การหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่ ร่วมกับฝุ่นแอสฟัลท์ และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3%

Pavement Recycling with Asphalt Dust and 3% Hydraulic Cement

นัทธพงศ์ ธาตุมาศ[1], ศลิษา ไชยพุทธ[1*], จิรัชญา อายะวรรณา[2] และ ธนาดล คงสมบูรณ์[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

**Corresponding author; salisa.ch@kmitl.ac.th*

บทคัดย่อ

การหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้งานใหม่ นับเป็นวิธีหนึ่งของการปรับปรุงวัสดุทางด้านงานทาง ด้วยการนำวัสดุผิวทางเดิมที่ได้จากการขูดรื้อถนนในส่วนที่ชำรุดและนำกลับมาใช้งานใหม่ โดยทั่วไปจะมีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม เพื่อเพิ่มกำลังความแข็งแรงของวัสดุผิวทางเดิม นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตแอสฟัลท์คอนกรีต ยังก่อให้เกิดฝุ่นแอสฟัลท์ ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตที่ไม่มีมูลค่า และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำฝุ่นแอสฟัลท์มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ เพื่อเพิ่มกำลังความแข็งแรงและเพิ่มความยั่งยืนของการหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่ โดยกำหนดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% ของน้ำหนักแห้งของมวลรวม (%) ทดสอบภายใต้ 5 อัตราส่วนผสม ได้แก่ 1) ผิวทางเดิมผสมกับหินคลุก 2) ผิวทางเดิมผสมกับหินคลุกและปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% 3) ผิวทางเดิมผสมกับหินคลุก ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% และฝุ่นแอสฟัลท์ 10% 4) ผิวทางเดิมผสมกับหินคลุก ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% และฝุ่นแอสฟัลท์ 20% และ 5) ผิวทางเดิมผสมกับหินคลุก ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% และฝุ่นแอสฟัลท์ 30% ภายใต้ทดสอบการบดอัดดิน การทดสอบแรงอัดแกนเดียว และการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม จากผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างผิวทางเดิมผสมกับหินคลุก ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% และฝุ่นแอสฟัลท์ 10% และ 20% มีผลการทดสอบที่ดีกว่าตัวอย่างผิวทางเดิมผสมกับหินคลุก และตัวอย่างผิวทางเดิมผสมกับหินคลุกและปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% ทั้งในการทดสอบแรงอัดแกนเดียว และการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของฝุ่นแอสฟัลท์ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของการหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่ คือ 10% - 20% ของน้ำหนักแห้งของมวลรวม

คำสำคัญ: การขูดรื้อถนน, การปรับปรุงคุณภาพดิน, การหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่, ฝุ่นแอสฟัลท์, วัสดุผิวทางเดิม

Abstract

Pavement recycling is one method for improving road construction by reusing the existing pavement materials obtained from road resurfacing in damaged sections. Generally, cement is added as a binder to increase the strength of the recycled pavement materials. Additionally, the production process of asphalt concrete generates asphalt dust, which is an economically non-valuable byproduct and leads to additional disposal costs. This research explores the innovative approach of incorporating asphalt dust with cement to enhance the mechanical strength and promote the sustainability of pavement recycling. Additionally, asphalt dust, a waste product from the production of asphalt concrete, can be mixed with cement. This combination enhances the strength of recycled pavement materials and contributes to the sustainability of the recycling process. This research focuses on cement used in recycling existing pavement materials, aiming for a cement content of only 3% by the dry weight of the aggregate (%). The tests were conducted under 5 different conditions: 1) reclaimed asphalt pavement mixed with crushed rock, 2) reclaimed asphalt pavement mixed with crushed rock and 3% cement, 3) reclaimed asphalt pavement mixed with crushed rock, 3% cement and 10% asphalt dust, 4) reclaimed asphalt pavement mixed with crushed rock, 3% cement and 20% asphalt dust and 5) reclaimed asphalt pavement mixed with crushed rock, 3% cement and 30% asphalt dust. These samples were tested under compaction, unconfined compressive strength, and indirect tensile strength tests. The results showed that samples of reclaimed asphalt pavement mixed with crushed rock, 3% cement, 10% and 20% asphalt dust, performed better in both the unconfined compressive strength and indirect tensile strength tests compared

to the sample of reclaimed asphalt pavement mixed with crushed rock or reclaimed asphalt pavement mixed with crushed rock and 3% cement. Moreover, it was found that the optimal amount of asphalt dust for improving the quality of recycled pavement materials is between 10% and 20% by the dry weight of the aggregate.

