รายงานการวิจัย

คอนกรีตผสมฝุ่นหินจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

Concrete Mixed with Dust Stone from Asphalt Concrete Mixing Plant

ชูเกียรติ ชูสกุล

Chookiat Choosakul

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๒

คอนกรีตผสมฝุ่นหินจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

ชูเกียรติ ชูสกุล

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตโดยใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลท์คอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 บางส่วน โดยใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตแอสฟัลท์คอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.60 โดยศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน เปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1 และศึกษาคุณสมบัติการหดตัวของคอนกรีต จากการศึกษาพบว่า คุณสมบัติของฝุ่นหินเหลือทิ้งมีความละเอียดต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ (ถพ.) เท่ากับ 2.71 ในส่วนคุณสมบัติของมอร์ตาร์พบว่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงตามอัตราส่วนการเพิ่มของฝุ่นหินเหลือทิ้ง โดยอัตราส่วนการแทนที่ของฝุ่นหินเหลือทิ้ง 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ผ่านตามเกณฑ์ของมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1 ที่อายุ 3, 7, และ 28 วัน แต่หากพิจารณาที่อายุ 28 วัน ตามเกณฑ์ของมาตรฐาน มอก. 849-2556 อัตราส่วนการแทนที่ 20 เปอร์เซ็นต์ จะมีความเหมาะสมมากที่สุด โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 285 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,095 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสเท่ากับ 312 ไมโครเมตร และค่าการหดตัวรวมเท่ากับ 699 ไมโครเมตร

คำสำคัญ: คอนกรีต กำลังรับแรงอัด ฝุ่นหินเหลือทิ้ง การหดตัวออโตจีเนียส การหดตัวรวม

Concrete Mixed with Dust Stone from Asphalt Concrete Mixing Plant

Chookiat Choosakul

Abstract

This research studies the property of Concrete by using waste stone dust from the asphalt mixing process to replace some Portland Cement type I in the ratio of 0, 10, 20, 30, 40 and 50 percent by weight. Using the water to binder ratio (W / B) equal to 0.60 by studying the compressive strength of mortars at the age of 3, 7 and 28, compared with TIS. 15 Volume 1 and study the shrinkage properties of concrete. The study found that the property of waste stone dust has lower resolution than Portland Cement type I, with a specific gravity equals to 2.71. As for the property of mortar, compressive strength reduces in accordance with the increase ratio of dust waste stone by the ratio of rock dust leftover which is 10 and 20 percent that passes the standards of TIS. 15 Volume 1 at the age of 3, 7, and 28 days. If by considering at the age of 28 days follow the standards of TIS. 849-2556, the ratio of 20 percent is very appropriate by having compressive strength equals to 285 kg/cm^2 the density is 2,095 kg/m^3 autogenous shrinkage is 312 microns and total shrinkage is 699 microns.

Keywords: Concrete, Compressive Strength, Waste Stone Dust, Autogenous shrinkage, Total shrinkage

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “คอนกรีตผสมฝุ่นหินจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต” ได้รับการสนับสนุนงบประมาณ ทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ปีงบประมาณ ๒๕๖๒

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณนายธนากร อักษรพันธ์ นายเกรียงไกร ไกรเทพ และนางสาวผกาวรรณ หวานสนิท นักศึกษาหลักสูตรวิชาเทคโนโลยีโยธา สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ร่วมมือในการเก็บข้อมูลและทดสอบ ขอขอบคุณนายศุภวัฒน์ จันทร์ปราง และหลักสูตรวิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูเกียรติ ชูสกุล
หัวหน้าโครงการวิจัย
กันยายน ๒๕๖๓

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและการนำโครงการวิจัยไปใช้ประโยชน์	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่สำคัญและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 มอร์ตาร์ (Mortar)	7
2.2 ปูนซีเมนต์	10
2.3 ปอซโซลาน (Pozzolan)	15
2.4 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 เตรียมวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	29
3.2 ทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์	29
3.3 ทดสอบคุณสมบัติของฝุ่นหินจากโรงงานแอสฟัลต์คอนกรีต	30
3.4 ทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์	30
3.5 การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมของมอร์ตาร์	32
3.6 ทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์	33
3.7 ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต	33
3.8 การถอดแบบและบ่มคอนกรีต	34
3.9 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 สรุปผลการทดสอบ วิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินเหลือทิ้ง 35

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ 38

4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ 38

4.4 ผลการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีต 44

4.5 ผลการทดสอบการหดตัวรวมของคอนกรีต 45

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการศึกษา 47

5.2 ข้อเสนอแนะ 48

บรรณานุกรม 49

ภาคผนวก ผลลัพธ์ (OUTPUT) ที่ได้จากโครงการวิจัย 53

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	เกณฑ์กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดมาตรฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตาม มอก. 15 เล่ม 1	7
2-2	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	11
2-3	ข้อกำหนดคุณสมบัติทางด้านกายภาพด้านเคมี และข้อกำหนดเสริมของวัสดุปอซโซลาน ประเภทต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM C 618	16
2-4	ขนาดของมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้	19
3-1	ปริมาณของวัสดุที่ใช้ผสมของมอร์ต้า ตาม มอก.15 เล่ม 12 2532	32
3-2	สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์	33
3-3	เกณฑ์กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดมาตรฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์ (มอก. 15 เล่ม 1 2547)	34
4-1	องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินเหลือทิ้ง	36
4-2	ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และฝุ่นหินเหลือทิ้ง	37
4-3	ผลการทดสอบความข้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้ง	37
4-4	ผลการทดสอบระยะการก่อตัวเริ่มต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้ง	38
4-5	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียด	38
4-6	ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน	40
4-7	ผลการทดสอบการรับกำลังอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน	43

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	ฝุ่นหินที่ออกจากบ่อดักฝุ่น	2
1-2	กองฝุ่นหินเหลือทิ้งในบริเวณโรงงานผลิตแอสฟัลท์คอนกรีต	2
2-1	แผนภาพกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	13
2-2	ถังเก็บแอสฟัลต์และยุ้งเก็บวัสดุมวลรวม	18
2-3	ยุ้งหินเย็น	20
2-4	หม้อเผา	20
2-5	ชุดตะแกรงร่อน	21
2-6	ยุ้งหินร้อน	22
2-7	เครื่องเก็บฝุ่น	22
2-8	กระบวนการการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต	23
4-1	ลักษณะสีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และฝุ่นหินเหลือทิ้ง	35
4-2	รูปขยายอนุภาคฝุ่นหินเหลือทิ้ง ขนาด 500 และ 1,500 เท่า	36
4-3	ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน	39
4-4	ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน	39
4-5	ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน	40
4-6	กราฟค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน	41
4-7	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน	41
4-8	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน	42
4-9	ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน	42
4-10	กราฟค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน	43
4-11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีตกับอายุการบ่ม	44
4-12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวรวมของคอนกรีตกับอายุการบ่ม	45

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันมีการก่อสร้างอาคาร บ้านพักอาศัยที่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากตามปริมาณประชากรในประเทศ จึงทำให้การผลิตปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น แนวโน้มอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในปี 2559 คาดว่าจะปรับตัวดีขึ้นเมื่อเทียบกับปีก่อน เนื่องจากการขยายตัวของเศรษฐกิจในประเทศ ซึ่งเป็นผลมาจากนโยบายกระตุ้นเศรษฐกิจของรัฐบาล ทั้งการเร่งรัดการเบิกจ่ายเงินงบประมาณและการเร่งลงทุนก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานต่อเพื่อ เปิดพื้นที่ใหม่ให้ภาคเอกชนได้ขยายการลงทุนในโครงการอสังหาริมทรัพย์บนที่ดินที่ยังมีราคาไม่สูงมากเท่าที่ดินในเขตเมืองหรือในบริเวณแนวรถไฟฟ้าที่เปิดใช้งานแล้วสำหรับการส่งออกมีแนวโน้มปรับตัวดีขึ้นเช่นกันเนื่องจากประเทศคู่ค้าของไทยยังคงมีความต้องการใช้ปูนซีเมนต์จากไทยในปริมาณมากเพื่อรองรับการขยายตัวของเศรษฐกิจในประเทศตนที่กำลังเติบโตอย่างต่อเนื่อง ซึ่งถึงแม้ว่าความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ในประเทศจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในปี 2559 ก็จะไม่กระทบต่อปริมาณการส่งออกปูนซีเมนต์เนื่องจากไทยมีกำลังการผลิตที่เกินความต้องการใช้ในประเทศค่อนข้างมากอยู่แล้ว (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2559)

ในปัจจุบันจึงทำให้มีการนำวัสดุต่าง ๆ มาทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในงานอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย และวัสดุจำพวกปอซโซลานอื่น ๆ เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์รวมถึงปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสอนุรักษ์พลังงาน สำหรับประเทศไทยมีโรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตหลายโรงงาน โดยเกิดจากการนำหินหลายขนาดมาคละกัน ทำการเผารวมกันที่อุณหภูมิ 150-170 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะผสมน้ำยางมะตอยลงไป จึงทำให้เกิดฝุ่นหินที่ได้จากกระบวนการผสมแอสฟัลต์ ซึ่งฝุ่นหินเหลือทิ้งที่เหลือจากการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีขนาดเล็กซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ซึ่งไม่สามารถผสมกับยางมะตอยได้ หินที่นำมาการใช้ในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งเป็น หินปูน (limestone) เป็นหินในกลุ่มหินตะกอน มีชื่อวิทยาศาสตร์ที่รู้จักกันในหมู่นักธรณีว่า แร่แคลไซต์ (Calcite)($CaCO_3$) เป็นหินตะกอนคาร์บอเนต เกิดจากการทับถมของตะกอนคาร์บอเนตในท้องทะเล ทั้งจากสารอนินทรีย์ และซากสิ่งมีชีวิต เช่น ปะการัง และกระดองของสัตว์ทะเล ซึ่งถับถมกันภายใต้ความกดดันและตกผลึกใหม่เป็นแร่แคลไซต์จึงทำปฏิกิริยากับกรด เนื้อแน่นละเอียดทึบ มีสีออกขาว เทา ชมพู หรือสีดำ ภูเขาหินปูนมักมียอดยักแหลมเป็นหน้าผา และเป็นหินที่ละลายน้ำได้ดี บริเวณที่พบ จังหวัดสระบุรี เพชรบุรี กระบี่ นครศรีธรรมราช พังงา และราชบุรี ประโยชน์ใช้ในอุตสาหกรรมการทาง ทำถนน ทางรถไฟ เผาทำปูนซีเมนต์ ปูนขาว หรือปูนกินหมาก ทำแคลเซียมคาร์ไบด์ ทำวัสดุทนไฟ ทำปุ๋ย และทำสีผม มีธาตุประกอบชนิดเดียวกับปูนซีเมนต์ โรงงาน

ผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะสร้างบ่อดักฝุ่นเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายออกสู่ชั้นบรรยากาศ แต่มีบางส่วนที่ฟุ้งกระจายออกไปซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ

ภาพที่ 1-1 ฝุ่นหินที่ออกจากบ่อดักฝุ่น

ภาพที่ 1-2 กองฝุ่นหินเหลือทิ้งในบริเวณโรงงานผลิตแอสฟัลท์คอนกรีต

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาวัสดุที่เหลือใช้จากการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามการนำฝุ่นหินเหลือทิ้งจากการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมาลดปริมาณปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตอาจจะไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุด เพียงแค่ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการลด

ปริมาณปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำทรัพยากรธรรมชาติที่เหลือใช้และลดสภาวะปัญหาสิ่งแวดล้อม ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตที่ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน

1.2.3 เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมเพื่อจะนำไปใช้ในงานคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 สำรวจ และรวบรวมตัวอย่างฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจาก หจก. โล่ทองการโยธา ณ ตำบลทุ่งกระบือ อำเภอย่านตาขาว จังหวัดตรัง

1.3.2 ศึกษาการนำฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีต

1.3.3 วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), Scanning Electronic Microscope (SEM) และThermogravimetric analysis (TGA)

1.3.4 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ในด้านความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C188, หาความละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C204 และความข้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ตามมาตรฐาน ASTM C187

1.3.5 ศึกษาผลของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตต่อระยะการก่อตัว (Setting Time) ของเพสต์ โดยศึกษาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) และการก่อตัวสุดท้าย (Final Setting Time) โดยกระทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C230

1.3.6 ศึกษาค่าการไหลแผ่ (Flow Value) ของมอร์ตาร์ โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143

1.3.7 ศึกษาการหดตัวแบบออโตจีเนียส และการหดตัวรวมของคอนกรีตตามมตรฐาน ASTM C490

1.3.8 ศึกษาผลของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM : C109 โดยทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ขนาด 50 x 50 x 50 มม. ที่อายุ 3, 7, 28, 56 และ 90 วัน ใช้สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ของฝุ่นหินเท่ากับร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1.4.1 เก็บตัวอย่างฝุ่นหินฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจาก หจก. โล่ทองการโยธา ณ ตำบลทุ่งกระบือ อำเภอย่านตาขาว จังหวัดตรัง นำมาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซียลเซียส เป็นเวลา 24ชั่วโมง

1.4.2 ถ่ายภาพขยายกำลังสูงฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

1.4.3 วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) ของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้เครื่องมือ Particle Size Analyzer ซึ่งสามารถหาขนาดเฉลี่ยของอนุภาคได้

1.4.4 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

1.4.5 วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

1.4.6 วิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง (Differential Thermal Analysis, DTA), วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารตัวอย่าง วัดการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่าง ที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาหรือกับอุณหภูมิใน Scanning Mode (Thermo Gravimetric Analyzer, TGA) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

1.4.7 ทดสอบหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier Flask) ตามมาตรฐาน ASTM C188 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำ ที่มีปริมาตรเท่าวัสดุนั้นโดยปริมาตรของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตหาได้จากการแทนที่ในน้ำมันก๊าด

1.4.8 ทดสอบหาปริมาณที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) ของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้การร่อนแบบเปียก (Wet Sieve Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C430 เป็นการวัดความละเอียดของวัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็กและไม่ละลายน้ำ ค่าที่ได้เป็นร้อยละของอัตราส่วนของน้ำหนักที่ค้างต่อน้ำหนักที่ใช้ทดสอบ

1.4.9 ทดสอบหาความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ และเพสต์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้เครื่องมือไวแคต (Vicat Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C451 โดยมีอัตราส่วนการแทนที่ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

1.4.10 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์ และเพสต์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้เครื่องมือไวแคต (Vicat Apparatus) ตามมาตรฐานASTM C191 ใช้ปริมาณน้ำที่พอเหมาะจากการทดสอบความข้นเหลวปกติ ซึ่งการก่อตัว

ระยะต้นคือระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. ภายในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจนทำให้เข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงในเพสต์ด้วยน้ำหนักของตัวเองได้

1.4.11 ทดสอบหาความสามารถในการไหลตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ และมอร์ตาร์ที่มีฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นส่วนผสมในอัตราร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ควบคุมค่าการไหลตัว (Flow) ของมอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนผสมให้มีค่าอยู่ระหว่าง 110±5 ตามมาตรฐาน ASTM C230 เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบทุกตัวอย่างมีค่าความสามารถเทได้ (Workability) ใกล้เคียงกัน

1.4.12 ทดสอบการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C490 โดยหล่อคอนกรีตแท่งตัวอย่างขนาด 7.5x7.5x28.5 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่างต่ออายุการทดสอบ ถอดแบบออกเมื่อคอนกรีตมีอายุ 24 ชั่วโมง ทำการแกะตัวอย่างการทดสอบออกจากแบบหล่อคอนกรีต หอตัวอย่างด้วยเทปอลูมิเนียมหนา 5 มม. จำนวน 2 ชั้น ตามด้วยพลาสติกใส 5 ชั้น และเทปกาวใส 2 ชั้น วัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบว่ามีน้ำระเหยออกจากตัวอย่างหรือไม่ การสูญเสียน้ำหนักต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.05 ของน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำเขาห้องควบคุมอุณหภูมิ 28±1 องศาเซลเซียส ควบคุมความชื้น 50±5 เพื่อวัดคาการเปลี่ยนแปลงความยาวและการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตซึ่งจะทำการวัดการหดตัวที่อายุ 1, 3, 7,14 และ 28 วัน

1.4.13 ทดสอบการหดตัวโดยรวมของคอนกรีตจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C490 และ ASTM C157 ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 7.5x7.5x 28.5 เซนติเมตร ใช้จำนวน 4 ตัวอย่าง ถอดแบบเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง ทำการบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำเป็นระยะเวลา 1, 3, 7,14 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อทำการบ่มตัวอย่างคอนกรีตเสร็จสิ้นแล้ว ทิ้งตัวอย่างคอนกรีตไว้ประมาณ 30 นาที ต่อจากนั้นนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตมาวัดค่าการหดตัวโดยรวมพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง

1.4.14 ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C109 และมีวิธีการผสมมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C305 โดยใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนผสมวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต) ต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำที่ใช้คือปริมาณน้ำที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ 110±5 ตามการทดสอบการไหลตัวของมอร์ตาร์ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 14, 28, 56 และ 90 วันตามลำดับ

1.4.15 หาค่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ของมอร์ตาร์ เป็นการเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในอัตราส่วนเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานกับมอร์ตาร์ที่ไม่ใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นส่วนผสม (มอร์ตาร์มาตรฐาน) ซึ่งสามารถบอกถึงความเป็นวัสดุปอซโซลานของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้ โดยมาตรฐาน ASTM C618 ได้กำหนดค่าดัชนีกำลังของวัสดุปอซโซลานไว้คือมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 และ 28 วัน

1.4.16 วิเคราะห์ผลการศึกษา

1.4.17 สรุปผลการศึกษาและจัดทำรูปเล่ม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและการนำโครงการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1.5.1 ทราบคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

1.5.2. ทราบคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตที่ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน

1.5.3 ทราบปริมาณการใช้ฝุ่นหินทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในขบวนการผลิตคอนกรีต

1.5.4 ส่งเสริมการประหยัดพลังงานในรูปของการใช้ฝุ่นหินจากกระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต ทำให้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ดีขึ้น

บทที่ 2
ทฤษฎีที่สำคัญและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอร์ตาร์ (Mortar)

มอร์ตาร์ คือ วัสดุที่ได้จากผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับทรายและน้ำ ดังภาพที่ 3 หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งคือซีเมนต์มอร์ตาร์ การรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นสิ่งที่แสดงถึงความแข็งแรงของปูนซีเมนต์นั้นมีคุณภาพดี ซึ่งในอาคารประเภทต่าง ๆ จะให้โครงสร้างที่เป็นคอนกรีต ทำหน้าที่รับแรงอัดเป็นส่วนใหญ่ ฉะนั้นคุณสมบัติที่ดีของปูนซีเมนต์และคุณสมบัติที่ดีของทรายจึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาเพื่อให้รับกำลังได้ตามที่กำหนดไว้การทดสอบการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์นี้ จะใช้ส่วนผสมตามมาตรฐานที่จะใช้ทดสอบ โดยจะใช้ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ต่อทราย 2.75 ส่วน และน้ำในปริมาณหนึ่งโดยน้ำหนัก (ปริญญาและชัย, 2556)

2.1.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์

คุณสมบัติบางประการของมอร์ตาร์จะมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต เช่น กำลังอัดของมอร์ตาร์และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับมวลรวม ซึ่งกำลังของมอร์ตาร์มีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์นี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ตาร์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความพรุน จะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กำลังของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่อย่างมากกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

การนำวัสดุปอซโซลานมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น หลักการพิจารณาว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุปอซโซลานหรือไม่ มาตรฐาน ASTM C618 ได้กำหนดไว้ว่า เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หากพบว่ามีดัชนีกำลังอัดเกินร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุ 7หรือ 28 วัน จึงถือว่าวัสดุดังกล่าวสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้

