วัน	60 วัน
CPC	0.54	108	- 224	- 297	- 459	- 624	- 782	- 891
CBA	0.58	107	- 410	- 674	- 821	- 920	- 1,009	- 1,173
CTA	0.54	110	- 296	- 455	- 610	- 738	- 862	- 953



รูปที่ 4.4 การหดตัวแห้งของมอร์ตาร์

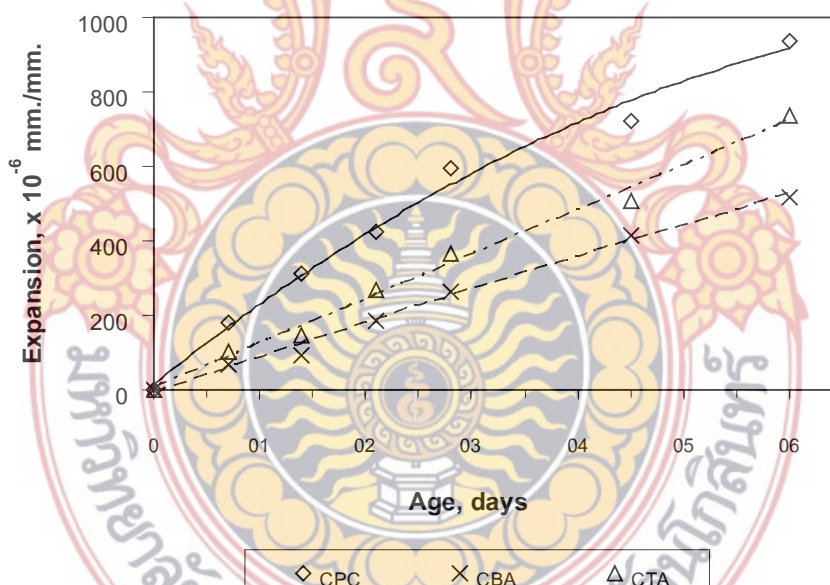
การหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ CTA สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม CPC เล็กน้อยตลอดอายุทดสอบ แต่มีค่าการหดตัวแห้งต่ำกว่ามอร์ตาร์ CBA กลไกการหดตัวแห้งเริ่มจากการสูญเสียน้ำอันเกิดจากการระเหยของน้ำในแท่งตัวอย่างทดสอบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่เรียกว่าการหดตัวแห้ง เมื่อพิจารณามอร์ตาร์ CBA จะพบว่ามีค่าการหดตัวแห้งสูงสุด เนื่องจากมีความต้องการน้ำในส่วนผสมมากกว่ามอร์ตาร์ประเภทอื่นๆ ดังนั้นการใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจึงมีผลต่อการหดตัวแห้งซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ณพงศธร และคณะ 2548) อย่างไรก็ตาม

เมื่อใช้เถ้าลอยผสมรวมโดยงานวิจัยนี้ใช้เถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก พบว่าสามารถช่วยลดการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ได้ เนื่องจากเถ้าลอยช่วยลดความต้องการน้ำในส่วนผสมจึงทำให้การหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ลดลง

ข. การขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากซัลเฟต ผลการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากการแช่ตัวอย่างทดสอบในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แสดงในตารางที่ 4.6 และแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาในรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.6 การขยายตัวของมอร์ตาร์

มอร์ตาร์	w/b	การไหล (ร้อยละ)	ค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์, $\times 10^{-6}$ mm./mm.					
			7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน	42 วัน	60 วัน
CPC	0.72	109	181	311	425	595	722	937
CBA	0.77	108	67	95	183	265	415	516
CTA	0.72	112	101	145	270	366	508	737



