

การใช้วัสดุฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับเถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสม



นางสาวพิมพ์ชนก เสริฐสูงเนิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2565

THE USE OF ASPHALT WASTE DUST AND FLY ASH
IN CEMENT - MIXED MATERIALS



PIMCHANOK SERTSOONGNERN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Material Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การใช้วัสดุฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับเถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.ศลิษา ไชยพุทธ)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.จิรัชญา อายะวรรณา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.อนูรัตน์ ภูวนคำ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ศิริวรรณ โชคคำ)

กรรมการ

(รศ. ดร.นัตถชัย โชติชรูญางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พิมพ์ชนก เสริฐสูงเนิน : การใช้วัสดุฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับเถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสม (THE USE OF ASPHALT WASTE DUST AND FLY ASH IN CEMENT- MIXED MATERIALS) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. จิรัชญา อายะวรรณ ,
64 หน้า

คำสำคัญ : วัสดุซีเมนต์ผสม/ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง/เถ้าลอย/ค่ากำลังรับแรงอัด/การบ่ม

จากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ นำมาสู่การพัฒนาวัสดุก่อสร้างแบบยั่งยืนเพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง โดยศึกษาวัสดุซีเมนต์ผสมที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ร่วมกับฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตแอสฟัลท์คอนกรีตและเถ้าลอยจากการเผาถ่านหินในการผลิตไฟฟ้า ขึ้นงานเตรียมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ร่วมกับฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งและเถ้าลอยร้อยละ 0 - 50 โดยน้ำหนัก ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวและค่ากำลังรับแรงอัดหลังจากบ่มวัสดุซีเมนต์ผสมตามมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยวัสดุซีเมนต์ผสมจะถูกบ่มในสภาวะน้ำปูนขาวอิ่มตัวและการบ่มภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกเป็นระยะเวลา 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงเฟสในตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ผสมหลังทดสอบระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นของวัสดุซีเมนต์ผสมทุกสูตรพบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 80 - 2550 ที่กำหนดไม่น้อยกว่า 45 นาที ระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง ทำให้ปริมาณน้ำบางส่วนถูกดูดซับบนผิวอนุภาคของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง ทำให้น้ำที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์มีน้อยลง ในทางกลับกันระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ วัสดุซีเมนต์ผสมทุกสูตรที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน จึงให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรม โดยการใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งในปริมาณร้อยละ 20 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 ด้วยวิธีการบ่มวัสดุซีเมนต์ผสมภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก ส่งผลให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา พิมพ์ชนก

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา จ.ช.

PIMCHANOK SERTSOONGNERN : THE USE OF ASPHALT WASTE DUST AND FLY ASH IN CEMENT-MIXED MATERIALS THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. JIRATCHAYA AYAWANNA, Ph.D., 64 PP.

Keywords : CEMENT-MIXED MATERIALS/ ASPHALT WASTE DUST /FLY ASH/
COMPRESSIVE STRENGTH /CURING

Due to an environmental problem of the carbon dioxide (CO₂) emission from the cement manufacturing industry, sustainable construction materials with the reduction of cement usage are being developed. Mixed cement material made of Portland cement type 1 with asphalt waste dust from asphalt concrete plants and fly ash from lignite coal-fired power stations was studied. The mixed cement specimens were prepared from a fixed 50 wt% of Portland cement ratio, with 0 - 50 wt% of each asphalt waste dust and fly ash. Setting time and compressive strength test were carried out on the specimens after curing in lime-saturated water and in a plastic wrapping for 3, 7, and 28 days. After the strength test, microstructure and phase development of all specimens were examined. The initial setting time of all specimens passed the specified TIS 80 - 2007 standard, which is not less than 45 minutes. The setting time tended to reduce with an increase of asphalt waste dust due to the small particle size of asphalt waste dust, providing water is adsorbed on the surface of particles. As a result, less water for the hydration reaction of cement. Conversely, the setting time tended to increase with the fly ash content. This is because the pozzolanic reaction of fly ash takes place more slowly than the hydration reaction of cement. Mixed cement material at a curing period of 28 days, therefore, provided high compressive strength above the industry standard.

The use of 20 wt% asphalt waste dust with 30 wt% fly ash and curing by plastic wrapping generated the highest compressive strength as a result of continuous hydration reaction and pozzolanic reaction



School of Material Engineering

Academic Year 2022

Student's Signature วิมลพร

Advisor's Signature วิมลพร

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลทุกท่าน ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. จิรัชญา อายะวรรณมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ช่วยชี้แนะแนวทางทั้งการเรียนและเรื่องส่วนตัว รวมทั้งช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด ตลอดจนช่วยตรวจสอบทั้งผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่และความสมบูรณ์ของเนื้อหาในงานวิจัยเล่มนี้

ครอบครัว เพื่อนสนิท เพื่อนระดับบัณฑิตศึกษา รวมทั้งนางสาวน้ำทิพย์ กิ่งน้อย และนายณัฐวัชร จูประเสริฐ ที่เข้าใจในการศึกษาต่อครั้งนี้ ให้การช่วยเหลือและคำแนะนำ รวมทั้งให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยมาโดยตลอด

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้เปิดโอกาสทางการศึกษา และให้การช่วยเหลือสนับสนุนด้านทุนการศึกษา รวมทั้งด้านอุปกรณ์ในการทำวิจัยและเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์มาโดยตลอด

คณาจารย์ทุกท่านในสาขาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้และการช่วยเหลือกับผู้วิจัยนี้

คุณพันทิพา นำสว่างรุ่งเรือง ที่ให้ความช่วยเหลือและประสานงานทางด้านเอกสารตลอดระยะเวลาการศึกษา รวมถึงนางสาวหนึ่งฤทัย งามแสง และนายสงคราม ยาวะประภาส ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือให้กับผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ศลิษา ไชยพุทธ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรัตน์ ภูวานคำ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ โชคคำที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และช่วยแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องในครั้งนี้

คุณประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ย่อมเป็นผลจากการช่วยเหลือและกรุณาจากทุกท่านที่กล่าวนามมาข้างต้น รวมทั้งบุคคลอื่นที่ผู้วิจัยมิได้กล่าวถึง ผู้วิจัยซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ค่ะ

พิมพ์ชนก เสริฐสูงเนิน

สารบัญ

หน้า

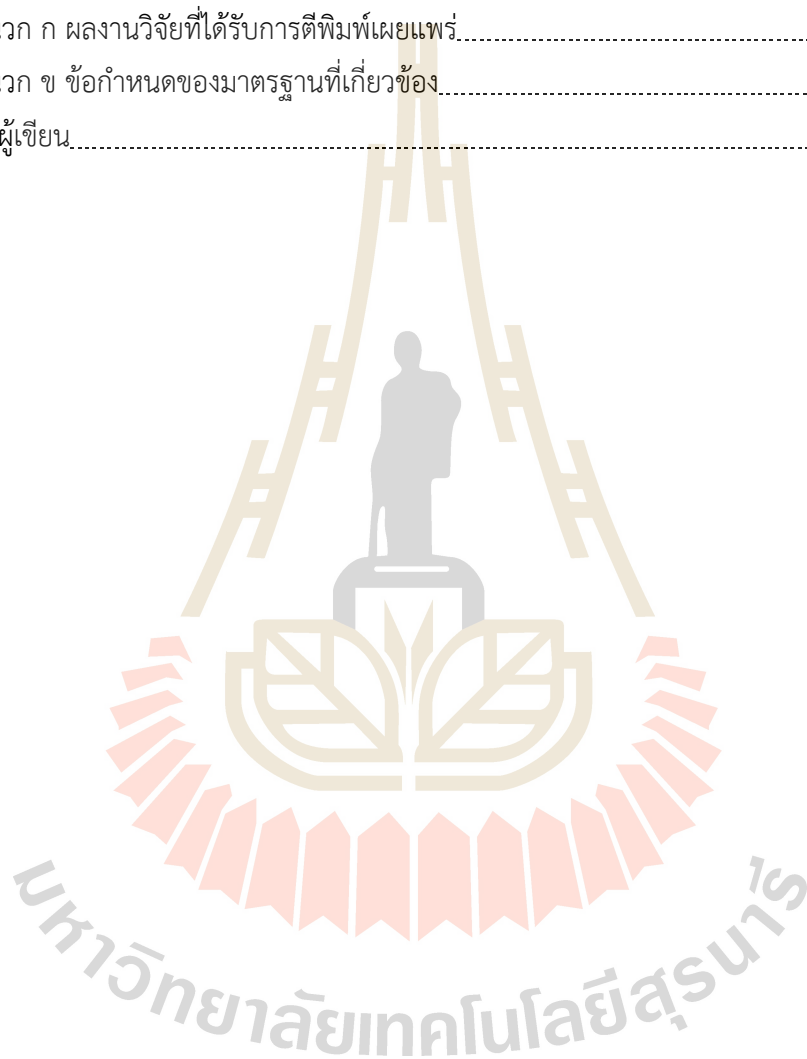
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement).....	5
2.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....	7
2.1.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7
2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction).....	9
2.3 ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง (Asphalt Waste Dust).....	10
2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินแอสฟัลท์เหลือทิ้ง.....	11
2.4 ผงหินปูน (Limestone Powder).....	13
2.4.1 วัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี.....	13
2.4.2 วัสดุที่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมี.....	13
2.5 วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan Material).....	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 อัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบ.....	31
3.3.2 การคำนวณหาปริมาณการใช้แก๊สลอย.....	32
3.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ.....	34
3.4.1 การวิเคราะห์ขนาด และการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ.....	34
3.4.2 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเฟสของวัสดุดิบ.....	34
3.4.3 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ.....	35
3.4.4 การวิเคราะห์หลักษณะ และรูปร่างของวัสดุดิบ.....	35
3.5 การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะของชิ้นงานหลังทดสอบ.....	36
3.5.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยเข็มแบบไวแคต.....	36
3.5.2 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดชิ้นงาน.....	36
3.5.3 การวิเคราะห์หลักษณะพื้นผิวและรูปร่างของชิ้นงานหลังการทดสอบ.....	37
3.5.4 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานหลังการทดสอบ.....	37
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล	38
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ.....	38
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ขนาด และการกระจายขนาดอนุภาค.....	39
4.1.2 ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ.....	40
4.1.3 ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเฟสของวัสดุดิบ.....	42
4.1.4 ผลการวิเคราะห์หโครงสร้างระดับจุลภาคลักษณะของพื้นผิว และรูปร่างของวัสดุดิบ.....	44
4.2 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุซีเมนต์ผสม.....	45
4.3 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสม.....	47
4.4 ผลการวิเคราะห์หโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุซีเมนต์ผสมหลังการทดสอบ.....	54
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รายการอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	65
ภาคผนวก ข ข้อกำหนดของมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	87



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....7
2.2	รายละเอียดของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1.....8
2.3	องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....11
2.4	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618.....16
2.5	องค์ประกอบทางเคมีทั่วไปของเถ้าลอย.....17
2.6	คุณลักษณะที่ต้องการของปูนซีเมนต์ผสม.....19
3.1	วัสดุ และอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย.....27
3.2	เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย.....28
3.3	สัญลักษณ์ที่ใช้งานวิจัย.....29
3.4	อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ผสมแบบระบบสามวัสดุประสานของปูนซีเมนต์ ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และเถ้าลอย ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.4.....31
4.1	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุดิบ.....39
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ.....41
4.3	ระยะเวลาในการก่อตัวของวัสดุซีเมนต์ผสม.....45
4.4	ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างชิ้นงานหลังทดสอบด้วยวิธีการบ่มใน น้ำปูนขาวอิ่มตัวและการบ่มภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ระยะเวลา 28 วัน.....54
4.5	การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเฉพาะจุดจากเทคนิค EDS ของตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ผสม โดยวิธีการบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว และบ่มภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ ระยะเวลา 28 วัน.....57

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	อนุภาคฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งจาก SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า.....10
2.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสเบื้องต้นของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง.....12
2.3	อนุภาคของเถ้าลอยที่กำลังขยาย 2580 เท่า.....15
3.1	ขั้นตอนการทำวิจัยโดยสังเขป.....30
3.2	เครื่องวิเคราะห์ขนาด และการกระจายขนาดอนุภาค (Laser Diffraction Particle Size Distribution Analyzer : PSD).....34
3.3	เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer : XRD).....35
3.4	เครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยใช้เข็มแบบไวแคต (Vicat Apparatus).....36
3.5	เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด.....37
4.1	วัตถุดิบที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะ (ก) ปูนซีเมนต์ (ข) ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และ ค) เถ้าลอย.....38
4.2	การกระจายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง.....40
4.3	รูปแบบลักษณะจำเพาะตัวของปูนซีเมนต์ ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และเถ้าลอย.....44
4.4	โครงสร้างทางจุลภาคของวัตถุดิบจาก SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า ก) ปูนซีเมนต์ ข) ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และ ค) เถ้าลอย ตามลำดับ.....44
4.5	การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุซีเมนต์ผสม.....46
4.6	ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน.....47
4.7	ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน.....48
4.8	ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน.....49
4.9	แนวโน้มค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น.....51
4.10	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานวัสดุซีเมนต์ผสมสูตร 50CM:20AD:30FA ด้วย (ก) การบ่มด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัว และ (ข) การบ่มภายใต้เงื่อนไขห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก 53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ ภาคธุรกิจ และครัวเรือนของประเทศไทย เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักที่ส่งผลต่อการเติบโตของผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศ (GDP) ของประเทศ ปูนซีเมนต์ (Cement) เป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการก่อสร้าง เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่สามารถให้ความแข็งแรง และความทนทานสูง โดยสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) เมื่อนำมาผสมน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ส่งผลให้เกิดการยึดประสาน และแข็งตัวขึ้น (วินิต ช่อวิเชียร, 2539) อย่างไรก็ตามการผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตจำนวนมาก และมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่ชั้นบรรยากาศ โดยมีการรายงานว่าการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน ก่อให้เกิด CO_2 ในปริมาณ 1 ตันโดยประมาณ (Barcel et al., 2014)

ปูนซีเมนต์ผสม (Mixed Cement) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผสมสมน้ำเสมอระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 กับวัสดุอื่นที่บดเป็นผงแล้ว (มอก. 80, 2550) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหนียว อาทิ ทรายหรือหิน เป็นต้น โดยค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานมอก. 80 - 2550 ของปูนซีเมนต์ผสมในระยะการบ่ม 3 วันและ 7 วัน มีค่ามากกว่า 6.9 MPa และ 11.8 MPa ตามลำดับ ปัจจุบันปูนซีเมนต์ผสมเป็นวัสดุที่ถูกพัฒนาเป็นวัสดุยึดประสานชนิดใหม่ระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมที่สามารถเกิดปฏิกิริยา อาทิ แก้วลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง และเป็นการพัฒนาวัสดุในก่อสร้างที่ยั่งยืน

ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง (Asphalt Waste Dust) เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตแอสฟัลท์คอนกรีต เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหิน โดยโรงงานนำหินหลายขนาดมาคลุกกัน และเผารวมกันที่อุณหภูมิ 150 - 170 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะผสมน้ำอย่างมอดยลงไป จึงทำให้เกิดฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต (ชูเกียรติ ชูสกุล, 2562) โดยปกติโรงงานผลิตแอสฟัลท์คอนกรีตจะอยู่ในระยะไม่เกิน 100 กิโลเมตร จากสถานที่ก่อสร้างถนน (กรมทางหลวง, 2556) ดังนั้นจึงมีโรงงานผลิต

แอสฟัลท์คอนกรีตทั่วประเทศ และมีปริมาณฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งเกิดขึ้นจำนวนมากทุกวัน โรงงานต้องใช้จ่ายจำนวนมากในการจัดการ และจัดหาพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อฝังกลบลงดิน เนื่องจากองค์ประกอบหลักของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate; CaCO_3) จึงนำไปสู่การทบทวนเอกสารงานวิจัยวัตถุอื่นที่มี CaCO_3 เป็นองค์ประกอบหลักเทียบเคียงกับฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง อาทิ หินปูนธรรมชาติ (Limestone) หรือโดโลไมต์ (Dolomite) เป็นต้น เพื่อสนับสนุนแนวคิด และสมมติฐานเบื้องต้นว่าฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งสามารถใช้ประโยชน์ในวัสดุซีเมนต์ผสมได้เช่นเดียวกับหินปูน

จากงานวิจัยเบื้องต้นฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งเป็นวัสดุเฉื่อย ทำหน้าที่หลักเป็นตัวเติม (Filler Effect) เพื่อลดช่องว่างในเนื้อวัสดุ โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ของผู้วิจัยพบว่าคุณสมบัติการเป็นตัวเติมของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งสามารถปรับปรุงความแข็งแรงของดินลูกรังคุณภาพต่ำที่ใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางสำหรับการก่อสร้างถนนได้ (Salisa et al., 2022) อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังรับแรงอัดมาจากการประกอบของปูนซีเมนต์ในปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก และได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide; Ca(OH)_2) ซึ่งสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ในการนี้จึงนำวัสดุปอซโซลานิก คือ เถ้าลอยที่เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการเผาถ่านหินในการผลิตไฟฟ้า เป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้มีเถ้าลอยปะปนไปพร้อมกับก๊าซเสียในรูปของเขม่าควัน จึงมีการแยกเถ้าลอยออกจากก๊าซเสียด้วยเครื่องตกฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เถ้าลอยมีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือ ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในรูปกิ่งผลึก (Thomas, 2007) และถูกแบ่งเป็น 2 ประเภทตามผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้แก่ ประเภท F และประเภท C (ASTM C618, 2019) เนื่องจากเถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงละเอียดและมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก จึงถูกนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ สามารถให้สารประกอบที่มีคุณสมบัติยัดประสานเสริมความแข็งแรง ช่วยลดปริมาณ และต้นทุนจากปูนซีเมนต์ โดยมีงานวิจัยเกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสมเพื่องานก่อสร้าง อาทิ คอนกรีตบล็อกมวลเบา (อภิชาติ ใจดี, 2564) หรือคอนกรีตบล็อกประสาน (Nair, 2015) เป็นต้น

ดังนั้นในงานนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการใช้วัสดุฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับเถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสม เพื่อพัฒนาวัสดุในงานก่อสร้าง โดยใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งเป็นวัสดุตัวเติมในช่องว่างระหว่างอนุภาคหรือรูพรุนภายในเนื้อซีเมนต์ผสม ส่งเสริมค่ากำลังรับแรงอัดระยะต้นในเชิงกายภาพ ในขณะที่เถ้าลอยที่เป็นวัสดุปอซโซลานิกสามารถช่วยให้ซีเมนต์ผสมไหลตัวได้ดีขึ้นรูป และช่วยพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดระยะยาวจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยจากการทบทวนเอกสารงานวิจัยเบื้องต้น พบว่ายังไม่มีการศึกษาการใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับเถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสม

อีกทั้งการนำฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และเถ้าลอยซึ่งต่างเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ นอกจากจะเป็นการพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซีเมนต์ผสมแล้วยังเป็นแนวทางในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสีย และสามารถใช้ประโยชน์ของเสียเหลือทิ้ง และเถ้าลอยจากโรงงานอุตสาหกรรมได้อย่างเกิดประโยชน์สูงสุดสำหรับงานก่อสร้างแบบยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับเถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาแนวโน้มค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และเถ้าลอย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งของปูนอินทรีเพชร ตามมาตรฐาน มอก.15 - 2547 และมาตรฐานอเมริกา ASTM C150
- 1.3.2 ศึกษาวัสดุซีเมนต์ผสม โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ปูนอินทรีเพชร) ปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ร่วมกับฝุ่นแอสฟัลท์ และเถ้าลอย
- 1.3.3 ใช้เถ้าลอยชนิดซี (Class C) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตามมาตรฐาน ASTM C 618
- 1.3.4 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.4 ซึ่งเป็นผลจากการทดลองเบื้องต้น
- 1.3.5 ตรวจสอบค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมฝุ่นแอสฟัลท์ และเถ้าลอยตามมาตรฐาน มอก. 80 – 2550 ในระยะการบ่ม 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 12

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.4.1 ด้านวิชาการ งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยใหม่ที่ก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในการใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งและเถ้าลอยในการผลิตวัสดุซีเมนต์ผสมในงานก่อสร้างแบบยั่งยืน

1.4.2 ด้านเศรษฐกิจเชิงพาณิชย์ งานวิจัยนี้สามารถนำของเสียเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และเถ้าลอยมาเพิ่มมูลค่า และใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสีย และการผลิต

1.4.3 ด้านสังคม และชุมชน งานวิจัยนี้สามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง สามารถช่วยลดปัญหาหมอกควันทางสิ่งแวดล้อมทั้งจากการผลิตปูนซีเมนต์ และจากการฝังกลบฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งลงดิน



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน และวัตถุดิบหลักที่ใช้ในงานก่อสร้าง เนื่องจากสามารถให้ความแข็งแรง และความทนทานสูง วัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้แก่ วัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate หรือ CaCO_3) ที่ได้จากหินปูน (Limestone) หินชอล์ก (Marl) หรือดินสอพอง (Chalk) เป็นต้น และวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ได้จากหินดินดาน (Shale) หรือดินเหนียว (Clay) เป็นต้น รวมถึงสารผสมอื่น ๆ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ อาทิ ยิปซัม (Gypsum) เป็นต้น

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แบ่งออกเป็น 2 กรรมวิธี ได้แก่ กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process) และกรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process) ประเทศไทยนิยมผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบแห้ง (วินิต ช่อวิเชียร, 2539) โดยเป็นการนำวัตถุดิบมาบดให้ละเอียด และผสมตามสัดส่วนที่กำหนด หลังจากนั้นจะถูกเผาด้วยหม้อเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) โดย Momen (2015) กล่าวว่าความร้อนจากหม้อเผาจะทำให้น้ำระเหยออกจากวัตถุดิบ ดิน และหินปูนจะเกิดการสลายตัวตามลำดับจนถึงอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส จะเริ่มเกิดเป็นสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) จนเกิดสารประกอบขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่ 1350 องศาเซลเซียส จนถึง 1400 – 1600 องศาเซลเซียส จะเกิดการหลอมตัวเป็นปูนเม็ด (Clinker) และถูกลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ก่อนจะถูกนำมาบดละเอียดอีกครั้งพร้อมกับการเติมยิปซัม เพื่อช่วยหน่วงเวลาในการแข็งตัวของปูนซีเมนต์

2.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือ มอก. 15 เล่ม 1 (2547) ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ 5 ประเภท ดังนี้คือ

2.1.1.1 ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์เหมาะสำหรับงานก่อสร้าง งานคอนกรีตทั่วไป หรือโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการความแข็งแรงสูง

2.1.1.2 ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เกิดความร้อนน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และสามารถทนทานต่อซัลเฟตได้ปานกลาง เหมาะสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตที่มีความหนาหรือต้องสัมผัสกับดินหรือน้ำที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตไม่ถึงระดับรุนแรง

2.1.1.3 ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูงเร็ว (High Early Strength Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก มีลักษณะผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือถอดแบบในเวลาสั้น

2.1.1.4 ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ปริมาณ และอัตราความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ จึงมีการพัฒนากำลังของคอนกรีตช้ากว่าปูนซีเมนต์อื่น ๆ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลา (Mass Concrete) อาทิ เขื่อน เป็นต้น

2.1.1.5 ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตสูง (Sulphate Resistance Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ต่ำ สามารถต้านทานซัลเฟตเข้ามาทำลายคอนกรีต และให้กำลังช้ากว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับงานโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับสภาวะซัลเฟตอย่างรุนแรง

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงดังตารางที่ 2.1 มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา (SiO₂), อะลูมินา (Al₂O₃) และเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ซึ่งสารประกอบหลักมีปริมาณรวมกันมากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนองค์ประกอบที่เหลือเป็นองค์ประกอบรอง ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃), โพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) และโซเดียมออกไซด์ (Na₂O) เป็นต้น เมื่อทำการเผาในกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์สารประกอบหลักจะเกิดการรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ดได้สารประกอบที่สำคัญ 4 ประเภท ดังหัวข้อที่ 2.1.3

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Mark and Eric, 2015)

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	64.18
SiO ₂	21.02
Al ₂ O ₃	5.04
Fe ₂ O ₃	2.85
SO ₃	2.58
MgO	1.67
K ₂ O	0.70
Na ₂ O	0.24

2.1.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
(ซีซวาลย์ และคณะ, 2553)