เกณฑ์กำหนดค่ากำลังอัดของก้อนลูกบาศก์ซีเมนต์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1 ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ต่อทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วน และทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 12 จะต้องไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 เกณฑ์กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดมาตรฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตาม มอก. 15 เล่ม 1

อายุทดสอบ และการบ่ม	กำลังอัดไม่ต่ำกว่า (กก./ซม.^{2})				
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2	ประเภทที่ 3	ประเภทที่ 4	ประเภทที่ 5
1 วัน ในอากาศชื้น	-	-	120	-	-
1 วัน ในอากาศชื้น+2 วันในน้ำ	120	100	240	-	80
1 วัน ในอากาศชื้น+6 วันในน้ำ	190	170	-	70	150
1 วัน ในอากาศชื้น+27 วันในน้ำ	280	280	-	170	210

ที่มา : ชูเกียรติ (2559)

ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมนี้จะได้จากการทดสอบโดยใช้โต๊ะการไหล (Flow Table) ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนผสมที่ทดสอบบนโต๊ะการไหลนี้เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 100 ถึง 115 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดิม ปริมาณน้ำที่ใช้ก็จะถือว่าอยู่ในช่วงที่ใช้ได้โดยทำให้ส่วนผสมอยู่ ณ สภาวะเหลว (Plastic Consistency) พบว่าปริมาณน้ำที่ใช้ทดลองนี้ ปกติเริ่มใช้ตั้งแต่ร้อยละ 47 ถึง 49 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ หลังจากหล่อแบบและบ่มตามเกณฑ์กำหนดก็นำมาทดสอบเมื่อลูกปูนมีอายุ 3, 7 และ 28 วัน

2.1.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์

คอนกรีตนับตั้งแต่เริ่มผสมเสร็จใหม่ ๆ ซึ่งอยู่ในสภาพเหลวจนกระทั่งสิ้นสุดอายุการใช้งานจะมีการใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและมีการเคลื่อนที่เข้าหรือออกของน้ำได้ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรของคอนกรีต การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตสามารถจำแนกได้ดังนี้

1) การขยายตัว คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์เมื่อบ่มในน้ำจะเกิดการขยายตัวหรือการบวม (Swelling) และมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ดูดเข้าไปในซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดแรงต้านแรงยึดเกาะกันและทำให้เกิดแรงตึงผิวของอนุภาคซีเมนต์เจลลดลง จึงทำให้คอนกรีตขยายตัว ซีเมนต์เพสต์เป็นต้นกำเนิดของการขยายตัวและมีการขยายตัวสูงประมาณ $2{,}000 \times 10^{-6}$ เมตร ส่วนคอนกรีตมีการขยายตัวต่ำมากคือประมาณ 200×10^{-6} เมตร เพราะคอนกรีตมีมวลรวมซึ่งไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงปริมาตรผสมอยู่ในปริมาณสูงประมาณร้อยละ 70 ของปริมาตรทั้งหมด การขยายตัวของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเลซึ่งมีความดันสูงด้วย ที่ความลึก 100 เมตร น้ำทะเลจะมีความดัน 10.0 เมกะพาสคาล คอนกรีตที่แช่อยู่ในความลึกระดับนี้ 3 ปี มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นกว่า 8 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่อยู่ในบรรยากาศธรรมดา การขยายตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างมากของคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลเนื่องมาจากการแทรกซึมเข้าของน้ำทะเลภายใต้ความดัน และรวมถึงการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตปริมาณมากขึ้น

2) การหดตัวพลาสติก (Plastic Shrinkage) คือ การหดตัวจากการสูญเสียน้ำใน ขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวหรือยังอยู่ในสภาพพลาสติก การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ ทำให้ปริมาตรของคอนกรีตลดลงและเกิดการหดตัว เนื่องจากปฏิกิริยาของซีเมนต์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายหลังการก่อตัว ดังนั้นการหดตัวในช่วงนี้จึงเกิดขึ้นค่อนข้างสูงแต่ภายหลังจากการที่ซีเมนต์เพสต์เริ่มแข็งตัวแล้วการหดตัวจะเกิดขึ้นได้ยากเพราะซีเมนต์เพสต์เริ่มมีกำลังสูงนอกจากนี้คอนกรีตยังสูญเสียน้ำโดยการระเหยที่ผิวหน้าและการดูดน้ำออกจากคอนกรีตจึงทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวมากขึ้น การหดตัวพลาสติกของซีเมนต์เพสต์มีค่ามากกว่ามอร์ตาร์และการหดตัวของ คอนกรีตจะมากขึ้นเมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมสูงขึ้น

ในกรณีที่น้ำซึ่งระเหยออกจากคอนกรีตมีปริมาณมากกว่าน้ำที่เยิ้มขึ้นสู่ผิวหน้าของคอนกรีต การแตกร้าวแบบพลาสติกที่ผิวของคอนกรีตจะเกิดขึ้นได้บ่อยในการเทพื้นคอนกรีตที่อยู่ บริเวณกลางแจ้ง มีแสงแดดจัด และไม่มีการป้องกันการระเหยของน้ำอย่างเพียงพอ ดังนั้นการป้องกันรอยแตกร้าวชนิดนี้จึงทำโดยป้องกันการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีตที่เทเสร็จใหม่ ๆ โดยลดอัตราการระเหยของน้ำออกจากผิวหน้าคอนกรีตไม่ให้เกินกว่า 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตร-ต่อ ชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่าอัตราการเยิ้มของน้ำขึ้นสู่ผิวหน้าของคอนกรีต แต่ถ้าอัตราการระเหยของน้ำสูงกว่า 1.0 กิโลกรัมต่อ

ตารางเมตรต่อชั่วโมง โอกาสเกิดรอยร้าวจากการหดตัวพลาสติกจะมีมากซึ่งต้องเพิ่มความระมัดระวังต่อคอนกรีตดังกล่าวในอากาศรอบ ๆ และอาจทำให้เกิดการแตกร้าวแบบ พลาสติกได้ถึงแม้ว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมาก ดังนั้นวิธีที่ดีที่สุดจึงต้องป้องกันคอนกรีตโดยใช้กำบังแดดและลม ทำการเทตกแต่งผิวหน้าและบ่มคอนกรีตให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้

3) การหดตัวด้วยตัวเอง (Autogenous Shrinkage) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์จะยังคงมีต่อไปภายหลังจากการก่อตัว ในกรณีที่ไม่มีความชื้นหรือไม่มีน้ำเข้าออกอาจทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัว การหดตัวในลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากมีการนำน้ำที่อยู่ในโพรงคาปิลารีมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และเรียกการหดตัวชนิดนี้ว่าการหดตัวด้วยตัวเอง (Autogenous Shrinkage) และในบางครั้งคอนกรีตอาจใช้น้ำจนแห้ง (Self-Desiccation) การหดตัวด้วยตัวเองส่วนใหญ่เกิดขึ้นในแกนภายในของคอนกรีตขนาดใหญ่และในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำโดยทฤษฎีคือต่ำกว่า 0.42 ขนาดของการหดตัวชนิดนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบ กับการหดตัวอื่น ๆแม้ว่าการหดตัวด้วยตัวเองจะเกิดขึ้นทั้งสามทิศทาง แต่โดยทั่วไปแล้วนิยมบอกเป็นค่าความยาวในรูปของหน่วยความเครียดเพื่อให้สามารถใช้พิจารณาร่วมกับการหดตัวแห้งได้ การหดตัวด้วยตัวเองของคอนกรีตมีค่าประมาณ$100x10^{-6}$ เมตร การหดตัวด้วยตัวเองของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นและตามปริมาณความละเอียดของปูนซีเมนต์ที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไลท์ (C_4AF) สูงขึ้นมีแนวโน้มการหดตัวด้วยตัวเองที่สูงขึ้น การใช้เถ้าถ่านหินในการแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถช่วยลดการหดตัวนี้ได้การดูดน้ำหรือความชื้นจากโพรงคาปิลารีจะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ จึงทำให้เกิดการหดตัวด้วยตัวเองที่สูงขึ้นได้ กรณีที่ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำมาก เช่น เท่ากับ 0.17พบว่าการหดตัวด้วยตัวเองมีค่าสูงถึง $700x10^{-6}$ เมตร การหดตัวด้วยตัวเองมีความสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณาในกรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำมากและในกรณีของงานคอนกรีตขนาดใหญ่

4) การหดตัวแห้ง (Drying Shrinkage) เป็นการเสียรูปของคอนกรีตอีกอย่างหนึ่ง เกิดจากการที่น้ำในคอนกรีตระเหยออกมา ทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว การหดตัวแห้งนี้เป็นการหดตัวที่สำคัญยิ่ง การออกแบบและการก่อสร้างถ้าไม่ได้เผื่อการหดตัวอย่างเพียงพอ จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวและการบิดตัวของคอนกรีตขึ้นในอาคาร

5) กลไกลของการหดตัว การหดตัวแห้งของคอนกรีตขึ้นอยู่กับการหดตัวของซีเมนต์เพสต์เพราะโดยทั่วไปมวลรวมมีการหดตัวต่ำมาก ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของซีเมนต์เพสต์กับความชื้นสัมพัทธ์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนด้วยกัน (1) การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์เกินร้อยละ 50 การหดตัวในช่วงนี้ เกิดจากการสูญเสียน้ำในโพรงคาปิลารีเป็นหลัก โดยในช่วงแรกน้ำในโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่จะถูกขับมาก่อนตามด้วยน้ำในโพรงคาปิลารีที่มีขนาดเล็กลง การสูญเสียน้ำทำให้น้ำที่เหลืออยู่ในโพรง เกิดเป็นผิวโค้ง (Meniscus) และเกิดแรงตึงผิว (Surface Tension) ซึ่งมีขนาดสูงขึ้นเมื่อโพรงมีขนาดเล็กลงนอกจากนี้การสูญเสียน้ำดูดซับที่อยู่ในซอก (Hindered Adsorbed Water) หรือที่อยู่ในโพรงขนาดเล็กมาก (Micro pore) มีส่วนทำให้เกิดการหดตัว ในการหดตัวพบว่าแผ่นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะเคลื่อนเข้าใกล้กันมากขึ้น แผ่น C-S-H บางแผ่นที่เคลื่อนเข้าใกล้กันมากพอก็จะยึดเกาะกันอย่างถาวรทำให้เกิดชั้น (Layer) ของแผ่น C-S-H ซึ่งการเคลื่อนตัวและการยึดเกาะกัน ดังกล่าวเป็นส่วนของการหดตัวอย่างถาวรซึ่งคืนกลับไม่ได้ (Irreversible Shrinkage) (2)

การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ ช่วงนี้เกิดในอัตราที่ต่ำกว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์เกินร้อยละ 50 ที่ความชื้น สัมพัทธ์ร้อยละ 40 ถึง 50 น้ำในโพรงคาปิลารีถูกขจัดออกไปและแรงตึงผิวจะหมดไป การหดตัวในช่วงนี้เกิดจากการสูญเสียน้ำดูดซับ (Absorbed Water) ที่ผิวอนุภาคของเจลเป็นหลักซึ่งเริ่มมีความสำคัญเมื่อความหนาของชั้นน้ำลดลงเหลือเพียง 2 โมเลกุล ที่ความชื้นสัมพัทธ์เกินร้อยละ 50 การหดตัวจากการสูญเสียน้ำอาจยังคงมีอยู่แต่ไม่มากนัก เมื่อความชื้นลดลงจะเกิดการสูญเสียน้ำที่ดูดซับชั้นสุดท้ายและทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น การหดตัวในช่วงนี้เป็นการหดตัวแบบคืนกลับได้ (Reversible Shrinkage) (3) การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 10 การหดตัวของ ซีเมนต์เพสต์ในช่วงนี้เกิดในอัตราที่สูง การตากแห้งที่สภาวะนี้ทำให้น้ำระหว่างแผ่นแคลเซียมซัลเฟอร์อลูมิเนตไฮเดรต (C-S-H) ถูกขจัดออกไป การสูญเสียน้ำในช่วงนี้ทำให้แผ่น C-S-H เคลื่อนที่เข้าหากัน การหดตัวจะเป็นแบบคืนกลับได้แต่ถ้าการตากแห้งรุนแรงและนานพอแผ่น C-S-H ที่เคลื่อนที่เข้าใกล้กันจะสามารถยึดเกาะกันได้ซึ่งทำให้เกิดการหดตัวแบบถาวร

6) องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของคอนกรีต องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของคอนกรีตได้แก่ มวลรวม ปริมาณของน้ำและปูนซีเมนต์คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ รูปร่างและขนาดของคอนกรีตเป็นต้น การเสริมเหล็กในคอนกรีตสามารถลดการหดตัวเพราะเหล็ก ช่วยยึดไม่ให้คอนกรีตหดตัวแต่ทำให้เกิดแรงอัดในเหล็กและแรงดึงในคอนกรีตได้คอนกรีตที่อยู่ในอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะเกิดการหดตัวสูง (1) มวลรวม (Aggregate) เนื่องจากซีเมนต์เพสต์ เป็นต้นกำเนิดของการหดตัว ดังนั้นการเพิ่มปริมาตรของมวลรวมจึงลดปริมาณซีเมนต์เพสต์และลดการหดตัวได้อย่างดี นอกจากนี้การหดตัวของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวม ได้แก่ กำลัง โมดูลัสยืดหยุ่น ความพรุน ลักษณะของผิว รูปร่าง ปริมาณ ขนาดและขนาดคละ มวลรวมที่แข็งแกร่งมีการดูดซึมน้ำน้อยและมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงทำให้คอนกรีตมีการหดตัวน้อย ส่วนกำลังของมวลรวมนั้นไม่เป็นปัจจัยที่สำคัญนักเพราะกำลังของมวลรวมจะสูงกว่าซีเมนต์เพสต์มาก การใช้หิน ทราย และมวลรวม

2.1.3 การหล่อมอร์ตาร์

การหล่อมอร์ตาร์และการคำนวณส่วนผสมของมอร์ตาร์เพื่อการทดสอบนั้น ให้ใช้อัตราส่วนผสมของวัสดุประสานต่อทรายมาตรฐานเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนัก ซึ่งวัสดุประสานหมายถึงปูนซีเมนต์ หรือปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลาน จากนั้นผสมกับน้ำสะอาดตามปริมาณที่กำหนดสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่หากเป็นปูนซีเมนต์ชนิดอื่น เช่น ปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลาน ให้ใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ (Flow) เท่ากับร้อยละ 110±5 ตามมาตรฐาน ASTM C230 หากต้องการนำไปทดสอบการรับกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 ให้ใช้แบบหล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร และปล่อยทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบนำมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว และทดสอบกำลังอัดตามอายุที่ต้องการ

2.2 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต ที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับการที่นำไปใช้ นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์อื่นที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะสมกับงานที่หลากหลาย โดยเฉพาะด้าน ความแข็งแรง

ความทนทาน ความสวยงาม และการใช้งานเฉพาะด้านคุณสมบัติของปูนซีเมนต์จะ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ การปรับส่วนประกอบของวัตถุดิบจะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบเคมี	ชื่อย่อ	เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก)
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide)	CaO	60.0-67.0
ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide)	SiO_2	17.0-25.0
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide)	Al_2O_3	3.0-8.0
ไอออนออกไซด์ (Ferric Oxide)	Fe_2O_3	0.5-6.0
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide)	MgO	0.1-4.0
อัลคาไลด์ออกไซด์ (Alkalies Oxide)	Na_2O	0.1-1.8
ฟอสฟอรัสออกไซด์ (Phosphorus Oxide)	P_2O	0.1-1.8
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfer Trioxide)	SO_3	0.5-3.0
สารประกอบอื่นๆ	-	0.5-3.0
การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา	-	0.1-3.0
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง	-	0.20-0.75

ที่มา : ปริญญาและชัย (2556)

2.2.1 การผลิตปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีในธรรมชาติ ได้แก่ หินปูน (Limestone; $CaCO_3$) และดินสอพอง(Chalk) ซึ่งเรียกว่าวัสดุธาตุปูน (Calcareous Material) และวัสดุธาตุอาร์จิลลาเซียส (Argillaceous Material) ได้แก่ดินเหนียว (Clay) และดินดาน (Shale) เป็นต้น โดยตัวหินปูนจะเป็นตัวให้แคลเซียม และดินดานจะให้ทั้งซิลิเกตและอลูมิเนต นำมาผ่านกระบวนการเผาด้วยหม้อเผาแบบหมุนที่อุณหภูมิประมาณ 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส จนเป็นปูนเม็ด (Clinker) นำปูนเม็ดมาผสมกับยิปซัม (Gypsum) แล้วบดให้ละเอียดเป็นผงในหม้อบดซีเมนต์ (Cement Mill)

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ ชัชวาลย์ (2549) ได้แบ่งกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ออกเป็น 2 แบบ คือ

1. แบบเปียก (Wet Process)

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิต คือ ดินขาว (Marl) และดินเหนียว (Clay) สำหรับดินขาว มีอยู่ในระดับพื้นดินหรือใต้ดินตามธรรมชาติ โดยปกติจะมีความชื้นสูง การผลิตเริ่มจากการนำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาผสมกับน้ำในบ่อตีดิน (Wash Mill) กวนให้เข้ากัน นำไปบดให้ละเอียดในหม้อบดดิน (Slurry Mill) จนได้น้ำดิน (Slurry) แล้วกรองเอาเศษหินและส่วนที่ไม่ละลายน้ำออก เหลือแต่น้ำดินที่ละลายเข้ากันดี จากนั้นนำไปเก็บพักไว้ในยุ้งเก็บ (Silo) เพื่อตรวจสอบคุณภาพ และปรับแต่งให้ส่วนผสมให้ได้คุณภาพตามที่กำหนด น้ำดินที่มีส่วนผสมที่ถูกต้องแล้ว จะถูกนำไปรวมกันที่บ่อกวน