รูปที่ 4.5 การขยายตัวของมอร์ตาร์

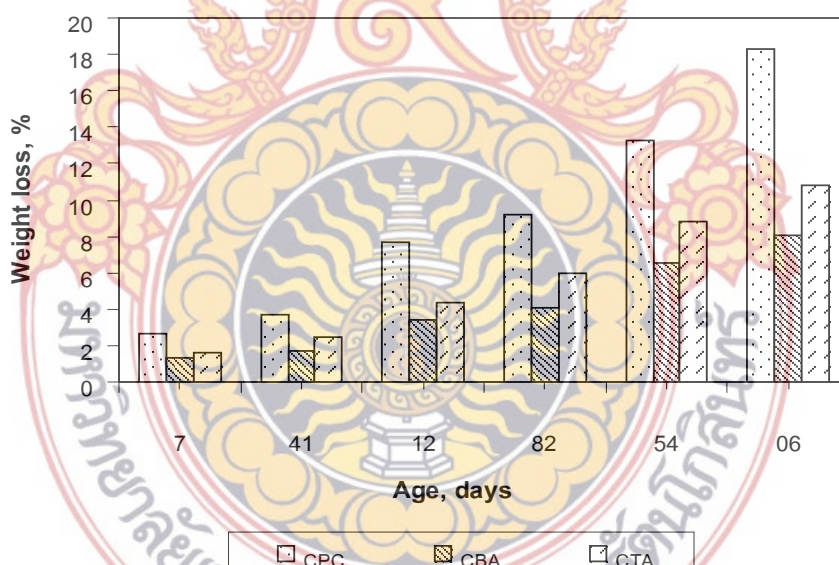
การขยายตัวของมอร์ตาร์ CTA ต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม CPC ตลอดอายุทดสอบ เนื่องจากเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยเป็นสารปอซโซลานเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะช่วยลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และส่งผลให้มอร์ตาร์มีความที่บ้น้ำสูงขึ้น ทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 น้อยลงจึงทำให้การขยายตัว

ของมอร์ตาร์ลดลง นอกจากนี้ถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) น้อยกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยจึงทำให้ CaO และ SO₃ ลดลง ซึ่ง CaO และ SO₃ นี้เองที่มีผลต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์ และการทดสอบในงานวิจัยนี้พบว่ามอร์ตาร์ CBA มีค่าการขยายตัวต่ำที่สุด

ค. การต้านทานกรดซัลฟูริก ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ เนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกแสดงในตารางที่ 4.7 และแสดงกราฟเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ในรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.7 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์เนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก

มอร์ตาร์	w/b	การไหล (ร้อยละ)	การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ (ร้อยละ)					
			7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน	42 วัน	60 วัน
CPC	0.72	109	2.63	3.73	7.68	9.23	13.27	18.32
CBA	0.77	108	1.28	1.68	3.43	4.11	6.53	8.09
CTA	0.72	112	1.62	2.46	4.35	5.97	8.84	10.85



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์จากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก

กรดซัลฟูริกเมื่อทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)₂ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่ายิปซั่ม (CaSO₄) ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์ที่ผิวของตัวอย่างทดสอบถูกกัดกร่อนหลุดร่อนได้ง่าย การใช้ถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะช่วยลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) จึง

ด้านทานการกั้ดกร่อนได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ CTA จึงน้อยกว่ามอร์ตาร์ CPC และการทดสอบในงานวิจัยนี้พบว่ามอร์ตาร์ CBA ซึ่งมีค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการกั้ดกร่อนของกรดซัลฟูริกน้อยที่สุด ซึ่งจากงานวิจัยกำลังและโครงสร้างทาง จุลภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอย (สาโรจน์ และคณะ, 2550) สรุปว่าผลของ ปฏิกริยาปอซโซลานของเถ้าขานอ้อยและเถ้าขานอ้อยผสมเถ้าลอยมีผลทำให้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ลดลง



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

จากการศึกษากำลังและความคงทนของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยโดยมีปริมาณเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 เถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนเท่ากับร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก มีส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพจัดเป็นปอซโซลานประเภท N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 สามารถนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำวัสดุก่อสร้างได้