Keywords: Road milling, Soil improvement, Pavement recycling, Asphalt dust, Reclaimed asphalt pavement

1. คำนำ

ประเทศไทยมีระบบคมนาคมขนส่งที่หลากหลาย ครอบคลุมทั้งการขนส่งทางบก ทางน้ำ และ ทางอากาศ โดยรูปแบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ การขนส่งทางบก ซึ่งใช้ถนนเป็นเส้นทางหลักในการเดินทางและขนส่งสินค้า อย่างไรก็ตามเมื่อถนนถูกใช้งานเป็นระยะเวลานานย่อมเกิดการเสื่อมสภาพและความเสียหาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการบรรทุกเกินมาตรฐานที่กฎหมายกำหนด ทำให้ต้องมีการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างพื้นทาง ซึ่งมีต้นทุนที่สูงและใช้ทรัพยากรมาก

หนึ่งในแนวทางที่นำมาใช้เพื่อลดปัญหานี้ คือ การหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นกระบวนการนำวัสดุจากผิวทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพ [1] ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ โดยกระบวนการนี้สามารถใช้วัสดุได้หลากหลายชนิด เช่น วัสดุผิวทางเดิม สารผสมเพิ่ม น้ำ หิน ทราย ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก เถ้าลอยจากอุตสาหกรรม [2] สอดคล้องกับปัจจุบันโรงงานผลิตแอสฟัลท์มีจำนวนมาก หนึ่งในขั้นตอนกระบวนการผลิตแอสฟัลท์คอนกรีตมักเกิดเถ้าลอยหรือฝุ่นส่วนเกินจากการเผาไหม้ ซึ่งถูกกักเก็บไว้ ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ และมักกลายเป็นของเสียที่ต้องกำจัด

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น การนำฝุ่นแอสฟัลท์ซึ่งเป็นเถ้าลอยจากกระบวนการผลิตแอสฟัลท์ มาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุผิวทางเดิม โดยใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์) ในอัตราส่วน 3% ของน้ำหนักมวลรวม (ผิวทางเก่าผสมหินคลุก) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงการหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมให้มีคุณภาพดีขึ้น ลดต้นทุนและการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และส่งเสริมแนวคิดด้านความยั่งยืนในงานวิศวกรรมโยธา

2. วัสดุและการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 ผิวทางเดิม (Reclaimed asphalt pavement: RAP)

วัสดุที่ได้จากการขูดพื้นผิวถนนที่เสียหายในจังหวัดสมุทรปราการ ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.27 และขนาดคละเป็นไปดังตารางที่ 1

2.1.2 หินคลุก (Crushed rock: CR)

หินคลุกสำหรับในใช้งานก่อสร้างทั่วไปซึ่งมีที่มาจากจังหวัดสระบุรี ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.68 และขนาดคละเป็นไปดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดคละของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชนิด

ขนาดตะแกรง	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ			
	ผิวทางเดิม (RAP)	หินคลุก (CR)	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC)	ฝุ่นแอสฟัลท์ (AWD)
2 นิ้ว	100	100	-	-
3/8 นิ้ว	62.02	53.33	-	-
No. 4	27.69	36.26	-	-
No. 10	9.56	16.56	-	-
No. 30	-	-	100	100
No. 40	2.73	4.97	-	-
No. 50	-	-	94.08	96.58
No. 100	-	-	93.16	94.08
No. 200	0.82	0.36	92.67	66.77
Pass No. 200	-	-	68.58	36.08

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ : ผิวทางเดิม, หินคลุก, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และฝุ่นแอสฟัลท์

2.1.3 ฝุ่นแอสฟัลต์ (Asphalt dust: AWD)

ฝุ่นแอสฟัลท์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตแอสฟัลต์ มีที่มาจากโรงงานผลิตแอสฟัลท์ในจังหวัดสมุทรปราการ ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.74

2.1.4 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement: HC)

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU (ปูนใช้งานทั่วไปสำหรับงานโครงสร้าง) หรือในบทความนี้เรียกว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก จาก SCG [3] ผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย (TIS 2594) [4] ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.05 มีองค์ประกอบทางเคมี เช่น MgO 1.15%, SO_3 3.1% ค่าการซึมผ่านอากาศ 3,360 cm^2/g และระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น 101 นาที