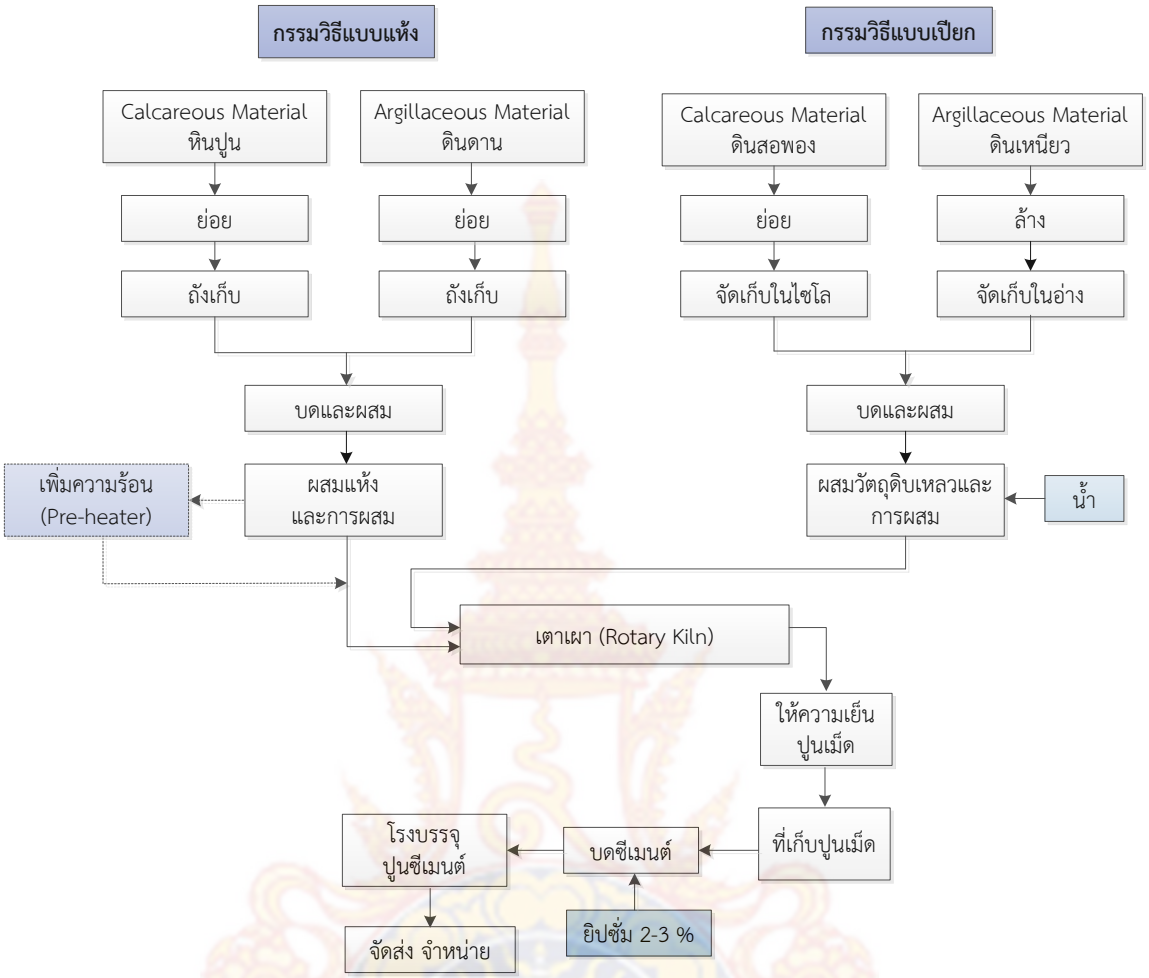
ดิน (Slurry Basin) เพื่อให้มีปริมาณเพียงพอ และกวนให้ส่วนผสมรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้ง ก่อนที่จะนำไปเผาในหม้อเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ความร้อนในหม้อเผาจะทำให้น้ำระเหยออกสู่บรรยากาศ เหลือแต่เม็ดดินซึ่งเมื่อให้ความร้อนต่อไปจนถึงอุณหภูมิหนึ่ง จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker) ขั้นตอนการบดปูนเม็ดให้กลายเป็นปูนซีเมนต์ ทำโดยนำปูนเม็ดมาผสมกับยิปซัมแล้วบดให้ละเอียดเป็นผงในหม้อบดซีเมนต์ความละเอียดในการบดและอัตราส่วนระหว่างปูนเม็ดกับยิปซัมต้องเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ จากนั้นจะลำเลียงปูนซีเมนต์ไปเก็บไว้ในยุ้งเก็บปูนซีเมนต์ผง (Cement Silo) เพื่อรอการจำหน่ายต่อไป ดังภาพที่ 3 กรรมวิธีการผลิตแบบเปียกนี้ไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากต้องใช้เชื้อเพลิงปริมาณมากในการผลิตปูนเม็ด และยังมีอัตราการผลิตต่ำ ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตสูง

2. แบบแห้ง (Dry Process)

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิต คือหินปูน (Limestone) ซึ่งได้จากการระเบิดหินจากภูเขาหินปูน แต่หินปูนที่ได้ยังมีขนาดใหญ่ จึงต้องนำมาลดขนาดโดยเครื่องย่อย (Crusher) เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตขั้นต่อไป วัตถุดิบอื่น เช่น ดินดาน (Shale) และวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (Corrective Materials) ซึ่งใช้เฉพาะบางตัวเพื่อให้ได้ส่วนประกอบทางเคมีตามค่ามาตรฐานที่กำหนด วัตถุดิบอื่นเหล่านี้ก็ต้องผ่านเครื่องย่อยเพื่อลดขนาดให้เหมาะสมเช่นกัน วัตถุดิบที่ผ่านการย่อยแล้วจะถูกนำมาเก็บไว้ที่กองเก็บวัตถุดิบ (Storage Yard) จากนั้นจะลำเลียงไปยังหม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) ต่อไป

หม้อบดวัตถุดิบมีหน้าที่บดหินปูน ดินดาน และวัตถุดิบ ปรับแต่งคุณสมบัติให้เป็นผงละเอียด ซึ่งเรียกว่าวัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) การควบคุมอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่หม้อบดวัตถุดิบมีความ สำคัญ เนื่องจากอัตราส่วนของวัตถุดิบที่เหมาะสมทำให้วัตถุดิบสำเร็จ มีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกับการเผา หลังจากผ่านกระบวนการบดแล้ว วัตถุดิบสำเร็จจะถูกส่งไปยังยุ้งผสมวัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal Homogenizing Silo) เพื่อเก็บและผสมวัตถุดิบสำเร็จให้เป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนส่งไปเผาในหม้อเผาแบบหมุน กระบวนการเผาช่วงแรก เป็นชุดเพิ่มความร้อน (Preheater) จะค่อย ๆ เพิ่มความร้อนให้แก่วัตถุดิบสำเร็จ แล้วส่งวัตถุดิบสำเร็จไปเผาในหม้อเผา ที่มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงประมาณ 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีตามลำดับ จนในที่สุดกลายเป็นปูนเม็ด จากนั้นทำให้ปูนเม็ดเย็นลง ก่อนจะลำเลียงไปเก็บไว้ที่ยุ้งเก็บเพื่อรอการบดปูนเม็ดต่อไป

ปัจจุบันนิยมกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้งเนื่องจากใช้ความร้อนต่ำกว่า จึงประหยัดเชื้อเพลิงในการเผาและสามารถควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ได้ง่ายกว่า จึงทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่าสามารถผลิตปูนซีเมนต์ได้ถึง 10,000 ตันต่อวัน



ภาพที่ 2-1 แผนภาพกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์
ที่มา : ชูเกียรติ (2559)

2.2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปริญญาและชัย (2556) กล่าวว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดความร้อน เกิดการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและในสภาพแข็งตัวแล้ว ปฏิกิริยาทางเคมีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา ถ้ามีการทำปฏิกิริยามากจะมีการคายความร้อนมาก

ชัชวาลย์ และคณะ (2553) กล่าวว่าปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีดังนี้

1. อายุของซีเมนต์เพสต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีมากที่สุดในช่วงแรก และลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

2. องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบหลักแต่ละตัวในปูนซีเมนต์จะแตกต่างกัน โดยเฉพาะ C_3S และ C_3A

3. ความละเอียดของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมาก ปฏิกิริยาจะเกิดได้สมบูรณ์มาก และเกิดในอัตราที่เร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา

4. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในช่วงต้นอัตราน้ำต่อซีเมนต์จะไม่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่น แต่ในช่วงหลังหากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลงด้วย

5. อุณหภูมิ เมื่อให้ความร้อนที่เหมาะสม (ต้องไม่มากเกินไปจนเพสต์แตกร้าว) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเกิดได้ดี และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นก็จะเพิ่มขึ้น โดยมีเงื่อนไขว่าการเพิ่มอุณหภูมิต้องไม่ทำให้เพสต์เกิดการแข็งตัว

6. น้ำยาผสมคอนกรีต ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภท คือ 1) สารหน่วง และ 2) สารเร่งการก่อตัว จะมีผลต่ออัตราการเกิด ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยจะลดและเพิ่มอัตราตามลำดับ

ผลิตภัณฑ์หลักของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างแคลเซียมซิลิเกตกับน้ำจะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(Calcium Silicate Hydrates; C-S-H) ซึ่งทำหน้าที่หลักด้านตัวยึดประสาน และความแข็งแรงของคอนกรีตสูงขึ้นในปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ โดยจะเกิดรูปแบบของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสองแคลเซียมซิลิเกตและน้ำ โดยปฏิกิริยาเหล่านี้อาจจะเขียนเป็นสมการทางเคมีดังสมการที่ (1) และ (2)

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH \quad (1)$$

$$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH \quad (2)$$

C-S-H ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันไป โดยจะขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ C-S-H ที่ได้จะทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นวุ้น (Gel) มีสมบัติเป็นตัวประสานเหนียวคล้ายกาว ก่อแข็งตัวและเกาะยึดแน่นกับวัสดุผสม รูปร่างของ C-S-H ไม่สามารถสรุปได้แน่นอน มีหลายรูปแบบ เช่น เส้นใย (Fibrous) แบบปี้(Flattened) โครงข่าย (Network) และรูปร่างผิดปกติ แต่ที่พบมากที่สุดคือ เส้นใยกลวงตัน โดย C_3S จะสร้าง C-S-Hได้น้อยกว่า C_2S ประมาณ 3 เท่า สำหรับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาจะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่าง คือ มี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนและการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ $Ca(OH)_2$เป็นอนุภาคที่มีรูปทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal) และมีขนาดใหญ่หลายสิบไมโครเมตร แต่มีโครงสร้างอ่อนแอกว่า C-S-H

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) จะเกิดทันทีทันใด (ประมาณ 2 ถึง 3 นาทีแรกหลังจากน้ำเข้าทำปฏิกิริยา) และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วจนเกินไป จึงใส่ยิปซัม ($C\bar{S}H_2$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดปูนซีเมนต์ ยิปซัมจะไปทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นของแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต (Callium Sulforaluminate Hydrate) บนผิวของอนุภาค

C_3A เราจะเรียกแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ว่า Ettringite โดยชั้นของ Ettringite จะหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของแคลเซียมซิลิเกตเป็นส่วนใหญ่ ดังสมการที่ (3)

$$C_3A + 3C\bar{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A\bar{S}_3H_{32} \quad (3)$$

Tricalcium Aluminate + Gypsum + Water → Ettringite

Ettringite จะเข้าปกคลุม C_3A ทำให้ C_3A ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ช้าลง อย่างไรก็ดีความต้องการในการทำปฏิกิริยาของ C_3A กับน้ำจะมีอยู่ เป็นผลให้ Ettringite ที่หุ้มอยู่แตกออกไป C_3A จะเข้าทำปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออน(SO_4^{-2}) ที่เหลืออยู่ และสร้าง Ettringite อีกครั้ง โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดไปเรื่อย ๆ จนซัลเฟตไอออน (จากยิบซัม) เริ่มหมดไป หลังจากนั้น C_3A จะเข้าทำปฏิกิริยากับ Ettringite ที่เหลืออยู่เกิดเป็น Monosulfo Aluminate ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal-Plate) ดังนั้น Monosulfo Aluminate จึงเป็นขั้นตอนที่มีความเสถียรในคอนกรีตดังสมการที่ (4)

$$C_6A\overline{S}_3H_{32} + 2C_3A + 4H \rightarrow 3C_4A\overline{S}H_{12} \quad (4)$$

Ettringite + Tricalcium Aluminate + Water → Monosulfo Aluminate

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเทตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรด์ (C_4AF) จะเกิดในช่วงต้นคล้ายกับ C_3A แต่เกิดขึ้นช้ากว่าและมีความร้อนน้อยกว่า โดยจะทำปฏิกิริยากับยิบซัม ($C\overline{S}H_2$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์($Ca(OH)_2$) ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายเข็มของซัลโฟอะลูมิเนต (Sulphoaluminate) และซัลโฟเฟอร์ไรต์ (Sulphoferrite) ดังสมการที่ (5)

$$C_4AF + 3C\overline{S}H_2 + 21H \rightarrow C_6(A,F)\overline{S}_3H_{32} + (F,A)H_3 \quad (5)$$

2.3 ปอซโซลาน (Pozzolan)

ปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา มีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลยแต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวที่อุณหภูมิปกติ และเมื่อมีความชื้นจะเกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่งได้แก่

1. ปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ได้แก่ ไดอะตอมมาเชียสเอริ์ธ เถ้าภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ วัสดุเหล่านี้เมื่อจะนำไปใช้งานจะต้องนำไปใช้งานจะต้องนำไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ ก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้เช่น การเผา การบด และการทำแห่ง เป็นต้น ปัจจุบันมีการนำปอซโซลานจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อน และสะพาน เพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำและช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากซัลเฟต และช่วยในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างด่างกับซิลิกา นอกจากนี้สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง

2. ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (Artificial Pozzolan) ได้แก่ เถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่ถูกบดในการผลิตไฟฟ้า เถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมของซิลิกา เป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 66-68 เถ้าลอยบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับปูนขาวและด่างเกิดเป็นสารประกอบที่มีแรงยึดประสาน แต่เถ้าลอยบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ และแข็งตัวได้เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2-3 ข้อกำหนดคุณสมบัติทางด้านกายภาพ ด้านเคมี และข้อกำหนดเสริมของวัสดุปอซโซลานประเภทต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM C 618

พารามิเตอร์	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
คุณสมบัติทางด้านเคมี			
ผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ ไอร์รอนออกไซด์	70.0	70.0	50.0
ร้อยละไม่น้อยกว่า	4.0	5.0	5.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ร้อยละไม่เกิน	3.0	3.0	3.0
ความชื้น ร้อยละไม่เกิน	10.0	6.0	6.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผา ร้อยละไม่เกิน	1.5	1.5	1.5
โซเดียมออกไซด์ ร้อยละไม่เกิน			
คุณสมบัติทางกายภาพ			
Fineness : Amount retained when wet-sieved on 45 μm (No. 325) Sieve, max, %	34	34	34
Strength activity index :	75	75	75
With Portland cement, at 7 days, min, % of control	75	75	75
With Portland cement, at 28 days, min, % of control	800	800	800
With lime, at 7 days, min, psi (kPa)	115	115	115
ปริมาณน้ำที่ต้องการ ร้อยละไม่เกิน	0.8	0.8	0.8
ความคงตัว ร้อยละไม่เกิน	5	5	5
ความถ่วงจำเพาะ ค่าเฉลี่ยร้อยละไม่เกิน			

ที่มา : ดัดแปลงจากปริญญาและชัย (2556)

ตาม ASTM C 618 จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ (คุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 2- 3) ได้แก่

1. ชั้นคุณภาพ N เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

2. ชั้นคุณภาพ F เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินแอนทราไซด์หรือบิทูมินัส เถ้าลอยในชั้นคุณภาพนี้มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน

3. ชั้นคุณภาพ C เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์หรือซับบิทูมินัส เถ้าลอยในชั้นคุณภาพนี้นอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานแล้ว ยังมีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์ คือ สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดแรงยึดประสานได้เลย เถ้าลอยในชั้นคุณภาพนี้อาจมีปูนขาวปนอยู่มากกว่าร้อยละ 10

กล่าวโดยสรุปได้ว่า วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการนำไปใช้งานจึงควรมีการตรวจคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวก่อนนำไปใช้งาน เพื่อที่จะสามารถใช้งานได้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์

2.3.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.Al_2O_3.6H_2O$ หรือ C-A-H)

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไฮดรอกไซด์(SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง CSH และ CAH ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน (Fraay, 1989) และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม (Hansen, 1990)

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (6)

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \xrightarrow{H_2O} 3CaO.2SiO_2.3H_2O \quad \text{หรือ C-S-H} \qquad (6)$$

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้สมการที่ (7)

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \xrightarrow{H_2O} 3CaO.\ 2Al_2O_3.3H_2O \text{ หรือ C-S-H} \qquad (7)$$

เมื่อพิจารณาต่อไปจะพบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะถูกจำกัดโดยปริมาณซิลิกอนออกไซด์อลูมิเนียมออกไซด์จากวัสดุปอซโซลานเอง และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเมื่อใช้วัสดุปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง ในขณะที่ความต้องการแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพื่อใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานกลับยิ่งสูงเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ทำให้ความสามารถในการรับแรงของคอนกรีตลดลงจึงนำมาสู่ขีดจำกัดของวัสดุปอซโซลานสูงสุดที่สามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีตได้ ปฏิกิริยาปอซโซลานจะต่อเนื่องกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาโดยเฉพาะงานคอนกรีตหลา

2.4 กระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต

กรมทางหลวงชนบท (2558) แอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง วัสดุทำผิวทางหรือพื้นทางบดอัดแน่น ซึ่งได้จากการผสมกันระหว่างวัสดุมวลรวม (Aggregate) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) ตามอัตราส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้ โดยในการผสมกันนี้จะต้องให้ความร้อนทั้งวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์จนได้อุณหภูมิตามที่กำหนดเสียก่อนเมื่อผสมเข้ากันดีแล้ว จึงนำไปใช้งานพร้อมบดอัดให้แน่นขณะที่ยังร้อนอยู่ตาม มทช. 230-2545 มาตรฐานงานแอสฟัลต์คอนกรีต

2.4.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต

1) มวลรวมให้เป็นไปตาม มทช. 209-2545 : มาตรฐานวัสดุมวลรวมสำหรับงานแอสฟัลต์คอนกรีต

ภาพที่ 2-2 ถังเก็บแอสฟัลต์และยุ้งเก็บวัสดุมวลรวม

2) แอสฟัลต์ในกรณีที่ไม่ได้ระบุชนิดของแอสฟัลต์ไว้เป็นอย่างอื่น ให้ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 851-2545 มาตรฐานแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง การใช้แอสฟัลต์อื่น ๆ หรือแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารใด ๆ นอกเหนือจากนี้ต้องมีคุณภาพเทียบเท่าหรือดีกว่า ซึ่งต้องผ่านการทดสอบคุณภาพและพิจารณาความเหมาะสมรวมทั้งต้องได้รับอนุญาตให้ใช้ได้จากกรมทางหลวงชนบทเป็นกรณีไปสำหรับปริมาณการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์โดยปริมาณให้เป็นไปตามตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ขนาดของมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้

ขนาดที่ใช้เรียก	มิลลิเมตร	9.5	12.5	19.0	25.0
	นิ้ว	3/8	1/2	3/4	1
ชั้นทาง		Wearing Course	Wearing Course	Binder Course	Base Course
ความหนา (มิลลิเมตร)					
ขนาดตะแกรง		ปริมาณผ่านตะแกรงร้อยละโดยมวล			
มิลลิเมตร	นิ้ว				
37.5	1 ½	-	-	-	100
25.0	1	-	-	100	90-100
19.0	¾	-	100	90-100	-
12.5	½	100	80-100	-	56-80
9.5	$^{3}/_{8}$	90-100	-	56-80	-
4.75	เบอร์ 4	55-85	44-74	35-65	29-59
2.36	เบอร์ 8	32-67	28-58	23-49	19-45
1.18	เบอร์ 16	-	-	-	-
0.600	เบอร์ 30	-	-	-	-
0.300	เบอร์ 50	7-23	5-21	5-19	5-17
0.150	เบอร์ 100	-	-	-	-
0.075	เบอร์ 200	2-10	2-10	2-8	1-7
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 ร้อยละโดยมวลของมวลรวม		4.0-8.0	3.0-7.0	3.0-6.5	3.0-6.0

หมายเหตุ : กรมทางหลวงชนบทอาจพิจารณาเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวม และปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ แตกต่างจากตารางดังกล่าวก็ได้ ทั้งนี้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้ต้องมีคุณสมบัติและความแข็งแรงถูกต้องตามตามตารางที่ 4

ที่มา : คู่มือการปฏิบัติงานควบคุมคุณภาพการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (2558)

2.4.2 กระบวนการผลิต

กระบวนการการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต

1) กองวัสดุมวลรวม

2) ยุ้งหินเย็น

ก) ยุ้งหินเย็น (Cold Bin) และเครื่องป้อนหินเย็น (Aggregate Feeder) โรงงานผสมต้องมียุ้งหินเย็นไม่น้อยกว่า 4 ยุ้ง สำหรับแยกใส่วัสดุหินหรือวัสดุอื่น ๆ แต่ละขนาด ช่องเปิดปากยุ้งจะต้องเป็นแบบปรับได้ ยุ้งหินเย็นจะต้องประกอบด้วยเครื่องป้อนหินเย็นแบบที่เหมาะสม สามารถป้อนหินเย็นได้อย่างสม่ำเสมอไปยังหม้อเผา (Dryer)ได้ถูกต้องตามอัตราส่วนที่ต้องการ

โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องป้อนหินเย็นสำหรับยุ้งมวลละเอียด เช่น หินฝุ่นหรือทราย จะต้องเป็นแบบสายพานยางต่อเนื่อง หรือสายพานอื่นใดที่ให้ผลเทียบเท่า