5.1.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์ CTA ต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม CPC ในช่วงแรกที่อายุ 3 วัน และ 7 วัน แต่สามารถพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นในระยะยาว โดยกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม CPC และมอร์ตาร์ CTA มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ CBA ตลอดอายุทดสอบ ส่วนกำลังดีดมอร์ตาร์ CTA เป็นไปในแนวทางเดียวกับกำลังอัด โดยกำลังดีดที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน ของมอร์ตาร์ CTA สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม CPC และมอร์ตาร์ CBA

5.1.3 การหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ CTA สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม CPC เล็กน้อยตลอดอายุทดสอบ แต่ต่ำกว่ามอร์ตาร์ CBA การใช้เถ้าลอยผสมกับเถ้าชานอ้อยสามารถลดการหดตัวแห้งได้

5.1.4 มอร์ตาร์ CTA มีค่าการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกีดกร่อนของกรดซัลฟูริก น้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม CPC ตลอดอายุทดสอบ การใช้เถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยลดปริมาณ Ca(OH)_2 ส่งผลให้การขยายตัวของมอร์ตาร์ลดลงและต้านทานการกีดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ดีขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาความคงทนของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอย ได้แก่ การหดตัวแห้ง การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกีดกร่อนของกรดซัลฟูริก ในระยะยาวโดยใช้เวลาทดสอบไม่น้อยกว่าเวลา 1 ปี

5.2.2 การศึกษาครั้งต่อไปควรศึกษาคูณสมบัติของมอร์ตาร์ด้านความคงทนเพิ่มเติม เช่น การต้านทานการซึมผ่านน้ำ และผลกระทบของเถ้าชานอ้อยผสมเถ้าลอยต่อการซึมผ่านของคลอไรด์

บรรณานุกรม

คาวี มณฑการติวงศ์, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2549. กำลังอัดและความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อย การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย, จังหวัดอุดรธานี. MAT 92.

ณพงษ์ ลิขิตศรีไพบูลย์, นันทชัย ชูศิลป์, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2549. การศึกษาเถ้าชานอ้อยที่มี LOI ต่างกันต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11, จังหวัดภูเก็ต. MAT-066.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย. หน้า 293.

ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. <http://www.oae.go.th>

ลักกนาท คงบุญ, สุพจน์ วรรณะบุรณ์, อภิชาติ ดาวเรือง, 2548. คุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตผสมเถ้าชานอ้อย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตรศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.

สาโรจน์ ดำรงศีล และสุวิมล สัจจวาณิชย์, 2549. ผลกระทบของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11, จังหวัดภูเก็ต. MAT-039.

สาโรจน์ ดำรงศีล และสุวิมล สัจจวาณิชย์, 2549. ผลกระทบของวิธีการผสมเถ้าชานอ้อยกับเถ้าลอยต่อดัชนีกำลังของมอร์ตาร์. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2, สมาคมคอนกรีตไทย, จังหวัดอุดรธานี. MAT 92.

สาโรจน์ ดำรงศีล และสุวิมล สัจจวาณิชย์, 2549. ผลกระทบของการใช้เถ้าชานอ้อยร่วมกับเถ้าลอยต่อกำลังอัดและการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2, สมาคมคอนกรีตไทย, จังหวัดอุดรธานี. MAT 98.

สาโรจน์ ดำรงค์ศีล และรณกร เทพวงษ์สุวิมล, 2550. กำลังและโครงสร้างทางจุลภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอย. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.

สุชีรา กุลชนะประสิทธิ์ และชูชัย สุจิรวงศ์, 2548. ผลกระทบของเถ้าขานอ้อยต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, จังหวัดชลบุรี. MAT-67.

สุวิมล สัจจวาณิชย์, 2546. ผลกระทบของเถ้าลอยในลักษณะวัสดุประสาน. วิศวกรรมสาร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 18-22.