สารประกอบ	ชื่อย่อ	ปริมาณ (%)	ลักษณะและคุณสมบัติ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	C_3S	35 - 55	<ol style="list-style-type: none"> 1.) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างผลึก 6 เหลี่ยม 2.) เกิดการก่อตัวและแข็งตัวภายใน 2 - 3 ชั่วโมง หลังจากผสมกับน้ำ 3.) สามารถให้กำลังรับแรงอัดในช่วงระยะแรก
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	C_2S	15 - 35	<ol style="list-style-type: none"> 1.) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม 2.) มี β C_2S ที่เสถียร ผน อุดหนุมิทั่วไป และมีคุณสมบัติยึดเกาะ 3. เมื่อเกิดการแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ ในช่วงแรก แต่จะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะยาว
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	C_3A	7 - 15	<ol style="list-style-type: none"> 1.) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม 2.) ทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วและเกิดความร้อนสูง จึงมีการเติมยิปซัม เพื่อหน่วงเวลาในการก่อตัว และมีค่ากำลังรับแรงอัดค่อนข้างต่ำ
เตตระแคลเซียมอะลูมิโน เฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	C_4AF	5 - 10	<ol style="list-style-type: none"> 1.) ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็ว และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำ

2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดความร้อน การก่อตัว และการแข็งตัว โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบแต่ละประเภทในปูนซีเมนต์ (วินิต ช่อวิเชียร, 2539) ดังนี้

2.2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ CSH) และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, $Ca(OH)_2$) ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ



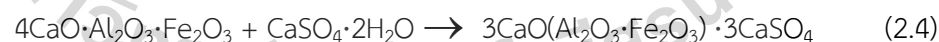
2.2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไตรแคลเซียมอะลูมิเนตจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จะมีการเติมยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เพื่อหน่วงปฏิกิริยาให้ช้าลง ก่อให้เกิดชั้นของเอทริงไทต์ (Ettringite) บนผิวของอนุภาค เกิดความแข็งแรงเพียงเล็กน้อย ดังสมการที่ 2.3



2.2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

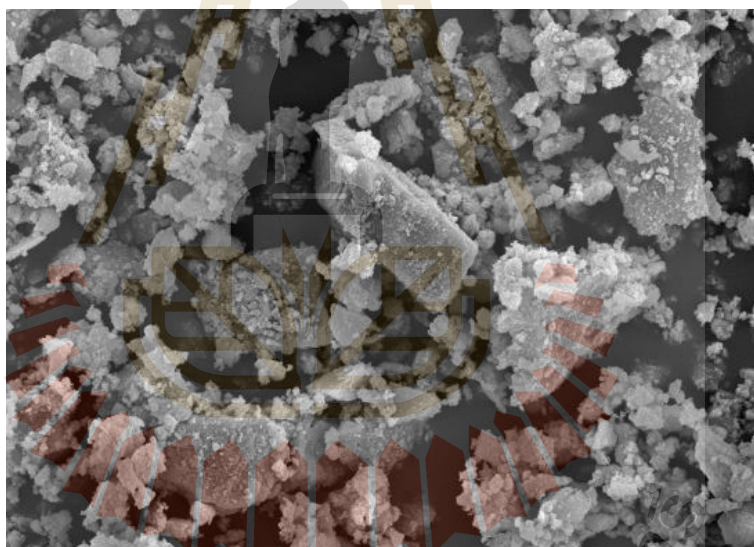
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ คล้ายกับปฏิกิริยาของ C_3A แต่เกิดช้ากว่า โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นกับยิปซัมในช่วงต้น ดังสมการที่ 2.4



ปูนซีเมนต์ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย จนเกิดผลกระทบที่เป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตจำนวนมาก ก่อให้เกิดปัญหาภาวะจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่ชั้นบรรยากาศ โดย Barcel et al. (2014) รายงานว่าในทุก ๆ 1 ตันของการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิด CO_2 ประมาณ 1 ตัน จึงมีการศึกษาและนำของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแอสฟัลท์คอนกรีตมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.3

2.3 ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง (Asphalt Waste Dust)

ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง เป็นของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมแอสฟัลท์คอนกรีต เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในระหว่างการผลิตแอสฟัลท์คอนกรีตที่ประกอบด้วยส่วนผสมของหินบดกับยางแอสฟัลท์หรือยางมะตอย โดยโรงงานนำหินหลายขนาดมาคละกัน ทำการเผารวมกันที่อุณหภูมิ 150 - 170 องศาเซลเซียส จึงทำให้เกิดฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตแอสฟัลท์คอนกรีต โดยจะมีขนาดเล็กผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หรือ 75 ไมโครเมตร ซึ่งไม่สามารถนำมาผสมกับยางมะตอยได้ ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งมีลักษณะผงละเอียดและมีสีเทาอ่อน แตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีสีเทาเข้ม เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายจาก Scanning Electron Microscope (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 พบว่าอนุภาคฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งมีรูปร่างลักษณะส่วนใหญ่เป็นเหลี่ยมมุม ผิวนูนขรุขระ และมีหลากหลายขนาด



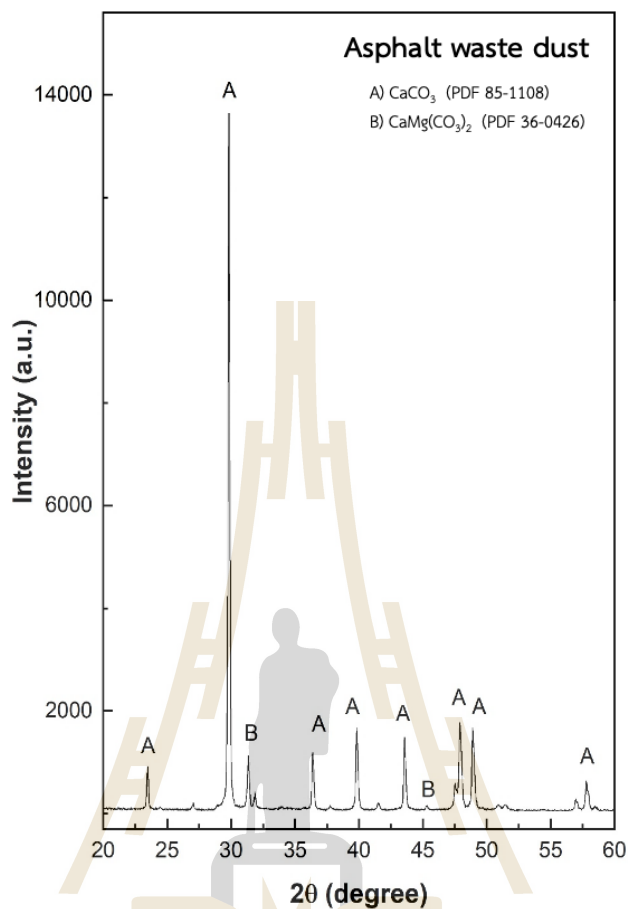
รูปที่ 2.1 อนุภาคฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งจาก SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (ชูเกียรติ ชูสกุล, 2562)

2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินแอสฟัลท์เหลือทิ้ง

ชูเกียรติ ชูสกุล (2562) รายงานองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง ดังตารางที่ 2.3 โดยพบปริมาณ CaO และ MgO เป็นองค์ประกอบหลัก และมีค่า Loss on ignition (LOI) น้อยกว่า 10 และค่า SO₃ น้อยกว่าร้อยละ 4 ตามข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานของมาตรฐาน ASTM C618

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชูเกียรติ ชูสกุล, 2562)

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (%)	ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง (%)
CaO	64.99	34.66
SiO ₂	20.62	4.15
Al ₂ O ₃	5.22	3.40
Fe ₂ O ₃	3.10	0.97
SO ₃	2.70	1.60
MgO	0.91	15.96
K ₂ O	0.50	0.08
Na ₂ O	0.07	-
P ₂ O ₅	-	0.09
LOI	1.13	3.80



รูปที่ 2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสเบื้องต้นของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง

อย่างไรก็ตามองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งขึ้นอยู่กับประเภทและแหล่งที่มาของหินโรจงานนำมาใช้ในการผลิตแอสฟัลท์คอนกรีต เนื่องจากฝุ่นแอสฟัลท์ยังไม่ถูกนำมาศึกษา ทางผู้วิจัยจึงวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสเบื้องต้นของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง แสดงดังรูป 2.2 ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) คล้ายผงหินปูน จึงมีการศึกษาวิจัยวัตถุดิบอื่นที่มี CaCO_3 เป็นองค์ประกอบหลักเทียบเคียงกับฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง จึงมีการศึกษาการใช้วัสดุผงหินปูนเป็นหลัก ดังหัวข้อ 2.4

2.4 ผงหินปูน (Limestone Powder)

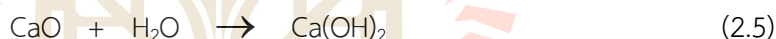
ผงหินปูนได้จากการบดหินปูนเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และคอนกรีตผสม โดยองค์ประกอบทางเฟสหลักของผงหินปูน คือ สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) สุรสิทธิ์ เพาะบุญ (2562) กล่าวว่าผงหินปูนมีทั้งอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี (Inert Material) และวัสดุที่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมี (Reactive Material) สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

2.4.1 วัสดุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี

สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) จัดเป็นสารประกอบที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงของคอนกรีตจากการเป็นวัสดุตัวเติม (Filler Material) และช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตได้ ทำให้มีการเสถียรภาพในเชิงปริมาตรดีขึ้น

2.4.2 วัสดุที่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมี

สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จัดเป็นสารประกอบที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ การนำวัสดุประเภทนี้มาใช้ในงานทดแทนปูนซีเมนต์ โดยให้ผลิตภัณฑ์เป็น Ca(OH)_2 สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ (Rougé et al., 2017) ดังสมการ 2.5



ดังนั้นฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมคาร์บอเนตคล้ายกับผงหินปูน จึงจัดเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาการใช้งานวัสดุปอซโซลานร่วมกับผงหินปูน ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.5 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material)

วัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 (2019) เป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีหลักคือซิลิกา (SiO_2) หรือซิลิกาพร้อมกับอะลูมินา (Al_2O_3) วัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์

2.5.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานมีที่มาจาก 2 แหล่ง คือ วัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และวัสดุปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (Artificial Pozzolan)

2.5.1.1 วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan)

เกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ ได้แก่ ดินเกาลิน (Kaolin Clay) หินชั้น (Shale) เปลือกหอย (Mollusc Shell) ดินเบนโทไนท์ (Bentonite Clay) และเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Ash) เป็นต้น วัสดุเหล่านี้เมื่อจะนำไปใช้งานจะต้องเผาและบดก่อน

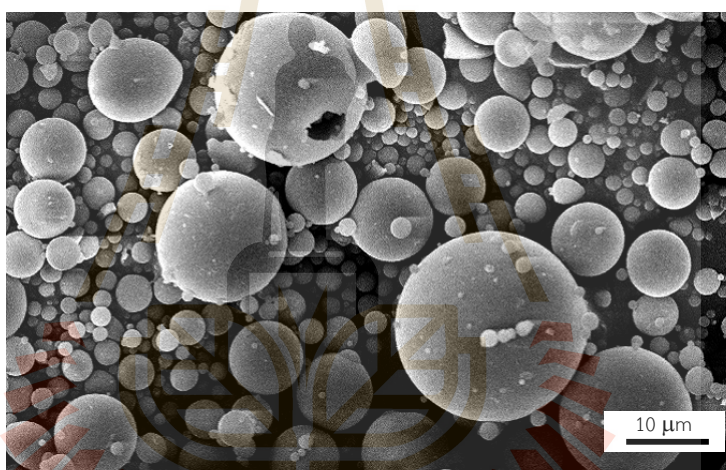
2.5.1.2 วัสดุปอซโซลานจากกระบวนการผลิต (Artificial Pozzolan)

วัสดุมาจากผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) เถ้าลอย (Fly Ash) เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Ground Granulated Blast-Furnace Slag) เป็นต้น

ในปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้งานคอนกรีตในรูปแบบของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตในด้านกำลังรับแรงอัดให้ดีขึ้น และสามารถลดต้นทุนในการใช้ปูนซีเมนต์ลง นอกจากนี้วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดส่งผลกระทบต่องานคอนกรีตที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัว โดยวัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ในการศึกษานี้คือ เถ้าลอย (Fly Ash) ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.6

2.6 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีลักษณะผงละเอียด สีน้ำตาลหรือสีเทาตามแหล่งที่มา มีน้ำหนักเบา และเกิดการฟุ้งกระจายได้ดีเมื่ออยู่ในสภาพแห้ง เถ้าลอยจะถูกรวบรวมด้วยวิธีการดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายจาก Scanning Electron Microscope (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เถ้าลอยจะมีรูปร่างทรงกลมตันหรือกลวงเล็กน้อย โดยทั่วไปเถ้าลอยจะมีความเป็นผลึก (Crystalline) ร่วมกับความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) จึงสามารถทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้สารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ซึ่งสารประกอบทั้งสองนี้มีคุณสมบัติการเชื่อมประสาน



รูปที่ 2.3 อนุภาคของเถ้าลอยที่กำลังขยาย 2580 เท่า (Roberto et al., 2005)

2.6.1 ประเภทของเถ้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2019) ได้แบ่งเถ้าลอยเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.6.1.1 เถ้าลอยประเภทเอฟ (Class F)

เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส โดยจะมีปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 มีปริมาณ CaO ต่ำ จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.4

2.6.1.2 เถ้าลอยประเภทซี (Class C)

เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส โดยจะมีปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 แต่มีปริมาณ CaO สูง จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมสูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C618 ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมินาไตรออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกิน, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกิน, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลน์สูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O , ร้อยละ	1.5	1.5

2.6.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยทั่วไปจะคล้ายกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ คือมีซิลิกา (SiO_2), อะลูมินา (Al_2O_3), แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เป็นองค์ประกอบรอง แสดงดังตารางที่ 2.5 โดยที่องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและแหล่งที่มาของถ่านหิน

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีทั่วไปของเถ้าลอย (Almufarji et al., 2019)

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)
SiO_2	46.80
Al_2O_3	18.41
Fe_2O_3	6.08
CaO	3.32
K_2O	1.34
Na_2O	1.20
MgO	1.15
SO_3	0.53
P_2O_5	0.41

ดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานด้วยตัวเองได้น้อยมาก จึงต้องอาศัยการทำปฏิกิริยาทางเคมีด้วยปฏิกิริยาปอซโซลานิก ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 2.7

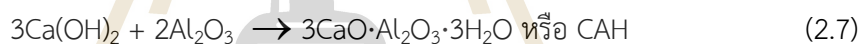
2.7 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction)

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ ซึ่งมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่กล่าวถึงข้างต้นในสมการที่ (2.1) และ (2.2) โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จากสมการ 2.2 จะเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลานิก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ดังแสดงในสมการที่ (2.6) และ (2.7) ซึ่งสารประกอบทั้งสองจะทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงของวัสดุ

กรณีที่วัสดุปอซโซลานิกมีองค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นซิลิกา (SiO_2) สามารถเขียนสมการของปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Ahmed et al., 2019) ได้ดังนี้



กรณีที่วัสดุปอซโซลานิกมีองค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นอะลูมินา (Al_2O_3) สามารถเขียนสมการของปฏิกิริยาปอซโซลานิก ได้ดังนี้



จากข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น การใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับเถ้าลอย มีความเป็นไปได้ที่จะเสริมประโยชน์ซึ่งกันและกันในวัสดุก่อสร้างที่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งที่มีขนาดเล็ก สามารถลดช่องว่างในวัสดุคอนกรีต ขณะเดียวกันเถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ของปูนซีเมนต์ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.8 เรื่องปูนซีเมนต์ผสม

2.8 ปูนซีเมนต์ผสม (Mixed Cement)

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 80 (2550) ให้ความหมายของปูนซีเมนต์ผสม หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเติมวัสดุอื่นใดลงไปบดพร้อมกันกับการบดปูนเม็ดที่จะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 หรือได้จากการผสมสม่ำเสมอระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับวัสดุอื่นใดที่บดเป็นผงแล้ว โดยปูนซีเมนต์ผสมจะมีคุณลักษณะที่ต้องการตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 คุณลักษณะที่ต้องการของปูนซีเมนต์ผสม (มอก. 80, 2550)

รายการ	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ปริมาณอากาศในมอร์ตาร์ ร้อยละ โดยปริมาตร ไม่มากกว่า	12	มอก. 15 เล่ม 13
2	ความละเอียด พื้นผิวจำเพาะ (Specific Surface) ทดสอบหาสภาพอากาศซึมได้ของเบลน (Blaine Air Permeability) ตารางเมตรต่อกิโลกรัม ไม่น้อยกว่า	320	มอก. 15 เล่ม 6
3	การขยายตัวโดยวิธีออโตเคลฟ (Autoclave Expansion) ร้อยละ ไม่มากกว่า	0.8	มอก. 15 เล่ม 11
4	ความต้านแรงอัด เมกะพาสคัล ไม่น้อยกว่า		มอก. 15 เล่ม 12
	อายุ 3 วัน	6.9	
	อายุ 7 วัน	11.8	
5	ระยะเวลาก่อตัว ทดสอบแบบไวแคต (Vicat Test) นาที ไม่น้อยกว่า	45	มอก. 15 เล่ม 9

2.9 การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีต เป็นวิธีการช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดและความคงทนของคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง โดยหน้าที่สำคัญหลักของการบ่มคอนกรีต คือ ป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต ป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสม และการลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด วิธีการบ่มคอนกรีตจึงมีหลากหลายวิธีอยู่กับข้อจำกัดในการก่อสร้างและค่าใช้จ่าย โดย วินิต ช่อวิเชียร (2539) ได้แบ่งกรรมวิธีการบ่มออกเป็น 2 ชนิดตามสภาพอุณหภูมิที่ใช้บ่ม คือ การบ่มที่อุณหภูมิปกติ และการบ่มที่อุณหภูมิและความกดดันสูง ในที่นี้ใช้กรรมวิธีการบ่มที่อุณหภูมิปกติ สามารถจำแนกออกเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

2.9.1 การเพิ่มความชื้น

เป็นการให้ความชื้นต่อผิวหน้าของคอนกรีตโดยตรงในระยะแรกที่คอนกรีตแข็งตัว วิธีนี้สามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีตลง ได้แก่ การแช่น้ำด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัว (Immersion in Lime - Saturated Water) การฉีดน้ำหรือพรมน้ำ (Sprinkling) และการใช้วัสดุเปียกชื้นคลุม (Water - Absorbent Materials) เป็นต้น

2.9.2 การป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต

เป็นการป้องกันความชื้นจากผิวคอนกรีตไม่ให้ระเหยออกสู่ภายนอก ได้แก่ การใช้กระดาษกันน้ำซีเมนต์ได้คลุม (Reinforced Paper) การใช้แผ่นพลาสติกคลุม (Plastic Film) การบ่มด้วยน้ำยาเคมีเคลือบผิวคอนกรีต (Liquid Membrane - Forming Compounds) และการใช้แบบหล่อ (Formwork) เป็นต้น

2.10 แนวคิดงานวิจัย

จากการทบทวนงานวิจัย และองค์ความรู้ต่าง ๆ ข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดจะศึกษาการใช้วัสดุฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับเถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสม เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุในงานก่อสร้างแบบยั่งยืนและลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง จากที่กล่าวมาข้างต้นประกอบกับการทบทวนเอกสารงานวิจัยเบื้องต้น พบว่าฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งยังไม่ถูกนำมาศึกษาในด้านนี้ ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งมีองค์ประกอบหลักเป็น CaCO_3 จึงมีการศึกษาวิจัยวัตถุดิบอื่นที่มี CaCO_3 เป็นองค์ประกอบหลักเทียบเคียงกับฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง อาทิ หินปูนธรรมชาติ (Limestone) และโดโลไมต์ (Dolomite) เป็นต้น โดยมีสมมติฐานเบื้องต้นว่าฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งสามารถใช้ประโยชน์ในวัสดุซีเมนต์ผสมได้เช่นกัน โดยนำฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งที่มีขนาดละเอียดเป็นตัวเติมในช่องว่างระหว่างอนุภาคภายในเนื้อซีเมนต์ผสม ส่งเสริมค่ากำลังรับแรงอัดระยะต้นในทางกายภาพได้ ขณะที่เถ้าลอยเป็นวัสดุพอไซโซลาน

ที่มีการใช้มาอย่างแพร่หลายจะถูกนำมาพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดระยะยาวโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งการใช้งานร่วมกันของวัสดุทั้งสองชนิดยังเป็นแนวทางใหม่ที่ไม่มีการศึกษาวิจัยมาก่อน

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากแนวคิดในการศึกษาการใช้วัสดุฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับเถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสมที่ถูกกล่าวไปแล้วข้างต้น ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.11.1 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับศักยภาพของผงหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์

ภาณุพงศ์ และคณะ (2559) ศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดและการหดตัวแห้งของคอนกรีตที่ใช้หินปูนแทนที่ทราย โดยใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 โดยพบว่าการใช้หินปูนในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลง และค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณหินปูนที่เพิ่มขึ้น และค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 100 มีค่าสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายบางส่วนหรือแทนที่ทั้งหมด สามารถพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าหรือเท่ากับคอนกรีตที่ไม่ใช้หินปูน เนื่องจากความเป็นเหลี่ยมมุมของหินปูนจะช่วยให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุผสมรวมละเอียดดีขึ้น และขนาดอนุภาคเล็กของหินปูน สามารถช่วยในการเติมเต็มของช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตอัดแน่นมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้หินปูนในส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

สุรสิทธิ์ เพาะบุญ (2562) ศึกษาความละเอียดของผงหินปูนต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน โดยทำการศึกษาผงหินปูนที่มีความละเอียด 2, 8 และ 15 ไมโครเมตรแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 20 ร่วมกับเถ้าลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า ผงหินปูนขนาด 2 ไมโครเมตร มีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนผงหินปูนขนาด 8 และ 15 ไมโครเมตร มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใกล้เคียงและต่ำกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามลำดับ เนื่องจากผงหินปูนไม่ได้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องร่วมกับปูนซีเมนต์ แต่เข้าไปเติมเต็มช่องว่างในเนื้อคอนกรีตได้ดีขึ้น จึงทำให้ภายในเนื้อคอนกรีตมีความอัดแน่นมากขึ้นและส่งผลค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การแทนที่เพิ่มขึ้นของผงหินปูนและลดปูนซีเมนต์ลง จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้น้อยลง

ชูเกียรติ ชูสกุล (2562) ศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์โดยใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากกระบวนการผสมแอสฟัลท์คอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 บางส่วน โดยใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตแอสฟัลท์คอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.60 ผลการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์พบว่า เมื่อผสมฝุ่นหินในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดลดลง โดยอัตราส่วนการแทนที่ของฝุ่นหินเหลือทิ้งไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดผ่านตามเกณฑ์ของมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1

Aquino และคณะ (2010) ทำการทดลองแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยหินปูนละเอียด ร้อยละ 0, 30, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก โดยพบว่าการใช้หินปูนบดละเอียด สามารถลดการหดตัวในคอนกรีตได้ โดยเฉพาะผสมกับหินปูนบดละเอียดมากกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ด้านค่ากำลังรับแรงอัด แรงดัดงอและโมดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนหินปูนละเอียดเพิ่มขึ้น

Wendimu และ Abebe (2010) ศึกษาการแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยการเติมผงหินปูนที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ โดยพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนละเอียดร้อยละ 15 % ส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดเทียบเท่ากับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน แต่การใช้ผงหินปูนร้อยละ 25 - 35 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงอัดมาตรฐานของระยะการบ่ม 28 วันเล็กน้อย แสดงถึงขีดจำกัดปริมาณของการใช้งาน นอกจากนี้การใช้ผงหินปูนละเอียดร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้การพัฒนาความแข็งแรงช่วงต้นเร็วขึ้น ทำให้ลดระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ผสม

Maisarah และคณะ (2015) ศึกษาการใช้วัสดุตัวเติมในวัสดุทดแทนซีเมนต์ โดยแทนที่ด้วย CaCO_3 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าคอนกรีตที่ใช้ CaCO_3 มีค่าการยุบตัวเหมาะสมที่จะช่วยเพิ่มความสามารถในการเท (Workability) เนื่องจาก CaCO_3 มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ จึงสามารถช่วยเติมเต็มช่องว่าง และลดความพรุนตัวในเนื้อคอนกรีต ขณะที่ค่ากำลังรับแรงอัดในระยะการบ่ม 3 วันและ 7 วันคอนกรีตที่มีการใช้ CaCO_3 จะเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วและมีค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงแรกสูงกว่าปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากมีการกระจายขนาดอนุภาคที่ดี ลดช่องว่างระหว่างอนุภาค ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์สมบูรณ์มากขึ้น แต่เมื่อครบ 28 วัน คอนกรีตที่มีการใช้ CaCO_3 จะมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มี CaCO_3 เป็นผลมาจาก CaCO_3 ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ แต่ค่ากำลังรับแรงอัดยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานยอมรับได้