2.2 เงื่อนไขการทดสอบ

การศึกษานี้แบ่งเงื่อนไขการทดสอบออกเป็น 5 อัตราส่วนผสม ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2 ได้แก่

1) ผิวทางเดิมผสมกับหินคลุก (PA)
2) ผิวทางเดิมผสมกับหินคลุกและปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% (PA-HC3)
3) ผิวทางเดิมผสมกับหินคลุก ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% และฝุ่นแอสฟัลท์ 10% (PA-HC3-AWD10)
4) ผิวทางเดิมผสมกับหินคลุก ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% และฝุ่นแอสฟัลท์ 20% (PA-HC3-AWD20) และ
5) ผิวทางเดิมผสมกับหินคลุก ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% และฝุ่นแอสฟัลท์ 30% (PA-HC3-AWD30)

ตารางที่ 2 ขนาดคละของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบแต่ละชนิด

อัตราส่วนผสม	ร้อยละส่วนผสม วัสดุผิวทางเดิม (PA)		ร้อยละโดยน้ำหนักแห้งของ ผิวทางเดิม + หินคลุก	
	ผิวทางเดิม (RAP)	หินคลุก (CR)	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC)	ฝุ่นแอสฟัลท์ (AWD)
1. PA	70	30	0	0
2. PA-HC3	70	30	3	0
3. PA-HC3-AWD10	70	30	3	10
4. PA-HC3-AWD20	70	30	3	20
5. PA-HC3-AWD30	70	30	3	30

หมายเหตุ PA : วัสดุผิวทางเดิม (Pavement aggregates) คือ ผิวทางเดิมผสมหินคลุก

2.3 วิธีการดำเนินการศึกษาวิจัย

การศึกษาการหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่ ผสมกับฝุ่นแอสฟัลท์และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ 3% ของน้ำหนักแห้งของมวลรวมวัสดุผิวทางเดิมผสมหินคลุก เป็นการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุงานทางเพื่อหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่ โดยการใช้ฝุ่นแอสฟัลท์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเผาไหม้ในการผลิตแอสฟัลท์หรือยางมะตอยและไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ต่อ [5] การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบหาขนาดคละของเม็ดดิน (Grain size analysis) และการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test) จากนั้นออกแบบส่วนผสมเพื่อศึกษาหาปริมาณฝุ่นแอสฟัลท์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพของการหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่ ได้แก่ การทดสอบการบดอัดของดิน (Compaction test) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม จากนั้นทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength test: USC test) และการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect tension test: IDR test) เพื่อหากำลังการรับแรง ทั้งความต้านทานการรับแรงอัดและความต้านทานการรับแรงดึงของวัสดุต่อไป [6-10]

2.3.1 การทดสอบหาขนาดคละของเม็ดดิน (Grain size analysis)

มาตรฐานอ้างอิง ASTM D422 เพื่อหาขนาดคละของมวลรวม โดยการร่อนผ่านของแข็งที่ทราบน้ำหนักไปบนชุดตะแกรงทดสอบ ใช้ตะแกรงทดสอบขนาด 2 นิ้ว (50.00 mm), 3/8 นิ้ว (9.50 mm), No. 4 (4.75 mm), No. 10 (2.00 mm), No. 30 (0.60 mm), No. 40 (0.425 mm), No. 50 (0.30 mm), No. 100 (0.15 mm) และ No. 200 (0.075 mm) จากนั้นชั่งน้ำหนักของวัสดุที่ค้างบนตะแกรง คำนวณร้อยละที่ค้างและร้อยละที่ผ่านตะแกรงแต่ละชั้น

2.3.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test)

มาตรฐานอ้างอิง ASTM C188 เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ ใช้หลักการการแทนที่ที่วัสดุโดยการใส่วัสดุลงในขวดทดลองที่มีน้ำมันก๊าดบรรจุไว้ จากนั้นชั่งน้ำหนักของวัสดุที่ใส่และปริมาตรที่ถูกแทนที่ แล้วจึงคำนวณเป็นค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุแต่ละชนิด

2.3.3 การทดสอบการบดอัดของดิน (Compaction test)

