การศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผาโดยวิธีมาร์แชลล์

A STUDY OF THE PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE MODIFIED WITH METAKAOLIN USING MARSHALL METHOD

ศุภมิตร นันทวัฒนานุกูล[1] สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์[2] ภีม เหนือคลอง[3] ลาภยศ ประสิทธิโศภิน[4] และ จินตหรา ลาวงศ์เกิด[5,*]

[1,2,3,5] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

[4] ภาควิชาถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: ljintara@engr.tu.ac.th*

บทคัดย่อ

แอสฟัลต์คอนกรีตเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างถนนและทางหลวง อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตอาจได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมและการรับน้ำหนักซ้ำ ๆ ซึ่งนำไปสู่ปัญหาการเปลี่ยนรูปถาวร (rutting) การแตกร้าวจากความล้า (fatigue cracking) และการเสื่อมสภาพของวัสดุ เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เสริมความแข็งแรงด้วยดินขาวเผา (Metakaolin, MK) ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีศักยภาพในการเพิ่มเสถียรภาพของแอสฟัลต์และลดการเสื่อมสภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต ในงานศึกษานี้ ดินขาวเผาถูกนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในปริมาณ 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC60/70) การประเมินผลการศึกษา ทดสอบประสิทธิภาพด้วยการทดสอบหาค่าเสถียรภาพและการไหลพบว่า การเติมดินขาวเผาช่วยเพิ่มค่าความเสถียร (Stability) ของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีค่าสูงสุดที่ 4% และเมื่อปริมาณดินขาวเผาเพิ่มขึ้นเกิน 4% ค่าความเสถียรเริ่มลดลง ในขณะที่ค่า การไหล (Flow) มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของดินขาวเผา ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ดินขาวเผาในปริมาณที่เหมาะสม สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีต ลดการเปลี่ยนรูปของวัสดุ และช่วยยืดอายุการใช้งานของถนน นอกจากนี้ การใช้วัสดุปอซโซลานยังช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนในระยะยาว ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในแนวทางการพัฒนาโครงสร้างพื้นทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยั่งยืน งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนานวัตกรรมวัสดุก่อสร้างสำหรับโครงสร้างพื้นทางที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: แอสฟัลต์คอนกรีต, ดินขาวเผา,วัสดุพอซโซลาน,เสถียรภาพของมาร์แชลล์, โครงสร้างพื้นทาง

Abstract

Asphalt concrete is the primary material for road construction but is affected by environmental conditions and repeated loading, leading to issues like rutting, fatigue cracking, and material degradation. This study examines the mechanical properties of asphalt concrete reinforced with Metakaolin (MK), a pozzolanic material that enhances asphalt stability and reduces deterioration. Metakaolin was added at 2%, 4%, 6%, 8%, and 10% by weight of AC60/70 asphalt cement. Marshall Stability and flow tests showed that stability peaked at 4% metakaolin before declining, while flow values decreased as metakaolin content increased, aligning with asphalt concrete standards. The findings suggest that optimal metakaolin content improves mechanical properties, reduces deformation, and extends pavement life. Additionally, pozzolanic materials help lower carbon emissions, supporting sustainable pavement development. This research offers an innovative approach to improving construction materials while minimizing environmental impact.

Keywords: Asphalt Concrete, Metakaolin, Pozzolanic Material, Marshall Stability, Road infrastructure

1. บทนำ

แอสฟัลต์คอนกรีตเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างทางหลวงและถนนทั่วโลก เนื่องจากสามารถรองรับแรงกดทับได้ดีและมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตาม วัสดุนี้มักได้รับผลกระทบจากภาระน้ำหนักซ้ำ ๆ และปัจจัยทางธรรมชาติ เช่น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ความชื้น และสารเคมี ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาการเปลี่ยนรูปถาวร (rutting) การแตกร้าวจากความล้า (fatigue cracking) และการเสื่อมสภาพของวัสดุจากอายุการใช้งาน (aging degradation) ส่งผลให้พื้นทางสูญเสียความสามารถในการรองรับแรงและเพิ่มต้นทุนในการบำรุงรักษา

เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว นักวิจัยได้พัฒนาแนวทางการปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมุ่งเน้นไปที่การใช้ วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) เป็นสารเติมเต็มเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเสถียรภาพของวัสดุ รวมถึงช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการลดการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่สำคัญในอุตสาหกรรมก่อสร้างทางหลวง วัสดุปอซโซลานเหล่านี้ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash), ตะกรันเตาหลอม (Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS), เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) และดินขาวเผา (Metakaolin หรือ Calcined Kaolin, MK) โดยในบรรดาวัสดุเหล่านี้ ดินขาวเผาได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจาก การเผาดินขาวที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดโครงสร้างที่มีซิลิกาและอะลูมินาในรูปแบบที่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบในซีเมนต์ได้ดี คุณสมบัตินี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและทนทานของวัสดุที่ผสมดินขาวเผาเข้าไป โดยได้มีการนำดินขาวเผามาใช้เพื่อศึกษาความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรงร่วมกับโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ เช่น การศึกษาการนำดินขาวเผามาศึกษาร่วมกับคอนกรีตที่ใส่แทนซิลิกาฟูมเพื่อเสริมความแข็งแรง และลดการแพร่กระจายของคลอไรด์ [1] และการใส่แทนปูนซีเมนต์เพื่อเสริมความแข็งแรงและเป็นการลดต้นทุนการก่อสร้าง [2] รวมไปถึงการนำความสามารถของดินขาวเผาไปศึกษาร่วมกับโครงสร้างผิวทาง

งานวิจัยหลายฉบับสนับสนุนแนวคิดของการใช้ดินขาวเผาในแอสฟัลต์คอนกรีต Murana et al. (2014) ศึกษาผลของดินขาวเผาในแอสฟัลต์คอนกรีตและพบว่า การเติมดินขาวเผาสามารถช่วยเพิ่มค่าความเสถียร (Stability) และลดช่องว่างอากาศในมวลรวมผสม ส่งผลให้โครงสร้างของแอสฟัลต์มีความแข็งแรงและทนทานต่อการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกัน [3] Wild et al. (1996) ดินขาวเผาสามารถลดการเกิดรอยแตกร้าวและเพิ่มความทนทานต่อภาระน้ำหนัก ซึ่งช่วยลดโอกาสการเกิดความเสียหายของพื้นผิวถนนจากการใช้งานหนัก [4] และ Zhang et al. (2018) ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์กับดินขาวเผา พบว่า อนุภาคของดินขาวเผาสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบในแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความหนาแน่นสูงขึ้นและช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม การศึกษานี้ยังระบุว่าการใช้ดินขาวเผาสามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการทนต่อการเสื่อมสภาพจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น และลดอัตราการเกิดออกซิเดชันของแอสฟัลต์ ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพของถนน [5]

จากการทบทวนงานวิจัย [1-5] พบว่าการนำดินขาวเผามาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างนอกจากจะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างพื้นฐานแล้วนั้น การใช้ดินขาวเผาในอีกมุมหนึ่งยังเป็นการ ลดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตรงและทางอ้อมจากอุตสาหกรรมซีเมนต์และอุตสาหกรรมการก่อสร้าง [6]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 เพื่อกำหนดปริมาณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน โดยเน้นไปที่การพัฒนาโครงสร้างพื้นทางให้มี ความทนทานมากขึ้น ลดอัตราการเสื่อมสภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนด้านการบำรุงรักษาถนนในระยะยาว และช่วยตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมก่อสร้างทางหลวงที่มุ่งเน้นไปสู่แนวทางที่ยั่งยืนมากขึ้น

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

ในการทดสอบ การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผา มีวัสดุและวิธีการทดสอบดังนี้

2.1 วัสดุ

2.1.1 ดินขาวเผา (Metakaolin, MK)

ดินขาวเผา (ARGICAL-M1200S) ผู้วิจัยได้เลือกวัสดุปอซโซลานที่ได้จากการเผาดินขาวที่อุณหภูมิประมาณ 650-800°C เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) อยู่ในรูปแบบที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบในแอสฟัลต์ซีเมนต์และซีเมนต์ได้ดี จากคุณสมบัติของ ดินขาวเผา ดังนี้