ภาพที่ 2-3 ยุ้งหินเย็น

ที่มา : http://engineeringcare.blogspot.com/2012/12/ (9 มีนาคม 2560)

ข) หม้อเผา (Dryer) โรงงานผสมต้องมีหม้อเผาอยู่ในสภาพดี มีประสิทธิภาพในการทำงาน ดีพอที่จะทำให้มวลรวมแห้งและมีอุณหภูมิตามที่กำหนด โดยต้องมีเครื่องวัดอุณหภูมิที่เหมาะสม เช่น เครื่องวัดอุณหภูมิแบบแปรความร้อนเป็นค่าไฟฟ้า (Electric Pyrometer) ที่อ่านอุณหภูมิได้ละเอียดถึง 2.50 องศาเซลเซียส ติดตั้งอยู่ที่ปากทางที่มวลรวมเคลื่อนตัวออก และจะต้องมีเครื่องบันทึกอุณหภูมิของมวลรวมที่วัดได้โดยอัตโนมัติ

ภาพที่ 2-4 หม้อเผา

ที่มา : http://ecoplantservices.co.th/th/plant-cement-kiln-services.php (9 มีนาคม 2560)

ค) ชุดตะแกรงร่อน (Screening Unit) โรงงานผสมต้องมีชุดตะแกรงร่อนมวลรวมที่ผ่านมาจากหม้อเผา เพื่อแยกมวลรวมเป็นขนาดต่าง ๆ ตามที่ต้องการ โดยในชุดตะแกรงร่อนนี้ต้องประกอบด้วยตะแกรงคัด (Scalping Screen) สำหรับคัดมวลรวมก้อนโตเกินขนาดที่กำหนด (Oversize) ออกทิ้งตะแกรงทุกขนาดต้องอยู่ในสภาพดี เหล็กตะแกรงไม่ขาดหรือสึกหรอมากเกินไป อันจะให้มวลรวมที่ร่อนออกมาผิดขนาดไปจากที่ต้องการ

ภาพที่ 2-5 ชุดตะแกรงร่อน
ที่มา : http://tunjai.com/sumfile/ (9 มีนาคม 2560)

ฉ) ยุ้งหินร้อน (Hot Bin) โรงงานผสมต้องมียุ้งหินร้อนอย่างน้อย 4 ยุ้ง ทั้งนี้ไม่รวมยุ้งวัสดุผสมแทรก สำหรับเก็บมวลรวมร้อนที่ผ่านตะแกรงแยกขนาดแล้ว ยุ้งหินร้อนนี้ต้องมีผนังแข็งแรงไม่มีรอยรั่ว มีความสูงพอที่จะป้องกันไม่ให้มวลรวมไหลข้ามยุ้งไปปะปนกันได้ และจะต้องมีความจุมากพอที่จะป้อนมวลรวมร้อนให้กับห้องผสม (Pugmill Mixer) ได้อย่างสม่ำเสมอเมื่อโรงงานผสมทำการผสมเต็มกำลังผลิต ในแต่ละยุ้งต้องมีท่อสำหรับให้มวลรวมไหลออกไปข้างนอก เพื่อป้องกันไม่ให้ไปผสมกับมวลรวมที่อยู่ในยุ้งอื่น ๆ ในกรณีที่มีมวลรวมในยุ้งนั้น ๆ มากเกินไป

ยุ้งเก็บวัสดุผสมแทรก (Mineral Filler Storage Bin) โรงงานผสมต้องมียุ้งเก็บวัสดุผสมแทรกต่างหาก พร้อมกับมีเครื่องชั่ง หรือเครื่องป้อนวัสดุผสมแทรกซึ่งสามารถควบคุมปริมาณวัสดุเข้าสู่ห้องผสมอย่างถูกต้อง และสามารถปรับเทียบ (Calibrate)ได้

ภาพที่ 2-6 ยุ้งหินร้อน
ที่มา : http://ammann-apollo.com/asphalt-batch-type-portable-plant-anp-1500-gallery.html (9 มีนาคม 2560)

ช) เครื่องเก็บฝุ่น (Dust Collector) โรงงานผสมต้องมีเครื่องเก็บฝุ่น สำหรับเก็บวัสดุส่วนละเอียดหรือฝุ่น ที่มีประสิทธิภาพดีและเหมาะสมที่สามารถเก็บฝุ่นกลับไปใช้ได้อย่างสม่ำเสมอหรือนำไปทิ้งได้ทั้งหมดหรือบางส่วน และเครื่องเก็บฝุ่นดังกล่าวต้องสามารถควบคุมฝุ่นไม่ให้มีฝุ่นเหลือออกสู่อากาศภายนอกมากจนทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมโรงงานผสมต้องมีเครื่องเก็บฝุ่นทั้งชุดหลัก(Primary) และชุดรอง (Secondary) ชุดหลักให้เป็นแบบแห้ง (Dry Type) และชุดรองเป็นแบบเปียก (Wet Type) หรือแบบอื่น ๆ ที่มีประสิทธิภาพทัดเทียมกัน

ภาพที่ 2-7 เครื่องเก็บฝุ่น
ที่มา : http://www.cnc1993.com/index.php/th/ (9 มีนาคม 2560)

3) ให้ความร้อนมวลรวม
4) ตะแกรงคัดขนาดมวลรวม

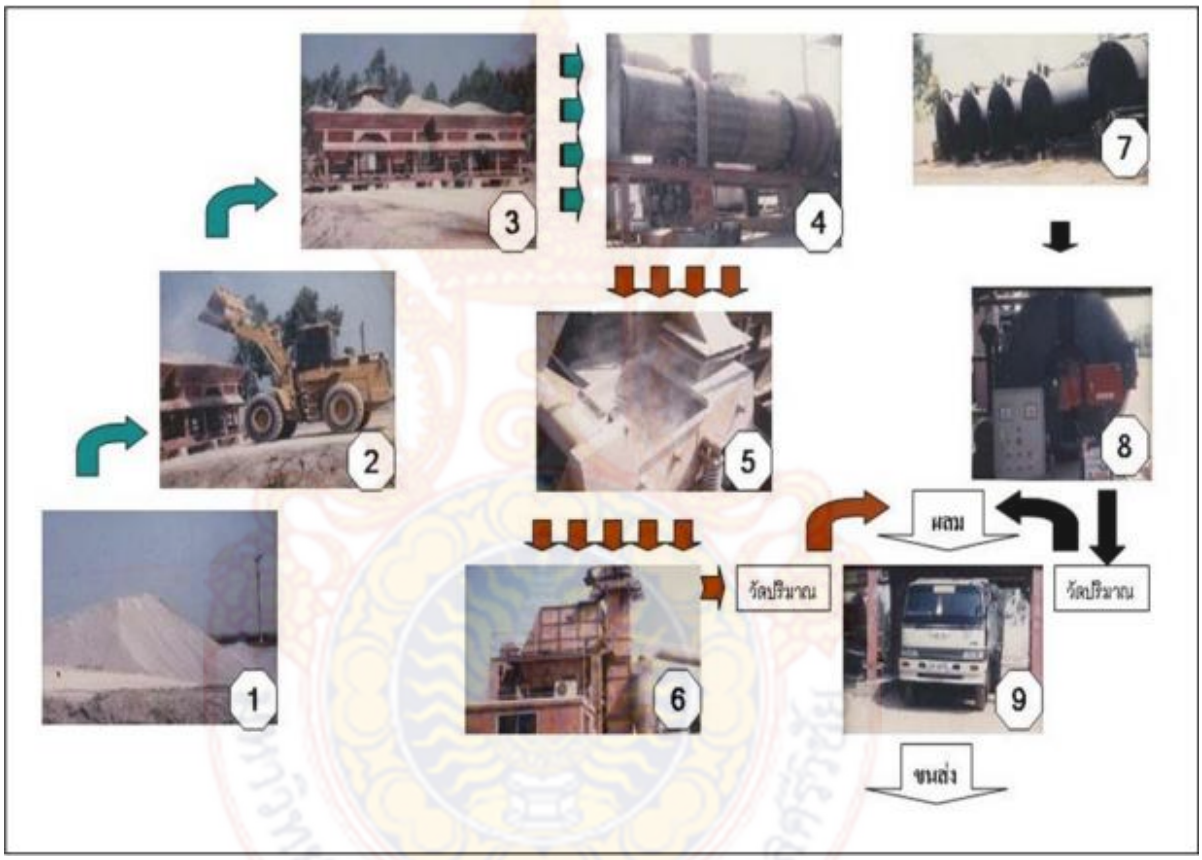
5) วัดปริมาณมวลรวม

6) Asphalt Cement เก็บรวมในถังบรรจุที่อุณหภูมิ ≤ 100 องศาเซลเซียส

7) ให้ความร้อน และวัดปริมาณ Asphalt Cement ที่อุณหภูมิ 159±8 องศาเซลเซียส

8) ส่วนผสมมวลรวมร้อน + Asphalt Cement ร้อน และการนำไปใช้งาน

กระบวนการการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต ดังรูปที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 กระบวนการการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต

ที่มา : คู่มือการปฏิบัติงานควบคุมคุณภาพการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (2558)

2.5 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

ชูเกียรติ ชูสกุล (2553) ศึกษาคุณสมบัติฝุ่นหินผุเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับงานก่อและงานฉาบ โดยศึกษากำลังอัดและความต้านทานแรงดึงของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินผุที่บดละเอียด โดยนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับฝุ่นหินผุในสัดส่วน 85 : 15, 80 : 20, 75 : 25 และ 70 : 30 โดยน้ำหนัก แล้วเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐาน ผลการศึกษาด้านกำลังอัด พบว่าที่อายุ 3 วัน มอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินผุมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานทุกอัตราส่วนผสม ที่อายุ 7 วัน ค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานทุกอัตราส่วนผสมและที่อายุ 28 วัน มอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินผุร้อยละ 25 มี

ค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน โดยมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินผุร้อยละ 25 มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดเท่ากับ 157, 281 และ 313 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 3, 7 และ 28 วันตามลำดับ ส่วนค่าความต้านทานแรงดึงพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินผุมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานทุกอัตราส่วนผสมและทุกอายุ โดยมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินผุร้อยละ 20 มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกอายุ มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดเท่ากับ 11, 21 และ 26 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 3, 7 และ 28 วันตามลำดับ

ปิติศานต์ กร้ำมาตร (2553) ศึกษาความต้องการของน้ำและการก่อตัวของตัวอย่างเพสต์ ค่าการไหลแผ่ความพรุน ค่าการหดตัวแห้ง และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างมอร์ตาร์ และกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีต ของวัสดุประสานที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนเป็นส่วนผสม โดยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลการศึกษาพบว่าความต้องการน้ำของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่ามากกว่า ในขณะเพสต์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอย มีความต้องการน้ำน้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการก่อตัว(ระยะต้นและระยะปลาย) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูน แทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่ามากกว่าเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนสำหรับค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์แทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ล้วน นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความพรุนที่อายุ 28 วัน ของตัวอย่างมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แทนด้วยเถ้าลอย และแทนที่ด้วยผงหินปูนมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยหินปูนและแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ (ทั้งกรณี 2 และ 3 วัสดุประสาน) มีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยที่การแทนที่ด้วยผงหินปูนขนาด 4ไมโครเมตรจะส่งผลให้ค่าการหดตัวแห้งที่น้อยกว่าของผงหินปูนขนาด 14 ไมโครเมตร และสุดท้ายพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยผงหินปูนมีผลให้กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์และของคอนกรีตช่วงอายุต้นมีแนวโน้มมากกว่าหรือใกล้เคียง (ถ้าแทนในปริมาณที่เหมาะสม) แต่เมื่ออายุมากขึ้นกลับให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์และคอนกรีตเถ้าลอยช่วงอายุต้นน้อยกว่าแต่เมื่ออายุมอร์ตาร์มากขึ้นมีค่าใกล้เคียง เมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ปฐมพงษ์ สัตย์จริง (2556) ศึกษาผลกระทบของปริมาณปูนซีเมนต์ อุณหภูมิการบ่ม และความละเอียดของวัสดุประสานจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 30 : 70 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสาน และมีความละเอียดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 4, 13, 21 และ 28 (ไม่บด) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นสารเร่งอัตรากำลังในอัตราร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ตาร์อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 บ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30, 45, 60 และ 75 องศาเซียลเซียส ผลการศึกษาพบว่าความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นสามารถเร่งกำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ในช่วงต้น ส่วนที่อายุปลายไม่มีประโยชน์มากนัก กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นตัวเร่ง

สุชาติ ภาคภูมิเกียรติคุณ และอิทธิพร ศิริสวัสดิ์ (2557) ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของซีเมนต์มอร์ตาร์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงฝุ่นหินปูน แคลเซียมคาร์บอเนต โดยศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นหินปูนและปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 ศึกษาความถ่วงจำเพาะ ระยะเวลาการก่อตัว การไหลแผ่ ปริมาณฟองอากาศ กำลังรับแรงอัดกำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด และการหดตัว โดยเปรียบเทียบกับคุณสมบัติที่ได้จากปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวกำหนดอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อผงฝุ่นหินปูนเท่ากับ 100 : 0, 95 : 5, 90 : 10, 85 : 15, 80 : 20 และ 75 : 25 โดยน้ำหนัก ทำการบ่มน้ำเป็นเวลา 1, 3 ,7, 28 และ 60 วันตามลำดับ และใช้สารผสมเพิ่มชนิดลดการใช้น้ำปริมาณมากประเภท F ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุผง ผลจากการศึกษาพบว่าการนำผงฝุ่นหินปูนมาแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละต่าง ๆ จะส่งผลทำให้การหดตัวและร้อยละการไหลแผ่จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณผงฝุ่นหินปูนที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่ปริมาณฟองอากาศและความสามารถในการก่อตัวจะลดลงเล็กน้อยตามปริมาณผงฝุ่นหินปูนที่เพิ่มขึ้นในส่วนคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด, แรงดัด และแรงดึงจะลดลงตามปริมาณผงฝุ่นหินปูนที่เพิ่มขึ้นในการแทนที่ปูนซีเมนต์ และพบว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้นกำลังรับแรงอัด, แรงดัด และแรงดึง ที่ร้อยละผงฝุ่นหินปูน 5 และ 10 จะมีการพัฒนากำลังเข้าใกล้กำลังรับแรงของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ส่วนที่ร้อยละผงฝุ่นหินปูน 15, 20 และ 25 จะมีการพัฒนากำลังต่ำกว่ากำลังรับแรงของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว อัตราส่วนต่อปูนซีเมนต์ต่อผงฝุ่นหินปูนที่จะเหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก

กฤษดา เสือเอี่ยม และณัฏฐ์ มากุล (2557) ศึกษาอิทธิพลของฝุ่นหินปูนต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์ชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกลบโดยทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบและ/หรือฝุ่นหินปูนที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D) เท่ากับ 24.32 และ15.63 ไมโครเมตร ตามลำดับ ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุผง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/p) เท่ากับ 0.38 ทำการทดสอบสมบัติของซีเมนต์เพสต์ในสภาวะสดและแข็งตัวแล้ว ผลการทดสอบพบว่า ฝุ่นหินปูนสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลตัวได้ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบได้

ทนงศักดิ์ โนไชยา ศราวุฒิ เถื่อนถ้ำ และชุตินธร สุขเกษม (2557) ศึกษากำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยกับเถ้าลอย โดยนำเถ้าชานอ้อยมาผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปบดด้วยเม็ดบอล 12 ชั่วโมง เถ้าลอย และชานอ้อยถูกนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (s/b) เท่ากับ 0.5 และ 2.5 ตามลำดับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลาน (เถ้าลอยและเถ้าชานอ้อย) ทราย และน้ำ จะถูกนำมาผสมรวมกันเพื่อทำเป็นชิ้นงานมอร์ตาร์ หลังจากนั้นชิ้นงานจะถูกแช่น้ำที่เป็นด่างเข้มข้นจะนำไปทดสอบต่อไปนอกจากนี้มีการเตรียมชิ้นงานเป็นเพสต์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 สำหรับนำไปใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกและโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามลำดับ พบว่ากำลังของมอร์ตาร์ในทุกส่วนผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยจะมีค่าใกล่เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมทุกระยะเวลาในการบ่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอร์ตาร์สูตร 10FA10SCBA และสูตร 5FA15SCBA ส่วนผสมของความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุปอซโซ

ลานทั้งสองมีค่าไม่ต่างจากมอร์ตาร์ควบคุม ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 90 วัน ยิ่งไปกว่านั้นค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์จะมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความพรุนของมอร์ตาร์ สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยเกิดการทำปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานยังสามารถดูได้จากโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานเพสต์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุปอซโซลานดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้เถ้าลอยและเถ้าชานอ้อย สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์ได้

สุภิชาติ เจนจิระปัญญา และปิติศานต์ กร้ำมาตร (2559) ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม โดยศึกษาการใช้ประโยชน์วัสดุกากอุตสาหกรรมเป็นสารปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราที่ส่วนร้อยละ 40 และ 50 ของปริมาณปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก โดยวัสดุการอุตสาหกรรมที่ศึกษาคือ เถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบด ทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตเบื้องต้น และคุณสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต เพื่อสามารถนำวัสดุกากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ลดปัญหาในการกำจัดทิ้ง ผลการทดลองพบว่าวัสดุกากอุตสาหกรรมคือ เถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดมีศักยภาพในการแทนที่ปูนซีเมนต์คุณสมบัติด้านกำลังยังมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนในช่วงอายุต้น แต่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุมากขึ้นเนื่องจากการเกิดของปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่วนการเกิดคาร์บอเนชั่นจะเกิดอย่างรวดเร็วเมื่อผสมวัสดุกากอุตสาหกรรมในส่วนผสม มีความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าก้อนตัวอย่างที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ล้วน และมีการขยายตัวในสารละลายซัลเฟต เนื่องจากปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลงและผลจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน

อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ และอรรถพล มาลัย (2559) ศึกษากาพัฒนากำลังมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินและหินฝุ่น โดยการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และหินฝุ่นแทนทรายร้อยละ 80, 90, 100 โดยน้ำหนัก ทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 1, 3, 7, 21 และ 28 วัน ผลการทดสอบกำลังอัดพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมหินฝุ่นและเถ้าถ่านหินจะมีความสามารถรับแรงอัดได้ดีกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน กำลังอัดของมอร์ตาร์จะลดลงตามสัดส่วนเถ้าถ่านหิน โดยค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันมีค่าสูงสุด จึงเป็นแนวทางว่าการใส่เถ้าถ่านหินและหินฝุ่นแทนทรายในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์

Kiattikomol K. et al., (2001) นำเถ้าลอยจาก 5 แหล่งซึ่งมีรูปร่าง ขนาดและองค์ประกอบทางเคมีต่างกันมาบดให้มีขนาด 1.9-17.2 ไมโครเมตรและแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ผลการทดสอบพบว่า เมื่อความละเอียดของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เถ้าลอยที่บดจนมีขนาดอนุภาค 9 ไมโครเมตร พบว่าดัชนีกำลังเพิ่มสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมภายใน 28 วัน

Tangpagasit J. et al. (2005) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของเถ้าลอยต่ออิทธิพลการอัดตัว (Packing Effect) และปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ ผลต่างของอิทธิพลการอัดตัวและปฏิกิริยาปอซโซลาน พิจารณาจากมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาร์ผสมวัสดุเฉื่อยที่มีขนาดอนุภาคเท่ากัน ผลการทดลองพบว่าดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าลอยและ อายุการบ่ม ที่อายุต้นดัชนีกำลังสูง เนื่องจากอิทธิพลการ