สุวิมล สัจจวาณิชย์ และอาทิมา ดวงจันทร์, 2547. ธรรมชาติความเป็นปอซโซลานของเถ้าขานอ้อยและความต้องการน้ำ. การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 2, จังหวัดเชียงใหม่. หน้า 118-120.

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. <http://www.eppo.go.th>

Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., Sirivatnanon, V., 2004. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. Cement and concrete research, Vol. 34, pp. 1087-1092.

Martirene Hernandez, J.F., Middendorf, B., Gehrke, M., Budelmann, H., 1998. Use of Weastes of the Sugar Industry as Pozzolana in Lime-Pozzolana Binders: Study of Reaction. Cement and concrete research, Vol. 28, pp. 1525-1536.

Mindess, S. and Young, J.F., 1981. Concrete. Prancis-Hall, Englewood Cliff, New Jersey.

Shahriar Mahbub Alam., 1987. Use of Sugar Cane Bagasse as Pozzolana. Master Engineering Thesis, A.I.T., Thailand.

Singh, N.B., Singh, V.D., and Sarita Rai., 2000. Hydration of Bagasse Ash-Blended Portland Cement. Cement and concrete research, Vol. 30, pp. 1485-1488.

Srinivasan, S., 1986. Bagasse Ash–A Potential Pozzolan Material. Appropriate
Tecnology, Vol. 12, No. 4.



ภาคผนวก

ผลการทดสอบกำลังและความคงทนของมอร์ตาร์



ตารางที่ ผ.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน

ประเภทมอร์ตาร์	ตัวอย่างที่	พื้นที่หน้าตัด	แรงกด (กก.)	หน่วยแรง (กก./ซม. ²)	ค่าเฉลี่ย
CPC	1	25.43	3,643	143.26	141.23
	2	25.60	3,554	138.83	
	3	25.14	3,575	142.20	
	4	25.90	3,642	140.62	
CBA	1	25.60	2,780	108.59	104.59
	2	25.87	2,642	102.13	
	3	25.58	2,605	101.84	
	4	25.42	2,690	105.82	
CTA	1	25.25	3,125	123.76	120.73
	2	25.34	3,089	121.90	
	3	25.41	2,974	117.04	
	4	25.50	3,065	120.20	

ตารางที่ ผ.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน

ประเภทมอร์ตาร์	ตัวอย่างที่	พื้นที่หน้าตัด	แรงกด (กก.)	หน่วยแรง (กก./ซม. ²)	ค่าเฉลี่ย
CPC	1	25.48	5,240	205.65	210.05
	2	25.36	5,436	214.35	
	3	25.65	5,540	215.98	
	4	25.76	5,190	201.48	
	5	25.19	5,360	212.78	
CBA	1	25.24	4,265	168.98	164.21
	2	25.36	3,956	155.99	
	3	25.22	4,250	168.52	
	4	25.42	4,185	164.63	
	5	25.15	4,098	162.94	
CTA	1	25.21	4,855	192.58	200.68
	2	25.32	5,180	204.58	
	3	25.38	5,172	203.78	
	4	25.64	5,090	198.52	
	5	25.72	5,245	203.93	

ตารางที่ ผ.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน

ประเภท มอร์ตาร์	ตัวอย่างที่	พื้นที่หน้าตัด	แรงกด (กก.)	หน่วยแรง (กก./ซม. ²)	ค่าเฉลี่ย
CPC	1	25.23	7,800	309.16	308.81
	2	25.14	7,685	305.69	
	3	25.38	7,920	312.06	
	4	25.41	7,835	308.34	
CBA	1	25.32	7,415	292.85	294.98
	2	25.20	7,435	295.04	
	3	25.26	7,520	297.70	
	4	25.43	7,485	294.34	
CTA	1	25.08	8,425	335.93	335.16
	2	25.23	8,410	333.33	
	3	25.17	8,565	340.29	
	4	25.52	8,450	331.11	