- พฤติกรรมปอซโซลาน (Pozzolanic Activity) มีค่า Chapelle test ที่ 1400 mg $Ca(OH)_2$/g แสดงถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา pozzolanic สูง ซึ่งเมื่อใช้ร่วมกับสารที่มีแคลเซียม (เช่น แอสฟัลต์มอร์ตาร์หรือน้ำยางผสม) hydrate ได้
- ขนาดอนุภาคละเอียดพิเศษ ขนาด 1.5 µm. ส่งผลให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาค ได้ดี ทำให้ ลดช่องว่าง (voids) และช่วยปรับโครงสร้างของแอสฟัลต์ให้แน่นขึ้น
- พื้นที่ผิว 25 m^2/g และความสามารถในการดูดซึมน้ำส่งผลให้ Metakaolin มีความสามารถในการดูดซับน้ำหรือสารยึดเกาะในระบบแอสฟัลต์ได้ดี ซึ่งช่วยเพิ่ม การยึดเกาะ อนุภาค และลดความเสี่ยงในการแยกชั้นหรือ stripping เมื่อเจอสภาวะชื้น

จากคุณสมบัติของ ARGICAL™ - M 1200S (Metakaolin) สามารถสรุปได้ว่าเป็นวัสดุเสริมที่มีศักยภาพสูงสำหรับงาน แอสฟัลต์คอนกรีตที่ต้องการคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและความยั่งยืน

รูปที่ 1 ดินขาวเผา (Metakaolin, MK)

2.1.2 วัสดุมวลรวมจากธรรมชาติ (Natural Aggregate)

มวลรวมที่ใช้เป็นมวลรวมสำหรับการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเฉพาะ ในชั้นผิวทาง (Wearing Course) เป็นหินประเภท หินปูน (Limestone) จากโรงโม่หินในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งเป็นแหล่งหินที่ได้มาตรฐานสำหรับการก่อสร้างโครงสร้างผิวทาง

รูปที่ 2 วัสดุมวลรวมประเภทหินปูน จากแหล่งโรงโม่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

2.1.3 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement, AC)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้เป็นสารยึดเกาะหลักในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70 ซึ่งมีคุณสมบัติการไหลและความแข็งตัวที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาพอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย โดยแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70 จากบริษัท ทิปโก้ จำกัด เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับมาตรฐานระดับสากล และถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในโครงการก่อสร้างทางหลวงและถนนในประเทศไทย

รูปที่ 3 แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70

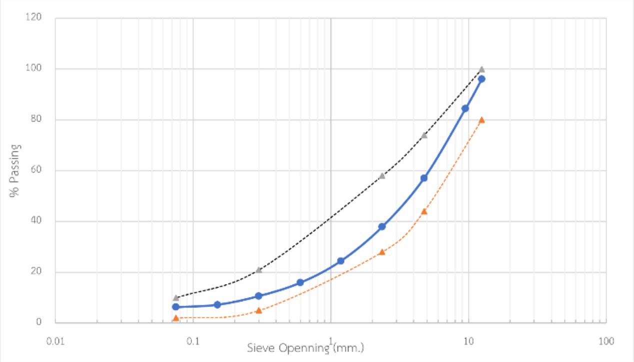
2.2 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

ในส่วนของการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับการศึกษาเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา อ้างอิงตามการออกแบบตามมาตรฐานที่ ทล. -ม. 408/2532 (DH. -S 408/2532) แอสฟัลต์คอนกรีต ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดคละของมวลรวมตามมาตรฐาน DH. -S 408/2532

ชั้นทาง		Wearing Course		Binder Course	Base Course
ขนาดที่เรียกใช้	มิลลิเมตร	9.5	12.5	19.0	25.0
	นิ้ว	3/8	1/2	3/4	1
ความหนา	(มิลลิเมตร)	25 – 35	40 - 70	40 - 80	70 - 100
ขนาดตะแกรง		ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล			
มิลลิเมตร	นิ้ว				
37.5	1 1/2				100
25	1			100	90 - 100
19	3/4		100	90 - 100	
12.5	1/2	100	80 - 100		56 - 80
9.5	3/8	90 - 100		56 - 80	
4.75	#4	55 – 85	44 - 74	35 - 65	29 - 59
2.36	#8	32 – 67	28- 58	23 - 49	19 - 45
1.18	#16				
0.6	#30				
0.3	#50	7-23	5-21	5-19	5-17
0.15	#100				
0.075	#200	2-10	2-10	2-8	1-7
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวลรวม)		4.0 - 8 0	3.0 - 7.0	3.0 - 6.5	3.0-6 0

โดยทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบมวลรวมประกอบด้วยมวลหยาบและมวลละเอียดโดยมีขนาดคละของมวลรวมในชั้นผิวทาง (Wearing Course 12.5 mm) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 อัตราส่วนของมวลรวมที่ออกแบบ ตามมาตรฐาน DH. -S 408/2532

แอสฟัลต์ซีเมนต์ ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ตามข้อกำหนดคุณภาพ ทล. -ก. 401/2531 (DH. -SP 401/2531) โดยในงานวิจัยนี้ออกแบบให้ใช้ที่ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ร้อยละ 5 ของปริมาณมวลรวม และ ใช้เลือกใช้ปริมาณดินขาวเผา จากการทดสอบเบื้องต้น โดยเริ่มทำการใส่ที่อัตราส่วนร้อยละมากกว่า 10 ของปริมาณน้ำยางส่งผลทำให้น้ำยางไม่จับตัวกับมวลรวม เลยได้ทำการเลือกอัตราส่วนมวลรวม 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อทำการทดสอบเพื่อดูคุณสมบัติเชิงกลพื้นฐานให้เป็นแนวทางก่อนที่จะนำไปศึกษาคุณสมบัติอื่นๆของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาต่อไป

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่าง ควบคุมจำนวนครั้งที่บดอัด ด้านละ 75 ครั้ง ตามมาตรฐาน DH. -S 408/2532 และควบคุมอุณหภูมิที่ 150 องศาเซลเซียส และทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นถอดแบบออกจากก้อนตัวอย่างตามมาตรฐานข้อกำหนดในหารออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต ทล. -ม. 408/2532 (DH. -S 408/2532) ดังตารางที่ 2 เพื่อทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ (ทล.-ม. 604/2517)

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐาน DH. -S 408/2532

ชั้นทาง		Wearing Course		Binder Course	Base Course
ขนาดที่เรียกใช้	มิลลิเมตร (นิ้ว)	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)
ความหนา	มิลลิเมตร	25 - 35	40 - 70	40 - 80	70 -100
Number of Blows	Each End	75	75	75	75
Stability	N min.	8006	8006	8006	7117
	(lb) Min.	1800	1800	1800	1600
Flow 0.25 mm (0.01 in)		8 - 16	8 - 16	8 -16	8 - 16
Percent Air Voids		3 - 5	3 - 5	3 - 6	3 - 6
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) Min.		15	14	13	12
Stability/Flow Min.					
N/0.25 mm		712	712	712	645
(lb/0.01 in)		160	160	160	145
Percent Strength Index Mn		75	75	75	75

3. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างควบคุมและแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ได้ผลการทดสอบเรียงตามลำดับดังนี้

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตตัวควบคุมที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 11760.88 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการไหล (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.53 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของแอสฟัลต์คอนกรีตตัวควบคุม

NO.	C1.1	C1.2	C1.3
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)		5	
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)		4.76	
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)		4.48	
Density			
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1192.6	1189.3	1175.9
น้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้ง (g.)	1195.6	1200.6	1178.3
น้ำหนักในน้ำ (g.)	694.8	699.8	684.1
ปริมาตรรวม (ml.)	500.8	500.8	494.2
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.38	2.37	2.38
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)		2.38	
Voids Analysis			
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.47	10.44	10.46
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.62	85.38	85.55
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.38	14.62	14.45
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	3.91	4.18	3.99
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)		4.03	
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	72.79	71.42	72.37
Stability/Flow			
ค่าเสถียรภาพ (N.)	12753.00	11870.10	11379.60
อัตราส่วนการปรับแก้	0.98	0.98	0.98
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	12497.94	11632.69	11152.01
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)		11760.88	
อัตราการไหล (mm.)	3.9	3.7	3
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)		3.53	