อัดตัวสูงกว่าอิทธิพลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ตลอดอายุการบ่ม 3-90 วันเถ้าลอยที่มีขนาด 2.7 และ 160 ไมโครเมตรมีผลต่างของดัชนีกำลังเนื่องจากอิทธิพลการอัดตัวค่อนข้างคงที่ที่ร้อยละ 29 ของมอร์ตาร์ควบคุม ส่วนผลต่างของดัชนีกำลังเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ของเถ้าลอยที่มีขนาด 2.7 และ 160ไมโครเมตรที่ 3, 28, และ 90 วัน คือร้อยละ 3, 20 และ 27 ตามลำดับ

Cordeiro G.C. et al., (2008) ศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานและอิทธิพลการแทรกตัว (Filler Effect) ของเถ้าชานอ้อยซึ่งแทนที่บางส่วนในมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์และปูนขาว ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มความละเอียด ของเถ้าชานอ้อย ทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าชานอ้อยสูงกว่ามอร์ตาร์ผสมควอร์ตถึงร้อยละ 31 ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการ

วิธีการดำเนินการการวิจัยคอนกรีตผสมฝุ่นหินจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แบ่งขั้นตอนออกเป็นสองขั้นตอนคือ หนึ่งขั้นตอนการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสม และขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยวิธีการดำเนินงานจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมวัสดุที่ใช้ในการศึกษา
2. ทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์
3. ทดสอบคุณสมบัติของฝุ่นหินจากโรงงานแอสฟัลต์คอนกรีต
4. ออกแบบอัตราส่วนผสมมอร์ตาร์
5. ทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ตาร์
6. วิเคราะห์และประเมินผล
7. สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 เตรียมวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้างของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ผลิตขึ้นโดยมีคุณสมบัติตามกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15-2514/2517 ประเภทที่ 1 และมาตรฐาน ASTM (150-71 Type 1)

3.1.2 สารประกอบวัสดุปอซโซลาน ใช้ฝุ่นหินผุ ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจาก หจก. โล่ทองการโยธา ณ ตำบลทุ่งกระบือ อำเภอย่านตาขาว จังหวัดตรัง นำมาทำการอบที่อุณหภูมิ 105 C° เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.3 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายที่ได้มาจากแม่น้ำ อำเภอขนอม ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ค้างเบอร์ 30

3.1.4 น้ำ น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ใช้ประปา

3.2 ทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM C 188) โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบดังนี้

1. ขวดแก้วสำหรับหาความถ่วงจำเพาะของเลอซาทาเลีย (La Chatalia) เป็นขวดแก้วใส หน้าตัดเป็นรูปวงกลม ลักษณะคอขวดเป็นก้านยาวและมีกระเปาะเล็ก ๆ ก่อนจะถึงก้นขวดซึ่งเป็นกระเปาะกลมใหญ่ ความจุของขวดแก้วนี้ประมาณ 290 มิลลิลิตร
2. เครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

3. เทอร์โมมิเตอร์
4. ถ้วยตวงหรือกรวยก้านยาว
5. ผ้าแห้งหรือแผ่นยาง
6. ลวดสำหรับเขี่ย
7. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
8. ภาชนะใส่ปูนซีเมนต์

ค่าการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา SCG ค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้จะใช้เป็นข้อมูลในการหาความละเอียดของปูนซีเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความถ่วงจำเพาะของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานแอสฟัลท์คอนกรีต และยังเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของปูนซีเมนต์อีกด้วย

3.3 ทดสอบคุณสมบัติของฝุ่นหินจากโรงงานแอสฟัลต์คอนกรีต

3.3.1 ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ การทดสอบก็ใช้วิธีการเดียวกับการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง แต่จะเปลี่ยนจากการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง มาใช้เป็นฝุ่นหินจากโรงงานแอสฟัลต์คอนกรีตแทน ค่าที่ได้จากการทดสอบที่ได้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความละเอียดของฝุ่นหินจากโรงงานแอสฟัลต์คอนกรีต

3.3.2 ทดสอบหาปริมาณที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) โดยใช้การร่อนแบบเปียก (Wet Sieve Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C430 เป็นการวัดความละเอียดของวัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็กและไม่ละลายน้ำ ค่าที่ได้เป็นร้อยละของอัตราส่วนของน้ำหนักที่ค้างต่อน้ำหนักที่ใช้ทดสอบ

3.3.4 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

3.3.4 ถ่ายภาพขยายกำลังสูงฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.3.5 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

3.4 ทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์

3.4.1 ทดสอบหาความข้นเหลวปกติ โดยใช้เครื่องมือไวแคต (Vicat Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C451 โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบดังนี้

1. เครื่องไวแคท
2. ขวดแก้วที่มีความจุ 200 หรือ 250 มิลลิลิตร

3. ตาชั่ง ความละเอียด 0.01 กรัม
4. เกรียง
5. นาฬิกาจับเวลา
6. ถุงมือยาง
7. ภาชนะสำหรับใส่ปูนซีเมนต์
8. เครื่องผสมปูน
9. มีดปาดดิน

จากการทดลอง ความข้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะพบว่าหลักการเกิดปฏิกิริยาเคมีซีเมนต์เพสจะเริ่มก่อตัว และแข็งตัวในที่สุดในการทดสอบหาระยะการก่อตัวกำหนดซีเมนต์ในสภาพข้นเหลว เป็นมาตรฐานสากลโดยกำหนดสภาพความข้นเหลวปกติที่ยอมให้เข็มไวแคทขนาดมาตรฐานจมลง 10 มิลลิเมตร ภายในเวลา 30 วินาทีและมีปริมาณปกติค่าประมาณ 24-33% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

3.4.2 ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลาย โดยใช้เครื่องมือไวแคต (Vicat Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C191 โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบดังนี้

1. เครื่องไวแคท
2. ขวดแก้วที่มีความจุ 200 หรือ 250 มิลลิลิตร
3. ตาชั่ง ความละเอียด 0.01 กรัม
4. เกรียง
5. นาฬิกาจับเวลา
6. ถุงมือยาง
7. ภาชนะสำหรับใส่ปูนซีเมนต์
8. เครื่องผสมปูน
9. มีดปาดดิน

ใช้ปริมาณน้ำที่พอเหมาะจากการทดสอบความข้นเหลวปกติ ซึ่งการก่อตัวระยะต้นคือระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. ภายในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจนทำให้เข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงในเพสต์ด้วยน้ำหนักของตัวเองได้

ระยะการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับการแปรผันโดยตรงกับน้ำ ซึ่งเป็นส่วนผสมที่สำคัญในการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ถ้าน้ำน้อยปูนซีเมนต์จะแข็งตัวเร็วกว่าปกติแต่ถ้าน้ำมากปูนซีเมนต์จะแข็งตัวช้ากว่าปกติ เพราะฉะนั้นต้องใช้ในอัตราส่วนที่พอเหมาะจะได้แข็งตัวในระยะเวลาที่พอดี

3.4.3 ทดสอบหาความสามารถในการไหลตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ ด้วยวิธีโต๊ะการไหลแผ่ ตามมาตรฐาน ASTM C230 โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบดังนี้

1. โต๊ะทดสอบการไหลแผ่

2. เครื่องผสมมอร์ต้าร์
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก
4. ตะแกรงร่อนเบอร์ 20,30
5. เกรียง
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ถุงมือ
8. มีดปาด

ค่าที่ได้จากการทดสอบหาความสามารถในการไหลตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยควบคุมค่าการไหลตัว (Flow) ของมอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนผสมให้มีค่าอยู่ระหว่าง 110±5 เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดปริมาณน้ำสำหรับการออกแบบส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์

3.5 การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมของมอร์ตาร์

ออกแบบปริมาณของวัสดุที่ใช้ผสมของมอร์ต้า ตาม มอก.15 เล่ม 12 2532 ดังตารางที่ 3-1 โดยใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมเท่ากับ 1: 2.75 ค่าอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (W/C) ได้จากการทดสอบหาความสามารถในการไหลตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ (Flow Table) ซึ่งผลการออกแบบดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-1 ปริมาณของวัสดุที่ใช้ผสมของมอร์ต้า ตาม มอก.15 เล่ม 12 2532

วัสดุ	**จำนวนก้อนทดสอบ**	
	6	9
ปูนซีเมนต์ (กรัม)	500	740
ทราย (กรัม)	1,375	2,035
น้ำ (ลูกบาศก์เซนติเมตร) เมื่อใช้กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	242	359
ปูนซีเมนต์อย่างอื่น	ค่าการไหล 110±5	

ที่มา: ชูเกียรติ, 2559

ตารางที่ 3-2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์

ชุดตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ฝุ่นหิน (กรัม)	ทราย (กรัม)	น้ำ (กรัม)
OPC 0	740	0	2,035	444
DLS 10	666	74	2,035	444
DLS 20	592	148	2,035	444
DLS 30	518	222	2,035	444
DLS 40	444	296	2,035	444
DLS 50	370	370	2,035	444
รวม	**3,330**	**1,110**	**2,035**	**2,664**

หมายเหตุ

OPC คือ Original Portland Cement ปูนซีเมนต์ล้วน (มอร์ตาร์ควบคุม)

DLS10 คือ Decomposed Stone Dust ปูนซีเมนต์ทดแทนด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งร้อยละ 10

3.6 ทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์

3.6.1 ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5x 5 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C109 และมีวิธีการผสมมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C305 โดยใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนผสมวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต) ต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำที่ใช้คือปริมาณน้ำที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่ 110±5 ตามการทดสอบการไหลตัวของมอร์ตาร์ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 14, 28, 56 และ 90 วันตามลำดับ

3.7 ทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

3.7.1 ทดสอบการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C490 โดยหล่อคอนกรีตแท่งตัวอย่างขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่างต่ออายุการทดสอบ ถอดแบบออกเมื่อคอนกรีตมีอายุ 24 ชั่วโมง ทำการแกะตัวอย่างการทดสอบออกจากแบบหล่อคอนกรีต หอตัวอย่างด้วยเทปอลูมิเนียมหนา 5 มม. จำนวน 2 ชั้น ตามด้วยพลาสติกใส 5 ชั้น และเทปกาวใส 2 ชั้น วัดค่าการหดตัวพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบว่ามีน้ำระเหยออกจากตัวอย่างหรือไม่ การสูญเสียน้ำหนักต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.05 ของน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำเขาห้องควบคุมอุณหภูมิ 28±1 องศาเซลเซียส ควบคุมความชื้น 50±5 เพื่อวัดคาการเปลี่ยนแปลงความยาวและการสูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่างคอนกรีตซึ่งจะทำการวัดการหดตัวที่อายุ 1, 3, 7,14 และ 28 วัน

3.7.2 ทดสอบการหดตัวโดยรวม ตามมาตรฐาน ASTM C490 และ ASTM C157 ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตร ใช้จำนวน 4 ตัวอย่าง ถอดแบบเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง ทำการบ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำเป็นระยะเวลา 1, 3, 7,14 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อทำการบ่มตัวอย่างคอนกรีตเสร็จสิ้นแล้ว ทิ้งตัวอย่างคอนกรีตไว้ประมาณ 30 นาที ต่อจากนั้นนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตมาวัดค่าการหดตัวโดยรวมพร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง

3.8 การถอดแบบและบ่มคอนกรีต

หลังจากที่เทคอนกรีตเข้าแบบเรียบร้อยแล้วให้บ่มมอร์ตาร์ประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปบ่มด้วยน้ำสะอาดก่อนที่จะนำมาทำการทดสอบที่อายุ 3, 7, 28, 56 และ 90 วัน ตามลำดับ

3.9 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

เปรียบเทียบผลกับมอร์ตาร์ควบคุม พิจารณาตามเกณฑ์กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดมาตรฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์ (มอก.15เล่ม 1 2547) ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 เกณฑ์กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดมาตรฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์ (มอก. 15 เล่ม 1 2547)

อายุการทดสอบและการบ่ม	กำลังอัด (กก./ตร.ซม)				
	ประเภทที่1	ประเภทที่2	ประเภทที่3	ประเภทที่4	ประเภทที่5
1วัน ในอากาศชื้น	-	-	120	-	-
1วันในอากาศชื้น + 2 วันในน้ำ	120	100	240	-	80
1วันในอากาศชื้น + 6 วันในน้ำ	190	170	-	-	150
1วันในอากาศชื้น + 27 วันในน้ำ	280	280	-	170	210

ที่มา: ชูเกียรติ, 2559

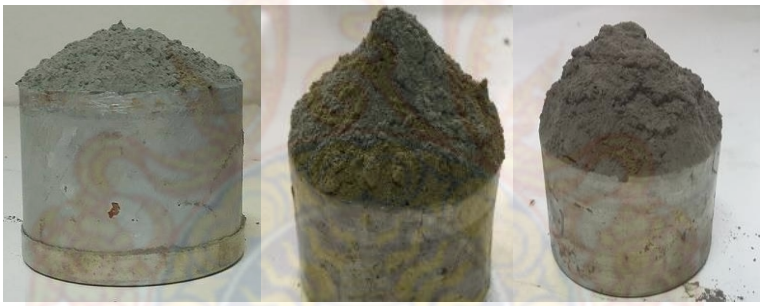
การนำวัสดุปอซโซลานมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น หลักการพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C618 ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุปอซโซลานหรือไม่ ได้กำหนดไว้ว่า เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หากพบว่ามีดัชนีกำลังอัดเกินร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน จึงถือว่าวัสดุดังกล่าวสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้

บทที่ 4
สรุปผลการทดสอบ วิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบของงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินและผลการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์มีรายละเอียดดังนี้

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นหินเหลือทิ้ง

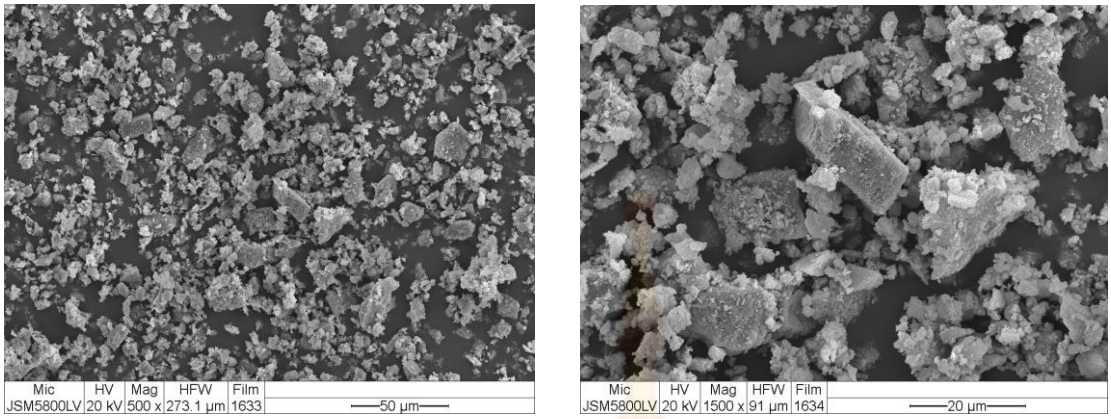
ในภาพที่ 4-1 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จะมีลักษณะสีดำ เมื่อทำการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สีของฝุ่นหินจะเปลี่ยนเป็นสีเทาเข้มซึ่งแตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีลักษณะสีเทาอ่อน



ปูนซีเมนต์ ฝุ่นหินก่อนอบ ฝุ่นหินหลังอบ

ภาพที่ 4-1 ลักษณะสีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และฝุ่นหินเหลือทิ้ง

รูปร่างลักษณะของอนุภาคของฝุ่นหินเหลือทิ้ง เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายขยายโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope ดังแสดงในภาพที่ 4-2 พบว่าอนุภาค ฝุ่นหินมีรูปร่างลักษณะส่วนใหญ่เป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม มีผิวขรุขระและตัน



ภาพที่ 4-2 รูปขยายอนุภาคฝุ่นหินเหลือทิ้ง ขนาด 500 และ 1,500 เท่า

ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินเหลือทิ้ง

Chemical Composition (%)	Portland Cement	Dust Stone Waste
SiO_2	20.62	4.15
Al_2O_3	5.22	3.40
Fe_2O_3	3.10	0.97
SO_3	2.70	1.60
MgO	0.91	15.96
Na_2O	0.07	-
K_2O	0.50	0.08
CaO	64.99	34.66
P_2O_5	-	0.09
LOI	1.13	3.80

องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินจากตารางที่ 4-1 พบว่าค่า LOI น้อยกว่า 10 ค่า SO_3 น้อยกว่าร้อยละ 4 มีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 ค่อนข้างสูง ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ สำหรับปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีค่าเท่ากับร้อยละ 34.66 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (64.99) ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ในการรับกำลังอัดของคอนกรีต คือกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ของวัสดุปอซโซลานนั้น โดยวัสดุที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่าจะได้กำลังอัดมากกว่าด้วย

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และฝุ่นหินเหลือทิ้ง

จากตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของฝุ่นหินเหลือทิ้งที่ได้จาก

การผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ 0.52 พิจารณาได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความละเอียดมากกว่าฝุ่นหินเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เนื่องจากฝุ่นหินผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 200 จากกระบวนผลิตจึงมีอนุภาคที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ และฝุ่นหินมีค่าความละเอียดโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) โดยใช้การร่อนแบบเปียก (Wet Sieve Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C430 เท่ากับร้อยละ 28 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C168 (ไม่เกินร้อยละ 34)

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และฝุ่นหินเหลือทิ้ง

รายงานการทดสอบ	ผลการทดสอบ	มาตรฐาน ASTM	หมายเหตุ
ความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3.23	3.00-3.20	ASTM C 128-97
ความถ่วงจำเพาะฝุ่นหิน	2.71	-	ASTM C 128-97

4.1.2 ค่าความข้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมฝุ่นหินและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเห็นว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (OPC) เท่ากับร้อยละ 29 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมฝุ่นหินในปริมาณอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนเนื่องมาจากฝุ่นหินอาจมีส่วนผสมของฝุ่นผสมอยู่ด้วยจึงทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบความข้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้ง

ชุดตัวอย่าง	สัดส่วนผสม		ปริมาณน้ำที่พอเหมาะ (ร้อยละ) โดยน้ำหนัก
	ปูนซีเมนต์	ฝุ่นหิน	
ซีเมนต์เพสต์	500	0	29
ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหิน 10	450	50	29.5
ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหิน 20	400	100	30
ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหิน 30	350	150	33
ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหิน 40	300	200	36
ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหิน 50	250	250	39

ในตารางที่ 4-4 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของฝุ่นหิน ระยะการก่อตัวเริ่มต้นจะมากขึ้นตามปริมาณของฝุ่นหิน เนื่องจากฝุ่นหินมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน จึงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นน้อยในช่วงแรก

ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบระยะการก่อตัวเริ่มต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้ง

ชุดตัวอย่าง	สัดส่วนผสม		ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาที)
	ปูนซีเมนต์	ฝุ่นหิน	
ซีเมนต์เพสต์	500	0	95
ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหิน 10	450	50	108
ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหิน 20	400	100	120
ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหิน 30	350	150	125
ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหิน 40	300	200	131
ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหิน 50	250	250	140

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

4.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมละเอียด

ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมละเอียดดังตารางที่ 4-5 ของทรายแม่น้ำจากอำเภอสิชล จังหวัดนครศรีธรรมราช มีลักษณะรูปทรงค่อนข้างกลมและมีเม็ดกรวดเล็ก ๆ ปนอยู่ มีสัดส่วนขนาดคละกันดี มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำค่อนข้างมาก ดังนั้นมวลรวมละเอียดที่มีค่าการดูดซึมน้ำมากนี้จะมีผลต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต และค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C128

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียด

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	มาตรฐาน ASTM	หมายเหตุ
ความถ่วงจำเพาะ	2.55	2.40 – 3.00	ASTM C 128
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)	0.87	≤ 0.70	ASTM C 128
โมดูลัสความละเอียด (F.M.)	2.94	2.30 – 3.20	ASTM C 125
หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	1,598	1,400 – 1,600	ASTM C 29