ตารางที่ ผ.4 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 60 วัน

ประเภท มอร์ตาร์	ตัวอย่างที่	พื้นที่หน้าตัด	แรงกด (กก.)	หน่วยแรง (กก./ซม. ²)	ค่าเฉลี่ย
CPC	1	25.28	8,140	321.99	324.69
	2	25.17	8,355	331.94	
	3	25.05	8,225	328.34	
	4	25.24	8,095	320.72	
	5	25.12	8,050	320.46	
CBA	1	25.21	8,460	335.58	334.10
	2	25.05	8,555	341.52	
	3	25.18	8,325	330.62	
	4	25.24	8,260	327.26	
	5	25.02	8,395	335.53	
CTA	1	25.27	8,890	351.80	352.95
	2	25.31	9,045	357.37	
	3	25.28	9,120	360.76	
	4	25.36	8,815	347.59	
	5	25.17	8,740	347.24	

ตารางที่ ผ.5 กำลังตัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน

ประเภท มอร์ตาร์	ตัวอย่างที่	พื้นที่หน้าตัด	แรงกด (กก.)	หน่วยแรง (กก./ซม. ²)	ค่าเฉลี่ย
CPC	1	4.65x4.04	218	59.41	58.78
	2	4.02x4.10	226	60.70	
	3	4.03x4.15	214	55.96	
	4	4.02x4.11	221	59.06	
CBA	1	4.10x4.10	219	57.19	57.83
	2	4.02x4.08	215	57.80	
	3	4.06x4.17	223	56.85	
	4	4.05x4.10	225	59.48	
CTA	1	4.04x4.15	264	68.86	66.66
	2	4.05x4.18	256	65.66	
	3	4.04x4.20	267	67.99	
	4	4.03x4.19	250	64.13	

ตารางที่ ผ.6 กำลังตัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 60 วัน

ประเภท มอร์ตาร์	ตัวอย่างที่	พื้นที่หน้าตัด	แรงกด (กก.)	หน่วยแรง (กก./ซม. ²)	ค่าเฉลี่ย
CPC	1	4.05x4.18	267	67.91	63.36
	2	4.06x4.15	245	63.06	
	3	4.07x4.17	242	61.54	
	4	4.05x4.17	252	64.40	
	5	4.06x4.18	236	59.88	
CBA	1	4.04x4.14	251	65.24	67.73
	2	4.06x4.18	268	68.00	
	3	4.05x4.18	271	68.93	
	4	4.07x4.12	258	67.22	
	5	4.05x4.10	262	69.27	
CTA	1	4.02x4.10	282	75.11	75.85
	2	4.05x4.15	277	71.48	
	3	4.07x4.16	312	79.73	
	4	4.03x4.12	287	75.51	
	5	4.05x4.15	300	77.41	

ตารางที่ ผ.7 ผลการทดสอบการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ CPC

Specimen No.	1	2	3	4
Length of specimen: 3 days (mm.)	303.895	304.886	305.292	304.274
Length of specimen: 7 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.824 -233	304.799 -285	305.218 -242	304.232 -138
Length of specimen: 14 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.797 -322	304.765 -396	305.198 -307	304.224 -164
Length of specimen: 21 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.754 -463	304.702 -603	305.146 -478	304.185 -292
Length of specimen: 28 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.682 -700	304.681 -672	305.104 -615	304.118 -512
Length of specimen: 45 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.589 -1006	304.602 -931	305.098 -635	304.104 -558
Length of specimen: 60 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.542 -1161	304.593 -961	305.058 -766	304.068 -677

ตารางที่ ผ.8 ผลการทดสอบการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ CBA