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2 ได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 14616.25 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนดและตัวควบคุม ค่าการไหล (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.6 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาร้อยละ 2

NO.	M2.1	M2.2	M2.3
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)		5	
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)		4.76	
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)		4.48	
Density			
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1204	1220.3	1214.9
น้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้ง (g.)	1206.7	1224	1218
น้ำหนักในน้ำ (g.)	698.5	716	712
ปริมาตรรวม (ml.)	508.2	508	506
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.37	2.40	2.40
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)		2.39	
Voids Analysis			
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.41	10.56	10.55
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.18	86.37	86.33
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.82	13.63	13.67
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	4.41	3.07	3.12
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)		3.53	
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	70.27	77.45	77.18
Stability/Flow			
ค่าเสถียรภาพ (N.)	14420.70	14616.90	14518.80
อัตราส่วนการปรับแก้	1	1.02	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	14420.7	14909.23	14518.8
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)		14616.25	
อัตราการไหล (mm.)	3.2	3.8	3.8
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)		3.60	

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 4 ได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 15091.05 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนดและตัวควบคุม ค่าการไหล (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.67 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาร้อยละ 4

NO.	M4.1	M4.2	M4.3
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)		5	
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)		4.76	
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)		4.48	
Density			
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1187.3	1198.5	1211
น้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้ง (g.)	1190	1202	1215
น้ำหนักในน้ำ (g.)	685	692	710
ปริมาตรรวม (ml.)	505	510	505
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.35	2.35	2.40
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)		2.37	
Voids Analysis			
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.33	10.33	10.54
ปริมาตรมวลรวม (g.)	84.53	84.49	86.22
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	15.47	15.51	13.78
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	5.13	5.18	3.24
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)		4.52	
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	66.81	66.61	76.48
Stability/Flow			
ค่าเสถียรภาพ (N.)	15107.40	15058.35	15107.40
อัตราส่วนการปรับแก้	1.02	1	0.98
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	15409.54	15058.35	14805.25
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)		15091.05	
อัตราการไหล (mm.)	3.6	3.6	3.8
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)		3.67	

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 6 ได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 13439.90 นิวตัน สูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนดและตัวควบคุม ค่าการไหล (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.9 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาร้อยละ 6

NO.	M6.1	M6.2	M6.3
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)		5	
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)		4.76	
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)		4.48	
Density			
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1193.9	1217.9	1190.9
น้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้ง (g.)	1196	1222	1195
น้ำหนักในน้ำ (g.)	695	699	690
ปริมาตรรวม (ml.)	501	523	505
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.38	2.33	2.36
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)		2.36	
Voids Analysis			
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.47	10.23	10.36
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.68	83.73	84.79

ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.32	16.27	15.21
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	3.85	6.04	4.85
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)	4.91		
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	73.14	62.89	68.14
Stability/Flow			
ค่าเสถียรภาพ (N.)	13292.55	12831.48	14204.88
อัตราส่วนการปรับแก้	0.98	1.02	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	13026.70	13088.11	14204.88
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	13439.90		
อัตราการไหล (mm.)	3.6	4.1	4
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.90		

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 8 ได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 12305.67 นิวตัน สูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนดและตัวควบคุม ค่าการไหล (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 4.0 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาร้อยละ 8

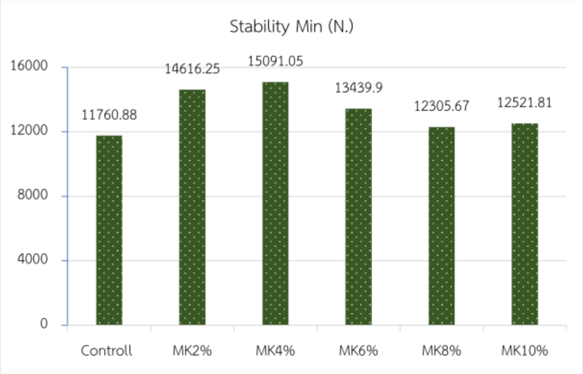
NO.	M8.1	M8.2	M8.3
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5		
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76		
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48		
Density			
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1205.1	1191.8	1230.7
น้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้ง (g.)	1209	1195	1234
น้ำหนักในน้ำ (g.)	701	685	709
ปริมาตรวม (ml.)	508	510	525
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.37	2.34	2.34
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.35		
Voids Analysis			
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.43	10.27	10.30
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.29	84.02	84.28
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.71	15.98	15.72
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	4.28	5.71	5.41
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)	5.13		
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	70.89	64.28	65.56
Stability/Flow			
ค่าเสถียรภาพ (N.)	11968.20	12017.25	13684.95
อัตราส่วนการปรับแก้	0.98	0.98	0.98
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	11728.84	11776.91	13411.25
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	12305.66		
อัตราการไหล (mm.)	4.2	4	3.8
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	4.00		