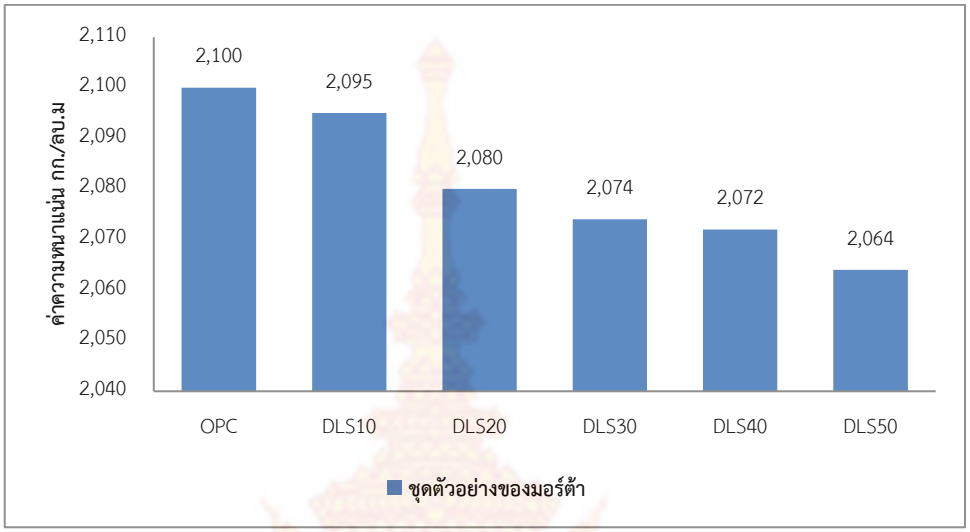
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของมอร์ตาร์

คุณสมบัติบางประการของมอร์ตาร์จะมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต เช่น กำลังอัดของมอร์ตาร์ และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ตาร์กับมวลรวม ซึ่งกำลังของมอร์ตาร์มีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยกำลังอัดของมอร์ตาร์นี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ตาร์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์(W/C) และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความพรุน จะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

4.3.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของมอร์ตาร์

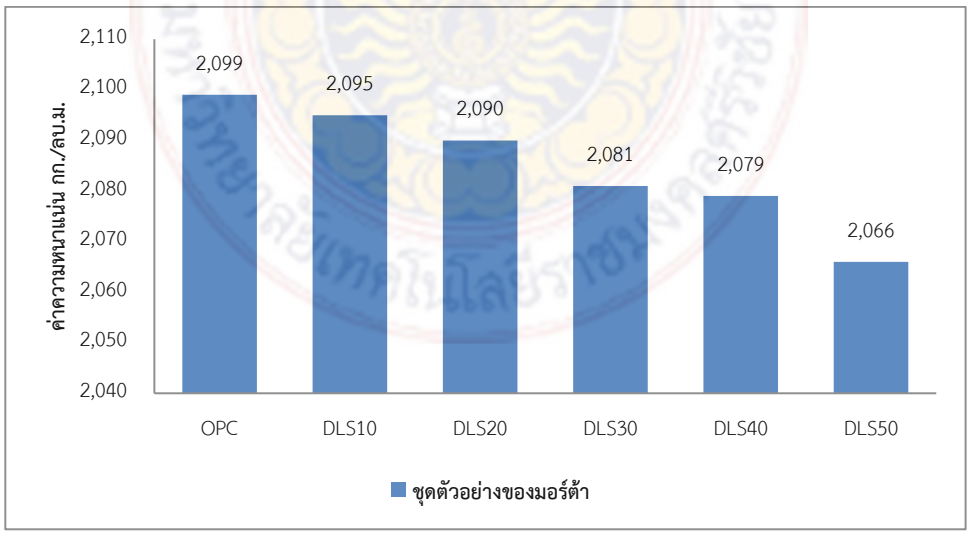
ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน ตามภาพที่ 4-3 พบว่า ค่าความหนาแน่นของ OPC มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 2,100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยในส่วนของมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินมีค่าต่ำ

กว่า มอร์ตาร์ควบคุมทุกอัตราส่วนผสม โดยค่าความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณของหินฝุ่นที่เพิ่มขึ้น ซึ่ง DLS50 มีค่าน้อยที่สุด



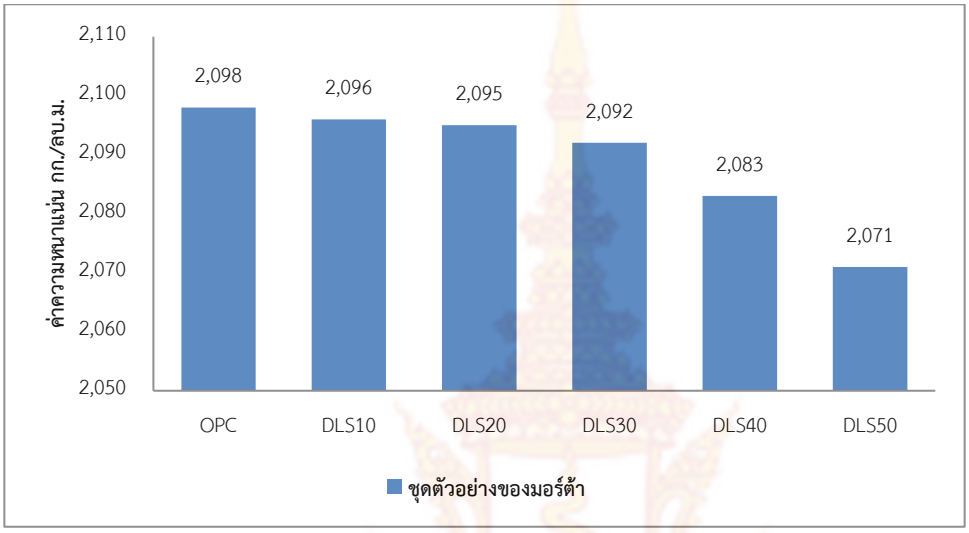
ภาพที่ 4-3 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน

ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน ตามภาพที่ 4-4 พบว่า ค่าความหนาแน่นของ OPC มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 2,104 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยในส่วนของมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินมีค่าต่ำกว่า มอร์ตาร์ควบคุมทุกอัตราส่วนผสม โดยค่าความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณของหินฝุ่นที่เพิ่มขึ้น ซึ่ง DLS50 มีค่าน้อยที่สุด



ภาพที่ 4-4 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน

ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน ตามภาพที่ 4-5 พบว่า OPC มีความหนาแน่นมากที่สุดเท่ากับ 2,112 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยในส่วนของมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินมีค่าต่ำกว่า มอร์ตาร์ควบคุมทุกอัตราส่วนผสม โดยค่าความหนาแน่นจะลดลงตามปริมาณของหินฝุ่นที่เพิ่มขึ้น ซึ่ง DLS50 มีค่าน้อยที่สุด

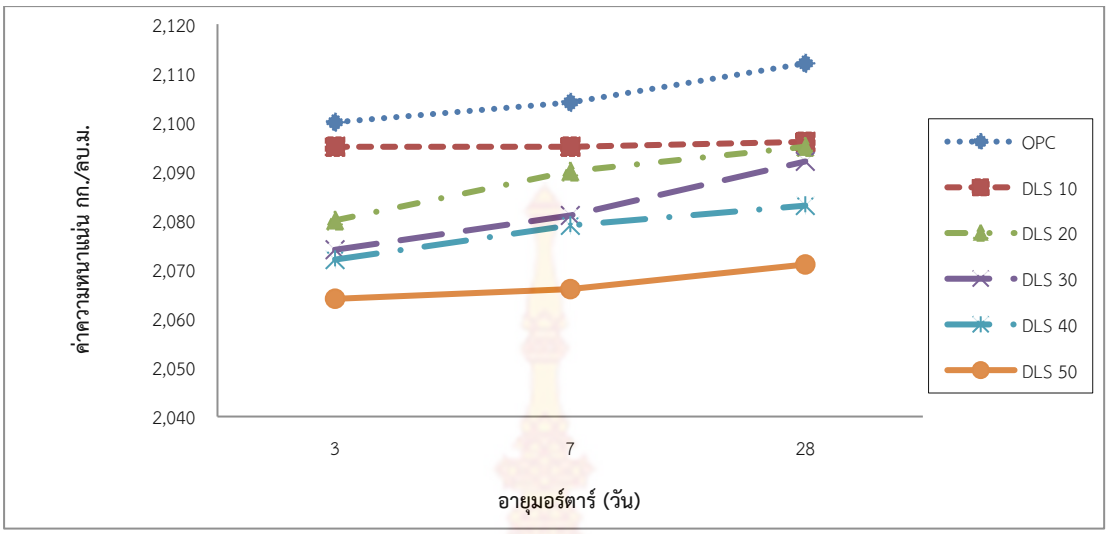


ภาพที่ 4-5 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบความหนาแน่นเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	W/C	ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ (กก./ลบ.ม.)		
		3 วัน	7 วัน	28 วัน
OPC	0.60	2,100	2,104	2,112
DLS10	0.60	2,095	2,095	2,096
DLS20	0.60	2,080	2,090	2,095
DLS30	0.60	2,074	2,081	2,092
DLS40	0.60	2,072	2,079	2,083
DLS50	0.60	2,064	2,066	2,071

ผลการทดสอบความหนาแน่นของมอร์ตาร์พบว่าเมื่อใส่ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นลดลงและเมื่อมอร์ตาร์มีอายุสูงขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานเมื่อมีอายุที่สูงจะทำให้มีค่าความหนาแน่นที่ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ (ปริญญาและชัย, 2556)

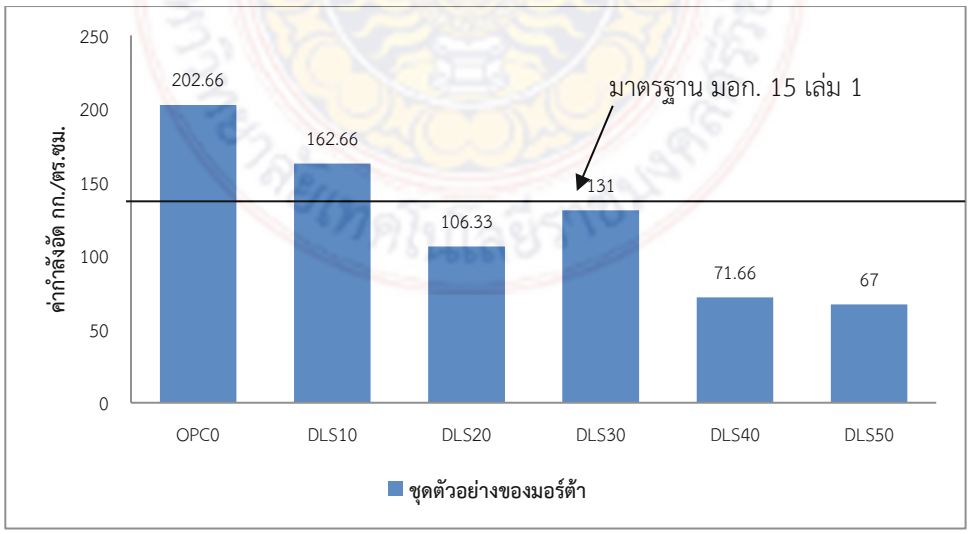


ภาพที่ 4-6 กราฟค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน

4.3.2 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์

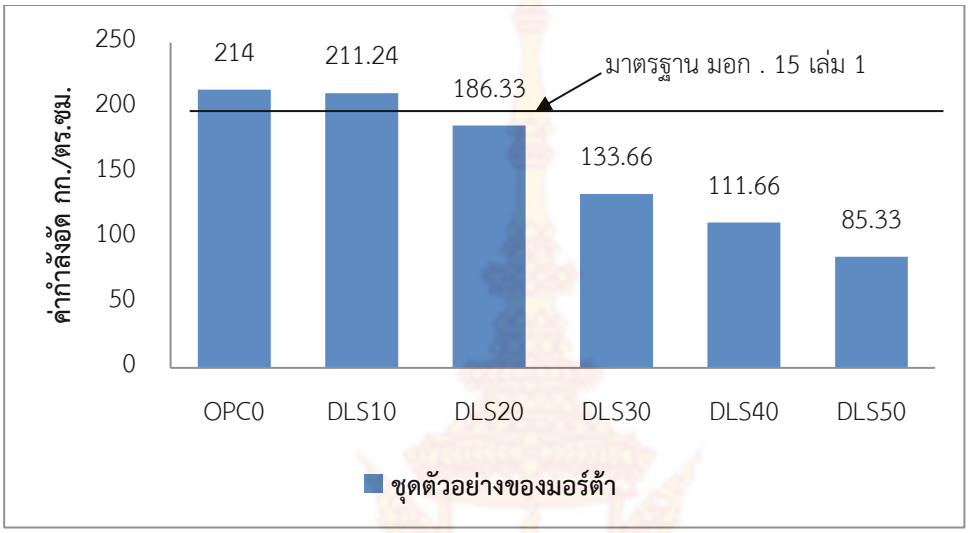
ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตตามอัตราส่วน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ W/C ที่ 0.60

ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน ดังภาพที่ 4-7 พบว่า OPC, DLS10 และ DLS30 มีค่าการรับกำลังอัดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์ซึ่งค่ากำลังอัดเท่ากับ 202.66, 162.66, และ 131 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วน DLS20, DLS40 และ DLS50 ไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน



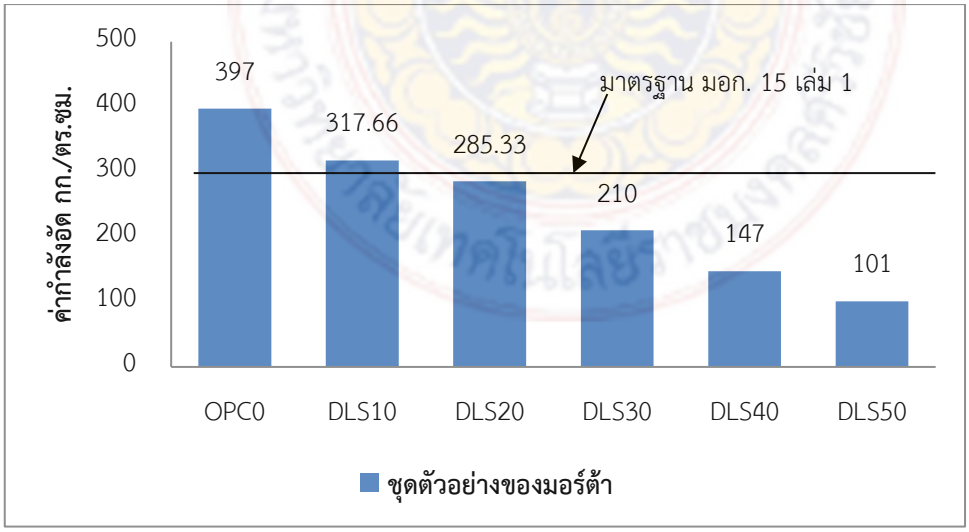
ภาพที่ 4-7 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 วัน

ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน ดังภาพที่ 4-8 พบว่า OPC, DLS10 มีค่าการรับกำลังอัดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์ซึ่ง ค่ากำลังอัดเท่ากับ 214, 211.24 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วน DLS20, DLS30, DLS40 และ DLS50 ไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน



ภาพที่ 4-8 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน

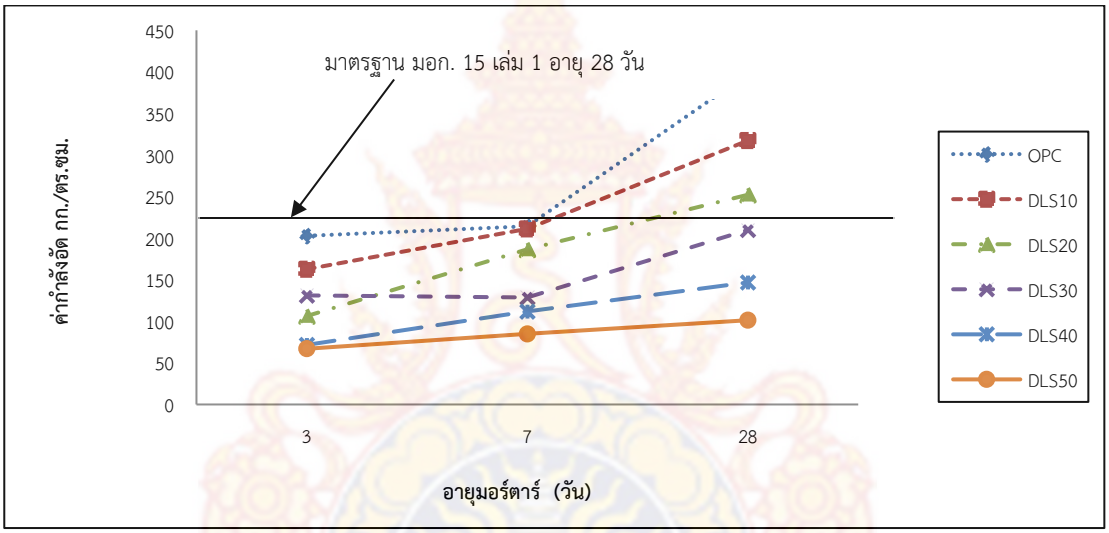
ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน ดังภาพที่ 4-9 พบว่า OPC, DLS10 และ DLS20 มีค่าการรับกำลังอัดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์ซึ่ง ค่ากำลังอัดเท่ากับ 397, 317.66 และ 285.33 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วน DLS30, DLS40 และ DLS50 ไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน



ภาพที่ 4-9 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบการรับกำลังอัดเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	W/C	ค่ากำลังอัดของมอร์ต้า กก./ตร.ซม. (ร้อยละ)		
		3 วัน	7 วัน	28 วัน
OPC	0.60	202.66 (100)	214.00 (100)	397.00 (100)
DLS 10	0.60	162.66 (19)	211.24 (1)	317.66 (19)
DLS 20	0.60	106.33 (47)	186.33 (12)	285.33 (28)
DLS 30	0.60	131.00 (35)	133.66 (37)	210.00 (47)
DLS 40	0.60	71.66 (64)	111.66 (40)	147.00 (62)
DLS 50	0.60	67.00 (66)	85.33 (17)	101.00 (74)



ภาพที่ 4-10 กราฟค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน

เมื่อพิจารณากำลังอัดของตัวอย่างที่ทำการทดสอบที่อายุ 3 วันมอร์ตาร์ตัวอย่าง DLS10, DLS30 และ OPC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 162.66, 131 และ 202.66 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับซึ่งมีค่าผ่านเกณฑ์กำหนดค่ากำลังอัดรับแรงอัดมาตรฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์ (มอก.15 เล่ม 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ 120 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วน DLS20, DLS40 และ DLS50 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 106.33, 71.66 และ 67.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยค่ากำลังอัดต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดที่อายุ 3 วัน