Specimen No.	1	2	3	4
Length of specimen: 3 days (mm.)	303.488	305.072	304.253	304.854
Length of specimen: 7 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.392 -316	304.915 -514	304.126 -417	304.734 -393
Length of specimen: 14 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.294 -639	304.865 -678	303.996 -844	304.690 -537
Length of specimen: 21 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.248 -790	304.830 -793	303.948 -1002	304.640 -701
Length of specimen: 28 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.223 -873	304.806 -871	303.915 -1,110	304.602 -826
Length of specimen: 45 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.192 -975	304.764 -1,009	303.907 -1,137	304.575 -915
Length of specimen: 60 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.112 -1,238	304.706 -1,199	303.894 -1,179	304.525 -1,079

ตารางที่ ผ.9 ผลการทดสอบการหดตัวของมอร์ตาร์ CTA

Specimen No.	1	2	3	4
Length of specimen: 3 days (mm.)	304.056	303.834	303.308	303.287
Length of specimen: 7 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.940 -381	303.775 -194	303.228 -263	303.182 -346
Length of specimen: 14 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.902 -506	303.714 -394	303.187 -398	303.128 -524
Length of specimen: 21 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.856 -657	303.655 -589	303.130 -586	303.102 -609
Length of specimen: 28 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.817 -786	303.604 -756	303.078 -758	303.089 -652
Length of specimen: 45 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.785 -891	303.596 -783	303.034 -903	303.022 -873
Length of specimen: 60 days (mm.) Drying shrinkage; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	303.724 -1091	303.567 -878	303.012 -975	302.981 -1,008

ตารางที่ ผ.10 ผลการทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์ CPC

Specimen No.	1	2	3	4
Length of specimen: 3 days (mm.)	304.777	304.634	303.714	304.534
Length of specimen: 7 days (mm.) Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	304.824 154	304.693 193	303.761 154	304.602 223
Length of specimen: 14 days (mm.) Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	304.892 377	304.750 380	303.779 214	304.618 275
Length of specimen: 21 days (mm.) Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	304.914 449	304.785 495	303.821 352	304.658 407
Length of specimen: 28 days (mm.) Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	304.998 725	304.809 574	303.886 566	304.692 518
Length of specimen: 45 days (mm.) Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	305.032 836	304.874 787	303.921 681	304.712 584
Length of specimen: 60 days (mm.) Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	305.084 1,007	304.926 958	304.097 1,261	304.792 847

ตารางที่ ผ.11 ผลการทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์ CBA

Specimen No.	1	2	3	4
Length of specimen: 3 days (mm.)	303.682	304.001	304.668	304.773
Length of specimen: 7 days (mm.)	303.705	304.058	304.686	304.794
Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	75	187	59	68
Length of specimen: 14 days (mm.)	303.714	304.080	304.692	304.805
Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	105	259	78	104
Length of specimen: 21 days (mm.)	303.764	304.091	304.705	304.822
Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	270	296	121	160
Length of specimen: 28 days (mm.)	303.812	304.110	304.724	304.851
Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	428	358	183	255
Length of specimen: 45 days (mm.)	303.874	304.181	304.758	304.883
Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	632	592	295	360
Length of specimen: 60 days (mm.)	303.925	304.209	304.788	304.917
Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	800	684	393	472

ตารางที่ ผ.12 ผลการทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์ CTA

Specimen No.	1	2	3	4
Length of specimen: 3 days (mm.)	303.624	304.523	304.480	304.841
Length of specimen: 7 days (mm.)	303.684	304.546	304.508	304.883
Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	197	75	91	137
Length of specimen: 14 days (mm.)	303.706	304.560	304.532	304.917
Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	270	121	170	249
Length of specimen: 21 days (mm.)	303.726	304.583	304.573	304.935
Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	335	197	305	308
Length of specimen: 28 days (mm.)	303.782	304.617	304.594	304.968
Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	520	308	374	416
Length of specimen: 45 days (mm.)	303.801	304.659	304.632	304.996
Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	582	446	499	508
Length of specimen: 60 days (mm.)	303.856	304.734	304.705	305.072
Expansion; $\times 10^{-6}$ mm./mm.	764	692	738	757