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 8 ได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 12521.81 นิวตัน สูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนดและตัวควบคุม ค่าการไหล (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 4.1 มม. เป็นค่าที่ไม่ผ่านมาตรฐานที่กำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 8

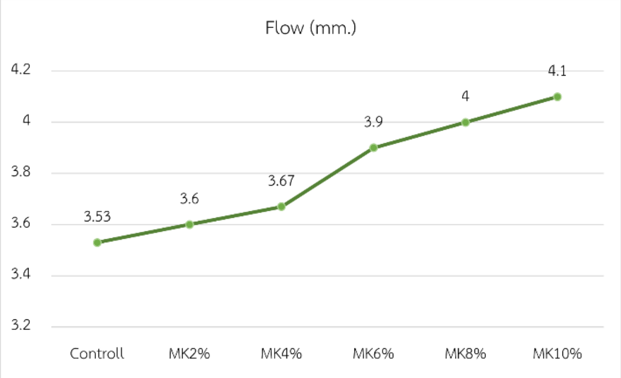
ตารางที่ 8 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาร้อยละ 10

NO.	M8.1	M8.2	M8.3
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5		
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76		
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48		
Density			
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1205.1	1191.8	1230.7
น้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้ง (g.)	1209	1195	1234
น้ำหนักในน้ำ (g.)	701	685	709
ปริมาตรวม (ml.)	508	510	525
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.37	2.34	2.34
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.35		
Voids Analysis			
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.43	10.27	10.30
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.29	84.02	84.28
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.71	15.98	15.72
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	4.28	5.71	5.41
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)	5.13		
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	70.89	64.28	65.56
Stability/Flow			
ค่าเสถียรภาพ (N.)	11968.20	12017.25	13684.95
อัตราส่วนการปรับแก้	0.98	0.98	0.98
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	11728.84	11776.91	13411.25
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	12305.66		
อัตราการไหล (mm.)	4.2	4	3.8
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	4.00		

จากผลการทดสอบในแต่ละอัตราส่วนที่ได้แสดงดังตารางตามลำดับนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบผลของค่าเสถียรภาพ (Stability) ค่าการไหล (Flow) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

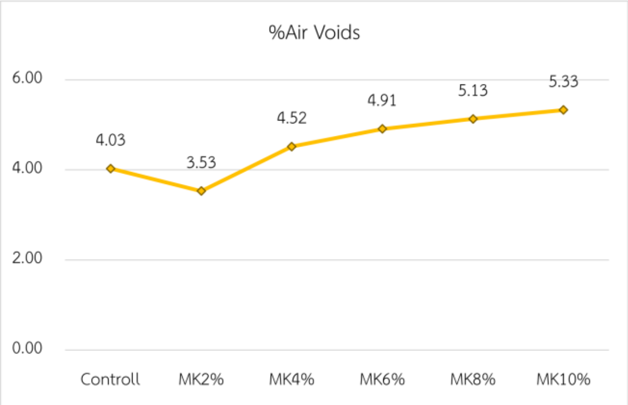


รูปที่ 5 ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าเสถียรภาพ (Stability) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์

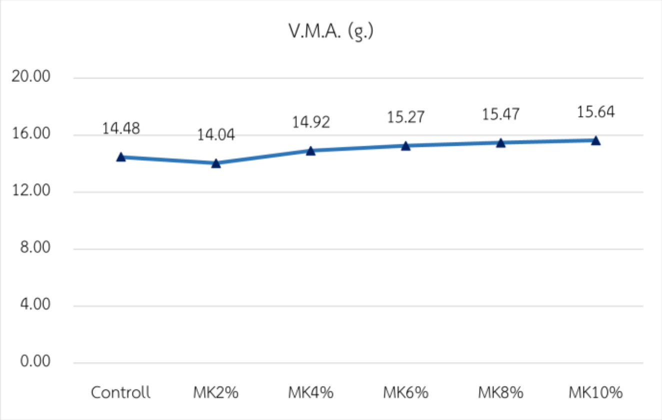


รูปที่ 6 ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าการไหล (Flow) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์