มาตรฐานอ้างอิง ASTM D1557 เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม(OMC) ดำเนินการด้วยวิธี Modified Proctor test โมลขนาด 6 นิ้วค้อนหนัก 10 ปอนด์ บดอัด 56 ครั้งต่อชั้น เป็นจำนวน 5 ชั้น จากนั้นจึงคำนวณค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\rho_d = \gamma/(1+(w/100)) \quad (1)$$

$$w = [(w_1 - w_2)/(w_2 - w_c)]\, x\, 100 \quad (2)$$

โดยที่ ρ_d คือ ความหนาแน่นแห้ง (kg/m^3)
γ คือ ความหนาแน่นเปียก (kg/m^3)
w คือ ปริมาณความชื้น (%)
w_c คือ น้ำหนักของภาชนะ (kg)
w_1 คือ น้ำหนักของภาชนะและดินเปียก (kg)
w_2 คือ น้ำหนักของภาชนะและดินแห้ง (kg)

2.3.4 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength test: UCS test)

มาตรฐานอ้างอิง ASTM D2166 เพื่อหาค่าแรงเฉือนของดินแบบไม่มีแรงดันด้านข้างและไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) โดยการบดอัดส่วนผสมด้วยวิธี Modified Proctor test จากนั้นบ่มตัวอย่างด้วยพลาสติกเป็นระยะเวลา 7 วันและ 28 วันสำหรับการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก จากนั้นทดสอบกดตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบ บันทึกค่าของแรงที่ทุกๆการหดตัว 0.005 นิ้วของตัวอย่าง ค่าความต้านทานแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength test; q_u) สามารถคำนวณจากสมการที่ (3)

$$S_u = q_u/2 \quad (3)$$

โดยที่ S_u คือ ค่าแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (kg/m^2)
q_u คือ ค่าความต้านทานแรงอัดแกนเดียว (kg/m^2)

2.3.5 การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect tension test: ITD test)

มาตรฐานอ้างอิง ASTM C496 เพื่อหากำลังรับแรงดึงของตัวอย่างจากการทดสอบที่กระทำทางอ้อม โดยการบดอัดส่วนผสมด้วยวิธี Modified Proctor test จากนั้นบ่มตัวอย่างด้วยพลาสติกเป็นระยะเวลา 7 วันและ 28 วันสำหรับการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ทดสอบกดตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบโดยการวางตัวอย่างในลักษณะแนวนอน จากนั้นทดสอบกดตัวอย่างด้วยความเร็วคงที่ บันทึกค่าของแรงและระยะการหดตัวแล้วจึงคำนวณค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมจากสมการที่ (4)

$$T = 2P/\pi DL \quad (4)$$

โดยที่ T คือ กำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่าง (kg/m^2)
P คือ แรงกระทำสูงสุดต่อแท่งตัวอย่าง (kg)
D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแท่งตัวอย่าง (m)
L คือ ความยาวเฉลี่ยของแท่งตัวอย่าง (m)

3. ผลการศึกษา

3.1 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction test)

ผลการศึกษาการทดสอบการบดอัดดิน (Compaction test) ซึ่งดำเนินการด้วยวิธีการทดสอบแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor test) แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินจากการทดสอบการบดอัดดิน (Compaction test) มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ที่ 2.210 – 2.256 (x 10^3) kg/m^3 ซึ่งเงื่อนไขที่มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดคือเงื่อนไข PA โดยมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.256 (x 10^3) kg/m^3 ค่าปริมาณความชื้นเท่ากับ 4.09% ตามด้วยเงื่อนไข PA-HC3-AWD30 โดยมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.254 (x 10^3) kg/m^3 ค่าปริมาณความชื้นเท่ากับ 6.24% ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่าเงื่อนไขที่มีการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกนั้นมีค่าปริมาณความชื้นที่สูงกว่าเงื่อนไขที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก เนื่องจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกต้องอาศัยความชื้นในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) [11] ส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเงื่อนไขที่ไม่ได้มีการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

3.2 การทดสอบแรงอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength test: UCS test)

การทดสอบแรงอัดแกนเดียว ซึ่งดำเนินการทดสอบหลังจากการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 วันและ 28 วันด้วยพลาสติก

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับแต่ละอัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสม	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (x 10^3 kg/m^3)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%)
PA	2.256	4.09
PA-HC3	2.230	5.90
PA-HC3-AWD10	2.210	5.79
PA-HC3-AWD20	2.238	5.23
PA-HC3-AWD30	2.254	6.24