ตารางที่ ผ.13 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ CPC

Specimen No.	1	2	3	4	5	6
Weight of specimen:	276.2	278.2	276.3	273.6	275.4	269.7
Weight of specimen: 7 days (g)	270.8	269.7	268.6	265.6	269.1	262.1
Weight loss (%)	1.95	3.05	2.78	2.92	2.28	2.81
Weight of specimen: 14 days (g)	269.4	266.4	265.5	262.3	265.0	259.1
Weight loss (%)	2.46	4.24	3.90	4.13	3.77	3.93
Weight of specimen: 21 days (g)	257.3	254.7	256.6	251.9	253.7	248.4
Weight loss (%)	6.84	8.44	7.12	7.93	7.87	7.89
Weight of specimen: 28 days (g)	253.4	249.7	252.0	246.3	250.1	245.5
Weight loss (%)	8.25	10.24	8.79	9.97	9.18	8.97
Weight of specimen: 45 days (g)	242.4	238.1	241.6	235.1	238.4	234.7
Weight loss (%)	12.23	14.41	12.55	14.07	13.43	12.97
Weight of specimen: 60 days (g)	229.1	224.5	227.5	221.2	225.4	219.5
Weight loss (%)	17.05	19.30	17.66	19.15	18.15	18.61

ตารางที่ ผ.14 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ CBA

Specimen No.	1	2	3	4	5	6
Weight of specimen:	262.8	269.4	264.3	272.8	270.5	266.7
Weight of specimen: 7 days (g)	260.6	267.3	261.2	268.5	266.6	261.5
Weight loss (%)	0.83	0.77	1.17	1.57	1.44	1.94
Weight of specimen: 14 days (g)	259.5	266.1	260.3	267.6	265.2	260.6
Weight loss (%)	1.25	1.22	1.51	1.90	1.95	2.28
Weight of specimen: 21 days (g)	255.2	260.9	254.7	264.6	259.5	256.3
Weight loss (%)	2.89	3.15	3.63	3.00	4.06	3.89
Weight of specimen: 28 days (g)	253.9	258.8	252.4	261.8	257.6	253.0
Weight loss (%)	3.38	3.93	4.50	4.02	4.76	5.12
Weight of specimen: 45 days (g)	248.0	251.3	247.6	254.1	252.8	247.6
Weight loss (%)	5.63	6.71	6.31	6.85	6.54	7.16
Weight of specimen: 60 days (g)	242.5	246.9	243.4	250.5	248.6	244.5
Weight loss (%)	7.72	8.35	7.90	8.17	8.09	8.32

ตารางที่ ผ.15 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ CTA

Specimen No.	1	2	3	4	5	6
Weight of specimen:	274.4	268.4	271.8	273.5	269.7	271.2
Weight of specimen: 7 days (g)	269.1	262.8	267.5	270.1	264.6	266.7
Weight loss (%)	1.93	2.08	1.58	1.24	1.89	1.65
Weight of specimen: 14 days (g)	268.7	261.5	266.1	268.0	261.5	263.0
Weight loss (%)	2.07	2.57	2.09	2.01	3.04	3.02
Weight of specimen: 21 days (g)	263.7	255.4	260.7	261.6	257.3	257.2
Weight loss (%)	3.89	4.84	4.08	4.35	4.59	5.16
Weight of specimen: 28 days (g)	260.3	251.6	256.5	258.7	252.6	251.9
Weight loss (%)	5.13	6.25	5.62	5.41	6.34	7.11
Weight of specimen: 45 days (g)	252.3	244.9	246.0	250.8	242.9	245.0
Weight loss (%)	8.05	8.75	9.49	8.29	9.93	9.66
Weight of specimen: 60 days (g)	245.4	237.9	242.7	245.8	237.3	239.9
Weight loss (%)	10.56	11.36	10.70	10.12	12.01	11.54