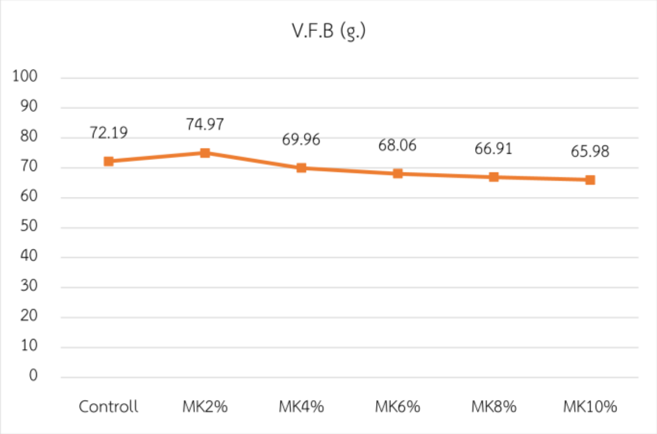
และแสดงค่าปริมาณร้อยละช่องว่างอากาศ (%Air Voids) ปริมาณช่องว่างในโครงสร้างมวลรวม (V.M.A.) และ อัตราส่วนของช่องว่างใน VMA ที่ถูกเติมเต็มด้วยยางแอสฟัลต์ (V.F.B.) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ดังรูปที่ 7-9 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าอัตราช่องว่างอากาศ (%Air Voids) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์



รูปที่ 8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์



รูปที่ 9 ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B) (g.) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมดินขาวเผา ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า

ค่าความเสถียรภาพของตัวอย่างที่เติม MK สูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานและตัวอย่างควบคุม โดยที่ MK 4% ให้ค่าความเสถียรสูงสุดที่ 15,091 N ซึ่งมากกว่าตัวอย่างควบคุม (11,761 N) และสูงกว่าค่ามาตรฐาน (8,006 N) อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ค่าความเสถียรมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติม MK เกิน 4% โดยที่ MK 6%, 8% และ 10% ให้ค่าความเสถียรลดลงเหลือ 13,440 N, 12,306 N และ 12,522 N ตามลำดับ แม้ว่าจะยังคงสูงกว่าค่ามาตรฐาน

การทดสอบค่าการไหล (Flow) พบว่า ค่าการไหลของตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่เติม MK อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามมาตรฐาน (2-4 mm) โดยที่ตัวอย่าง MK 2% และ MK 4% มีค่าการไหลอยู่ที่ 3.6 mm และ 3.67 mm ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม (3.53 mm) อย่างไรก็ตาม

การเติม MK มากกว่า 4% ทำให้ค่าการไหลเพิ่มขึ้น โดย MK 6%, 8% และ 10% มีค่าอยู่ที่ 3.9 mm, 4 mm และ 4.1 mm ตามลำดับ ซึ่งเริ่มสูงกว่าช่วงมาตรฐาน อาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงเฉือนของวัสดุ

การเติมดินขาวเผา (MK) ส่งผลให้ค่า %Air Voids มีแนวโน้มลดลงในช่วงต้น โดยสูตรควบคุมมีค่า 4.03% และลดลงต่ำสุดที่ 3.53% เมื่อเติม MK ที่ 2% ซึ่งบ่งชี้ว่าโครงสร้างภายในแน่นและอัดตัวดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ MK มากขึ้น ค่า Air Voids กลับเพิ่มขึ้นจนถึง 5.33% ที่ MK10% ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่ทั่วถึง

ค่าช่องว่างในโครงสร้างมวลรวม (VMA) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MK โดยเริ่มจาก 14.48% ในสูตรควบคุม ลดลงเล็กน้อยที่ MK2% แล้วเพิ่มขึ้นต่อเนื่องถึง 15.64% ที่ MK10% สะท้อนให้เห็นว่าการเติม MK มากขึ้น ทำให้โครงสร้างรวมเกิดช่องว่างมาก