Ahmed และคณะ (2018) ศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึงของผงหินปูนเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ โดยใช้ผงหินปูนในอัตราส่วนทดแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก พบว่า อัตราส่วนผงหินปูนที่ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ อัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและค่าการยุบตัว (Slump Test) ลดลง

2.11.2 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับศักยภาพของเถ้าลอยใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์

กัจจัต โภทวิภา (2543) ศึกษาปริมาณเถ้าลอยแม่เมาะที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับผลิตบล็อกรับน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก และพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าลอยแม่เมาะทุกอัตราส่วนผสมในระยะเวลา 7 ถึง 14 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตบล็อกจากปูนซีเมนต์ล้วน แต่ช่วง 28 ถึง 60 วันค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าลอยแม่เมาะเพิ่มขึ้น จนใกล้เคียงกับคอนกรีตบล็อกของปูนซีเมนต์ล้วน โดยการใช้เถ้าลอยแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 30 สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อก และให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด

Carolyn และ Atadero (2009) ได้ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของการใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีอัตราส่วนแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 โดยน้ำหนัก ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุที่ 0.525 และพบว่าอายุช่วงต้น 3 – 7 วันแรก ค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยต้องอาศัย Ca(OH)_2 จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ พอระยะเวลามากกว่า 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย ซึ่งคอนกรีตที่มีเถ้าลอยร้อยละ 25 – 35 ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมตามมาตรฐานของค่ากำลังรับแรงอัด เนื่องจากปริมาณ Ca(OH)_2 เกิดขึ้นเพียงพอต่อเถ้าลอยในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

Abushad และ Danish (2017) ศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย โดยมีอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก และพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดทุกระยะการบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

Rishabh (2017) ศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจากการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ โดยมีอัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุที่ 0.5 พบว่ามีความสามารถเทได้ (Workability) และความชื้นเหลวของซีเมนต์ (Consistency of Cement) เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยมีลักษณะผงละเอียดหรือขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ แต่ค่ากำลังรับแรงอัดของ

คอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเป็นปริมาณเหมาะสมที่สุดจากค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

2.11.3 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับศักยภาพของการใช้ผงหินปูนร่วมกับเถ้าลอย และปูนซีเมนต์

ปิติ และคณะ (2546) ศึกษาการใช้ผงหินปูนร่วมกับเถ้าลอย โดยกำหนดปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูน และเถ้าลอยตั้งแต่ร้อยละ 20 - 60 โดยน้ำหนัก และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ 0.485 โดยพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการใช้ผงหินปูนหรือเถ้าลอยอย่างใดอย่างหนึ่งในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ล้วน แต่เมื่อมีการใช้ผงหินปูนร่วมกับเถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุผงทั้งหมด ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันสูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ล้วน แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดได้ทั้งในช่วงต้นและในระยะยาว ส่วนผลของระยะเวลาการก่อตัวพบว่าเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุผงชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน จะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตทั้งช่วงต้นและช่วงปลายมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ล้วน

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ ณรงค์ศักดิ์ มากุล (2547) ศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอย และผงหินปูน โดยพบว่า คอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูนมีค่าการยุบตัวน้อยกว่าคอนกรีตปกติ เป็นผลมาจากเถ้าลอยและผงหินปูนมีพื้นผิวมากกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้สามารถดูดซับน้ำไว้ที่ผิว ขณะเดียวกันอนุภาคเถ้าลอย และผงหินปูนมีลักษณะผิวเรียบและเหลี่ยมมุมตามลำดับ ส่งผลให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำกว่าคอนกรีตปกติ ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในอัตราส่วนที่เท่ากัน มีการพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตปกติตั้งแต่อายุ 3 วันขึ้นไป เนื่องจากมีปริมาณ SiO_2 เพิ่มขึ้นจากเถ้าลอย (Supplementary Silicon Dioxide) ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณ SiO_2 รวมที่ต้องการ (Total Silica Demand) ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้มีปริมาณ Ca(OH)_2 เพียงพอในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีตปกติ

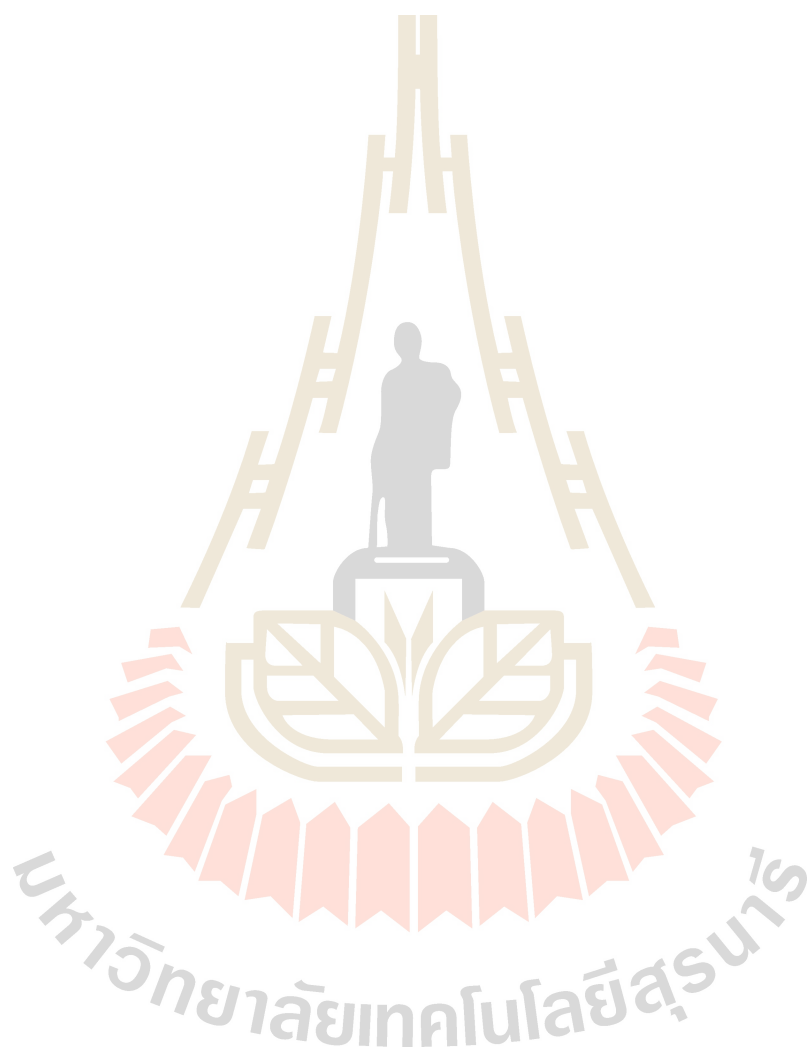
ปิติศานต์ กร้ามาตร (2553) ศึกษาระยะเวลาการก่อตัว ความพรุน ค่าการหดตัวแห้ง และค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูน โดยการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่มีการใช้เถ้าลอยและผงหินปูนใช้ระยะเวลาการก่อตัวมากกว่าระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ล้วน ความพรุนและการหดตัวแห้งของ

คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างปูนซีเมนต์ล้วน แสดงถึงว่าผงหินปูนสามารถเติมเต็มช่องว่างในเนื้อคอนกรีต มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดช่วงต้น และอายุ 28 วัน เถ้าลอยสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัด เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก แต่ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนน้อยกว่าปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์

โพลิน และคณะ (2557) ศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันและค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนละเอียด โดยกำหนดปริมาณแทนที่ของเถ้าลอยและผงหินปูนที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของ 3 วัสดุผสม มีค่ากำลังรับแรงอัดดีกว่าตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยเพียงอย่างเดียว ซึ่งผงหินปูนสามารถเป็นตัวเติมที่ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่นมากขึ้น โดยตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด แสดงให้เห็นว่าผงหินปูนสามารถช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่มีเถ้าลอยได้ ส่วนผลการศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นแบบคายความร้อน พลังงานความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันของ 3 วัสดุผสมเกิดขึ้นได้เร็ว แต่ยังคงต่ำกว่าปูนซีเมนต์ล้วน เนื่องจากอนุภาคผงหินปูนที่มีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง แคลเซียมไอออนในผงหินปูนที่ละลายออกมา อาจทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากปูนซีเมนต์หรือเถ้าลอย นำไปสู่การเร่งปฏิกิริยาและก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วขึ้น

จากข้อมูลจากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหลักของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือผงหินปูนที่ใช้ในการเทียบเคียงฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อคุณสมบัติทางกายภาพ ในบทบาทของผงหินปูนส่วนใหญ่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงแสดงพฤติกรรมแบบตัวเติม (Filler Effect) ในช่องว่างระหว่างอนุภาคหรือรูพรุนภายในเนื้อคอนกรีต และมอร์ตาร์ ส่งผลให้เนื้อวัสดุมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และมีผลต่อการพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดระยะต้น แต่เมื่อผ่านไประยะยาวผงหินปูนในรูปแบบแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับปูนซีเมนต์ ส่งผลต่อการชะลอของค่ากำลังรับแรงอัดในระยะยาว เนื่องจากผงหินปูนเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert Material) ในขณะที่เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์โดยอาศัยคุณสมบัติทางเคมี จะสามารถพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดในระยะยาว เนื่องจากเถ้าลอยมีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาในรูปแบบที่ไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ก่อให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานและให้ความแข็งแรง ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแอสฟัลท์คอนกรีตอย่างฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง ซึ่งคล้าย

กับพนักงานมาใช้ร่วมกับเก้าอี้ในวัสดุซีเมนต์ผสม โดยผู้วิจัยคาดการณ์ว่าการใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือ
ที่ร่วมกับเก้าอี้ จะช่วยสนับสนุนปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกอย่างต่อเนื่อง
ตามลำดับ และทำให้วัสดุซีเมนต์ผสมสามารถพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดได้ทั้งในช่วงต้น
และในระยะยาว นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจากอุตสาหกรรม ลดต้นทุนวัตถุดิบ
และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม



บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบ วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

วัตถุดิบที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย มีดังนี้

3.1.1 ผุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง (Asphalts Waste Dust) จากโรงงานผลิตแอสฟัลท์คอนกรีต
โคกกรวด ตำบลโคกกรวด อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา

3.1.2 เถ้าลอยถ่านหิน (Fly Ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ตำบลแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ
จังหวัดลำปาง

3.1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Portland Cement Type 1) ตามมาตรฐาน
ASTM C 150 ตราอินทรีเพชร จากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

3.1.4 ปูนขาว (Lime)

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2
ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

วัสดุ/อุปกรณ์
ปิกเกอร์สแตนเลส (Stainless Steel Beakers)
เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 2 ตำแหน่ง (Digital Weighing Scale 0.01)
เครื่องกวนผสม (Laboratory Mixer)
ถาดอะลูมิเนียม (Large Aluminium Tray)
ทัพพีสำหรับตักดิน (Ladle)
พลาสติกห่อใส (Plastic Wrap)
แบบพิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ขนาด 5 ซม. x 5 ซม. x 5 ซม. (Brass 3-Gang Cube Mold - ASTM C109)

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ	ยี่ห้อ/รุ่น
เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer : XRD)	BRUKER / D2 PHASER
เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer: WDXRF)	Rigaku / ZSX Primus II
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเอกซเรย์ สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Field Emission Scanning Electron Microscope / Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: FE-SEM / EDS)	JEOL / JSM-7800F
เครื่องวิเคราะห์ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาค (Laser Diffraction Particle Size Distribution Analyzer: PSD)	HORIBA / LA-950V2
เครื่องทดสอบวัสดุค้อนกประสงค์ ขนาด 100 kN ตามมาตรฐาน ASTM C39 (Universal Testing Machine 100 kN)	TTR / MUL-125
เครื่องไวแคต ตามมาตรฐาน ASTM C191 (Vicat Apparatus)	-

3.2 สัญลักษณ์ของวัสดุที่ใช้ทดสอบ

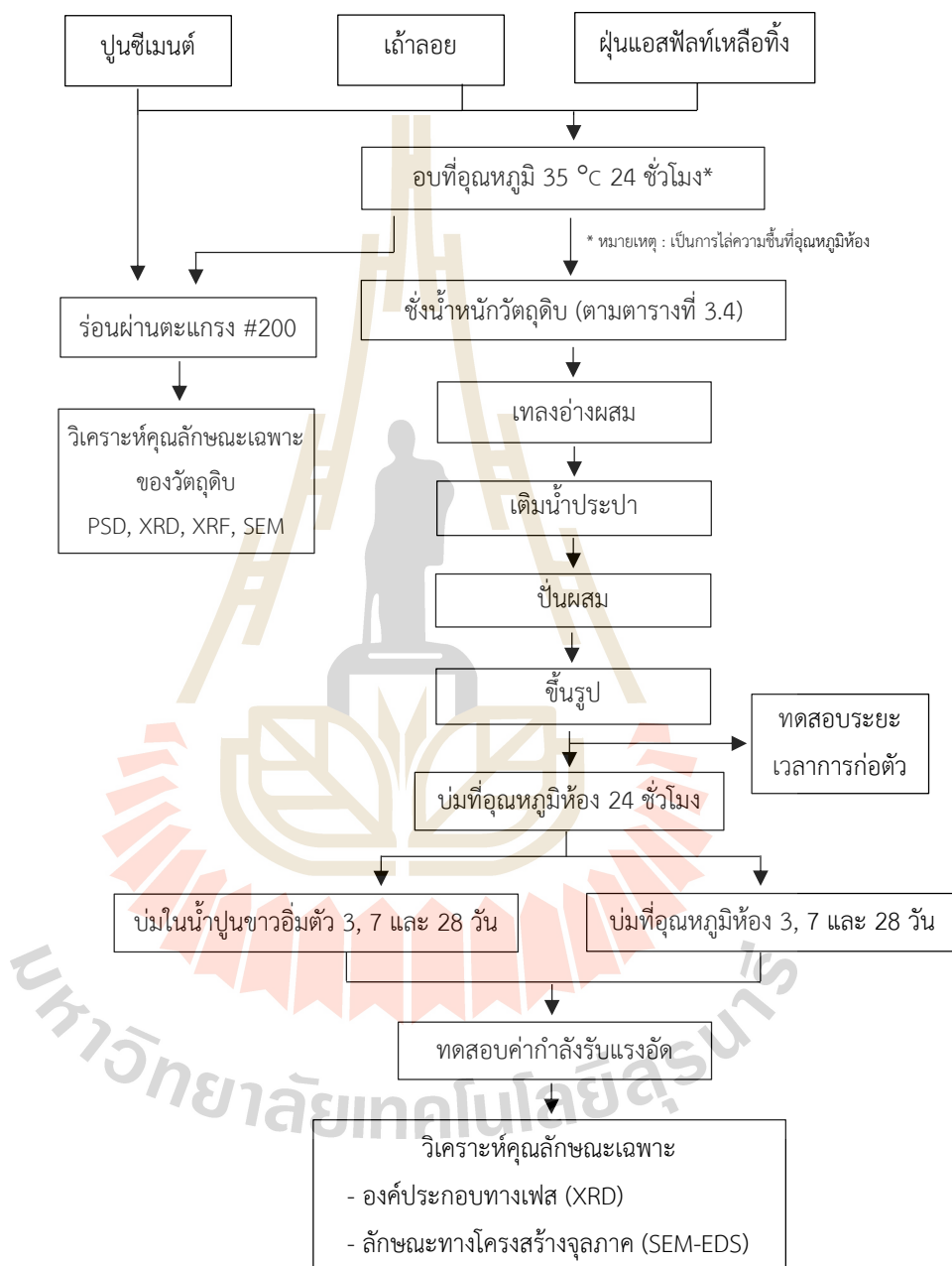
สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

สัญลักษณ์	ความหมาย
CM	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Portland Cement)
AD	ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง (Asphalt Waste Dust)
FA	เถ้าลอย (Fly Ash)
50CM: 50AD	การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ผสมฝุ่นแอสฟัลท์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
50CM: 30AD: 20FA	การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ผสมฝุ่นแอสฟัลท์ร้อยละ 30 และเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
50CM: 25AD: 25FA	การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ผสมฝุ่นแอสฟัลท์ร้อยละ 25 และเถ้าลอยร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
50CM: 20AD: 30FA	การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ผสมฝุ่นแอสฟัลท์ร้อยละ 20 และเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน
50CM: 50FA	การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

3.3 ขั้นตอนงานวิจัย

มีรายละเอียดขั้นตอนงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำวิจัยโดยสังเขป

3.3.1 อัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบ

จากรูปที่ 3.1 มีรายละเอียดของอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ผสมของปูนซีเมนต์ ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และเถ้าลอย ทั้งการบ่มด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัวและการบ่มภายใต้เงื่อนไขห้องหุ้ม ด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ผสมของปูนซีเมนต์ ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และเถ้าลอย ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.4

สูตร	ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)	ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง (ร้อยละ)	เถ้าลอย (ร้อยละ)
50CM: 50AD	50	50	-
50CM: 30AD: 20FA	50	30	20
50CM: 25AD: 25FA	50	25	25
50CM: 20AD: 30FA	50	20	30
50CM: 50FA	50	-	50

ตัวอย่างชิ้นงานวัสดุซีเมนต์ผสมแต่ละสูตร หลังจากชั่งน้ำหนักวัสดุดิบทั้งสามและน้ำประปา ตามอัตราส่วน จะถูกเทลงอ่างผสมและปั่นส่วนผสมทั้งหมด 5 นาที จนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นขึ้นรูปด้วยแบบพิมพ์ชิ้นงานทดสอบ ขนาด 5 ซม. x 5 ซม. x 5 ซม. เมื่อขึ้นรูปวัสดุซีเมนต์ผสมเรียบร้อยแล้ว แบบพิมพ์โลหะจะถูกคลุมด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกใส เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วจึงถอดชิ้นงานออกจากแบบพิมพ์ และนำชิ้นงานวัสดุซีเมนต์ผสมไปบ่มตามวิธีการทดสอบที่กำหนด คือ การบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว (Saturated - Lime Water) และการบ่มภายใต้เงื่อนไขห้องหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก (Plastic Wrapping) ใช้ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน หลังจากนั้นนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด โดยทดสอบแต่ละครั้งตามอายุการบ่มของชิ้นงาน โดยทดสอบครั้งละ 3 ชิ้น ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 12

3.3.2 การคำนวณหาปริมาณการใช้เถ้าลอย

จากตารางที่ 3.4 สามารถคำนวณหาปริมาณการใช้เถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสมจากการคำนวณหาร้อยละของสารประกอบหลักทั้ง 4 ในปูนซีเมนต์โดยประมาณในสมการของ Bogue ได้ ปริมาณของ C_3S และ C_2S เท่ากับร้อยละ 53.3 และ 14.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จึงคำนวณหาปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ (สมการ 3.1 และ 3.2) เนื่องจากเถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยการคำนวณมีดังต่อไปนี้



จากสมการที่ (3.1) หากใช้ปูนซีเมนต์ 100 กรัม จะได้ผลิตภัณฑ์ของ $Ca(OH)_2$ 39.37 กรัม

จากงานวิจัยนี้เป็นการใช้ปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากสมการจะได้ผลิตภัณฑ์ของ $Ca(OH)_2$ เท่ากับ 19.69 กรัม

จากสมการที่ (3.2) หากใช้ปูนซีเมนต์ 100 กรัม จะได้ผลิตภัณฑ์ของ $Ca(OH)_2$ 17.79 กรัม

จากงานวิจัยนี้เป็นการใช้ปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากสมการจะได้ผลิตภัณฑ์ของ $Ca(OH)_2$ เท่ากับ 8.89 กรัม

ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากสมการจะได้ผลิตภัณฑ์ของ $Ca(OH)_2$ เท่ากับ 28.58 กรัม

หากใช้ $Ca(OH)_2$ 2 กรัม จะต้องเติมเถ้าลอย 5 กรัม (ตามมาตรฐาน ASTM C311)

หากใช้ $Ca(OH)_2$ 28.58 กรัม จะต้องเติมเถ้าลอย $\frac{28.58}{2} \times 5 = 71.45$ กรัม

ดังนั้น หากคิดเป็นอัตราส่วน ปูน : etailoy คือ 1 : 0.7145
หาร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยetailoy ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ ร้อยละetailoy} &= \frac{\text{อัตราส่วนetailoy}}{\text{อัตราส่วนปูนซีเมนต์} + \text{etailoy}} \times 100 \% \\
 &= \frac{0.7145}{1 + 0.7145} \times 100 \% \\
 &= 41.67 \%
 \end{aligned}$$

ดังนั้น etailoyที่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักได้
จนหมด จะไม่เกินร้อยละ 42 โดยน้ำหนัก และการคำนวณหาปริมาณการใช้etailoyจาก
สมการข้างต้นร่วมกับการทบทวนงานวิจัยที่มีการใช้etailoy จึงมีการกำหนดปริมาณการใช้etailoyใน
การทดลองนี้อยู่ในช่วงร้อยละ 20 – 30 โดยน้ำหนัก

3.4. การวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ

จากรูปที่ 3.1 จะใช้เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ ดังนี้

3.4.1 การวิเคราะห์ขนาด และการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ

วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาด และการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ (Laser Diffraction Particle Size Distribution Analyzer: PSD) ดังรูปที่ 3.2 จะใช้หลักการของการเลี้ยวเบนของแสงจากเลเซอร์วัดขนาด โดยแสงจะกระเจิงจากอนุภาคจะมีรูปแบบความเข้ม (Intensity) ที่มุมแตกต่างกันขึ้นกับขนาดของอนุภาค มีเงื่อนไขการทดสอบคือ ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวกลาง และเวลาทดสอบ 100 วินาที



รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค (Laser Diffraction Particle Size Distribution Analyzer : PSD)

3.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุดิบ

วิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer : XRD) ดังรูปที่ 3.3 โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดขององค์ประกอบทางเฟสของวัสดุดิบ โดยให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD Pattern) แสดงลักษณะเฉพาะของแต่ละวัสดุดิบ มีเงื่อนไขการทดสอบ คือ ขนาดของการกวาดมุม (Step Size) เท่ากับ 0.02 เวลาในการกวาดมุม (Step Time) เท่ากับ 0.2 และช่วงของการทดสอบ (Scan Range: 2 θ) คือ 10 – 60°



รูปที่ 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer : XRD)

3.4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

วิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer : WDXRF) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุ โดยอาศัยหลักการยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง หลังจากนั้นจะเกิดเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ผ่านคอลลิเมเตอร์ (Collimator) เพื่อให้ลำรังสีเอกซ์เป็นลำขนานและไปในทิศทางที่จะให้ไปกระทบกับ Analyzing Crystal ทำหน้าที่กระจายรังสีเอกซ์ออกไปตามความยาวคลื่นต่าง ๆ ก่อนจะถูกส่งไปยังเครื่องตรวจจับ (Detector) เพื่อแปลงสัญญาณออกมาเป็นสเปกตรัม

3.4.4 การวิเคราะห์ลักษณะและรูปร่างของวัตถุดิบ

วิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope : FE-SEM) ร่วมกับเอกซเรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy : EDS) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจากการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ภาพที่ได้เป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ก่อนวิเคราะห์ จะทำการเคลือบวัตถุด้วยทอง จำนวน 3 รอบ รอบละ 3 นาที

3.5 การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะของชิ้นงานหลังการทดสอบ

จากรูปที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณลักษณะเฉพาะของชิ้นงานหลังทดสอบ มีดังนี้

3.5.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยเข็มแบบไวแคต

แสดงดังรูปที่ 3.4 ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 9 วิธีการทดสอบเริ่มตั้งแต่ปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ และอ่านค่าระยะจม หลังจากนั้นหาระยะการจมของเข็มทุก ๆ 15 นาที โดยระยะเวลาการก่อตัวตอนต้น จะเป็นระยะเวลาของการจมของเข็ม 25 มิลลิเมตร ส่วนระยะเวลาการก่อตัวตอนปลายจะเป็นระยะเวลาที่เข็มไม่สามารถจมกตเป็นรอย



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยใช้เข็มแบบไวแคต (Vicat Apparatus)

(ที่มา : <http://www.survey4289.com/product>)

3.5.2 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดชิ้นงาน

โดยใช้เครื่องทดสอบวัสดุคอนกรีตประสงค์ ขนาด 100 kN แสดงดังรูปที่ 3.5 ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 12-2532 โดยการใช้แรงกดอัดในแนวตรง เมื่อชิ้นงานได้รับแรงอัดจนเกินกำลังรับแรงอัด ชิ้นงานจะแตกออก จุดบันทึกค่าแรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานแตก



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด

3.5.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและรูปร่างของชิ้นงานหลังทดสอบ

วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ร่วมกับเทคนิค EDS เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว รูปร่าง และองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในชิ้นงานหลังทดสอบ โดยก่อนวิเคราะห์จะทำการเคลือบวัตถุด้วยทอง จำนวน 3 รอบ รอบละ 3 นาที