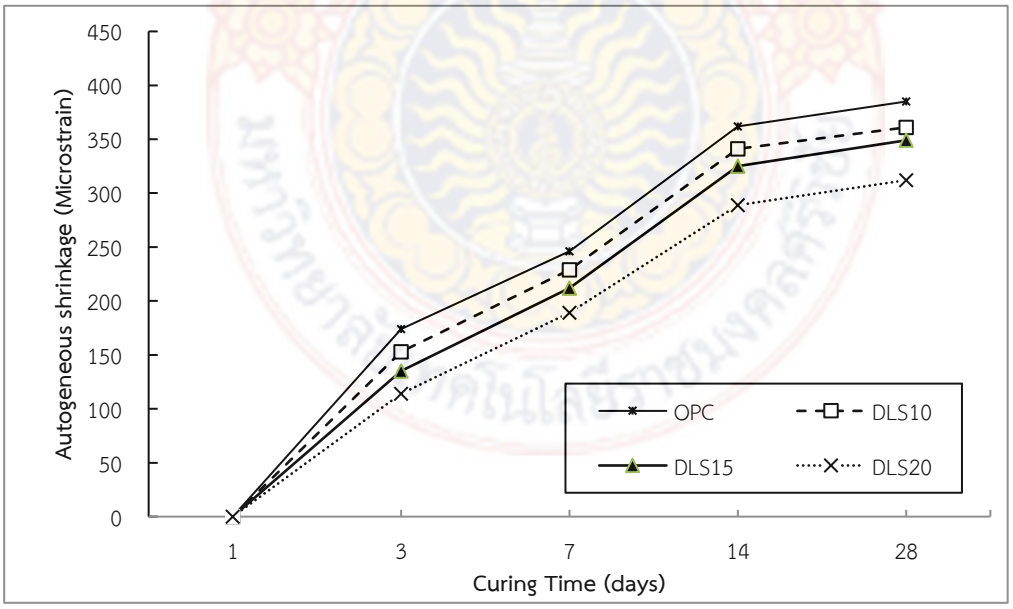
เมื่อพิจารณากำลังอัดของตัวอย่างที่ทำการทดสอบที่อายุ 7 วัน มอร์ตาร์ตัวอย่าง DLS10, OPC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 211.24, 214 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับซึ่งมีค่าผ่านเกณฑ์กำหนดค่ากำลังอัดรับแรงอัดมาตรฐานของซีเมนต์มอร์ตาร์ (มอก.15 เล่ม 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ 190 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วน DLS20, DLS30 , DLS40 และ DLS50 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 186.33, 133.66, 111.66 และ 85.33 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยค่ากำลังอัดต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดที่อายุ 7 วัน

เมื่อพิจารณากำลังอัดของตัวอย่างที่ทำการทดสอบที่อายุ 28 วันมอร์ตาร์ตัวอย่าง DLS10, DLS20 และ OPC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 317.66, 285.33 และ 397 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับซึ่งมีค่าผ่านเกณฑ์กำหนดค่ากำลังอัดรับแรงอัดมาตรฐานของซีเมนต์มอร์ต้า (มอก.15 เล่ม 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วน DLS30, DLS40 และ DLS50 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 210.00, 147.00 และ 101.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยค่ากำลังอัดต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดที่อายุ 28 วัน

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์พบว่าเมื่อผสมฝุ่นหินในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดลดลงตามลำดับและเมื่อมอร์ตาร์มีอายุสูงขึ้นจะทำให้มีค่าการรับกำลังอัดที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานระยะเริ่มต้นยังไม่มีผลต่อมอร์ตาร์แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นจะทำให้มอร์ตาร์มีความแข็งแรงและรับกำลังอัดได้เพิ่มขึ้นตามอายุของมอร์ตาร์ ซึ่งสอดคล้องกับ (ปริญญาและชัย, 2556)

จากผลการพิจารณาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ พบว่ามอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 ถึงจะผ่านมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1 ดังนั้นในการทดสอบค่าการหดตัวรวมและค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีตจึงเลือกทดสอบชุดตัวอย่างเพียง 4 ชุดตัวอย่าง โดยใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 10,15 และ 20

4.4 ผลการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีต

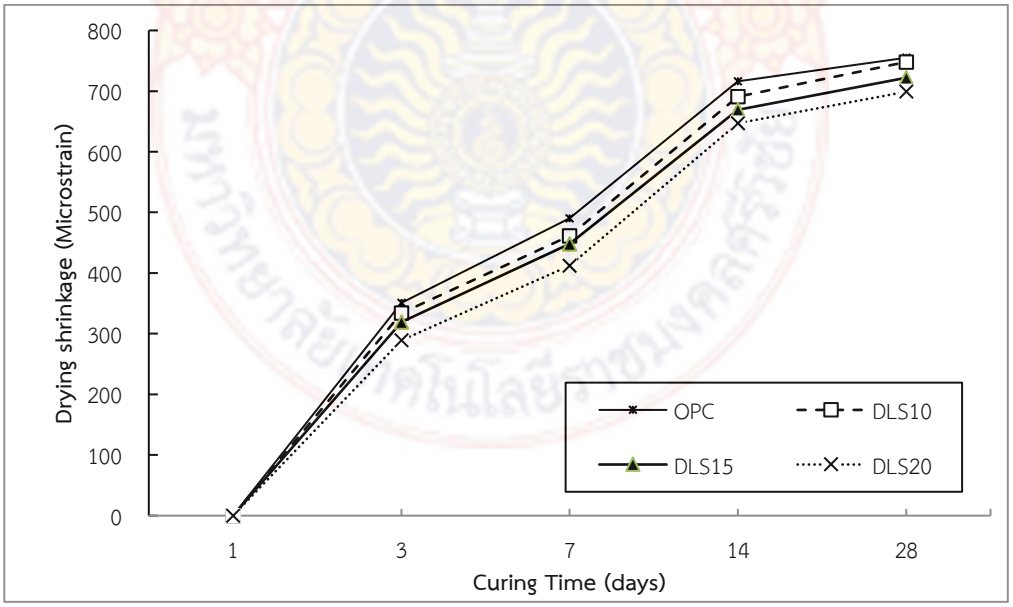


ภาพที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีตกับอายุการบ่ม

จากภาพที่ 4-11 แสดงพฤติกรรมการหดตัวแบบออโตจีนัส ของคอนกรีตผสมฝุ่นหินผุเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยภาพรวมจะเห็นว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของฝุ่นหินผุมีค่าการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และค่าการหดตัวลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินผุเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินผุ เท่ากับเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลงและช่วยเพิ่มปริมาณน้ำอิสระในคอนกรีต จึงทำให้การหดตัวแบบออโตจีนัสลดลง

4.5 ผลการทดสอบการหดตัวรวมของคอนกรีต

การหดตัวรวมของคอนกรีตแสดงในภาพที่ 4-12 พบว่า ค่าการหดตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการบ่มเพิ่มขึ้นทั้งคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมฝุ่นหินผุ อัตราการหดตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเริ่มมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป อันเนื่องมาจากในช่วงแรกน้ำอิสระซึ่งมีปริมาณมากสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกโดยผ่านทางช่องคาพิวลารี (Capillary) ได้ง่าย จนกระทั่งเมื่อน้ำอิสระมีปริมาณลดลงทำให้น้ำที่เป็นส่วนประกอบภายในโครงสร้างของเจลและแคลเซียมซิลิเกตไฮ-เดรต (C-S-H) แทรกออกมา แต่กระนั้นความสามารถในการเคลื่อนตัวออกมามีค่าต่ำมาก เนื่องจากถูกโครงสร้างของเจลและแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตยึดรั้ง (Restrained) ไว้ประกอบการที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ในคอนกรีตมีปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น นั่นคือการทำให้ช่องคาพิวลารีมีขนาดเล็กลง น้ำหรือความชื้นจึงเคลื่อนที่ออกได้ยากขึ้นส่งผลให้การหดตัวรวมจึงมีอัตราของการหดตัวลดลงจนกระทั่งมีค่าการหดตัวมีแนวโน้มคงที่ ผลการทดสอบการหดตัวรวมพบว่าคอนกรีตผสมฝุ่นหินผุ มีแนวโน้มหดตัวน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม



ภาพที่ 4-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวรวมของคอนกรีตกับอายุการบ่ม

จากการศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียส และค่าการหดตัวรวมคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 มีความเหมาะสมที่สุด โดยที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่าการหดตัวออโตจีเนียสเท่ากับ 312 ไมโครเมตร และค่าการหดตัวรวมเท่ากับ 699 ไมโครเมตร ตามลำดับ

บทที่ 5
สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาคอนกรีตโดยใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

5.1.1.1 ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.71

5.1.1.2 ฝุ่นหินหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าความละเอียดโดยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) โดยใช้การร่อนแบบเปียก (Wet Sieve Analysis) เท่ากับร้อยละ 28

5.1.1.3 มวลรวมละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.55 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ 0.87 โมดูลัสความละเอียด 2.94 และหน่วยน้ำหนัก 1,598 kg/m^3

5.1.2 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์

5.1.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (OPC) เท่ากับร้อยละ 29 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหินร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 มีค่าเท่ากับร้อยละ 29.5, 30, 33, 36 และ 39 ตามลำดับ

5.1.2.2 ระยะการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหินร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เท่ากับ 95, 108, 120, 125, 131 และ 140 นาที ตามลำดับ

5.1.3 คุณสมบัติของมอร์ตาร์

5.1.3.1 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ใช้ค่าการไหล 110±5 (W/C = 0.60) พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินจะมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (OPC) และเมื่อใส่ปริมาณฝุ่นหินที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นลดลงตามปริมาณฝุ่นหินที่เพิ่มขึ้นตามลำดับแต่เมื่อมอร์ตาร์มีอายุสูงขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นตามอายุของมอร์ตาร์

5.1.3.2 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสมฝุ่นหินทุกอัตราส่วน ปรากฏว่ามีค่ารับกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (OPC) เมื่อผสมฝุ่นหินในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ารับกำลังอัดมอร์ตาร์ลงลด ที่อายุ 3 วัน จะมีการพัฒนากำลังอัดต่ำ แต่ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน จะมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานเมื่อมีอายุสูงขึ้นจะทำให้รับกำลังอัดได้เพิ่มขึ้น โดยที่อายุ 28 วัน มอร์ต้าที่ผสมฝุ่นหินร้อยละ 10, 20 ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1 ซึ่งมีค่ากำลังอัดที่

อายุ 28 วันเท่ากับ 317, 285.33 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนอัตราส่วนร้อยละ 30, 40 และ 50 ไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน

5.1.4 คุณสมบัติการหดตัวของคอนกรีต

5.1.4.1 การหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีต

ผลการทดสอบค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีต จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

5.1.4.2 การหดตัวรวมของคอนกรีต

ผลการทดสอบค่าการหดตัวรวมของคอนกรีต จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต สอดคล้องกับการหดตัวแบบออโตจีเนียสของคอนกรีต

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากค่าความหนาแน่นของคอนกรีต ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ และพฤติกรรมการหดตัวของคอนกรีตในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าอัตราส่วนการทดแทนฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่อัตราร้อยละ 20 คือมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,095 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 285.33 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสเท่ากับ 312 ไมโครเมตร และค่าการหดตัวรวมเท่ากับ 699 ไมโครเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการนำฝุ่นหินจากหลายโรงงานมาทำการทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของฝุ่นหินโรงงานนั้น ๆ และจะได้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ฝุ่นหินที่ดีที่สุด และเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่พอเหมาะสำหรับทดแทนปูนซีเมนต์

บรรณานุกรม

กฤษดา เสือเอี่ยม และณัฏฐ์ มากุล. 2555. อิทธิพลของฝุ่นหินปูนต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์ชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้าแกลบ. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร**, ปีที่ 23 ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2555, หน้า 65-73.

กลุ่มวิเคราะห์ ทดสอบและควบคุมคุณภาพ สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. 2558. **คู่มือการปฏิบัติงานควบคุมคุณภาพการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต**. กรุงเทพฯ : กรมทางหลวงชนบท.

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2549. **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 13.กรุงเทพฯ : บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด.

ชูเกียรติ ชูสกุล. 2553. การศึกษาคุณสมบัติฝุ่นหินผุเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับงานก่อและงานฉาบ. **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6**, จังหวัดเพชรบุรี, 20-22 ตุลาคม 2553, หน้า 213-217.

ชูเกียรติ ชูสกุล. 2559. **คอนกรีตเทคโนโลยี ทฤษฎีและปฏิบัติ**, กรุงเทพฯ : บริษัท ทริปเพิ้ล กรุ๊ป จำกัด.

ทนงศักดิ์ โนไชยา ศราวุฒิ เถื่อนถ้ำ และชุตินธร สุขเกษม. 2557. ศึกษากำลังอัดของปูนซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าชานอ้อยกับเถ้าลอย. **รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยนเรศวร.**

ปิติ สุคนธสุขกุล. 2556. **คอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์วรรณกวี.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2552. **ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต**, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2556. **ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต**, พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

สุภิชาติ เจนจิระปัญญา และปิติศานต์ กร้ำมาตร. 2559. ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มจพ.**, ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 : พ.ค.–ส.ค. 2559, หน้า 77-86.

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2559. **สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2559 และแนวโน้มปี 2560**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ**: มอก. 15-2547. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.

อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ และอรรถพล มาลัย. 2559. การพัฒนากำลังอัดมอร์ต้าร์ผสมเถ้าถ่านหินและหินฝุ่น. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**, ปีที่ 26 ฉบับที่ 1 : 1 ม.ค.-เม.ย. 2559, หน้า 13-18.

American Society of Testing Materials ASTM C29: Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregates, **Annual Book of ASTM Standards**, 2001, Vol. 04.02: 1-4.

American Society of Testing Materials ASTM C 33: Standard Specification for Concrete Aggregates, **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, 1997; 04.02: 10-17.

American Society of Testing Materials ASTM C 127: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, 2001, Vol. 04.02: 64-68.

American Society of Testing Materials ASTM C 128: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, 2001, Vol. 04.02: 69-73.

American Society of Testing Materials ASTM C 136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, 2001, Vol. 04.02: 78-82.

American Society of Testing Materials ASTM C 143: Standard Practice for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, 2001, Vol. 04.02: 89-91.

American Society for Testing and Material, ASTM C 618: Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, 2001, Vol. 04.02: 310-313.

Cordeiro G. C., Toledo Filho R. D., Tavares L. M. and Fairbairn E.M. R. 2008. “Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars”. **Cement Concrete Compos,** Vol.30 : pp. 410–418

Fraay, A.L.A., Bijen, J.M. and Haan, Y.M.D. 1989. “The Reaction of Fly Ash in Concrete. A Critical Examination” **Cement and Concrete Research**, Vol.19, pp. 235-246

Hansen, T.C., (1990). “Long-Term Strength of High Fly Ash Concrete” **Cement and Concrete Research**, Vol.20 : pp.193-196.

Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S. and Chutubtim, S. 2001. “A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources pozzolanic materials” **Cement & Concrete Composites,** Vol.23 : pp.335-343

Pimraksa, K. and Chindaprasirt, P. 2009. Lightweight bricks made of diatomaceous earth, lime and gypsum. **Ceramics International**, Vol. 35 : pp. 417-478.

Tangpagasita, T., Cheerarotb, R., Jaturapitakkula, C., and Kiattikomo, K. 2005. “Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar” **Cement and Concrete Research**, Vol.35 : pp. 1145–1151.

ภาคผนวก

ผลลัพธ์ (OUTPUT) ที่ได้จากโครงการวิจัย

มอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตแอสฟัลท์คอนกรีต

Mortar Mixed with Waste Stone Dust from Asphalt Concrete Mixing Plant

ชูเกียรติ ชูสกุล[1*], ดุสิต ชูพันธ์[1] และ ขวัญชีวา หยงสตาร์[2]
Chookiat Choosakul[1*], Dusit Chupan[1] and Khwanchiwa Yongsata[2]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เพื่อศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์โดยใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลท์คอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 บางส่วน โดยใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตแอสฟัลท์คอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วน 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.60 โดยศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน เปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1 จากการศึกษาพบว่า คุณสมบัติของฝุ่นหินเหลือทิ้งมีความละเอียดต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ (ถพ.) เท่ากับ 2.71 ในส่วนคุณสมบัติของมอร์ตาร์พบว่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงตามอัตราส่วนการเพิ่มของฝุ่นหินเหลือทิ้ง โดยอัตราส่วนการแทนที่ของฝุ่นหินเหลือทิ้ง 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ผ่านตามเกณฑ์ของมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1 ที่อายุ 3, 7, และ 28 วัน แต่หากพิจารณาที่อายุ 28 วัน ตามเกณฑ์ของมาตรฐาน มอก. 849-2556 อัตราส่วนการแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์ จะมีความเหมาะสมมากที่สุด โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 318 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2,099 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

คำสำคัญ: มอร์ตาร์, ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์, กำลังรับแรงอัด, ฝุ่นหินเหลือทิ้ง

[1] สาขาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210
[1] สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดตรัง 92150
[1] Department of Civil Engineering, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya Nakhon Si Thammarat Province 80210
[2] Department of Engineering Technology, Facuty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Trang Province 92150
*Corresponding author e-mail: chookiat58@yahoo.com

Abstract

This research studies the property of mortar by using waste stone dust from the asphalt mixing process to replace some Portland Cement type I in the ratio of 0, 10, 20, 30, 40 and 50 percent by weight. Using the water to binder ratio (W / B) equal to 0.60 by studying the compressive strength of mortars at the age of 3, 7 and 28, compared with TIS. 15 Volume 1. The study found that the property of waste stone dust has lower resolution than Portland Cement type I, with a specific gravity equals to 2.71. As for the property of mortar, compressive strength reduces in accordance with the increase ratio of dust waste stone by the ratio of rock dust leftover wich is 10 and 20 percent that passes the standards of TIS. 15 Volume 1 at the age of 3, 7, and 28 days. If by considering at the age of 28 days follow the standards of TIS. 849- 2556, the ratio of 10 percent is very appropriate by having compressive strength equals to 318 kg/cm^2 and the density is 2,099 kg/m^3.

Keywords: Mortar, Setting time cement paste, Compressive strength, Waste stone dust

บทนำ

ในปัจจุบันจึงมีการนำวัสดุต่าง ๆ มาทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในงานอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย และวัสดุจำพวกปอซโซลานอื่น ๆ เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์รวมถึงปัญหาสภาวะโลกร้อนและกระแสอนุรักษ์พลังงาน อีกทั้งลดมลภาวะจากการทิ้งวัสดุจากโรงงานอุตสาหกรรม จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต โดยสุภิชาติและปิติศานต์ [1] ได้ศึกษาการใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมเป็นสารปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พวงแก้ว, รวิกานต์และดนุพล [2] ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินแกรนิต Abbas et al. [3] ได้ศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์และทรายบางส่วนด้วยฝุ่นหินปูนหลือทิ้งและเถ้าก้นเตา บุรฉัตร และเพิ่มพล [4] ศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน ซึ่งการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่จะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

ประเทศไทยมีโรงงานผลิตแอสฟัลท์คอนกรีตหลายโรงงาน โดยเกิดจากการนำหินหลายขนาดมาคละกันทำการเผารวมกันที่อุณหภูมิ 150-170 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะผสมน้ำยางมะตอยลงไป จึงทำให้เกิดฝุ่นหินที่ได้จากกระบวนการผสมแอสฟัลท์ ซึ่งฝุ่นหินเหลือทิ้งที่เหลือจากการผสมแอสฟัลท์คอนกรีตจะมีขนาดเล็กซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ซึ่งไม่สามารถผสมกับยางมะตอยได้ หินที่นำมาการใช้ในการผสมแอสฟัลท์คอนกรีตเป็นหินปูน (limestone) เป็นหินในกลุ่มหินตะกอน มีชื่อวิทยาศาสตร์ที่รู้จักกันในหมู่นักธรณีว่า แร่แคลไซต์ (Calcite) ($CaCO_3$) เป็นหินตะกอนคาร์บอเนต ภูเขาหินปูนมักมียอดยักแหลมเป็นหน้าผา และเป็นหินที่ละลายน้ำได้ดี บริเวณที่พบจังหวัดสระบุรี เพชรบุรี กระบี่ นครศรีธรรมราช พังงา และราชบุรี ประโยชน์ใช้ในอุตสาหกรรมการทาง ทำถนน ทางรถไฟ เผาทำปูนซีเมนต์ ปูนขาว หรือปูนกินหมาก ทำแคลเซียมคาร์ไบด์ ทำวัสดุทนไฟ ทำปุ๋ย และทำสีผสม มีธาตุประกอบชนิดเดียวกับปูนซีเมนต์ และฝุ่นหินปูนมีอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1-100 ไมโครเมตร [5] โรงงานผสมแอสฟัลท์คอนกรีตจะสร้างบ่อดักฝุ่นเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายออกสู่ชั้นบรรยากาศ แต่มีบางส่วนที่ฟุ้งกระจายออกไป ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดทิ้งและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณข้างเคียง ดังภาพที่ 1 และ ภาพที่ 2