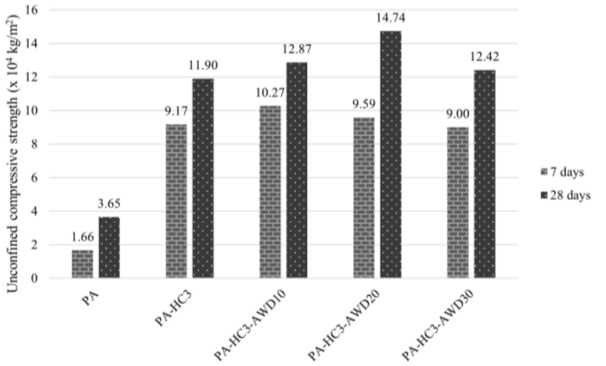
ก) การทดสอบแรงอัดแกนเดียว ข) การทดสอบแรงดึงทางอ้อม

รูปที่ 2 การทดสอบ: ก) การทดสอบแรงอัดแกนเดียว และ ข) การทดสอบแรงดึงทางอ้อม

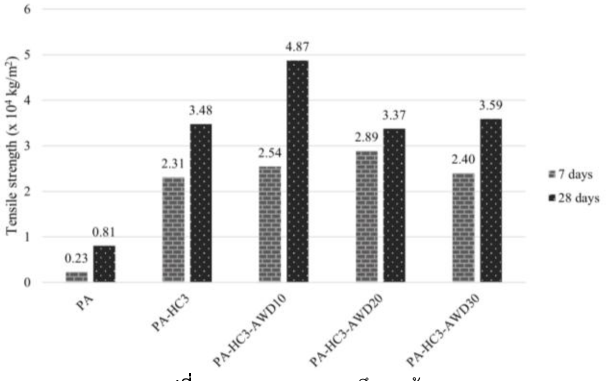
เมื่อครบกำหนดจึงแกะพลาสติกออกแล้วนำไปทดสอบ ผลการทดสอบเป็นไปดังรูปที่ 3 อัตราส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นส่วนประกอบจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และเงื่อนไขที่มีการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกร่วมกับฝุ่นแอสฟัลท์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น เพราะฝุ่นแอสฟัลท์เป็นอนุภาคที่ทำให้ช่องว่างภายในมวลรวมเล็กลง ส่งผลให้กำลังเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน เงื่อนไขที่มีกำลังการรับแรงอัดสูงที่สุดคือ PA-HC3-AD10 (10.27 x 10^4 kg/m^2) และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เงื่อนไขที่มีกำลังการรับแรงอัดสูงที่สุดคือ PA-HC3-AD20 (14.74 x 10^4 kg/m^2)

3.3 การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect tension test: ITD test)

การทดสอบแรงดึงทางอ้อม ซึ่งดำเนินการทดสอบหลังจากการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน ด้วยพลาสติก เมื่อครบกำหนดจึงแกะพลาสติกออกแล้วนำไปทดสอบ ผลการทดสอบเป็นไปดังรูปที่ 4 ความต้านทานในการรับแรงดึงของเงื่อนไขที่มีการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่ามากกว่าเงื่อนไขที่ไม่มีการปรับปรุง และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเกิดการพัฒนากำลังตามปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้อย่างเต็มที่ ซึ่งค่ากำลังการรับแรงของระยะการบ่ม 28 วันมีค่าสูงกว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน และความต้านทานการรับแรงดึงของวัสดุมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกร่วมกับการใช้ฝุ่นแอสฟัลท์ เนื่องจากฝุ่นแอสฟัลท์เป็นวัสดุที่เติมเต็มช่องว่างภายในมวลรวมให้มีขนาดช่องว่างเล็กลง ความแข็งแรงของวัสดุจึงเพิ่มสูงขึ้น [12]



รูปที่ 3 ผลการทดสอบแรงอัดแกนเดียว



รูปที่ 4 ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อม

พบว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน เงื่อนไขที่มีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงสุดคือ PA-HC3-AWD20 (2.89×10^4 kg/m^2) และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เงื่อนไขที่มีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงสุดคือ PA-HC3-AWD10 (4.87×10^4 kg/m^2)

จากรูปที่ 3 และ 4 แสดงให้เห็นว่าการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสำหรับการปรับปรุงนั้นส่งผลให้กำลังการรับแรงอัดและความต้านทานการรับแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นจากเงื่อนไขที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก เนื่องจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีส่วนในการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุโดยตรง รวมถึงการใส่ฝุ่นแอสฟัลท์ในปริมาณ 10% 20% และ 30% นั้นส่งผลให้กำลังของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน เพราะฝุ่นแอสฟัลท์ทำหน้าที่เป็นวัสดุสำหรับเติมเต็มและลดช่องว่างที่เกิดขึ้นในมวลรวมให้มีขนาดเล็กลง ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiratchaya และคณะ [5]