3.5.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานหลังทดสอบ

วิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer : XRD) ใช้เงื่อนไขการทดสอบเช่นเดียวกับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของ วัตถุในหัวข้อ 3.4.2

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ การศึกษาคุณสมบัติ และวิธีการบ่มที่เหมาะสมของวัสดุซีเมนต์ผสมในการทดสอบนี้ โดยใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับเถ้าลอย

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ

วัสดุดิบทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุดิบทั้งสาม มีลักษณะเป็นผงละเอียด ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในรูปที่ 4.1 (ก) สีเทาเข้มกว่าฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งในรูปที่ 4.1 (ข) ขณะที่เถ้าลอยในรูปที่ 4.1 (ค) จะมีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาล



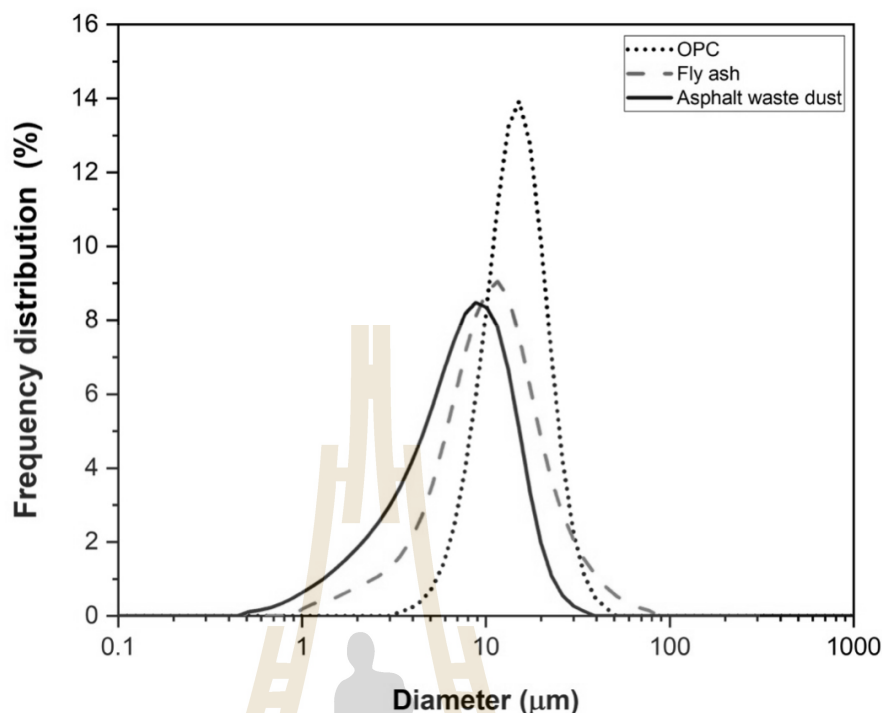
รูปที่ 4.1 วัสดุดิบ (ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ข) ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และ (ค) เถ้าลอย

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค

ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค (PSD) แสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 โดยพบว่า ลักษณะกราฟการกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความสมมาตร และมีการกระจายในช่วงแคบค่อนไปทางขนาดที่ใหญ่กว่าฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และเถ้าลอย ซึ่งมีลักษณะกราฟการกระจายขนาดอนุภาคที่คล้ายกัน แต่มีช่วงการกระจายที่กว้างกว่าปูนซีเมนต์ และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าปูนซีเมนต์ โดยตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ย $D(V,0.5)$ ของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งเล็กที่สุดเท่ากับ 8.1 ไมโครเมตร สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุตัวเติม (Filler) ตามด้วยเถ้าลอยแม่เมาะ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 10.0 และ 13.5 ไมโครเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	$D(V,0.5)$ (μm)
ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง	8.1
เถ้าลอยแม่เมาะ	10.0
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	13.5



รูปที่ 4.2 การกระจายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง

4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ แสดงในตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พบว่า องค์ประกอบทางเคมีหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เฉลี่ยร้อยละ 68.2 โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ได้แก่ ซิลิกา (SiO₂) อะลูมินา (Al₂O₃) เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ตามมาตรฐานของ ASTM C150

องค์ประกอบทางเคมีหลักของเถ้าลอยแม่เมาะ ได้แก่ CaO ร้อยละ 28.9 โดยน้ำหนัก SiO₂ ร้อยละ 26.7 โดยน้ำหนัก Fe₂O₃ ร้อยละ 18.1 โดยน้ำหนัก และ Al₂O₃ ร้อยละ 14.7 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบ SO₃ เจือปนมาร้อยละ 6.6 โดยจากเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM C618 ที่กำหนดผลรวมร้อยละของ SiO₂ , Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับ 59.5 และปริมาณ CaO มากกว่าร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยแม่เมาะที่นำมาศึกษาจัดเป็นเถ้าลอยประเภท ซี (Class C) หรือเถ้าลอยแคลเซียมสูง (High - Calcium Fly Ash)

องค์ประกอบทางเคมีหลักในฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งคือ CaO โดยมีปริมาณเฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 81.8 โดยน้ำหนัก และมีองค์ประกอบรองเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และ SiO₂ ปริมาณร้อยละ 2.4 และ 1.7 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งยังประกอบด้วยคาร์บอน (C) เจือปนกว่าร้อยละ 12.7 ซึ่งมาจากกระบวนการผลิต และไม่พบ SO₃ เหมือนปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อความทนทาน และความแข็งแรงในปริมาณตามที่กำหนด (Chen et al., 2008)

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ

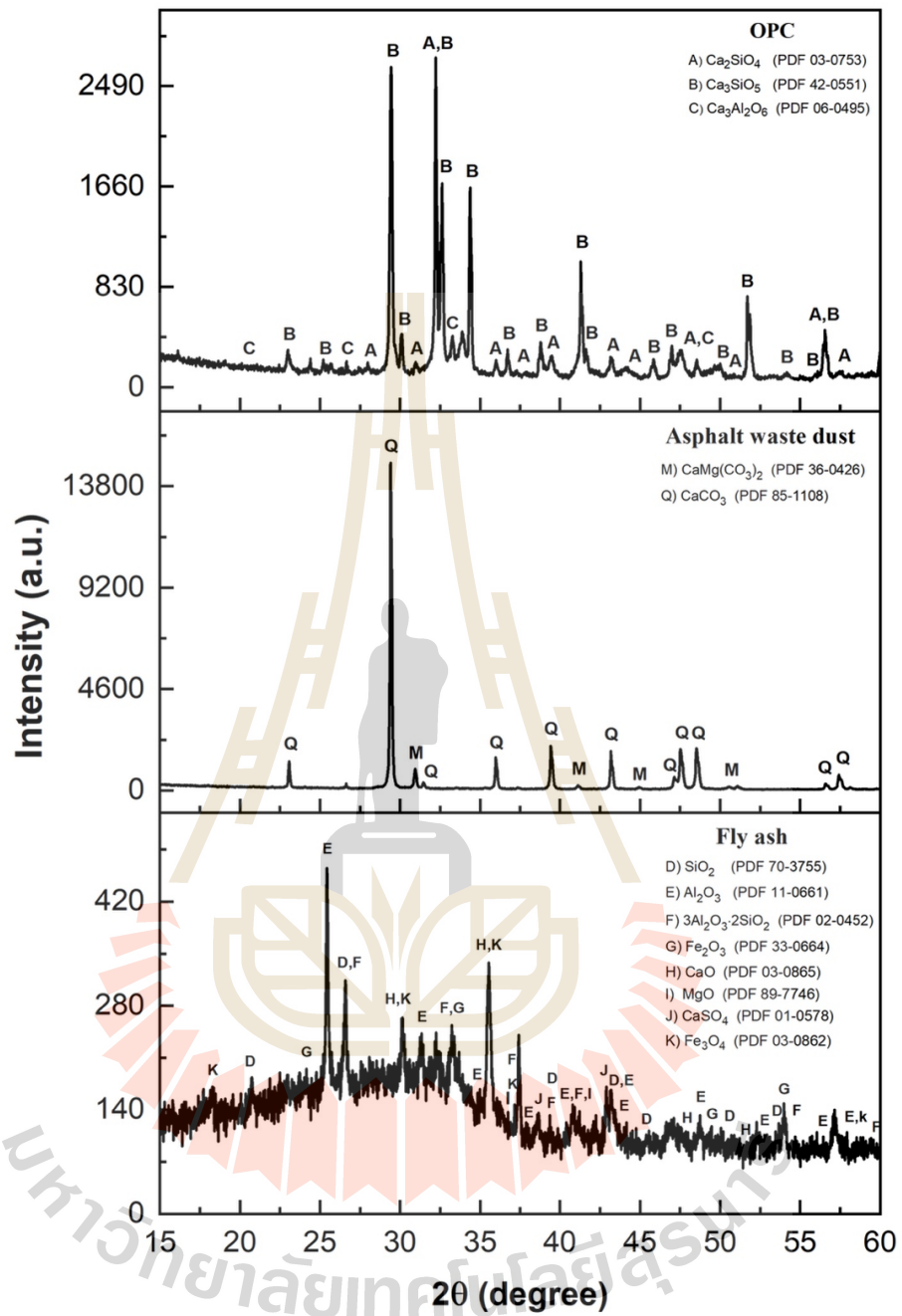
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์	ฝุ่นแอสฟัลท์ เหลือทิ้ง	เถ้าลอยแม่เมาะ
CaO	68.2	81.8	28.9
SiO ₂	15.9	1.7	26.7
Fe ₂ O ₃	3.3	0.5	18.1
Al ₂ O ₃	3.6	1.0	14.7
SO ₃	3.4	-	6.6
MgO	1.2	2.4	2.7
C	4.4	12.7	2.3

4.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุดิบ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุดิบ วิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงดังรูปที่ 4.3 องค์ประกอบทางเฟสของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งที่ใช้ในการทดลองนี้ ประกอบด้วยสารประกอบแคลไซต์ (Calcite ; CaCO_3) เป็นเฟสหลัก และสารประกอบโดโลไมท์ (Dolomite ; $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) เป็นเฟสรอง ซึ่งจะสอดคล้ององค์ประกอบทางเคมีในตารางที่ 4.2 สารประกอบ CaCO_3 ในฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งคล้ายคลึงกับผงหินปูน (Limestone) โดยจากการสังเกตพีคความเข้มสูงสุดของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งที่มุม 2θ ประมาณ 29.5° เป็นพีคของโครงสร้างของแคลไซต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกโรมโบฮีดรัล (Rhombohedral Structure) เป็นรูปแบบแคลไซต์ที่เสถียรในอุณหภูมิห้องทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Maisarah et al., 2015) ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันว่าฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งเป็นวัสดุเฉื่อยหรือวัสดุที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยา (Inert Material)

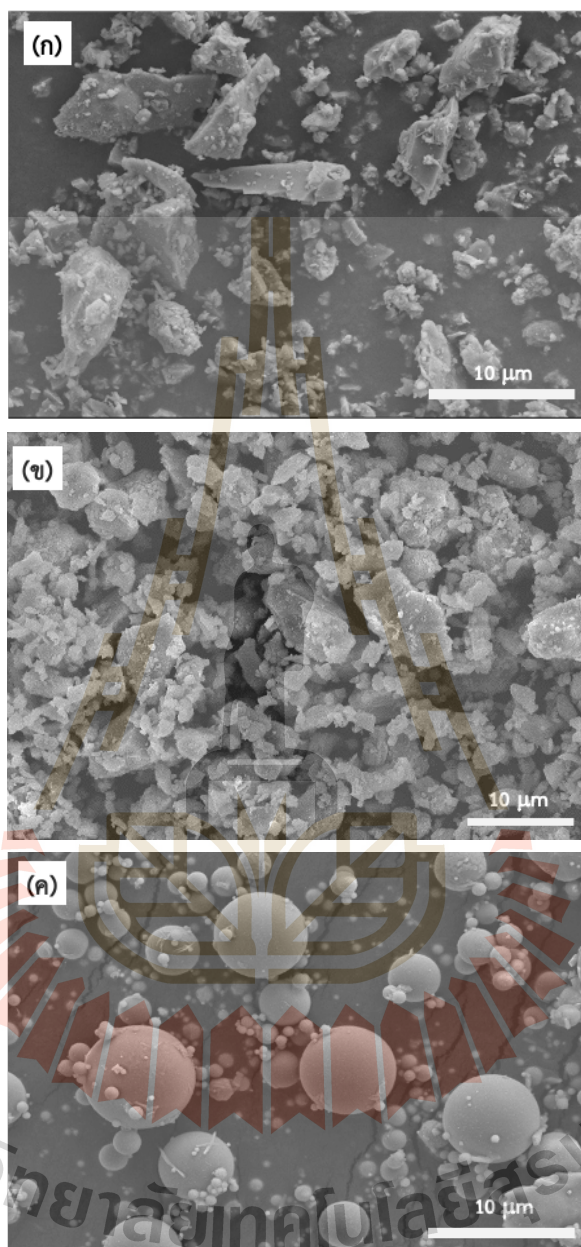
องค์ประกอบทางเฟสของเถ้าลอยที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วยสารประกอบที่หลากหลาย ได้แก่ SiO_2 และ Al_2O_3 ทั้งในรูปออกไซด์อิสระและในรูปสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) นอกจากนี้ยังประกอบด้วย CaO และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) และกลุ่มสารประกอบเหล็กทั้งในรูป Fe_2O_3 และ Fe_3O_4 โดยพบว่าที่มุม 2θ ประมาณ $23 - 35^\circ$ มีลักษณะเป็นเนินพีค (Amorphous Broad Hump) บ่งบอกว่าเถ้าลอยนี้มีคุณสมบัติความเป็นกึ่งอสัณฐานที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ (Thamer, 2018) โดยผลการวิเคราะห์ของเทคนิคการวัดการกระเจิงของรังสีเอกซ์ที่มุมโต (Wide Angle X-ray Scattering; WAXS) มีปริมาณเฟสอสัณฐาน (Amorphous Phase) พบร้อยละ 56.7 และปริมาณผลึก (Crystalline Phase) ร้อยละ 43.3

องค์ประกอบทางเฟสของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วยสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate ; C_3S) สารประกอบไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate ; C_2S) เป็นเฟสหลัก และสารประกอบไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate ; C_3A) เป็นเฟสรอง ซึ่งล้วนเป็นสารประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ ได้ผลิตภัณฑ์สารยึดประสาน และสามารถให้ค่ากำลังอัด (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษกุล , 2547)



รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และเถ้าลอย

4.1.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคลักษณะพื้นผิวและรูปร่างของวัสดุดิบ



รูปที่ 4.4 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุดิบจาก SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า
(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ข) ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง และ (ค) เถ้าลอย

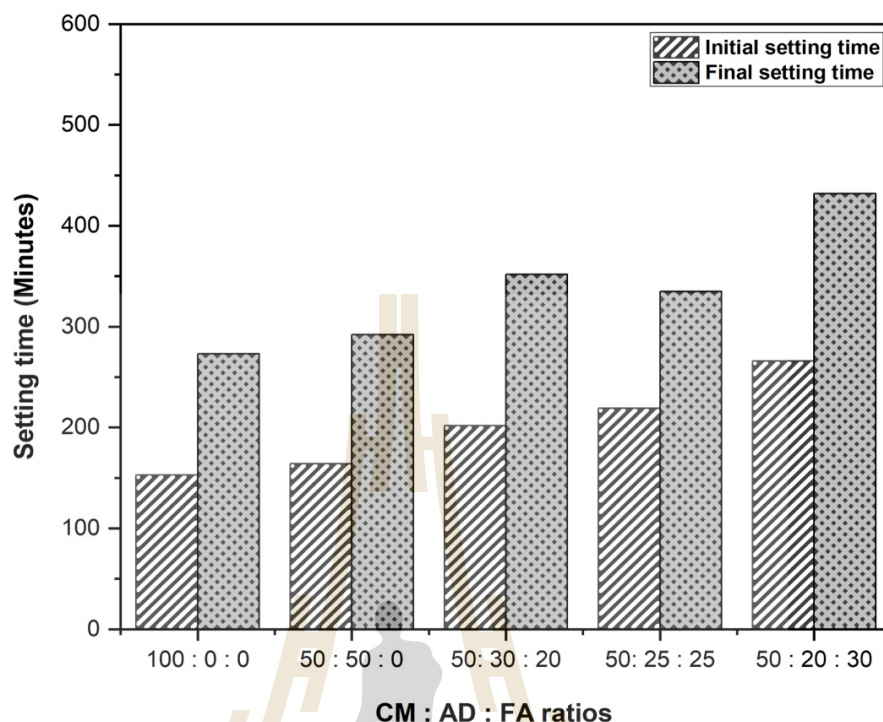
จากรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาควัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด อนุภาคของปูนซีเมนต์และฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งมีลักษณะรูปทรงที่ไม่สามารถระบุรูปร่างแน่นอนได้ (Irregular Shape) และส่วนใหญ่มีลักษณะไม่สมมาตร มีการกระจายของอนุภาคที่หลากหลายขนาด โดยอนุภาคปูนซีเมนต์มีลักษณะความเป็นมุมแหลม (Angularity) ขนาดใหญ่มากกว่าฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง ดังรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ขณะที่เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมตันผิวเรียบ และมีการกระจายของอนุภาคที่หลากหลายขนาด ดังรูปที่ 4.4 (ค)

4.2 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุซีเมนต์ผสม

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของวัสดุซีเมนต์ผสมด้วยเข็มแบบไวแคตตามวิธีมาตรฐานใน มอก. 15 เล่ม 9 ซึ่งข้อกำหนดของระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุซีเมนต์ผสมตามมาตรฐาน มอก. 80 - 2550 มีเพียงข้อกำหนดของระยะเวลาการก่อตัวตอนต้นต้องไม่น้อยกว่า 45 นาที โดยจากตารางที่ 4.3 ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นทุกสูตรผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 80 - 2550

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาในการก่อตัวของวัสดุซีเมนต์ผสม

สูตร	ระยะเวลาในการก่อตัว (นาที)	
	ระยะเวลาการก่อตัวตอนต้น	ระยะเวลาการก่อตัวตอนปลาย
100CM	153	273
50CM: 50AD	164	292
50CM: 30AD: 20FA	202	352
50CM: 25AD: 25FA	219	335
50CM: 20AD: 30FA	266	432
50CM: 50FA	325	454

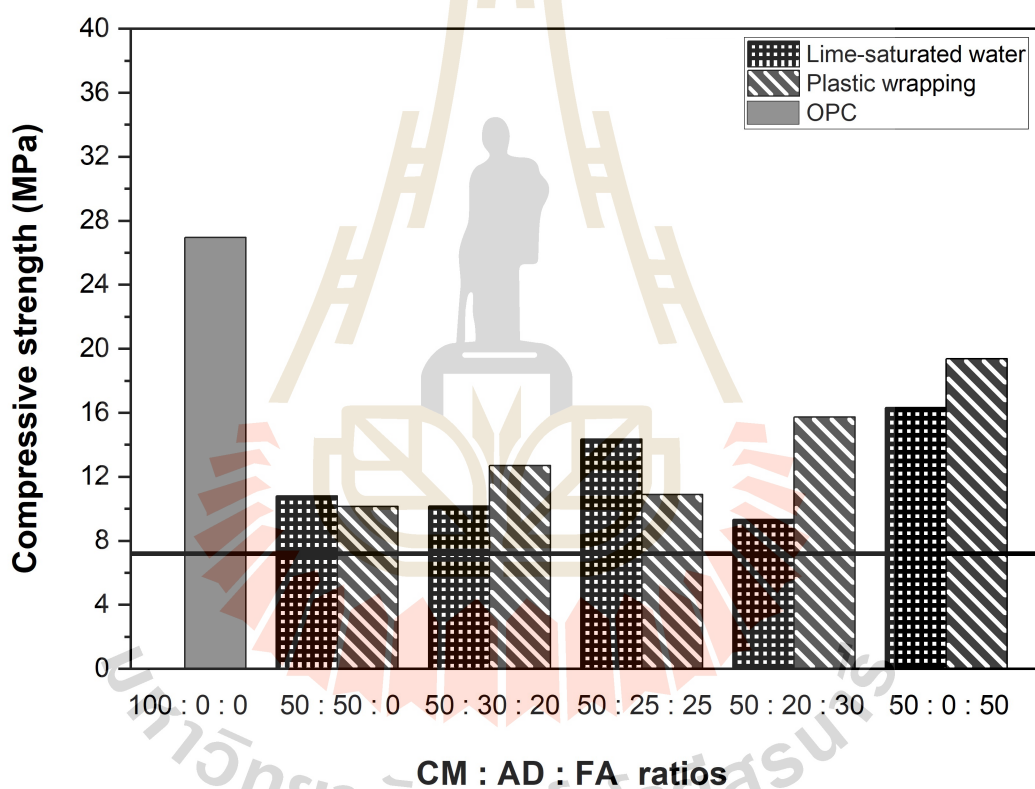


รูปที่ 4.5 กราฟแนวโน้มระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุซีเมนต์ผสม

จากกราฟแนวโน้มระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุซีเมนต์ผสมในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า ระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายมีแนวโน้มลดลง เมื่อฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งในสูตรมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งเป็นวัสดุเฉื่อย ไม่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์หรือน้ำได้ แต่ขนาดอนุภาคที่เล็กของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง ทำให้ปริมาณน้ำบางส่วนถูกดูดซับบนผิวอนุภาคของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งขณะที่เข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ (Salisa et al., 2022) ส่งผลทำให้น้ำที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์มีน้อยลง ระยะเวลาการก่อตัวจึงลดลง และแก้าลอยได้ ทำให้วัสดุซีเมนต์ผสมมีความแน่นตัวเพิ่มขึ้น จึงใช้ระยะเวลาการก่อตัวน้อย (Thongsanitgarn et al., 2011; กฤษฎดา เสือเอี่ยม และณัฏฐ์ มากุล, 2555) ในทางกลับกันเมื่อมีการนำแก้าลอยเข้ามาผสมร่วมและลดสัดส่วนของฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งลง ระยะเวลาการก่อตัวตอนต้นและตอนปลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแก้าลอยที่เพิ่มขึ้น เพราะแก้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยาในช่วงต้น แต่ต้องอาศัย Ca(OH)_2 จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกตามมา (Feng et al., 2018)

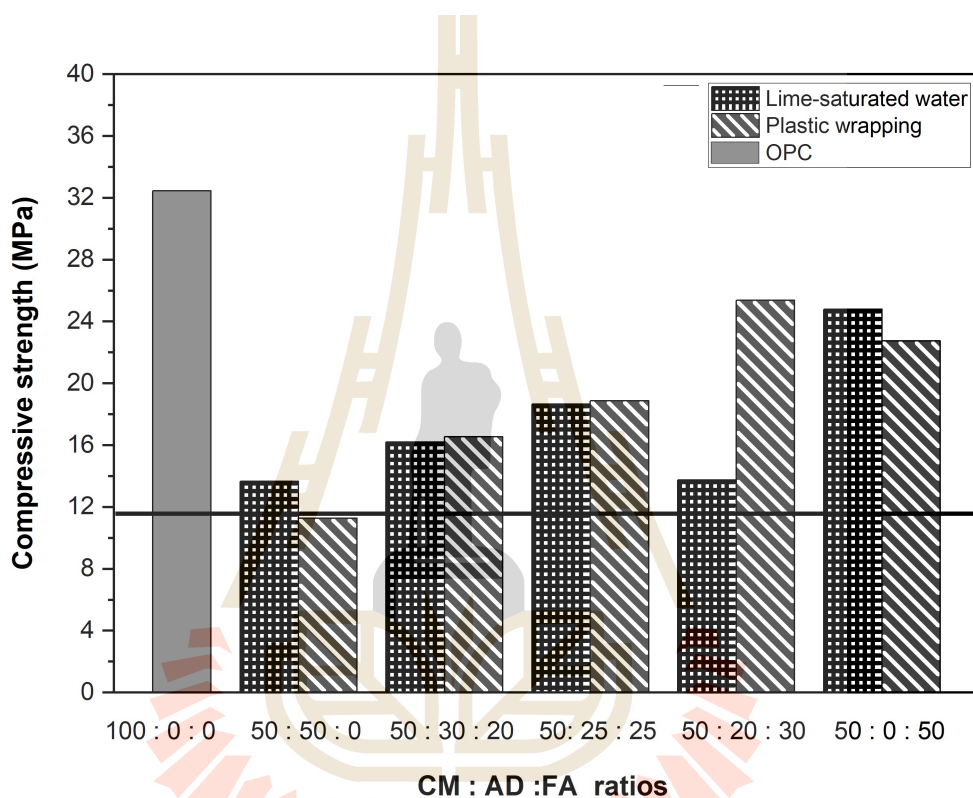
4.3 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสม

ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมที่ระยะการบ่ม 3 วัน โดยทำการบ่มด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัว (Lime - Saturated Water Curing Condition) ตามมอก. 15 เล่มที่ 12 วิธีนี้ช่วยป้องกันไม่ให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca^{2+}) ละลายออกมาระหว่างการบ่ม ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างต่อเนื่อง (Bediako et al., 2015) และการบ่มภายใต้เงื่อนไขห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก (Plastic Wrapping Curing Condition) ตามมาตรฐาน ASTM C171 ที่สามารถป้องกันการสูญเสียน้ำและความชื้นระหว่างการบ่ม ดังในรูปที่ 4.6 พบว่าชิ้นงานทุกสูตรทั้งสองวิธีการบ่มผ่านเกณฑ์ค่ากำลังรับแรงอัดตามข้อกำหนด มอก. 80-2550 ที่ 6.9 MPa (เส้นทึบ —)



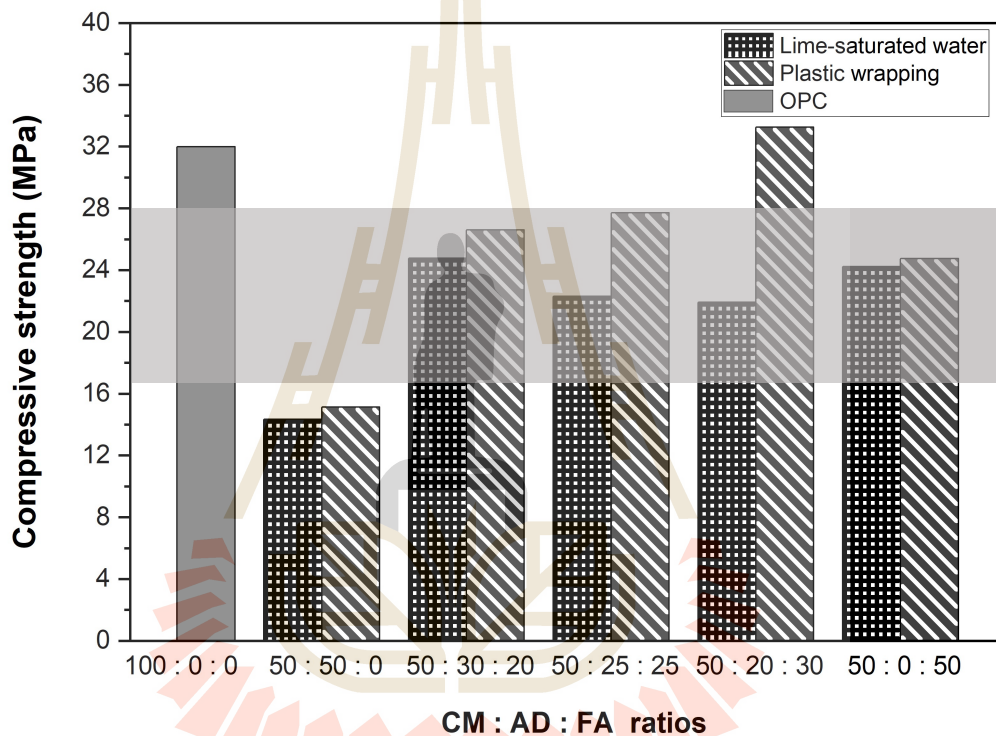
รูปที่ 4.6 ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมที่ระยะการบ่ม 3 วัน

ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมที่ระยะการบ่ม 7 วัน แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยพบว่าชิ้นงานสูตร 50CM:30AD:20FA, 50CM:25AD:25FA, 50CM:20AD:30FA และ 50CM:50FA ทั้งสองวิธีการบ่มผ่านเกณฑ์ค่ากำลังรับแรงอัด 11.8 MPa ที่ 7 วัน (เส้นทึบ —) ตามมาตรฐาน มอก. 80-2550 ขณะที่สูตร 50CM:50AD บ่มภายใต้เงื่อนไขห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานเล็กน้อย





รูปที่ 4.7 ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมที่ระยะการบ่ม 7 วัน

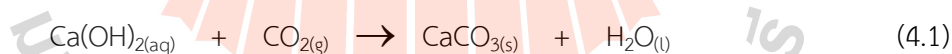
ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมที่ระยะการบ่ม 28 วัน แสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากมาตรฐาน มอก. 80 -2550 ไม่มีระบุเกณฑ์กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 28 วัน แต่การศึกษารวบรวมงานวิจัยของ NRMCA CIP 35 (2014) พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมอื่น ๆ มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 17 MPa ถึง 28 MPa (พื้นที่แรเงาในกราฟ) ดังนั้นวัสดุซีเมนต์ผสม สูตร 50CM:30AD:20FA, 50CM:25AD:25FA, 50CM:20AD:30FA และ 50CM:50FA มีค่ากำลังรับแรงอัดสามารถนำไปใช้งานในด้านวัสดุทางก่อสร้างได้

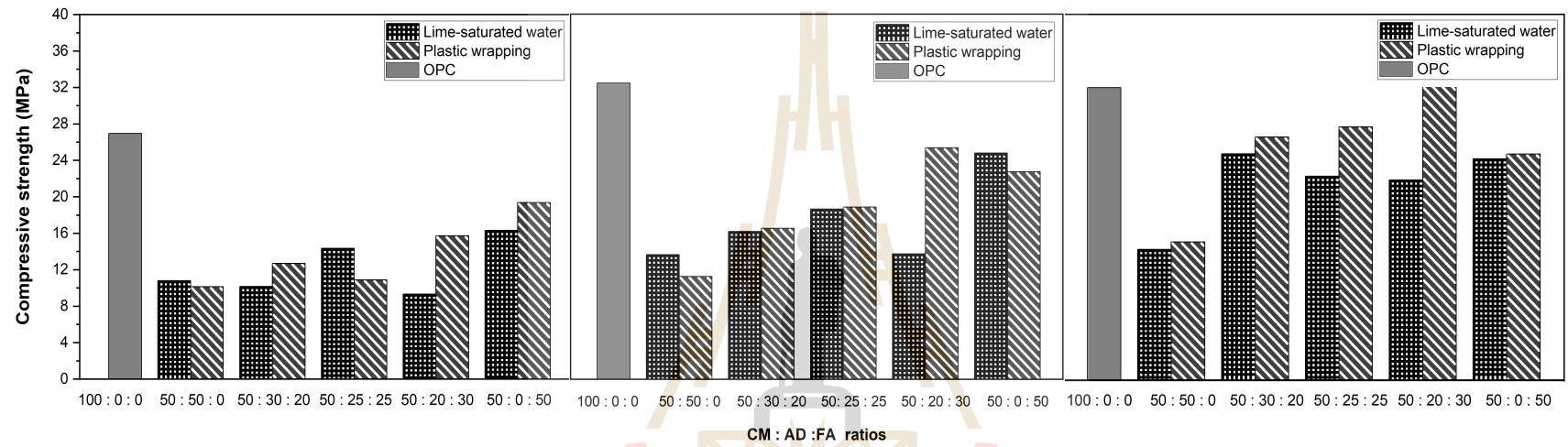


รูปที่ 4.8 ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมที่ระยะการบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมทุกสูตรเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่พัฒนาขึ้นระหว่างการบ่มตามลำดับ จากรูปที่ 4.9 การใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (สูตร 50CM:50AD) มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำและมีการพัฒนาของค่ากำลังรับแรงอัดเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เป็นที่ยืนยันว่าฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันร่วมกับปูนซีเมนต์ได้ และการนำเถ้าลอยมาใช้ผสมรวมในวัสดุซีเมนต์ผสม ทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าวัสดุซีเมนต์ผสมที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สามารถใช้เถ้าลอยไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และการคำนวณหาปริมาณการใช้เถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสมที่แสดงไว้ในหัวข้อ 3.3.2

ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมได้แก่ สูตร50CM:30AD:20FA, 50CM:25AD:25FA และ 50CM:20AD:30FA แสดงความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อบ่มด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัว (กราฟ ) และบ่มภายใต้เงื่อนไขห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก (กราฟ ) ดังในรูปที่ 4.9 น้ำปูนขาวอิ่มตัวเต็มไปด้วย Ca^{2+} และ OH^- สามารถกระตุ้นเถ้าลอยให้เกิดปฏิกิริยาได้ (Hui Ling et al., 2012) อย่างไรก็ตามการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของวิธีการบ่มด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัวให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า ไอออน Ca^{2+} จากปูนซีเมนต์ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันบางส่วนจะละลายออกมาจากชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ และตกตะกอนพร้อมกับไอออน OH^- ก่อนทำปฏิกิริยากับเถ้าลอย โดยตะกอนที่เกิดขึ้นคาดว่าเป็นหินปูนที่ได้จากน้ำปูนขาวอิ่มตัวทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ (Sang Jun et al., 2011) ดังสมการ 4.1



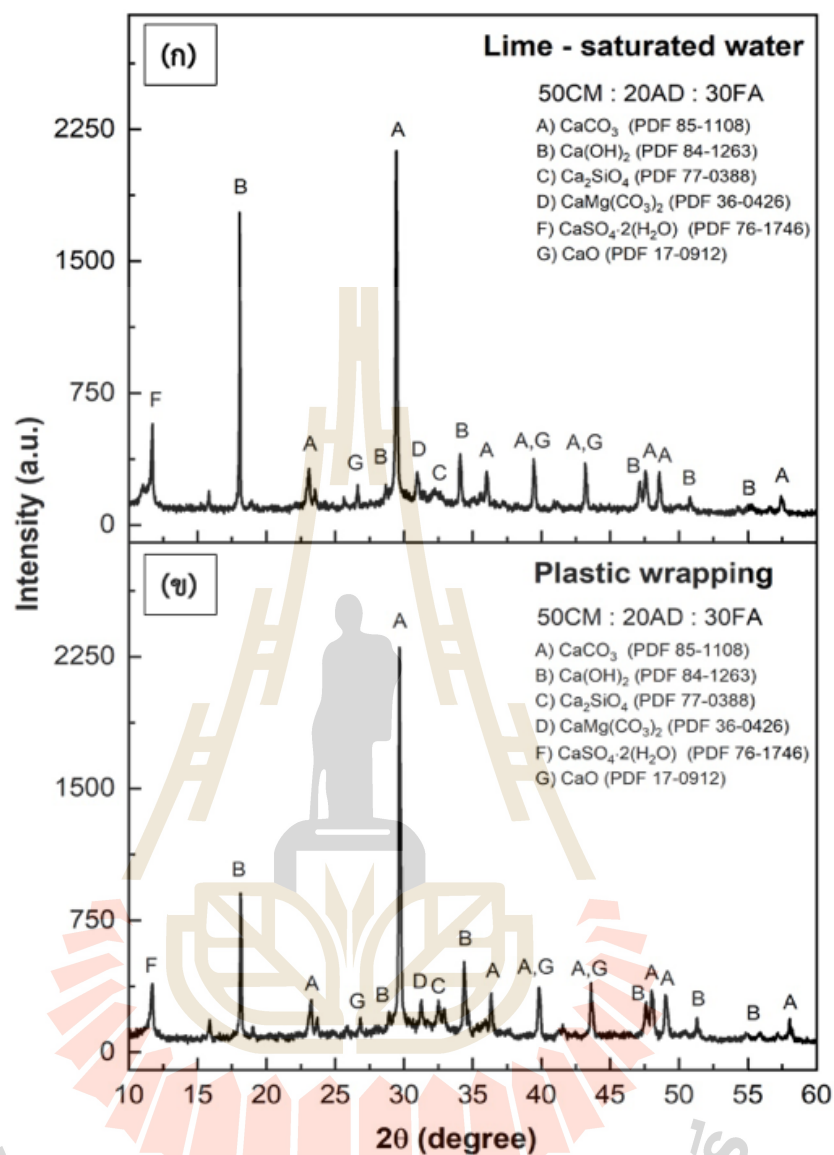


รูปที่ 4.9 แนวโน้มค่ากำลังรับแรงอัดเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น



จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุซีเมนต์ผสมหลังทดสอบชิ้นงานสูตร 50CM:20AD:30FA แสดงในรูป 4.10 โดยรูป 4.10 (ก) เป็นชิ้นงานจากการบ่มด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัว และรูป 4.10 (ข) เป็นชิ้นงานจากการบ่มภายใต้เงื่อนไขห้องหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก องค์ประกอบทางเฟสในตัวอย่างทั้งสองพบว่ามีความคล้ายกัน กล่าวคือพบสารประกอบของ CaCO_3 และ Ca(OH)_2 เป็นเฟสหลัก และสิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนคือที่มุม 2θ ประมาณ 18° ซึ่งเป็นตำแหน่งพิกของ Ca(OH)_2 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.10 (ก) จะเห็นได้ว่าความเข้มของพิก Ca(OH)_2 จากการบ่มชิ้นงานด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัวสูงกว่าความเข้มพิก Ca(OH)_2 ของการบ่มตัวอย่างภายใต้เงื่อนไขห้องหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกในรูป 4.10 (ข) เนื่องจากสารประกอบของ Ca(OH)_2 จากน้ำปูนขาวอิ่มตัวบางส่วนสามารถแทรกซึมเข้าไปในชิ้นงาน ทำให้มีปริมาณ Ca(OH)_2 ทั้งจากผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาไฮเดรชันและจากน้ำปูนขาวอิ่มตัวมากเกินไปจนเกิดความต้องการในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับเถ้าลอย (Solikin และ Setiawan, 2014)

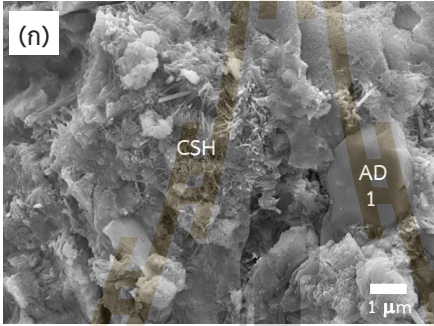
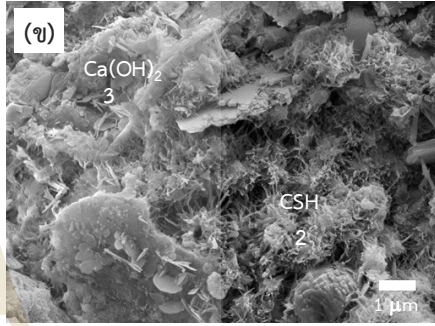
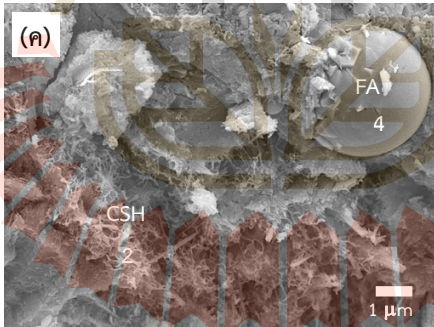
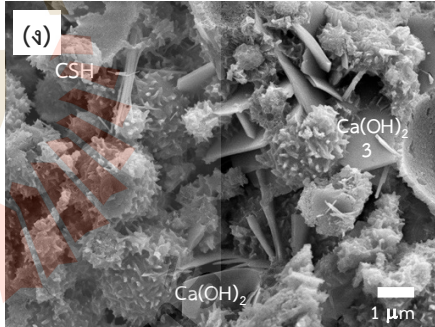
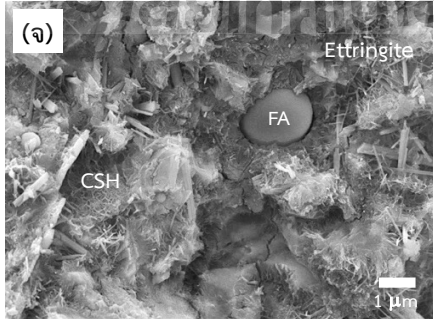
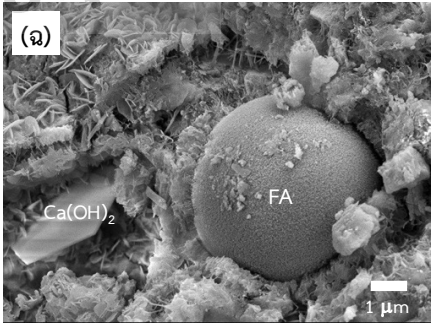
ในทางกลับกันการบ่มภายใต้เงื่อนไขห้องหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้เถ้าลอยผสมเพิ่มขึ้น (รูป 4.9) เนื่องจากวิธีการบ่มนี้ไม่เกิดการสูญเสียไอออน Ca^{2+} และความชื้นระหว่างการบ่ม ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์และต่อเนื่อง ซึ่งยืนยันได้อย่างชัดเจนเมื่อวัสดุซีเมนต์ผสมบ่มไปจนถึง 28 วัน และสอดคล้องกับการลดลงของสารประกอบของ Ca(OH)_2 ในรูปที่ 4.10 (ข) เนื่องจากการถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้มากกว่าชิ้นงานที่บ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว ดังนั้นวัสดุซีเมนต์ผสมด้วยวิธีการบ่มภายใต้เงื่อนไขห้องหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกที่สามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ 50CM:20AD:30FA ซึ่งเป็นวัสดุซีเมนต์ผสมที่มีปริมาณเถ้าลอยมากที่สุดในการศึกษา

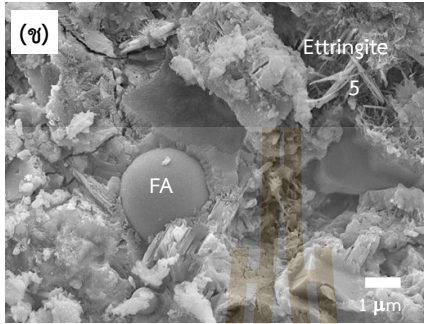
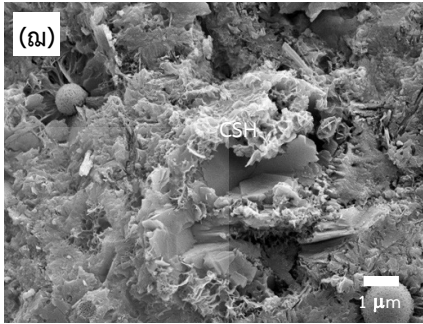
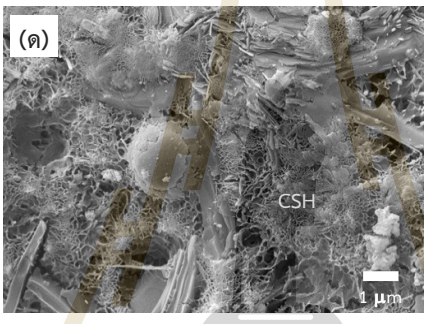
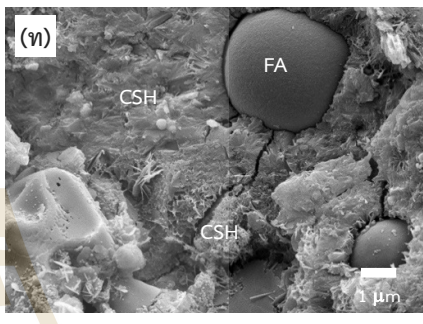


รูปที่ 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานวัสดุซีเมนต์ผสมสูตร 50CM:20AD:30FA ด้วย (ก) การบ่มด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัว และ (ข) การบ่มภายใต้เงื่อนไขท่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก

4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุซีเมนต์ผสมหลังทดสอบ

ตารางที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ผสมหลังทดสอบด้วยวิธีการบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว และการบ่มภายใต้เงื่อนไขห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ระยะเวลา 28 วัน

ตัวอย่างชิ้นงาน	วิธีการบ่มตัวอย่างชิ้นงาน	
	การบ่มด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัว	การบ่มภายใต้เงื่อนไขห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก
50CM:50AD	 <p>(ก) CSH, AD 1, 1 μm</p>	 <p>(ข) Ca(OH)₂ 3, CSH 2, 1 μm</p>
50CM:30AD: 20FA	 <p>(ค) CSH 2, FA 4, 1 μm</p>	 <p>(ง) CSH, Ca(OH)₂ 3, Ca(OH)₂, 1 μm</p>
50CM:25AD: 25FA	 <p>(จ) CSH, Ettringite, FA, 1 μm</p>	 <p>(ฉ) Ca(OH)₂, FA, 1 μm</p>

ตัวอย่างชิ้นงาน	วิธีการบ่มตัวอย่างชิ้นงาน	
	การบ่มด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัว	การบ่มภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก
50CM:20AD: 30FA	(ข) 	(ฅ) 
50CM:50FA	(ด) 	(ท) 

จากตารางที่ 4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่างชิ้นงานที่ 28 วัน จะเห็นได้ว่าชิ้นงาน ดังรูป (ก) ถึง (ฅ) ซึ่งมีฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งเป็นองค์ประกอบจะให้ลักษณะภายในที่มีความแน่นตัว เป็นเพราะฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งทำหน้าที่เป็นวัสดุตัวเติมในวัสดุซีเมนต์ผสม โดยชิ้นงาน 50CM:50AD ที่ไม่มีการเติมเถ้าลอย จะพบผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในวิธีการบ่มภายใต้เงื่อนไขที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก (รูป (ข)) ได้ชัดเจนมากกว่า ชิ้นงานในวิธีการบ่มด้วยน้ำปูนขาวอิ่มตัว (รูป (ก))

ตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเฉพาะจุดจากเทคนิค EDS ของ ตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ผสม แสดงให้เห็นว่าจุดที่ 1 เป็นบริเวณที่พบองค์ประกอบของ Ca และ O สูง และไม่พบ Si ซึ่งเป็นบริเวณของอนุภาคฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งที่พบเด่นชัดในตัวอย่าง 50CM:50AD ขณะเดียวกันจุดที่ 2 คือผลึกของ CSH ที่ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงของวัสดุซีเมนต์ผสม ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย โดย CSH มีลักษณะเป็น

แผ่นซ้อนกันหรือผลึกคล้ายเข็มเล็ก ๆ โดย CSH จะมีลักษณะคล้ายกับทอเบอร์มอไรท์ (Tobermorite gel; $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตของปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Ojovan et al., 2019 ; Richard, 2014) และจุดที่ 3 เป็นผลึกแผ่นหกเหลี่ยมขนาดใหญ่ที่มีปริมาณ Ca และ O สูงอย่างเห็นได้ชัดกว่าบริเวณข้างเคียง บ่งชี้ว่าเป็น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ portlandite ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (เริงศักดิ์ นนทิเมธากุล และอภิศักดิ์ จุฑาศิริวงศ์, 2549)

ในชิ้นงาน 50CM:30AD:20FA ที่มีการเติมเถ้าลอยเข้ามา ดังรูป (ค) ซึ่งเป็นสูตรที่บ่มด้วยน้ำปูนขาวอิมิตัว จะเห็นโครงสร้างของ CSH และเถ้าลอยถูกทำปฏิกิริยาจนมีสภาพไม่สมบูรณ์ จากตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุจากเทคนิค EDS จุดที่ 4 แสดงอนุภาคเถ้าลอยที่มีลักษณะกลมผิวเรียบ มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับเถ้าลอยดังที่แสดงไว้ก่อนหน้านี้ในตารางที่ 4.2 โดยพบปริมาณ Si และ Al เต็มขีด อีกทั้งยังพบ Fe ปริมาณมาก ในขณะที่ชิ้นงานจากสูตรเดียวกันในการบ่มภายใต้เงื่อนไขที่หุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก ดังรูป (ง) จะพบผลึกของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (จุดที่ 3) ชัดเจน แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและมีปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เหลือมากกว่าความต้องการนำไปใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานิกร่วมกับเถ้าลอย และมี CSH เกิดขึ้นน้อย

ลักษณะเช่นนี้พบเช่นเดียวกันกับตัวอย่าง 50CM:25AD:25FA ในรูป (จ) และ (ฉ) และตัวอย่าง 50CM:20AD:30FA ในรูป (ช) และ (ฌ) แต่ปริมาณของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จะเริ่มพบเห็นน้อยลงในตัวอย่างที่มีเถ้าลอยมากขึ้นและการบ่มภายใต้เงื่อนไขที่หุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก กล่าวคือเมื่อเทียบระหว่างตัวอย่าง (ง) 50CM:30AD:20FA (ฉ) 50CM:25AD:25FA และ (ฌ) 50CM:20AD:30FA จะพบผลึกของ CSH เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ พบน้อยลง เพราะถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับเถ้าลอย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชิ้นงาน 50CM:20AD:30FA รูป (ฌ) ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดด้วยการบ่มภายใต้เงื่อนไขที่หุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก และเป็นการยืนยันว่า $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่เกิดขึ้นมีปริมาณเพียงพอกับเถ้าลอยร้อยละ 30 ตามการคำนวณหาปริมาณการใช้เถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสมในงานนี้