ภาพที่ 1 ฝุ่นหินที่ออกจากบ่อดักฝุ่น

ภาพที่ 2 กองฝุ่นหินเหลือทิ้งในบริเวณโรงงานผลิตแอสฟัลท์คอนกรีต

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาวัสดุที่เหลือทิ้งจากการผสมแอสฟัลท์คอนกรีตเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามการนำฝุ่นหินเหลือทิ้งจากการผสมแอสฟัลท์คอนกรีตมาลดปริมาณปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตอาจจะไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุด เพียงแค่ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำทรัพยากรธรรมชาติที่เหลือใช้และลดสภาวะปัญหาสิ่งแวดล้อม ตลอดจนมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์และการใช้งานได้เชิงวิศวกรรมให้เกิดประโยชน์สูงสุด

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้าง ซึ่งมีคุณสมบัติตาม มอก. 15 เล่ม 1 โดยนำฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลท์คอนกรีตของ หจก. โล่ทองการโยธา ณ ตำบลทุ่งกระบือ อำเภอย่านตาขาว จังหวัดตรัง โดยนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำจากอำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ค้างตะแกรงเบอร์ 30

2. ส่วนผสมของมอร์ตาร์

งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างก้อนมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. ออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์ตาม มอก. 15 เล่ม 12 โดยออกแบบก้อนมอร์ตาร์ทดสอบที่จำนวน 9 ก้อนต่ออัตราส่วนการผสม และกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) หาได้จากการทดสอบค่าการไหลแผ่ (Flow Table Test) ตามมาตรฐาน ASTM C230 ที่ทำให้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 110±5 ซึ่งได้ค่า W/B = 0.60 โดยให้คงที่ตลอดการศึกษาครั้งนี้ ใช้อัตราส่วนฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลท์คอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1: 2.75 โดยน้ำหนัก ปริมาณส่วนผสมมอร์ตาร์ 9 ก้อนตัวอย่าง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของมอร์ตาร์

Mix	Mix Proportion Mortar				
	Cement (g)	DSW (g)	Sand (g)	Water (g)	Total (g)
OPC	740	0	2035	444	3219
DSW10	666	74	2035	444	3219
DSW20	592	148	2035	444	3219
DSW30	518	222	2035	444	3219
DSW40	444	296	2035	444	3219
DSW50	370	370	2035	444	3219

หมายเหตุ: OPC = Ordinary Portland Cement มอร์ตาร์ควบคุม

DSW10 = Dust Stone Waste มอร์ตาร์ที่ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งร้อยละ 10

3. การทดสอบคุณสมบัติ

3.1 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลท์คอนกรีตโดยทำการทดสอบดังนี้

1) ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินเหลือทิ้ง วิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยวิธี Theoretical Formulas Fundamental Parameter Calculations ซึ่งปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้คำนวณค่าให้อยู่ในรูปออกไซด์ของธาตุนั้น ๆ

2) ศึกษารูปร่างและลักษณะของอนุภาคของฝุ่นหินเหลือทิ้ง โดยถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

3) ทดสอบความถ่วงจำเพาะของฝุ่นหินเหลือทิ้ง ตามมาตรฐาน ASTM C188

4) ทดสอบหาความละเอียดของฝุ่นหินเหลือทิ้งด้วยวิธี Wet Sieving Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C430

3.2 ทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ตาร์มีรายละเอียดดังนี้

1) ทดสอบหาค่าความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ด้วยเข็มไวแคต ตามมาตรฐาน ASTM C187

2) ทดสอบหาระยะการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ด้วยเข็มไวแคต ตามมาตรฐาน ASTM C191

3) ทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. โดยการผสมมอร์ตาร์ตามส่วนผสมดังตารางที่ 1 จากนั้นหล่อมอร์ตาร์ลงในแบบหล่อ แล้วทำการห่อแบบหล่อด้วยพลาสติกป้องกันการสูญเสียความชื้น ทิ้งไว้จนครบ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบแล้วนำไปบ่มในน้ำ ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 ที่อายุการบ่ม 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง

4) ทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรของมอร์ตาร์ ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ซม. โดยการนำก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์ที่หล่อไปทำการอบที่อุณหภูมิ 105 ±5 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนัก วัดขนาด และหาค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งตาม มอก. 1505-2541

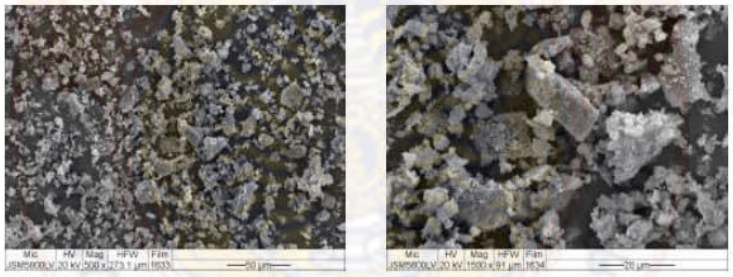
ผลการศึกษา

1. คุณสมบัติของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลท์คอนกรีต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ฝุ่นหินเหลือทิ้งก่อนอบ ฝุ่นหินเหลือทิ้งหลังอบ

ภาพที่ 3 ลักษณะของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลท์คอนกรีตกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

จากภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีสีเทาอ่อน ส่วนฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลท์คอนกรีตก่อนอบจะมีสีดำ เมื่อผ่านการอบจะเปลี่ยนเป็นสีเทาเข้ม ความละเอียดของฝุ่นหินเหลือทิ้งพิจารณาได้จากค่าร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) โดยการทดสอบด้วยวิธี Wet Sieving Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C430 ซึ่งได้ค่าเท่ากับร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 [6] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก จากภาพที่ 4 ขยายอนุภาคของฝุ่นหินเหลือทิ้ง พบว่าฝุ่นหินเหลือทิ้งมีรูปร่างไม่แน่นอน หยาบละเอียดคละกัน มีเหลี่ยมมุม และมีพื้นผิวทั้งแบบเรียบทึบและขรุขระมีรูพรุน มีลักษณะคล้ายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.71 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับฝุ่นหินปูนจากงานวิจัยของ [7]



ภาพที่ 4 ขยายอนุภาคฝุ่นหินเหลือทิ้ง ขนาด 500 และ 1,500 เท่า

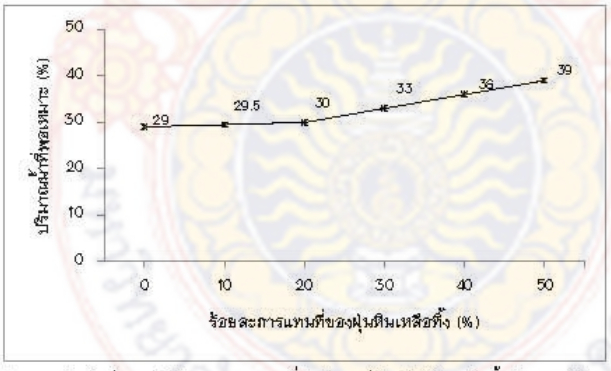
จากองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลท์คอนกรีตมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 34.7 ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประมาณร้อยละ 47 และมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งอาจจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในระยะยาว ซึ่งอาจก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัวของคอนกรีตได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง MgO กับน้ำช้ามาก [8]

ตารางที่ 2 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลท์คอนกรีต

องค์ประกอบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [8]	ฝุ่นหินเหลือทิ้ง
Silicon Dioxide (SiO_2)	17-25	4.1
Aluminum Oxide (AL_2O_3)	3-8	3.4
Iron Oxide (Fe_2O_3)	0.5-6.0	1.0
Calcium Oxide (CaO)	60-70	34.7
Magnesium Oxide (MgO)	0.1-4.0	16.0
Sodium Oxide (Na_2O)	0.1-1.8	-
Potassium Oxide (K_2O)	0.1-1.8	0.1
Sulfur Trioxide (SO_3)	0.5-3.0	1.6
Other	0.5-3.0	4.4
Loss on Ignition (LOI)	0.1-3.0	23.6
Insoluble Residue	0.20-0.75	-

2. คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์มอร์ตาร์

2.1 ความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์

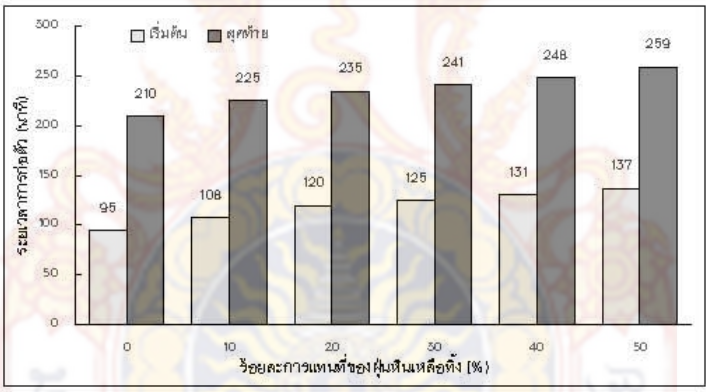


ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งกับความข้นเหลวปกติ

จากผลการทดสอบค่าความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่าปริมาณน้ำที่พอเหมาะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของการแทนที่ของฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลท์ตอนกรีตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากฝุ่นหินเหลือทิ้งมีลักษณะอนุภาคขรุขระ และมีรูพรุนมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้เกิดการดูดซึมน้ำสูง การไหลลื่นของส่วนผสมลดลง จึงมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณน้ำที่พอเหมาะจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของวัสดุผง [9]

2.2 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนการแทนที่ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลท์ตอนกรีตร้อยละ 0 (OPC) ใช้เวลาในการก่อตัวเริ่มต้นน้อยที่สุด ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ฝุ่นหินเหลือทิ้งในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายก็มีค่าสอดคล้องกับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการก่อตัวอาจมีผลมาจากเมื่อแทนที่ฝุ่นหินเหลือทิ้งเป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ลง รวมถึงการที่ฝุ่นหินเหลือทิ้งมี MgO ผสมอยู่มากกว่าปูนซีเมนต์ จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดน้อยลง ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jitchaiyaphum et al. [10] ประกอบกับขนาดอนุภาคของฝุ่นหินเหลือทิ้งโตกว่าปูนซีเมนต์จึงทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้น และทำให้โครงสร้างโดยรวมของซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นลดลงตามไปด้วย



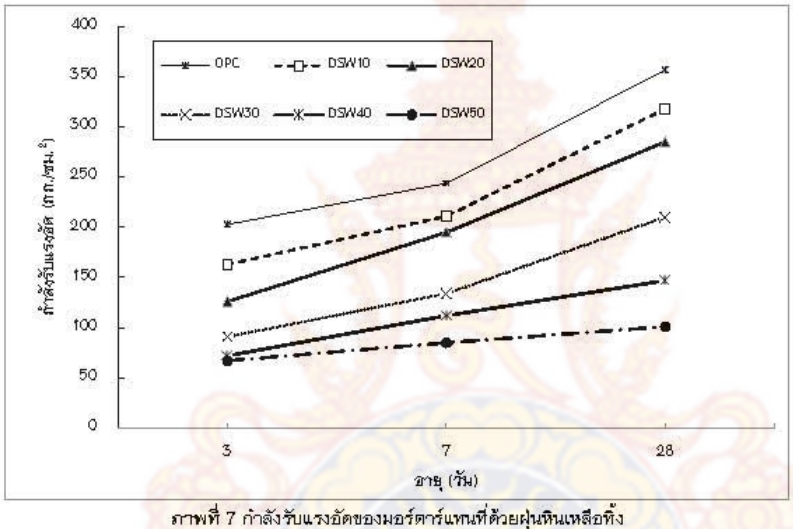
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งกับระยะเวลาการก่อตัว

2.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักดังแสดงในภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนผสมมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งเมื่ออายุการบ่มที่ยาวนานขึ้นทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดอย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่จะทำหน้าที่คล้ายวุ้นยึดเกาะให้โครงสร้างแข็งแรง และรับกำลังอัดได้สูงขึ้น [11] โดยมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งมีค่ากำลัง

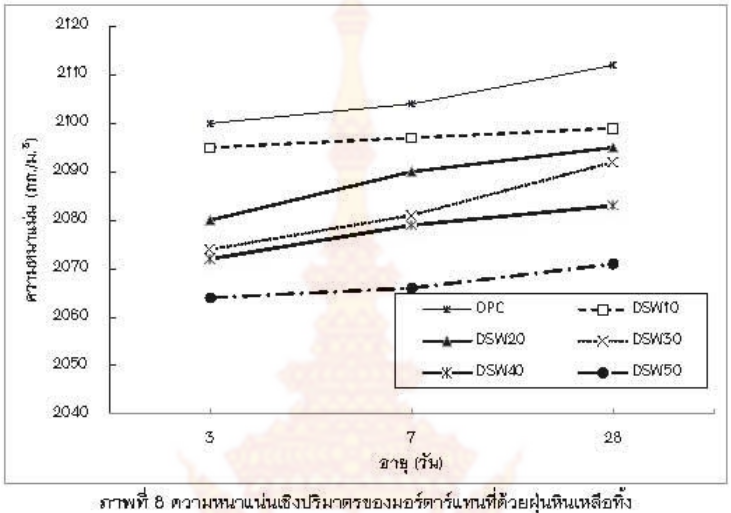
รับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมทุกอัตราส่วนการผสม เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงจะส่งผลให้ปริมาณ CSH ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลงด้วยสอดคล้องกับงานวิจัยของ [1, 12] อีกปัจจัยหนึ่งคือค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ (LOI) ของฝุ่นหินเหลือทิ้งมีค่าสูงถึงร้อยละ 23.8 กำลังรับแรงอัดจึงมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของมอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาตาม มอก. 15 เล่ม 1 เกณฑ์กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7 และ 28 ไม่ต่ำกว่า 120, 190 และ 280 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ พบว่ามอร์ตาร์ควบคุมผ่านเกณฑ์กำหนดดังกล่าว เมื่อพิจารณาตาม มอก. 849-2556 [13] (ไม่ต่ำว่า 130, 200 และ 300 กก./ซม.^{2}) พบว่ามอร์ตาร์แทนที่ฝุ่นหินเหลือทิ้งร้อยละ 10 ผ่านเกณฑ์กำหนดดังกล่าว



ภาพที่ 7 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์แทนที่ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้ง

2.4. ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของซีเมนต์มอร์ตาร์



ภาพที่ 8 ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของมอร์ตาร์แทนที่ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้ง

พิจารณาความหนาแน่นเชิงปริมาตรของมอร์ตาร์ตามภาพที่ 8 พบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งทุกอัตราส่วนการผสมมีความหนาแน่นน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากฝุ่นหินเหลือทิ้งมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งเพิ่มมากขึ้นทำให้มอร์ตาร์มีช่องว่างมากขึ้น และความหนาแน่นลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของขวัญชีวา, ชูเกียรติ [14] โดยมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งมีความหนาแน่นอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 98.2 ถึง 99.6 ของมอร์ตาร์ควบคุม

วิจารณ์และสรุปผล

จากผลของการศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลท์ตอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ค่า W/B เท่ากับ 0.60 ในครั้งนี้สรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณฝุ่นหินเหลือทิ้ง มีผลต่อค่าความข้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ โดยการใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น โดยซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 29.5-39.0 ซึ่งซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งในอัตราส่วนร้อยละ 40 และ 50 มีค่าสูงกว่าค่าความข้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั่วไปที่อยู่ในช่วงร้อยละ 24-33 [8] ทั้งนี้มีผลมาจากอนุภาคของฝุ่นหินเหลือทิ้งมีพื้นผิวขรุขระและมีรูพรุน

2. การเพิ่มขึ้นของปริมาณผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจะมีผลต่อการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ โดยระยะเวลาการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับค่าความข้นเหลวปกติ ทั้งนี้มีผลจากเมื่อเพิ่มปริมาณฝุ่นหินเหลือทิ้งจะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลง จึงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นน้อยไปด้วย โดยระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และก่อตัวสุดท้ายของมอร์ตาร์ควบคุมเป็นไปตามเกณฑ์กำหนดของ มอก. 15 เล่ม 1 ของมอร์ตาร์ผสมผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลท์ตอนกรีตทุกอัตราส่วนการผสมเป็นไปตามเกณฑ์กำหนดของ มอก. 849-2556

3. มอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งจะมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมทุกอัตราส่วน โดยค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของฝุ่นหินเหลือทิ้ง โดยค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผ่านเกณฑ์ของ มอก. 15 เล่ม 1 คือ OPC, DSW10 และ DSW20 ผ่านเกณฑ์ของ มอก. 849-2556 คือ DSW10

4. มอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรลดลง ตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีผลมาจากขนาดอนุภาคของฝุ่นหินใหญ่กว่าของปูนซีเมนต์

ข้อเสนอแนะงานวิจัยครั้งนี้ยังมีขอบเขตที่ควรศึกษาเพิ่มเติม เช่น ระยะการก่อตัวของคอนกรีต ความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต เพื่อศึกษาถึงความทนทานของคอนกรีตผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลท์คอนกรีต สำหรับการพิจารณาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งบรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย และใคร่ขอบคุณนายศุภวัฒน์ จันทร์ปราง นางสาวผกาวรรณ หวานสนิท นายธนากร อักษรพันธ์ และนายเกรียงไกร ไกรเทพ ทีมงานวิจัยที่ช่วยเก็บข้อมูลการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. สุภิชาติ เจนจิระปัญญา, ปิติศานต์ กร้ำมาตร. การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้วัสดุกากอุตสาหกรรม. วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 2559; 12(2): 77-86.
2. พวงแก้ว บัวทอง, รวิกานต์ อมฤตเบญจฤทัย, ดนุพล ดันนโยภาส. สมบัติของมอร์ต้าร์ผสมฝุ่นแกรนิตดัดแปร. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 2557; 17(1): 5-12.
3. Abbas Mahapara, Kumar Ravi, Kumar Dinesh. Study The Effect of Coal Bottom Ash And Limestone Dust as Partial Replacement of Sand and Cement. Int. J. Sci. Res. Educ. 2016; 4(5): 5363-5372.
4. บุรฉัตร ฉัตรวีระ, เพิ่มพล ศรีนวล. การศึกษาสมบัติของมอร์ต้าร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. 2555; 35(2): 201-218.
5. Kradi, E.H, Aggoun, S., De Schutter, G., Ezziane, K. Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration. MATERIALS AND STRUCTURES. 2010; 43(5): 665-673.
6. American Society for Testing and Materials. ASTM C618-01: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards. 2001; Vol. 04.02, Philadelphia.
7. กฤษดา เสือเอี่ยม, ณัฐฐ์ มากุล. ผลของวัสดุผงผสมร่วมสามชนิดในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตชนิดไหลตัวได้ในสภาวะคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. 2556; 36(1): 127-147.
8. ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย; 2556.
9. Hewlett, P. C., Liska, M. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 5th Edition. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann; 2019.
10. Jitchaiyaphum, K., Sinsiri, T., Jaturapitukkul, C., Chindaprasirt, P. Cellular Lightweight Concrete Containing High-Calcium Fly Ash and Natural Zeolite. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2013; 20(5): 482-471.
11. ชูเกียรติ ชูสกุล. คอนกรีตเทคโนโลยี หฤษฎีและปฏิบัติ. กรุงเทพฯ: บริษัท ทริปเพิ้ล กรุ๊ป จำกัด; 2559.
12. ปิญชาน์ ต่อกิตติกุล, ทนงศักดิ์ โนโชยา. กำลังอัด ความหนาแน่น และการนำความร้อนของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าหนัก. เอกสารการประชุมวิชาการระดับชาติ "วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 7"; มีนาคม 2558; คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. พิษณุโลก: 2558. (หน้า PY-O-029), 30-31.
13. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (มอก. 849-2556). กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม; 2556.
14. ขวัญชีวา หยงสตาร์, ชูเกียรติ ชูสกุล. การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในคอนกรีตกำลังสูง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2561; 20(1): 74-82.