นอกจากนี้ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดและความต้านทานการรับแรงดึงของแต่ละเงื่อนไขมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดและความต้านทานการรับแรงดึงที่ระยะการบ่ม 7 วัน เนื่องจากที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถพัฒนากำลังได้สูงกว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hashmi และคณะ [13]

4. บทสรุป

จากการศึกษาการปรับปรุงวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่โดยใช้วัสดุผิวทางเดิม (RAP) 70% วัสดุหินคลุก (CR) 30% ปรับปรุงโดยการเติมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% และฝุ่นแอสฟัลท์ปริมาณแตกต่างกันคือ 10% 20% และ 30% ของน้ำหนักมวลรวมแห้งทั้งหมดนั้น สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3% ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการปรับปรุงการหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่มีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้งกำลังการรับแรงอัดและความสามารถในการรับแรงดึง
2. การปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกร่วมกับการใช้ฝุ่นแอสฟัลท์ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเพียงอย่างเดียว
3. ปริมาณของฝุ่นแอสฟัลท์ที่เหมาะสม สำหรับการปรับปรุงการหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่ คือ 10-20% โดยน้ำหนักแห้งของมวลรวม (ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 3%)
4. ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน ให้ค่าความสามารถในการรับแรงที่มากกว่าระยะเวลาการบ่ม 7 วัน เนื่องจากการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
5. จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานการหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่ หรือ สำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง

ทั้งนี้การศึกษาการหมุนเวียนวัสดุผิวทางเดิมมาใช้ใหม่โดยปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและฝุ่นแอสฟัลท์ ถือเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุที่สามารถนำของเสียจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่ ลดต้นทุนและการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และส่งเสริมความยั่งยืนในงานวิศวกรรมโยธา

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ทดสอบวัสดุงานทาง สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท สำหรับการสนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ได้แก่ วัสดุผิวทางเดิม หินคลุก และฝุ่นแอสฟัลท์ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

[1] Department of Rural Roads, DRR.242-2555, pavement in-place recycling (2012), https://research.drr.go.th/wp-content/uploads/2020/02/drr-2020-02-04_08-34-45_435227.pdf.

[2] Department of Highways, DH-S 213/2543, Pavement recycling (2000), https://doh.go.th/doh/images/aboutus/standard/01/dhs213-43.pdf

[3] SCG Home, SCG hybrid structural cement (2020), https://damproduction.scghome.com/%2Ffiles%2Fassets%2FProduct%20Application%20Media%2FBrochure%2FBrochure%2FMortar%2FCatalog%20Hibrid.pdf.

[4] Thai Industrial Standards Institute, TIS.2594-2567, Hydraulic Cement (2024), https://www.tisi.go.th/data/standard/pdf/TIS4_a2594_25xx.pdf.

[5] J. Ayawanna, T. Suksawat, P. Sertsoongnern, S. Chaiyaput, The use of asphalt dust for stabilization of sustainable pavement recycling, Construction and Building Materials 446 (2024), https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137939.

[6] ASTM International, ASTM D422-63, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (1998), https://www.astm.org/d0422-63r98.html.

[7] ASTM International, ASTM C188-17, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement (2017), https://www.astm.org/c0188-17.html.

[8] ASTM International, ASTM D1557-00, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (2017), https://www.astm.org/d1557-00.html.

[9] ASTM International, ASTM D2 1 6 6 -0 6 , Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (2010), https://store.astm.org/d2166-06.html.

[10] ASTM International, ASTM C496-96, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2017), https://store.astm.org/c0496-96.html

[11] CPAC Academy, Concrete Technology (2000), https://www.cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/e-contech%20u2.pdf

[12] S. Chaiyaput, P. Sertsoongnern, J. Ayawanna, Utilization of waste dust from asphalt concrete manufacturing as a sustainable subbase course material in the pavement structure, Sustainability 1 4 ,9 8 0 4 (2002) https://doi.org/10.3390/su14169804.

[13] A. Fuzail Hashmi, Optimization of fly ash concrete mix – a solution for sustainable development, Materials Today: Proceedings. Vol. 26, 3250-3256 (2020) https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.908.