ในทางตรงกันข้ามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่าง (ค) 50CM:30AD:20FA (จ) 50CM:25AD:25FA และ (ช) 50CM:20AD:30FA ซึ่งการบ่มด้วยน้ำปูนขาวอิมิตัวและมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากการที่ไอออน Ca^{2+} บางส่วนละลายออกมาจากปูนซีเมนต์และเถ้าลอยเกิดการตกตะกอนพร้อมกับไอออน OH^- ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ก่อนจะทำปฏิกิริยากับเถ้าลอย (Chin mei yun et al., 2021) และความเข้มข้นของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในน้ำปูนขาวอิมิตัวสูงขึ้น แสดงถึงการมีปริมาณ Ca^{2+} สูง ซึ่งจะสามารถชะล้างหรือละลายซิลิกาในอนุภาคของเถ้าลอยได้ (Bagheri et al., 2022; Vargas et al., 2014) โดย Dove & Nix (1997) ได้อธิบายถึงไอออนประจุสองบวก (Divalent cations; M^{2+}) มีความสามารถ

ในการลดความแข็งแรงของพันธะ $\equiv \text{Si-O-Si} \equiv$ ส่งผลให้โครงสร้างภายในเนื้อวัสดุมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงหลังจาก 7 วัน (Vargas et al., 2014) นอกจากนี้ชิ้นงานที่บ่มด้วยน้ำปูนขาวอิมัลชันพบผลึกที่มีลักษณะคล้ายเข็มหรือเอททริงไกต์ในจุดที่ 5 โดยเอททริงไกต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างไตรแคลเซียมอะลูมิเนตกับยิปซัม ซึ่งการคงอยู่ของเอททริงไกต์ อาจนำไปสู่การขยายตัวจนเกิดการแตกร้าวได้ (Lubej et al., 2014)

ชิ้นงาน 50CM:50FA ในรูป (ด) และ (ท) ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่มีฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้ง จะเห็นผลึกของ CSH ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย โดยจะยังคงมีอนุภาคของเถ้าลอยที่ยังสมบูรณ์หลงเหลือให้เห็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการบ่มภายใต้เงื่อนไขห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก แต่ไม่พบผลึกของ Ca(OH)_2 ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณของเถ้าลอยร้อยละ 50 มีมากกว่าปริมาณ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เช่นนี้ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดังกล่าวแทบจะไม่มีการพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดหลังจาก 7 วัน ไม่ว่าจะการบ่มด้วยน้ำปูนขาวอิมัลชันหรือการบ่มภายใต้เงื่อนไขห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก จึงทำให้ลักษณะชิ้นงานในสูตรนี้มีความแน่นตัวน้อยกว่าชิ้นงานที่มีการใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมด้วย

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเฉพาะจุดจากเทคนิค EDS ของตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ผสม โดยวิธีการบ่มในน้ำปูนขาวอิมัลชัน และบ่มภายใต้เงื่อนไขห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ระยะเวลา 28 วัน

ตำแหน่ง	ผลึก	C	O	Al	Si	Ca	Fe	S
1	AD	9.7	42.5	-	-	47.8	-	-
2	CSH	10.5	55.6	5.6	8.8	19.5	-	-
3	Ca(OH)_2	1.8	32.2	6.0	5.7	54.3	-	-
4	FA	4.3	37.1	13.0	26.8	8.2	10.6	-
5	Ettringite	7.3	52.5	3.7	4.9	26.6	3.6	1.5

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับเถ้าลอยในวัสดุซีเมนต์ผสม ได้ระยะเวลาการก่อตัวและค่ากำลังรับแรงอัดตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 80-2550 โดยใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งและเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนัก และกำหนดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และศึกษาการบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวและการบ่มภายใต้เงื่อนไขห้องหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก ในระยะเวลา 3, 7 และ 28 วัน และศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคและการพัฒนาเฟสหลังจากการบ่มวัสดุซีเมนต์ผสมหลังทดสอบ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุซีเมนต์ผสมใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งร่วมกับเถ้าลอย เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 80-2550 โดยระยะเวลาการก่อตัวจะลดลงเมื่อใช้ปริมาณฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งเพิ่มขึ้น เพราะฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งเป็นวัสดุเฉื่อยที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้ปริมาณน้ำบางส่วนถูกดูดซับบนผิวอนุภาค ส่งผลทำให้น้ำที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์มีน้อยลง

5.1.2 ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมผ่านตามข้อกำหนดเกณฑ์ของค่ากำลังรับแรงอัดมาตรฐาน มอก. 80-2550 ที่ระยะเวลา 3 วัน และ 7 วัน ขณะที่ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 28 วัน เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของงานก่อสร้างงานจริง ในช่วงระหว่าง 17 MPa ถึง 28 MPa โดยค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมทุกสูตรเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น

5.1.3 การใช้ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งในปริมาณร้อยละ 20 ร่วมกับเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 30 ด้วยการบ่มภายใต้เงื่อนไขห้องหุ้มด้วยแผ่นฟิล์ม ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของวัสดุซีเมนต์ผสมนี้ สามารถนำไปใช้งานในด้านวัสดุทางการก่อสร้างได้

5.1.4 ฝุ่นแอสฟัลท์เหลือทิ้งและเถ้าลอยสามารถพัฒนาในงานวัสดุซีเมนต์ผสมที่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืน สามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดและเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 วัสดุดิบทั้งหมดที่ถูกใช้มีความไวต่อความชื้น เมื่อใช้วัสดุดิบไปในระยะเวลาหนึ่ง หากควบคุมความชื้นในการเก็บรักษาวัสดุดิบได้ไม่ดี ทำให้วัสดุดิบมีผลต่อการเข้ากันของเนื้อผสมขณะ ปั่นผสม ควรเก็บรักษาวัสดุดิบไว้ที่แห้งหรือมีการอบวัสดุดิบก่อนนำมาใช้

5.2.2 ฝุ่นแอสฟัลท์ไม่ควรอบถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากการทดลองเบื้องต้นฝุ่น แอสฟัลท์จะจับตัวเป็นก้อนแข็ง



รายการอ้างอิง

- กฤษดา เสือเอี่ยม และณัฐ มากุล. (2555). อิทธิพลของฝุ่นหินปูนต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์ชนิดไหลตัวได้ผสมแก้วกลบ. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 23(3), 65-73.
- กำจัด โกฏิปลา. (2543). *การใช้ซีเมนต์ลอมแม่เมาะในการผลิตคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก* (ปริญญา นิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่). สืบค้นจาก <http://cmuir.cmu.ac.th/handle>
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร และคณะ. (2553). ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพมหานคร : บริษัทเอสซีซีซีเมนต์.
- ชูเกียรติ ชูสกุล. (2562). *คอนกรีตผสมฝุ่นหินจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต*. (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, นครศรีธรรมราช). สืบค้นจาก <https://riss.rmutsv.ac.th>
- นิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล. (2560). การใช้ฝุ่นจากโรงโม่หินแทนที่ซีเมนต์ในการทำอิฐบล็อกประสาน. *Princess of Naradhiwas University Journal*, 9(1), 126-135.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และณรงค์ศักดิ์ มากุล. (2547). ความทนทานของปูนซีเมนต์เถ้าลอยผสมฝุ่นหินปูน. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 14(3), 8-16.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และสมาคมคอนกรีตไทย. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ :สมาคมคอนกรีตไทย.
- ปิติ เสรมธากุล, บุรฉัตร ฉัตรวีระ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกกุล. (2546). *การใช้ประโยชน์จากผงหินปูนร่วมกับวัสดุปอซโซลาน* (ปริญญาานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี). สืบค้นจาก <https://www.thaiscience.info/Article>
- ปิตินันต์ กร้ามาตร. (2553). คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน. (โครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี). สืบค้นจาก <http://www.research.rmutt.ac.th/>
- ภาณุพงศ์ จันญาไชย, รัฐพล สมณา และจิรศักดิ์ สุพรรณวัน. (2559). กำลังอัดประลัยและการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้หินปูนแทนที่ทราย. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ*, 21, 728-732.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2555). มอก. 15 เล่ม 1 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ). สำนักมาตรฐานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 12 หน้า.

- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2550). *มอก.80 : ปูนซีเมนต์ผสม*. สำนักมาตรฐานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 9 หน้า.
- เริงศักดิ์ นนทิเมธากุล และอภิศักดิ์ จุฑาศิริวงศ์. (2549). *ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด.
- วินิต ช่อวิเชียร. (2539). *คอนกรีตเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร : ป. สัมพันธ์พาณิชย์.
- สุรสิทธิ์ เพาะบุญ. (2562). *ผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน* (ปริญญาานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี). สืบค้นจาก <http://www.repository.rmutt.ac.th>
- อภิชาติ ใจดี. (2564). *ผลกระทบของการใช้เถ้าลอยและเถ้าหนักต่อสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ* (ปริญญาานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา). สืบค้นจาก <http://www.updc.clm.up.ac.th/>
- Abushad, M., & Sabri, M. (2017). Comparative Study of Compressive Strength of Concrete with Fly Ash Replacement by Cement. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4, 2627-2630.
- Abushad, M., & Sabri, M.D. (2017). Comparative Study of Compressive Strength of Concrete with Fly Ash Replacement by Cement. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(7), 2627-2630.
- Ahmed, A., John K., Jonida P., Fraser H., & Heni F. (2019). Chemical Reactions in Pozzolanic Concrete. *Modern Approaches on Material Science*, 1(4), 128-133.
- Ahmed, Dr., Alshahwany, R. & Mohammed, Z.A. (2018). Influence of Limestone Powder as Partial Replacement of Cement on Concrete and the Effect of High Temperature on It. *AL Rafdain Engineering Journal*, 18, 24-34.
- Ali, M., Abdullah, M., & Saad, S. (2015). Effect of Calcium Carbonate Replacement on Workability and Mechanical Strength of Portland Cement Concrete. *Advanced Materials Research*, 1115, 137-141.
- Almufarji, M., Hejazi, Farzad., & Al-Attar, A. (2019). Compressive strength of class F fly ash blended geopolymers- hybrid mortar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 357(1), 1-12.

- American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM C171 : Standard Specification for Sheet Materials for Curing Concrete, *ASTM International*, Retrieved from <https://www.astm.org>.
- American Society for Testing and Materials. (2019). ASTM C150 : Standard Specification for Portland Cement, *ASTM International*, Retrieved from <https://www.astm.org>.
- American Society for Testing and Materials. (2019). ASTM C618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *ASTM International*, Retrieved from <https://www.astm.org>.
- Aquino, C., Noue, M., Miura, H., Mizuta, M., & Okamoto, T. (2010). The effects of limestone aggregate on concrete properties. *Construction and Building Material*, 24(12), 2363-2368.
- Bagheri, M., Lothenbach, B., Shakoorioskooie, M., & Scrivener, K. (2022). Effect of different ions on dissolution rates of silica and feldspars at high pH. *Cement and Concrete Research*, 152, 1-19.
- Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G., & Gartner, E. (2014). Cement and carbon emissions. *Materials and Structures*, 47, 1055–1065.
- Bediako, M. & Amankwah E. (2015). Analysis of Chemical Composition of Portland Cement in Ghana: A Key to Understand the Behavior of Cement. *Advances in Materials Science and Engineering*, 5, 1-5.
- Bediako, M., Kevern, J. & Amankwah, E. (2015). Effect of Curing Environment on the Strength Properties of Cement and Cement Extenders. *Materials Sciences and Applications*, 6, 33-39.
- Chen, X., Zhou, M., Cong, P. & Li, X. (2008). Influence of SO₃ Content on the Strength of Cement-Fly Ash Stabilized Crushed-Stones. *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering*, 398-402.
- Chaiyaput, S., Sertsoongnern, P., & Ayawanna, J. (2022). Utilization of Waste Dust from Asphalt Concrete Manufacturing as a Sustainable Subbase Course Material in Pavement Structures. *Sustainability*, 14, 9804.

- Dove, P.M., & Nix, C.J. (1997). The influence of the alkaline earth cations, magnesium, calcium, and barium on the dissolution kinetics of quartz. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(16), 3329-3340.
- Feng, J., Sun, J. & Yan, P. (2018). The Influence of Ground Fly Ash on Cement Hydration and Mechanical Property of Mortar. *Advances in Civil Engineering*, 1-7.
- Isberto, C. (2019). Optimized Preparation of Rice Husk Ash (RHA) as A Supplementary Cementitious Material. *International Journal of GEOMATE*, 16(57), 56 -61
- Ling, X., Setunge, S. & Patnaikuni, I. (2012). Effect of different concentrations of lime water on mechanical properties of high volume fly ash concrete. *Materials to Structures: Advancement through Innovation*, 1135-1141.
- Lubej, S., Anzel, I., Jelušič, P., Kosec, L. & Ivanič, A. (2014). The effect of delayed ettringite formation on fine grained aerated concrete mechanical properties. *Science and Engineering of Composite Materials*, 23(3), 325–334.
- McCarthy, M.J., & Dyer, T.D. (2019). Pozzolanas and Pozzolanic Materials. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5, 363-467.
- Mohsen Momen. (2015). Cement Manufacturing. doi: 10.13140/RG.2.1.3461.0003.
- Nair, Deepa. (2015). Fly ash as a Fine Aggregate Replacement in Concrete Building Blocks. *International Journal of Engineering and Advanced Research Technology*, 1, 47-51.
- Namagga, C., & Atadero, R.A. (2009). *Optimization of Fly Ash in Concrete: High Lime Fly Ash as a Replacement for Cement and Filler Material*. In *2009 World of Coal Ash (WOCA) Conference*. USA: Lexington.
- National Ready Mixed Concrete Association, CIP 35 Testing Compressive Strength of Concrete, *Concrete in Practice Series*. Retrieved from <https://www.nrmca.org>.
- Ojovan, M., Lee, W., Kalmykov, S. (2014). An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation, *Immobilisation of Radioactive Waste in Cement*, 205–232.

- Richard, W. G. (2021). *Combustion Ash Residue Management* (Second Edition). New York : William Andrew.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C. & Kiattikomol, K. (2007). Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 21, 1589-1598.
- Solikin M. & Setiawan B. (2014). Mechanical Properties of Class C High Volume Fly Ash Concrete with Lime Water as Mixing Water. *Applied Mechanics and Materials*, 660, 312–316.
- Thamer Alomayri. (2018). Effect of glass microfibre addition on the mechanical performances of fly ash-based geopolymer composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 5, 334-340.
- Thomas, M. (2007). Optimizing the use of fly ash in concrete. *Portland Cement Association*.
- Thongsanitgarn, P., Wongkeo, W. & Chaipanich, A. (2014). Hydration and Compressive Strength of Blended Cement Containing Fly Ash and Limestone as Cement Replacement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(12), 1-5.
- Thongsanitgarn, P., Wongkeo, W., Sinthupinyo, S. & Chaipanich, A. (2011). Effect of Limestone Powders on Compressive Strength and Setting Time of Portland-Limestone Cement Pastes. *Advanced Materials Research*, 343-344.
- Vargas, A., Dal Molin, D., Masuero, A.B., Vilela, A.C., Castro-Gomes, J., & Mejia, R. (2014). Strength development of alkali-activated fly ash produced with combined NaOH and $Ca(OH)_2$ activators. *Cement and Concrete Composites*, 53, 341-349.
- Wendimu G. & Abebe D. (2010). The use of limestone powder as an alternative cement replacement material: An experimental study. *Zede Journal*, 27, 23-43.
- Yun, C., Rahman, M.D., Kuok, K., Mersal, M., Liing, C. & Bakri, M.K. (2021). Compressive Strength of High-Volume Fly Ash (HVFA) Concrete as a Function of Lime Water and Curing Time. *Research Square*.



ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

วารสารวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

Chaiyaput, S., Sertsoongnern, P., and Ayawanna, J. (2022). Utilization of Waste Dust from Asphalt Concrete Manufacturing as a Sustainable Subbase Course Material in Pavement Structures. *Sustainability*. 14, 9804.

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

Chaiyaput, S., Sertsoongnern, P., Ayawanna, J., Pratumwan, W ., and Kingnoi, N. (2020). The strength of soil-cement columns on the soft Bangkok clay: Equation and practical test. The 5 th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (SmartMat@2020), 1 st - 4 th December 2020 in Nongnooch Garden, Pattaya, Thailand [นำเสนอด้วยโปสเตอร์]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Article

Utilization of Waste Dust from Asphalt Concrete Manufacturing as a Sustainable Subbase Course Material in Pavement Structures

Salisa Chaiyaput ^{1,*}, Pimchanok Sertsoongnern ² and Jiratchaya Ayawanna ^{2,*}

¹ Department of Civil Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

² School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

* Correspondence: salisa.ch@kmitl.ac.th (S.C.); jiratchaya@sut.ac.th (J.A.)

Abstract: High calcium waste dust from asphalt concrete manufacturing was utilized to stabilize low-quality lateritic soil as a subbase course material in road structures. Asphalt waste dust up to 30 percent by weight (wt%) was incorporated into the solely lateritic soil and the mixture of lateritic soil containing 5 wt% Portland cement. The asphalt waste dust was successfully used as a subbase course material in road structures according to the standard specifications of pavement materials issued by the Thailand Department of Highways. The minimum 20 wt% asphalt waste dust induced a sufficiently high California bearing ratio, optimized plastic index, liquid limit, and swelling index of soil above the minimum standard requirements for a subbase course material. The fine particles of asphalt waste dust showed filler-like properties to reduce the voids and generated a very dense surface in the stabilized lateritic soil samples. With the small content of cement mixes, a decrease in the calcite phase in the soil stabilized with asphalt waste dust indicated a partial promotion of CaCO₃ from the asphalt waste dust in the cement hydration reaction. The very high strength (CBR > 250%) of these stabilized soil samples approached the standard for base course material (CBR ≥ 80%), which was beyond the expectation for the subbase material (CBR ≥ 25%). Thus, recycling-waste dust from asphalt concrete manufacturing can be used as an effectively sustainable subbase course and base course materials in further generation for road construction purposes.

Keywords: asphalt waste dust; California bearing ratio; soil stabilization; sustainable subbase course; road construction



Citation: Chaiyaput, S.; Sertsoongnern, P.; Ayawanna, J. Utilization of Waste Dust from Asphalt Concrete Manufacturing as a Sustainable Subbase Course Material in Pavement Structures. *Sustainability* **2022**, *14*, 9804. <https://doi.org/10.3390/su14169804>

Academic Editor: Maged A. Youssef

Received: 16 June 2022

Accepted: 2 August 2022

Published: 9 August 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Asphalt concrete containing aggregate and bitumen is widely used as a pavement material for road construction. "Asphalt Waste Dust" is highly produced as a byproduct or waste at every single production site of asphalt concrete. In the plant mix, the different sizes of stone are incinerated at 150–170 °C before being mixed with liquid asphalt to produce ready-mixed asphalt concrete. This results in residual dust from the asphalt concrete manufacturing process. According to the Department of Highways, asphalt concrete plants are typically found 100 km or less from the sites of road construction. As a result, there are numerous asphalt concrete plants located throughout the entire country, and a substantial amount of leftover asphalt waste dust from hot-mixed asphalt concrete is not currently being used for any other purposes. In addition, the disposal of asphalt waste dust normally uses landfills, which require a large area and subsume high costs to eliminate this abandoned dust.

In order to use a large amount of recycling asphalt waste dust, the construction sector offers a large opportunity to use such asphalt waste dust in road construction. The subbase course is one of the structural support layers in the road structure. According to

the standard specifications from the Thailand Department of Highways, the California bearing ratio (CBR) is the main criterion used to select the subbase course materials for road structure [1,2].

Nowadays, lateritic soil is used as a low-cost subbase course material in road structures. Since the natural lateritic soil does not possess all the desirable qualities, a stabilization technique is required to increase its properties to achieve the minimum requirement of the standard specifications. Chemical stabilization is applied to improve soil strength [3–5]. Portland cement is the most common additive in the soil to increase the strength of the base in the chemical stabilization technique. Stabilization by cement addition normally depends on the cement content, water content, and curing time [6,7]. Reports on the stabilization of lateritic soil with cement in terms of CBR value have been conducted by many researchers. It was found that the additions of cement in the ratio of about 5–7 wt% were the most effective ranges to develop the CBR of lateritic soil due to the obtained maximum dry density of the cement-stabilized lateritic soil [8–12]. These results were also obtained via a drawback effect on the CBR when the cement above 10 wt% was mixed into the stabilized lateritic soil [13].

Several additive materials, such as lime, fibers, fly ash, etc., were also used in soil stabilization by many researchers. The additive contents were relatively varied, depending on the characteristics and chemical properties of each additive material. Fly ash is one of the well-known additive examples in soil stabilization. It was typically used in the range of 0 wt% to 30 wt% in stabilizing expansive soil [14–16]. This was because the high content of fly ash strongly decreased the liquid limit, plasticity index, swelling, and maximum dry density values of the soil, whereas the CBR gradually increased.

Asphalt waste dust from asphalt concrete manufacturing is another industrial waste that has attractive characteristics as an alternative additive material for soil stabilization. In our preliminary study, the asphalt waste dust had fineness and a relatively high content of calcium oxide (CaO) in the form of limestone (CaCO_3) as a major component as analyzed using an X-ray diffraction technique. Since we found no previous report on the effective use of asphalt waste dust, a similar material such as natural limestone was considered as a reference. As opposed to its use in natural soil, the use of CaCO_3 in cement mixed materials has been widely reported [17,18]. The replacement of cement with 10–15 wt% CaCO_3 was found to be effective in improving the early strength, reducing the setting time, and providing workability of the cement mortar and concrete. This was attributed to the filler-like properties of fine CaCO_3 existing in the cement-mixed samples. This resulted in a reduction in voids in the cement-mixed samples, while at the same time, the hydration reaction was accelerated between adjacent cement particles. Thus, the CaCO_3 components in asphalt waste dust probably could assist in promoting the strength of soil–cement samples in a behavior similar to that of the CaCO_3 -mixed cement material in the aforementioned studies. That means that asphalt waste dust could be a novel additive filler in soil stabilization that would offer a higher sustainability performance in terms of cost savings and resource conservation, especially in future generations for construction purposes.

Since road construction requires high-quality materials, location is one of the crucial choices when selecting construction materials with minimized transportation costs. Many asphalt concrete plants located near road-construction sites in the entire country could serve this purpose in the selection of recycling materials such as asphalt waste dust. Therefore, this study aimed to assess and demonstrate the incorporation of asphalt waste dust into a soil–cement mixture in order to increase the overall performance of the low-quality lateritic soil used as a subbase course material in road structures. Asphalt waste dust in the range of 10 wt% to 30 wt% was selected in this study, following the common range of other additives from earlier works on soil stabilization. The asphalt waste dust was added into the solely lateritic soil and the mixture of lateritic soil with 5 wt% Portland cement. Furthermore, the materials testing under the standard specifications of pavement materials from the Thailand Department of Highways (DOH) was carried out on the prepared samples, and the performance of asphalt waste dust related to the basic chemical and mineral component

and microstructure of the stabilized-soil samples was discussed. The replacement of lateritic soil with asphalt waste dust for construction purposes could potentially offer economic, social, and environmental benefits.

2. Materials and Characterizations

Lateritic soils are classified by the grain size distribution ranges into five grades: A, B, C, D, and E, according to the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) criteria and the standard no. DH-S 205/2532 [19] of the Thailand Department of Highways (Table 1). The classified series are from the best properties with high maximum dry density and high California bearing ratio (CBR), but the lowest optimum water content value (grade A) [20], to the poor properties of dry density, CBR, and optimum water content (grade E). In this research, the lateritic soil was obtained from Chachoengsao province, Thailand. The lateritic soil grade E was selected for this research because it has the lowest mechanical properties that need to be enhanced. The grain size distribution of the lateritic soil was determined by sieve analysis before preparing the lateritic soil grade E (Mixed E in Table 1). The percent passing through a 25.00 mm sieve, 2.00 mm sieve, 0.425 mm sieve, and a 0.075 mm sieve of the lateritic soils were 100 wt%, 74 wt%, 20 wt%, and 6 wt%, respectively (Figure 1a and Table 1).

Table 1. Grain size distributions of subbase course classification by the Thailand Department of Highways [19].

Sieve Size	Percent Passing by Weight (%)					
	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D	Grade E	Mixed E
50.00 mm	100	100	-	-	-	-
25.00 mm	-	-	100	100	100	100
9.50 mm	30–65	40–75	50–85	60–100	-	-
2.00 mm	15–40	20–45	25–50	40–70	40–100	74
0.425 mm	8–20	15–30	15–30	25–45	20–50	20
0.075 mm	2–8	5–20	5–15	5–20	6–20	6

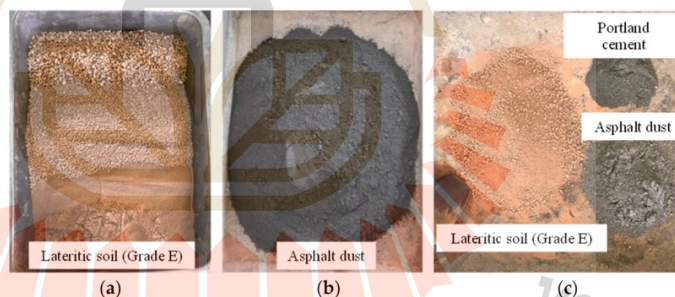


Figure 1. Materials testing (a) Lateritic soil (Grade E) (b) Asphalt waste dust (c) Mixing samples of Lateritic soil (Grade E), asphalt waste dust and Portland cement.

Asphalt waste dust shown in Figure 1b was obtained from the asphalt concrete plant at Nakhon Ratchasima, Thailand. Asphalt waste dust was prepared by sieving through a 40-mesh sieve in which the particles were smaller than 0.42 mm. Ordinary Portland cement (OPC) Type 1 was utilized at a low concentration of 5 wt% in a mixture of lateritic soil and asphalt waste dust (Figure 1c). Laser particle size analysis using HORIBA Partica LA-950V2 was used to determine average particle size and distribution size. Atterberg's limits tests, including plastic limit, liquid limit, and plasticity index, were carried out on the lateritic soil and asphalt waste dust. The chemical composition of raw materials was

determined using Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF) Horiba XGT-5200 X-ray Analytical Microscope. The mineral composition was examined by Bruker D2 PHASER X-ray diffractometer (XRD) with Cu-K α radiation over the 2θ range of 20–50°. Morphology of the asphalt waste dust was examined by JEOL JSM-6010 LV scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDS Oxford Instrument X-MaxN, Oxford, UK).

3. Testing Methods

3.1. Testing Conditions

This research was performed under the replacement conditions in the soil–cement stabilizing technique to understand the effect of asphalt waste dust stabilized the lateritic soil mixes. Asphalt waste dust was mixed into lateritic soil containing 5 wt% Portland cement. The efficiency of asphalt waste dust in an increment of the strength of the natural lateritic soil containing a small portion of Portland cement was investigated. The testing conditions were divided into 8 conditions (Table 2), and the names are as follows:

- (1) LS refers to ordinary lateritic soil.
- (2) AD refers to pure asphalt waste dust.
- (3) 90LS-10AD refers to LS of 90 wt% mixed with AD of 10 wt% of dry LS sample.
- (4) 80LS-20AD refers to LS of 80 wt% mixed with AD of 20 wt% of dry LS sample.
- (5) 70LS-30AD refers to LS of 70 wt% mixed with AD of 30 wt% of dry LS sample.
- (6) 90LS-10AD refers to LS of 90 wt% mixed with AD of 10 wt% of dry LS sample and added 5 wt% Portland cement.
- (7) 80LS-20AD refers to LS of 80 wt% mixed with AD of 20 wt% of dry LS sample and add 5 wt% Portland cement.
- (8) 70LS-30AD refers to LS of 70 wt% mixed with AD of 30 wt% of dry LS sample and add 5 wt% Portland cement.

Table 2. The 8 conditions of testing samples.

Condition Names	Lateritic Soil (%wt)	Asphalt Waste Dust (%wt)	Portland Cement (%wt)
LS	100	-	-
AD	-	100	-
90LS-10AD	90	10	-
80LS-20AD	80	20	-
70LS-30AD	70	30	-
90LS-10AD-5C	90	10	5
80LS-20AD-5C	80	20	5
70LS-30AD-5C	70	30	5

3.2. Compaction Test

Dry density and water content of LS, AD, 90LS-10AD, 80LS-20AD, 70LS-30AD, 90LS-10AD-5C, 80LS-20AD-5C, and 70LS-30AD-5C samples were determined by the modified proctor compaction (AASHTO T 180) [21] to obtain the maximum dry density and the optimal water content of those samples. The optimal water content was subsequently used for California bearing ratio testing.

In the sample preparation process, arbitrary amounts of tap water (five different amounts for each sample) were added to the samples and manually blended until the homogeneous color and texture were obtained. Then, five equal amounts of each mixture were transferred to cylindrical molds with a diameter of 152.4 mm in sequential order (to the top surface mold). Each layer of those samples was compacted 56 blows, using a 44.48 N hammer dropping from a height of 457.2 mm, equivalent to 2700 kN-m/m³ compaction effort (approximately 4.5 times of the standard proctor test). The compacted sample molds were weighed before ejecting the samples from the molds. The ejected samples were dried overnight in an oven before determining the optimal water content at the maximum dry density.

3.3. California Bearing Ratio

According to the AASHTO T 193 standard [22], the California bearing ratio (CBR) under soaked conditions and swelling indexes of LS, AD, 90LS-10AD, 80LS-20AD, 70LS-30AD, 90LS-10AD-5C, 80LS-20AD-5C, and 70LS-30AD-5C samples were determined. The CBR describes the strength of the materials in comparison to the bearing capacity of well-graded crushed rock with 100% CBR at the maximum dry density. Before the penetration test, the swelling behavior of those samples was also characterized under soaking conditions for 96 h (4 days). The soaked condition was used to simulate the worst-case scenario of the fully saturated region after flooding.

Each sample was uniformly blended in the tap water during the CBR test under soaking conditions at the optimal water content ratio determined by the compaction test. Five equal portions of each soil sample were sequentially put into each of the three cylindrical molds, with an inner diameter of 152.40 mm and a height of 177.80 mm. In those three molds, the transferred soil sample was compressed with 12, 25, and 56 blows for each layer, respectively. The samples were submerged in the water and then taken out of the water tank. The samples were dried for 15 min before being loaded axially with 50 kN maximum capacity and 1×10^{-5} to 6.00 mm/min speed using the penetration test machine (CONTROLS Triaxial tester T400 Digital, Model MUL125, Ser.no. 610910 by K. Thaithamrong Engineering LTD., Pathumthani, Thailand).

During the penetration test, a 4.54-kg surcharge weight (two pieces of 2.27-kg circular discs) was placed on top of the soil sample surface. The penetration was carried out at a rate of 1.27 mm/min using a steel penetration piston with a 49.63 mm diameter that was attached to the proving ring through the center. The load measurements for the deformation depths of 0.64 mm, 1.27 mm, 1.91 mm, 2.54 mm, 3.18 mm, 3.81 mm, 4.45 mm, 5.08 mm, 7.62 mm, 10.16 mm, and 12.70 mm were taken. To determine the water content at the top layer of the soil samples, the soil samples were taken out of the molds. Equation (1) was applied to convert the load and deformation at 5.08 mm-penetration depth under saturated conditions into the CBR of the soil samples. The obtained CBR was compared to the standard CBR (10.30 MPa) of the standard crushed rock at the same penetration depth.

$$\text{CBR (\%)} = (\text{Test unit load} / \text{Standard unit load}) \times 100 \quad (1)$$

The soil samples in the mold under loading with a 4.54-kg surcharge weight were submerged for 96 h (4 days) prior to the penetration test in order to analyze the swelling behavior of the samples and simulate flooding damage. The swelling index after 96 h-submersion was calculated using Equation (2), in which the initial height of the samples was fixed as 4.584 inches.

$$\text{Swell (\%)} = (\text{Sample extension during soaking} / \text{Initial height of sample}) \times 100 \quad (2)$$

4. Results and Discussion

4.1. Characteristics of Materials

The average particle size of lateritic soil was larger than 100 μm . The plastic limit, liquid limit, and plasticity index of Mixed E were 16.51%, 32.58%, and 16.07%, respectively. These values were below the standard specification from the Thailand Department of Highways (Table 3). The control parameters for optimizing subbase course materials in this work are based on the standard values of the liquid limit of 35% and plasticity index of 11% from Table 3. The chemical composition of lateritic soil, asphalt waste dust, and Portland cement is illustrated in Table 4. One of the major chemical components in the lateritic soil is Fe_2O_3 , which exists in two different Fe-containing minerals: goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$), and hematite (Fe_2O_3) (Figure 2a), resulting in a unique brown color of lateritic soil as seen in Figure 1a. SiO_2 is the other significant chemical component, which is in agreement with the XRD result showing quartz (SiO_2) mineral (Figure 2a). The high quartz component resulted in the low plasticity of the lateritic soil. The clay mineral in the form of kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) was observed as a minor component. Moreover, calcium carbonate or

calcite (CaCO_3) and gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) were the trace minerals detected in this lateritic soil (Figure 2a).

Table 3. Standard specifications of pavement materials from the Thailand Department of Highways.

Pavement Material	Liquid Limit (%)	Plasticity Index (%)	Soaked CBR (%)	Swell (%)	Compaction
Base course [23]	≤ 25	≤ 6	≥ 80	≤ 0.50	95% Modified Proctor
Subbase course [19]	≤ 35	≤ 11	≥ 25	≤ 4	95% Modified Proctor
Selected material A [24]	≤ 40	≤ 20	≥ 10	≤ 3	95% Modified Proctor
Selected material B [25]	-	-	≥ 6	-	95% Modified Proctor
Subgrade [26]	-	-	-	≤ 4	95% Modified Proctor

Table 4. Chemical composition of asphalt waste dust and ordinary Portland cement (Type I).

Chemical Composition (%wt)	Lateritic Soil	Asphalt Waste Dust	Portland Cement (Type I)
CaO	-	81.36	67.41
Al_2O_3	-	0.96	3.64
SiO_2	41.03	1.68	15.71
Fe_2O_3	54.17	0.48	3.25
Cr_2O_3	1.55	-	-
TiO_2	3.25	-	-
MgO , MnO_2 , SO_3 , K_2O	-	15.52	9.99

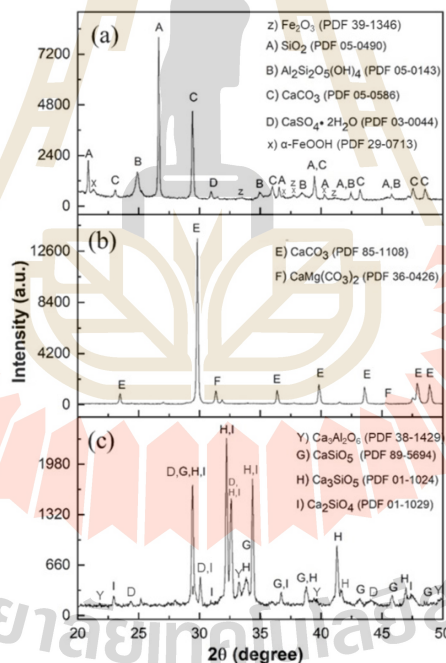


Figure 2. XRD pattern of (a) natural lateritic soil, (b) asphalt waste dust and (c) the ordinary Portland cement (Type I) used in this work.

The average particle size of asphalt waste dust was about 9.86 μm , which was consistent with the result of the sieving method. The plastic index of the asphalt waste dust cannot be determined since asphalt waste dust itself cannot be molded to evaluate the plastic limit. This ensures a non-plastic character and low water-holding capacity of asphalt waste dust. Asphalt waste dust included more than 80% CaO as its major component (Table 4). Highly detected CaO was associated with the existence of calcium carbonate (CaCO_3) as the major composition, and the mineral dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) as a minor detected composition (Figure 2b). These chemical and mineral compositions also confirmed it to be an environmentally friendly material for recycling asphalt waste dust in many applications. Moreover, the XRD analysis of the asphalt waste dust revealed the highest reflection peak at 2θ degrees around 28.5° , which corresponded to the (104) crystal plane. This reflection plane represented a rhombohedral calcite structure of CaCO_3 , which is the thermodynamically most stable form of CaCO_3 at room temperature [18]. The morphological image in Figure 3 shows that the asphalt waste dust particles have a variable size distribution and an angular shape. However, the particle size was rather small, approximately below 10 μm , which was consistent with the findings of the laser particle size analysis.

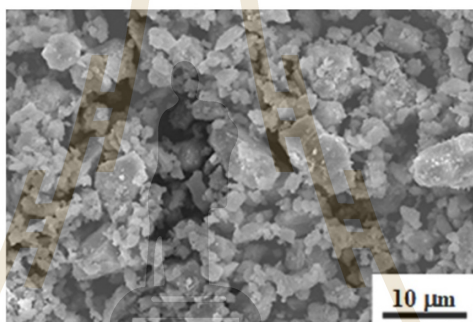


Figure 3. Scanning electron microscopy (SEM) micrograph of as-received asphalt waste dust.

From Table 4, Portland cement is composed of 67.4 wt% CaO, 3.6 wt% Al_2O_3 , 15.7 wt% SiO_2 , 3.2 wt% Fe_2O_3 , and 10 wt% of other trace oxides, including MgO, MnO_2 , SO_3 , and K_2O . The XRD patterns in Figure 2c reveals high CaO in the major-mineral forms of Dicalcium silicate (Ca_2SiO_4 or C_2S), Tricalcium silicate (Ca_3SiO_5 or C_3S), Tricalcium aluminate ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ or C_3A), Calcium silicate oxide (CaSiO_3), and Calcium sulfate or gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) in Portland cement. These all components are well-known precursors of hydration reactions in the hydrated cement powder.

4.2. Compaction and Strength Characteristics

The compaction curve of the testing samples is shown in Figure 4. The compaction curves were determined three times repeatedly using a compaction test on the randomized LS, AD, 90LS-10AD, 80LS-20AD, 70LS-30AD, 90LS-10AD-5C, 80LS-20AD-5C, and 70LS-30AD-5C samples. The maximum dry density and the optimal water content of those samples exhibited a bell-shaped trend, in which the peak presented the maximum dry density at the optimal water content. From Figure 4, the highest average maximum dry density (2270 kg/m^3) was observed in the pure lateritic soil or LS sample, whereas the lowest maximum dry density (1190 kg/m^3) was obtained in the pure asphalt waste dust or AD sample. This is because the AD particle is both finer and lighter (high volume) than the LS particles. This is confirmed by some earlier studies [27,28] and the average particle size from the laser particle size analysis, as shown in Figure 5. Due to a poor water holding capacity, extra water needs to be absorbed into the spaces between the adjacent AD fine

particles. As a result, the dry density cannot be as high as that of the LS particles. Moreover, the average maximum dry density of lateritic soil gradually decreased from 2270 kg/m^3 to 1360 kg/m^3 when the asphalt waste dust was replaced increasingly at the ratio of 10 wt%, 20 wt%, and 30 wt% in the LS samples. This also shows the descendent effect of asphalt waste dust on the reduction of maximum dry density.

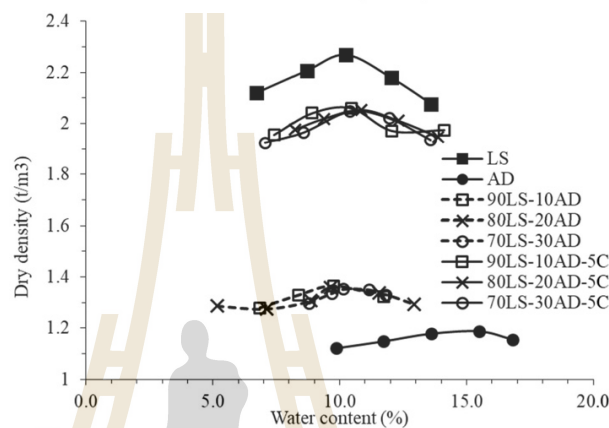


Figure 4. Compaction curve of the testing samples.

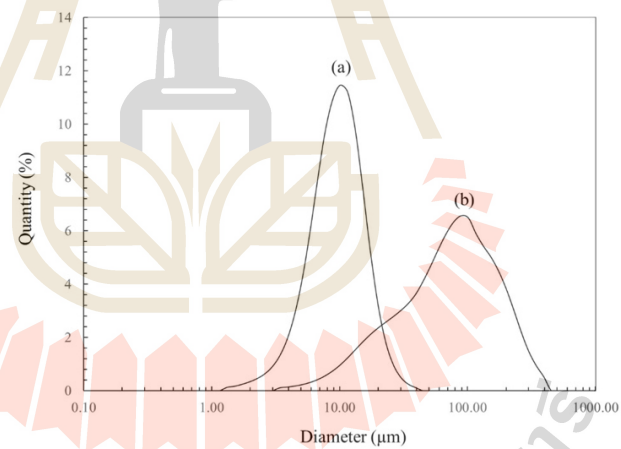


Figure 5. Particle size distribution curves of (a) asphalt waste dust and (b) lateritic soil.

A more uniform distribution of finer AD particles in contrast to LS particles can be observed in the particle size distribution studied by the Laser particle diffraction technique in Figure 5. These characteristics easily provided dense packing without swelling, which results in a decrease in dry density [27,28]. On the contrary, a variety of large particle sizes in mixed-lateritic soil affected the maximum void ratio in the compacted samples [29]. This result confirmed that an increment of asphalt waste dust decreased the weight per unit volume and dry density of the LS samples, as seen in Figure 4. The average maximum

dry density values of 90LS-10AD-5C, 80LS-20AD-5C, and 70LS-30AD-5C increased from 1360 kg/m^3 to 2060 kg/m^3 , 2070 kg/m^3 , and 2050 kg/m^3 , respectively, when 5 wt% Portland cement was added to those lateritic soil-mixed samples. The maximum dry density of the 90LS-10AD-5C, 80LS-20AD-5C, and 70LS-30AD-5C samples were, however, still less than that of the original lateritic soil. This can be attributed to a slightly higher unit volume of cement mixtures than the original LS. Thus, a lower total weight per unit volume was obtained in these mixed samples, similar to the earlier report by Mohanty et al. (2017) [14].

According to Figure 4, lateritic soil and asphalt waste dust have an average optimal water content of 10.22% and 15.00%, respectively. The replacement lateritic soil samples with asphalt waste dust showed comparable optimal water content to that of original lateritic soil, which was not much different among them (90LS-10AD = 10.50%, 80LS-20AD = 10.70%, 70LS-30AD = 10.90%, 90LS-10AD-5C = 10.20%, 80LS-20AD-5C = 10.90%, and 70LS-30AD-5C = 10.80%). The relatively high optimal water content of the asphalt waste dust sample was due to a higher surface area of fine particles (average size $\sim 9.86 \mu\text{m}$) that required high water absorption. In addition, higher optimal water content was also associated with a lower maximum dry density in the asphalt waste dust sample, as reported by Pongsivasathit et al. (2019) [30].

In Figure 6, the California bearing ratio, or CBR, along with the swelling index value, show the strength characteristics of all tested of the samples. The randomized soil samples were subjected to experimental testing three times each. The CBR values of the original lateritic soil and asphalt waste dust under the soaked conditions were 14 and 79%, respectively. A higher CBR was found in the samples of asphalt waste dust compared to lateritic soil because the asphalt waste dust particles were smaller. The Thailand Department of Highways' standard specifications for pavement materials (Table 3) show that the CBR value of asphalt waste dust is high enough to be used as a subbase course material in road construction. Moreover, the low CBR of the lateritic soil sample was related to the high water adsorption and high plasticity of lateritic soil under the soaked conditions, leading to a high shrinkage under the dry condition and high swelling under the wet condition [1,31].

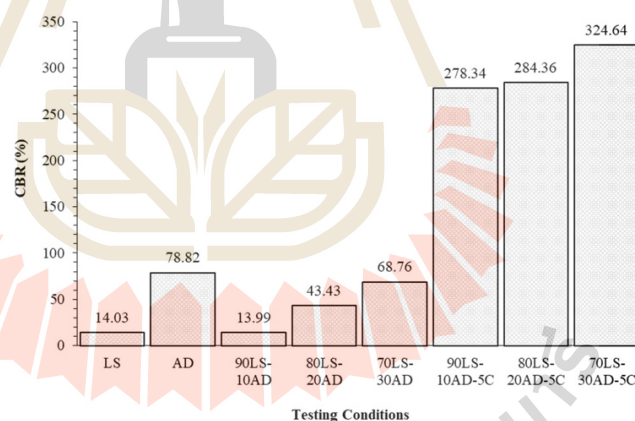


Figure 6. CBR under soaked condition.

According to Figure 6, the CBR of 90LS-10AD, 80LS-20AD, and 70LS-30AD samples without cement addition were 14%, 43%, and 69%, respectively. There was no remarkable improvement with a 10 wt% addition of asphalt waste dust to the lateritic soil. By further increasing the asphalt waste dust from more than 10 wt% to 30 wt%, the CBR values were enhanced over the standard requirement of the subbase course material ($\geq 25\%$).

However, the obtained CBR values were in the range between those of pure lateritic soil and asphalt waste dust samples. This is probably because the fine asphalt waste dust and the lateritic soil particles were rearranged, increasing the stability and compactness of the mixed samples.

Those lateritic soil-mixed asphalt waste dust samples with 5 wt% cement added significantly 10-times increased the CBR to 278%, 284%, and 325% for 90LS-10AD-5C, 80LS-20AD-5C, and 70LS-30AD-5C samples, respectively (Figure 6). With only 5 wt% cement addition, the CBR of the lateritic soil-mixed asphalt waste dust samples was evidently improved through a hydration reaction between the Portland cement and water in the soil-mixed asphalt waste dust samples [32]. The products from this reaction were calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium aluminate hydrate (C-A-H) compounds, which acted as the “glue” between the adjacent soil and fine asphalt waste dust particles. C-S-H and C-A-H glues provided more compaction and reduced water permeability and soil swelling, resulting in an increase in strength. The fine asphalt waste dust also serves as a filler between the lateritic soil and Portland cement mixed particles at the same time. As a result, the lateritic soil mixes were compacted more tightly and minimized void or porosity in the compacted samples [18].

The CBR $\geq 25\%$ of the lateritic soil mixes under the soaked conditions is required for use as a subbase course material according to the standard specifications of the Thailand Department of Highways. The CBR of lateritic soil and lateritic soil with 10% asphalt waste dust from this research were below the minimum criteria and were not appropriate for use as a subbase course material. As a result, the asphalt waste dust > 10 wt% was suggested in a replacement of lateritic soil samples in this work. According to Figure 6, the CBR of the 80LS-20AD sample (43.43%) and the 70LS-30AD sample (CBR 69%) were above the standard value, indicating that a minimum amount of 20 wt% of asphalt waste dust is required in lateritic soil mixtures to be suitable as a subbase course material.

The addition of small cement content further improved the CBR value. The extremely high CBR values from 278% to 325% were achieved in the 90LS-10AD-5C, 80LS-20AD-5C, and 70LS-30AD-5C samples. Without using the asphalt waste dust and other additive materials, several earlier works have reported a CBR below 200% for natural soil stabilized by Portland cement [9,11,12]. Therefore, the CBR values of 90LS-10AD-5C, 80LS-20AD-5C, and 70LS-30AD-5C samples in this work were much higher than those references. This indicated a capability of asphalt waste dust in lateritic soil stabilization with a small cement content.

The properties of all of the tested soil samples are summarized and presented in Table 5. In addition to the CBR value, the swelling index is also important to consider the suitable subbase course material when the road undergoes both dry conditions and wet conditions. According to Table 5, the swelling indexes of the lateritic soil samples, both with and without asphalt waste dust and cement, were in the range of 0.25–1.21%. All the swelling index obtained from the tested samples was all within acceptable limits for a subbase course material in accordance with the standard specifications of the Thailand Department of Highways (swelling index $\leq 4\%$), even though the values were somewhat variable with the asphalt waste dust content due to the high water absorption of fine dust.

Table 5 also shows the comparison of the liquid limit and plasticity index values of the testing samples. According to the Department of Highways' specification of subbase course material, the minimum requirements of liquid limit and plasticity index are $\leq 35\%$ and $\leq 11\%$, respectively. Only the liquid limit and plasticity index values of pure asphalt waste dust cannot be evaluated because of the non-plastic behavior of the waste dust. Meanwhile, all of the stabilized lateritic soil samples showed very acceptable liquid limit values (31–33%) under the minimum standard requirement.

Table 5. The properties for all conditions.

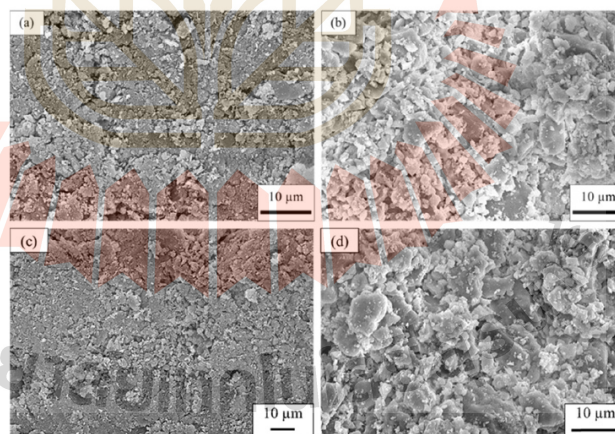
Properties	LS	AD	90LS-10AD	80LS-20AD	Testing Conditions			
					70LS-30AD	90LS-10AD-5C	80LS-20AD-5C	70LS-30AD-5C
Maximum dry density ($\times 10^3$ kg/m ³)	2.27	1.19	1.36	1.36	1.36	2.06	2.07	2.05
Optimal water content (%)	10.22	15.00	10.50	10.70	10.90	10.20	10.90	10.80
CBR (%)	14	79	14	43	69	278	284	325
Swell (%)	0.64	0.25	0.32	1.21	1.14	0.09	1.03	1.20
Liquid limit (%)	32.58	NP	31.25	33.09	31.21	34.20	32.74	32.14
Plastic limit (%)	16.54	NP	17.79	18.67	18.80	22.9	22.41	21.39
Plasticity index (%)	16.07	NP	13.46	14.41	12.40	11.30	10.33	10.75

On the contrary, the plasticity index values of lateritic soil samples, both with and without asphalt waste dust, were relatively higher than the accepted standard values. This contributed to the high plasticity of the original lateritic soil, although the non-plastic asphalt waste dust was partially replaced in the soil samples. However, the plasticity index values of the soil samples with increased asphalt waste dust can be further improved to find the standard requirement by cement addition (≤ 11 for Subbase course of DOH, 1989a). This was likely because the plasticity of lateritic soil was diminished by the hardening effect between cement and water [33]. Hence, the accepted plasticity index values of 11.30%, 10.33%, and 10.75% were obtained for the 90LS-10AD-5C, 80LS-20AD-5C, and 70LS-30AD-5C samples, respectively. The above findings suggested that the physical and mechanical properties of lateritic soil replaced with asphalt waste dust containing small amounts of cement could meet standard criteria for use as a subbase course material in road construction.

4.3. Microstructures and Relevant Phases of Compacted Samples

4.3.1. Microstructures of the Lateritic Soil and Asphalt Waste Dust Samples

The microstructures of the soaked lateritic soil and asphalt waste dust samples after the CBR test are shown in Figure 7. A loose-packed surface was observed for the pure lateritic soil sample (Figure 7a,c) compared to a denser compacted surface of the pure asphalt waste dust sample (Figure 7b,d). This was attributed to the large particle size and non-uniform distribution of soil particles, as previously shown in Figure 5. However, the compacted asphalt waste dust sample was still brittle compared to the other mixed samples, indicating that a non-plastic material such as asphalt waste dust could be utilized in certain strengthening projects.

**Figure 7.** Microstructures of the soaked lateritic soil (a,c) and asphalt waste dust samples (b,d) after CBR test.

The microstructures of the soaked lateritic soil-mixed asphalt waste dust samples after the CBR test are shown in Figure 8. The surface of the 90LS-10AD sample was found to be better compacted with 10 wt% asphalt waste dust (Figure 8a,b). This was influenced by the filling effect of fine asphalt waste dust in compacted soil particles. However, 10 wt% asphalt waste dust was not enough to improve the strength of the lateritic soil, and therefore the CBR values and the overall microstructure of the 90LS-10AD samples were almost the same as the compacted pure lateritic soil samples (Figure 7a,c). When increasing the asphalt waste dust to 20 wt% in the lateritic soil mixes, the microstructure of the compacted 80LS-20AD samples resembled that of the compacted non-plastic materials. The small crevasses were observed in between the clusters of compacted particles (Figure 8c,d).

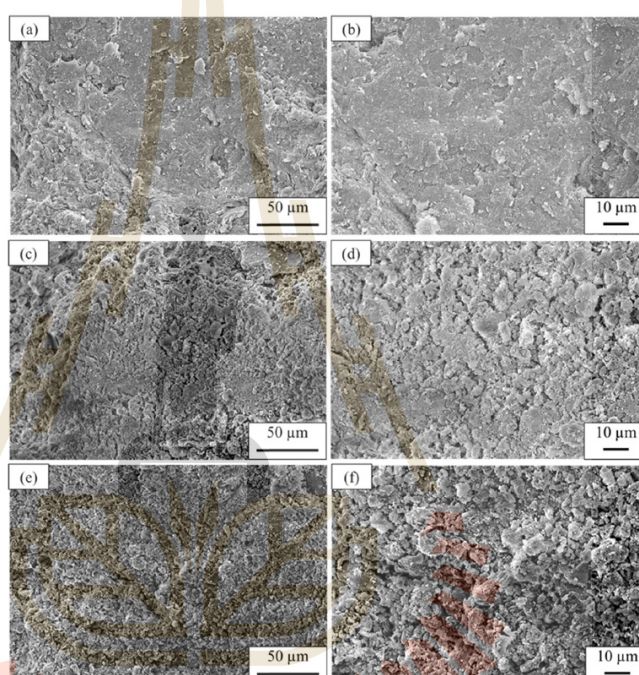


Figure 8. Microstructures of the soaked lateritic soil-mixed asphalt waste dust samples after CBR test: (a,b) 90LS-10AD (c,d) 80LS-20AD, and (e,f) 70LS-30AD samples.

However, the 20 wt% of fine asphalt waste dust better improved the strength of lateritic soil than that of the 10 wt% asphalt waste dust. The CBR of the 80LS-20AD samples was thus higher than that of the 90LS-10AD samples. With 30 wt% of asphalt waste dust (Figure 8e,f), the microstructure of the compacted 70LS-30AD samples looks very similar to the singly compacted asphalt waste dust samples. The CBR values, which were comparable between those two samples, agreed with this. However, compared to the 90LS-10AD and 80LS-20AD samples, the CBR of the compacted 70LS-30AD sample was higher. This finding confirmed that a 30 wt% replacing amount of asphalt waste dust in the lateritic soil can improve the physical and mechanical properties over those of the original lateritic soil.

4.3.2. Microstructures of the Lateritic Soil-Mixed Asphalt Waste Dust and Portland Cement

Figure 9 shows the microstructures of the soaked lateritic soil-mixed asphalt waste dust with the addition of 5 wt% Portland cement. With the presence of a small amount of cement, the lateritic soil-mixed asphalt waste dust samples were much more compacted than the other samples with none of the cement. Especially in the sample with higher asphalt waste dust, the compactness was much more developed with the addition of cement powder. As seen in Figure 9e,f, a very dense surfaces without porosity and air voids were achieved in the 70LS-30AD-5C samples compared to the other samples in Figure 9a–d. According to Table 5, the plasticity index values of the lateritic soil samples with increasing asphalt waste dust were improved by the cement addition (≤ 11 for the subbase course of DOH [19]). This was attributed to the development of stiffness in those lateritic soil samples due to the reaction between cement and water, and thus deteriorated soil plasticity [33]. The filler-like properties of fine asphalt waste dust also promoted the compacted area for the complete hydration process and increased the cohesiveness and uniformity of the lateritic soil samples. Fine asphalt waste dust could physically disperse cement particles, thus freeing more water to react with cement powder [18]. Moreover, the fine asphalt waste dust was able to fill the air voids and reduced the inter-particle fraction of compacted soil to increase the soil strength. As shown in Figure 6, the CBR values of the 70LS-30AD-5C sample were much highly improved, and a very high compact microstructure was achieved, as demonstrated in Figure 9e,f. It was implied that the presence of fine asphalt waste dust with a small amount of cement could simultaneously promote particle packing and hardening effect between the lateritic soil and cement in the 70LS-30AD-5C samples.

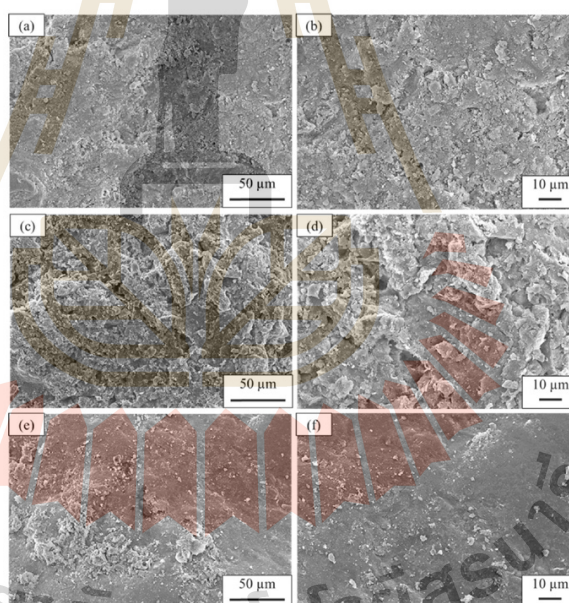


Figure 9. Microstructures of the soaked lateritic soil-mixed asphalt waste dust containing Portland cement samples after CBR test: (a,b) 90LS-10AD-5C (c,d) 80LS-20AD-5C, and (e,f) 70LS-30AD-5C samples.

4.3.3. Relevant Phases of Compacted Lateritic Soil-Mixed Asphalt Waste Dust and Portland Cement

Figure 10 shows the XRD patterns of 70LS-30AD-5C and 70LS-30AD samples in comparison to the pure asphalt waste dust and lateritic soil samples after the CBR test. According to Figure 10a, the broad 2θ range between 20° to 50° is presented the difference in mineral phases in the compacted 70LS-30AD-5C and 70LS-30AD samples compared with the pure lateritic soil and pure asphalt waste dust samples after the CBR test. Generally, the parent phases in both original lateritic soil and the asphalt waste dust were observed in both the 70LS-30AD-5C and 70LS-30AD samples, as seen in the reflection peaks in Figure 10(a1,a2), respectively. From Figure 10a, the narrow 2θ range between 24° to 31° was focused on three main peaks; $2\theta \sim 24.8^\circ$ of kaolinite (K), $2\theta \sim 26.6^\circ$ of SiO_2 or Quartz (Q), and $2\theta \sim 28.5^\circ$ – 29.5° of calcite or CaCO_3 (C1 and C2 peaks) in the original lateritic soil compared with asphalt waste dust and presented in Figure 10b. The CaCO_3 phase was reduced in the soaked 70LS-30AD-5C samples compared to the 70LS-30AD samples (Figure 10b1). This was attributed to the filler effect of fine asphalt waste dust containing CaCO_3 that promoted the hydration of the Tricalcium silicate (C_3S) major phase in cement [34]. Furthermore, very fine CaCO_3 particles reacted with the Tricalcium aluminate (C_3A) minor phase in cement to form a Carboaluminate. This phase partially took part in the Ettringite of cement hydration products and increased the early strength of the cement mixed samples [18]. Therefore, compared to the 70LS-30AD samples, the CBR values of the 70LS-30AD-5C samples were much greater.

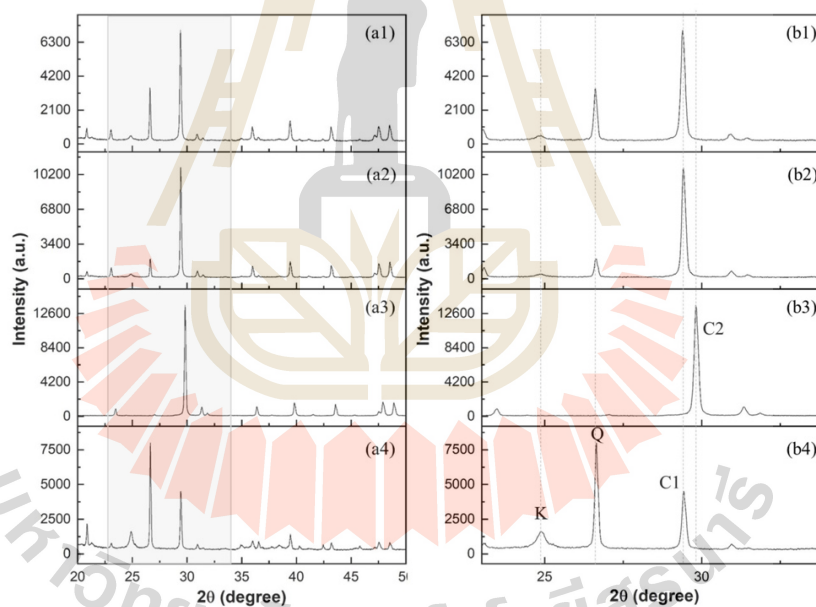


Figure 10. XRD pattern of (a1,b1) 70LS-30AD-5C and (a2,b2) 70LS-30AD samples in comparison to (a3,b3) asphalt waste dust and (a4,b4) lateritic soil samples after CBR test: (a) the broad 2θ range = 20° – 50° and (b) the narrow 2θ range = 24° – 31° (K = kaolinite (PDF 05-0143), Q = Quartz (PDF 05-0490), C1 = Calcite (PDF 05-0586), and C2 = Calcite (PDF 85-1108)).

To confirm the above finding, the amount of the CaCO_3 or calcite phase in both the 70LS-30AD-5C and 70LS-30AD samples was evaluated by Equation (3), based on the theory reported earlier by Ebadzadeh and Ghasemi (2002) [35] and Imane et al. (2020) [36]. I_C and I_Q are, respectively, the peak intensities of calcite at $2\theta = 28.5^\circ$ and quartz at $2\theta = 26.6^\circ$ that are used to estimate the calcite phase in the soaked 70LS-30AD-5C and the 70LS-30AD samples. Using Equation (3) and peak intensities from Figure 10(b1,b2), the calcite crystalline phase in the soaked 70LS-30AD was calculated to be 86.06%; meanwhile, the calcite crystalline phase in the soaked 70LS-30AD-5C was reduced to 67.36%. This confirmed that the CaCO_3 from the asphalt waste dust partially reacted with the chemical components in cement powder during the hydration reaction and finally increased the strength of the mixed lateritic soil samples.

$$\text{Calcite crystalline phase} = I_C / (I_C + I_Q) \times 100 \quad (3)$$

5. Conclusions and Recommendations

This study proposes asphalt waste dust as a sustainable material to improve the strength of low-quality lateritic soil used as a subbase course material for road construction. Based on the results, the following conclusions and recommendations can be made:

- The asphalt waste dust itself can be used as a subbase course material in road structure according to the standard specifications of pavement materials from the Thailand Department of Highways.
- The minimum 20 wt% asphalt waste dust was suggested for a sufficiently high California bearing ratio and optimized plastic index, liquid limit, and swelling index of stabilized lateritic soil above the standard requirement of subbase course materials.
- The fine particles of asphalt waste dust show filler-like properties to reduce the voids and generate a very dense surface without porosity in the strengthening lateritic soil.
- A partial reaction of the CaCO_3 phase in asphalt waste dust with the chemical components in cement reduced the calcite phase in the stabilized-soil samples containing asphalt waste dust, resulting in highly developed CBR in the stabilized-soil samples above the standard of the subbase course to achieve the base course material requirements.
- The stabilized soil samples containing asphalt waste dust and a small amount of cement dust were recommended to further use as the base course material instead of natural crush rock.

Finally, this research demonstrated that the recycling-asphalt waste dust from asphalt concrete manufacturing is a novel additive filler with highly effective performance to improve low-quality lateritic soil for construction purposes as an effectively sustainable subbase course and base course materials for further generation in road construction purposes.

Author Contributions: Conceptualization, S.C. and J.A.; methodology and experiments, S.C. and P.S.; data analysis, S.C. and J.A.; data curation, S.C. and J.A.; writing—original draft preparation, S.C.; writing—review and editing, S.C. and J.A.; supervision, S.C.; project administration, S.C.; funding acquisition, J.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was financially supported by Suranaree University of Technology (SUT) Research and Development Fund.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Acknowledgments: The work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) Research and Development Fund, and Thailand Science Research and Innovation (TSRI). The King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is also highly appreciated.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Ogbuagu, F.U.; Okeke, C.A.U. Geotechnical properties of lateritic soil from Nimo and Nteje areas of Anambra State, South-eastern Nigeria. In Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Infrastructural Development, Ota, Nigeria, 24–28 June 2019.
- Chaiyaput, S.; Ayawanna, J. Stabilization of lateritic soil by ladle furnace slag for pavement subbase material. *Geomech. Eng.* **2021**, *26*, 323–331. [[CrossRef](#)]
- Lemougna, P.N.; Melo, U.F.C.; Kameu, E.; Tchamba, A.B. Laterite Based Stabilized Products for Sustainable Building Applications in Tropical Countries: Review and Prospects for the Case of Cameroon. *Sustainability* **2011**, *3*, 293–305. [[CrossRef](#)]
- Chaiyaput, S.; Bergado, D.T.; Ayawanna, J. Effect of polymer and Portland cement on strengthen crushed rock for pavement base. *J. Lowl. Technol. Int.* **2019**, *21*, 134–142.
- Chaiyaput, S.; Manandhar, S.; Karki, S.; Ayawanna, J. Characteristics of cement treated soil: A case study from soft Bangkok clay and red soil of Nepal. *J. Lowl. Technol. Int.* **2020**, *22*, 178–191. [[CrossRef](#)]
- Horpibulsuk, S.; Sirilerdwatna, W.; Rachan, R.; Katkan, W. Analysis of strength development in pavement stabilization: A field investigation. In Proceedings of the 16th Southeast Asian Geotechnical Conference, Subang Jaya, Malaysia, 8–11 May 2007; pp. 579–583.
- Sunitsakul, J.; Sawatparnich, A. Statistical model to predict unconfined compressive strength of soil–cement materials. In Proceedings of the 13th National Convention on Civil Engineering, Pattaya, Thailand, 14–16 May 2008.
- Jaritngam, S.; Prachasaree, W.; Somchainuek, O.; Taneerananon, P. An investigation of lateritic soil cement for sustainable pavements. *Indian J. Sci. Technol.* **2012**, *5*, 3603–3606. [[CrossRef](#)]
- Promptthangkoon, P.; Kanchanachetance, B. Compound soil-tyre chips modified by cement as a road construction material. *Songklanakarinn J. Sci. Technol.* **2013**, *35*, 579–587.
- Marathe, S.; Kumar, A.; Avinash. Stabilization of lateritic soil subgrade using cement, coconut coir and aggregates. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.* **2015**, *4*, 11907–11914. [[CrossRef](#)]
- Afolayan, O.D. Evaluation of the effect of lime and cement on the engineering properties of selected soil in a university in Southwestern Nigeria. *J. Adv. Eng. Technol.* **2017**, *5*. [[CrossRef](#)]
- Komolafe, O.O.; Osinubi, K.J. Stabilization of lateritic soil with cement—Oil palm empty fruit bunch ash blend for California bearing ratio base course requirement. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2019**, *640*, 012085. [[CrossRef](#)]
- Oyediran, I.A.; Kalejaiye, M. Effect of increasing cement content on strength and compaction parameters of some lateritic soils from Southwestern Nigeria. *Electron. J. Geotech. Eng.* **2011**, *16*, 1501–1514.
- Mohanty, S.K.; Pradhan, P.K.; Mohanty, C.R. Stabilization of expansive soil using industrial wastes. *Geomech. Eng.* **2017**, *12*, 111–125. [[CrossRef](#)]
- Amadi, A. Evaluation of changes in index properties of lateritic soil stabilized with fly ash. *Leonardo Electron. J. Pract. Technol.* **2010**, *9*, 69–78.
- Mahajan, S.M.; Parbat, D.K. Effects of fly ash on engineering properties of BC soil. *Int. J. Sci. Eng. Res.* **2015**, *1*, 7–12.
- Gudissa, W.; Dinku, A. The use of limestone powder as an alternative cement replacement material: An experimental study. *Zede J.* **2010**, *27*, 23–43.
- Ali, M.; Abdullah, M.S.; Saad, S.A. Effect of Calcium Carbonate Replacement on Workability and Mechanical Strength of Portland Cement Concrete. *Adv. Mater. Res.* **2015**, *1115*, 137–141. [[CrossRef](#)]
- Department of Highways (DOH), Standard no. DH-S 205/2532. 1989. Available online: <http://www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs205-32.pdf> (accessed on 12 February 2021).
- Ruedeeroj, S.; Duangdeun, P. Effect of gradation and fine particles in soil mass on engineering properties of lateritic soil mixed with fly ash. In Proceedings of the 10th National Convention on Civil Engineering, Engineering Institute of Thailand, Pattaya, Thailand, 2–4 May 2005.
- AASHTO T 180; Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop. American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC, USA, 2017.
- AASHTO T 193; Standard Method of Test for the California Bearing Ratio. American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC, USA, 2017.
- Department of Highways (DOH), Standard No. DH-S 201/2544. 2001. Available online: <http://www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs201-44.pdf> (accessed on 12 February 2021).
- Department of Highways (DOH), Standard No. DH-S 208/2532. 1989. Available online: <http://www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs208-32.pdf> (accessed on 12 February 2021).
- Department of Highways (DOH), Standard No. DH-S 209/2532. 1989. Available online: <http://www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs209-32.pdf> (accessed on 12 February 2021).
- Department of Highways (DOH), Standard No. DH-S 102/2532. 1989. Available online: <http://www.doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs102-32.pdf> (accessed on 12 February 2021).
- Das, B.M. *Fundamental of Geotechnical Engineering*; Thomson Learning: Belmont, CA, USA, 2000.
- Marco, P.; Andrea, B.; Emiliano, P.; Marta, S.; Vanesa, O.-L. Performance-based characterization of bituminous mortars prepared with ladle furnace steel slag. *Sustainability* **2020**, *12*, 1777. [[CrossRef](#)]

29. Chaney, R.; Demars, K.; Lade, P.; Liggi, C.; Yamamuro, J. Effects of Non-Plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of Sand. *Geotech. Test. J.* **1998**, *21*, 336–347. [[CrossRef](#)]
30. Pongsivasathit, S.; Horpibulsuk, S.; Piyaphipat, S. Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils. *Case Stud. Constr. Mater.* **2019**, *11*, e00301. [[CrossRef](#)]
31. Maignien, R. *Review of Research on Laterites*; United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization: Paris, France, 1966.
32. Parsons, R.L.; Milburn, J.P. Engineering Behavior of Stabilized Soils. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2003**, *1837*, 20–29. [[CrossRef](#)]
33. Firoozi, A.A.; Guney Olgun, C.; Firoozi, A.A.; Baghini, M.S. Fundamentals of soil stabilization. *Int. J. Geo-Eng.* **2017**, *8*, 26. [[CrossRef](#)]
34. Poudyal, L.; Adhikari, K.; Won, M. Mechanical and Durability Properties of Portland Limestone Cement (PLC) Incorporated with Nano Calcium Carbonate (CaCO_3). *Materials* **2021**, *14*, 905. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Ebadzadeh, T.; Ghasemi, E. Effect of TiO_2 addition on the stability of t-ZrO₂ in mullite-ZrO₂ composites prepared from various starting materials. *Ceram. Int.* **2002**, *28*, 447–450. [[CrossRef](#)]
36. Daou, I.; Lecomte-Nana, G.; Tessier-Doyen, N.; Peyratout, C.; Gonon, M.; Guinebretiere, R. Probing the Dehydroxylation of Kaolinite and Halloysite by In Situ High Temperature X-ray Diffraction. *Minerals* **2020**, *10*, 480. [[CrossRef](#)]



ภาคผนวก ข

ข้อกำหนดของมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

ข้อกำหนดมาตรฐานของระยะเวลาการก่อตัวและค่ากำลังรับแรงอัดที่เกี่ยวข้อง

วัสดุซีเมนต์ผสม (มอก. 80 – 2550)		
มาตรฐาน	รายละเอียด	เกณฑ์ที่กำหนด
ระยะเวลาการก่อตัวตอนต้น	ทดสอบแบบไวแคต (เล่ม 9)	ไม่น้อยกว่า 45 นาที
ค่ากำลังรับแรงอัด	ระยะเวลาบ่ม 3 วัน	ไม่น้อยกว่า 6.9 MPa
	ระยะเวลาบ่ม 7 วัน	ไม่น้อยกว่า 11.8 MPa
ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (มอก. 15)		
ระยะเวลาการก่อตัวตอนต้น	ทดสอบแบบไวแคต (เล่ม 9)	ไม่น้อยกว่า 45 นาที
ระยะเวลาการก่อตัวตอนปลาย		ไม่มากกว่า 375 นาที
ค่ากำลังรับแรงอัด	ระยะเวลาบ่ม 3 วัน	ไม่น้อยกว่า 12 MPa
	ระยะเวลาบ่ม 7 วัน	ไม่น้อยกว่า 19 MPa
	ระยะเวลาบ่ม 28 วัน	ไม่น้อยกว่า 28 MPa

คุณลักษณะทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150

คุณลักษณะ	เกณฑ์ข้อกำหนด				
	ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3	ประเภท 4	ประเภท 5
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ ไม่น้อยกว่า		6.0			
ไอออน (III) ออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ ไม่มากกว่า		6.0		6.5	
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ร้อยละ ไม่มากกว่า	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)					
4.1 เมื่อมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3$) ร้อยละ 8 หรือน้อยกว่า	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
4.2 เมื่อมีไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3$) มากกว่าร้อยละ 8	3.5		4.5		
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา ร้อยละ ไม่มากกว่า	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ร้อยละ ไม่มากกว่า	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO \cdot SiO_2$) ร้อยละ ไม่มากกว่า				35.0	
ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO \cdot SiO_2$) ร้อยละ ไม่มากกว่า				40.0	
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3$) ร้อยละ ไม่มากกว่า		8	15	7	5
เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์บวกสองเท่าของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต [$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + 2(3CaO \cdot Al_2O_3)$] หรือสารละลายของแข็งของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์บวกไดแคลเซียมเฟอร์ไรต์ ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + 2CaO \cdot Fe_2O_3$) แล้วแต่กรณี ร้อยละ ไม่มากกว่า					25

ประวัติผู้เขียน

นางสาวพิมพ์ชนก เสริฐสูงเนิน เกิดวันที่ 20 เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2540 ภูมิลำเนาอยู่ จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสุนารีวิทยา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2559 เมื่อปี พ.ศ. 2563 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเข้าศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาของทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุน OROG) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2563