ค่า VFB มีแนวโน้มสูงสุดที่ MK2% คือ 74.97% ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการเติมเต็มช่องว่างด้วยยางแอสฟัลต์ได้ดีที่สุด แต่เมื่อปริมาณ MK เพิ่มขึ้น ค่า VFB กลับลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเหลือเพียง 65.98% ที่ MK10% แสดงว่าการเติม MK มากเกินไปทำให้ช่องว่างในโครงสร้างมากเกินความสามารถของแอสฟัลต์ที่จะเติมเต็ม ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยึดเกาะของส่วนผสม

จากผลการทดสอบทั้งหมด พบว่าอัตราส่วนของการเติมดินขาวเผา (Metakaolin, MK) ที่ ให้ผลดีที่สุดคือ MK 4% เนื่องจากสามารถเพิ่มค่าความเสถียรภาพได้สูงสุดที่ 15,091 N ซึ่งสูงกว่าทั้งตัวอย่างควบคุมและค่ามาตรฐานอย่างชัดเจน โดยยังคงมีค่าการไหล (Flow) ที่เหมาะสมที่ 3.67 mm ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐาน (2–4 mm) ไม่ส่งผลเสียต่อพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ นอกจากนี้ MK 4% ยังมีค่า %Air Voids ที่ไม่สูงเกินไป (4.52%) ค่า VMA อยู่ในระดับที่สมดุล (14.92%) และค่า VFB ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (69.96%) สะท้อนถึงความสามารถในการเติมเต็มช่องว่างด้วยยางแอสฟัลต์ได้ดี โดยไม่ทำให้โครงสร้างพรุนจนเกินไป เมื่อเปรียบเทียบกับ MK ในระดับอื่น MK 4% จึงเป็นอัตราส่วนที่ให้ความสมดุลที่ดีที่สุดทั้งในด้านความแข็งแรงเชิงกล การกระจายตัวของวัสดุ และประสิทธิภาพการเติมเต็มของยางแอสฟัลต์ในโครงสร้างของแอสฟัลต์คอนกรีต

5. ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบพบว่าการเติมดินขาวเผา (MK) ในแอสฟัลต์คอนกรีตที่อัตรา 4% ให้ค่าความเสถียรสูงสุดและค่าการไหลยังคงอยู่ในช่วงมาตรฐาน อย่างไรก็ตาม การเติม MK ในปริมาณที่มากขึ้นอาจส่งผลต่อความแข็งและความเปราะของวัสดุ ซึ่งอาจลดความสามารถในการรับแรงเฉือนและความทนทานในระยะยาว ดังนั้น ควรมีการทดสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับ คุณสมบัติทางรีโอโลยี (Rheological Properties) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เติม MK เพื่อตรวจสอบความทนทานต่ออุณหภูมิสูง นอกจากนี้ควรศึกษาผลกระทบของ MK ความต้านทานต่อการแตกร้าวจากความล้า (Fatigue Cracking Resistance) ซึ่งจะช่วยยืนยันความเหมาะสมของการใช้ดินขาวเผา ในการพัฒนาแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีสมบัติที่ดีขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างถนนที่ทนทานและยั่งยืนมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในการศึกษา และขอขอบคุณบริษัท ทิปโก้แอสฟัลท์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ได้การสนับสนุนวัสดุเพิ่มเติมสำหรับงานวิจัย รวมถึง อาจารย์ที่ปรึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือในงานวิจัยในทุกๆเรื่อง ทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Ding, J. T., & Li, Z. (2002). Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete. Materials Journal, 99(4), 393-398.

[2] Busari, A., Akinmusuru, J., & Dahunsi, B. (2019). Strength and durability properties of concrete using metakaolin as a sustainable material: Review of literature. International Journal of Civil Engineering and Technology, 10(1), 1893-1902.

[3] Murana, A. A., Olowosulu, A. T., & Ahiwa, S. (2014). Performance of metakaolin as partial replacement of cement in hot mix asphalt. Nigerian Journal of Technology, 33(3), 387-393.

[4] Wild, S., Khatib, J. M., & Jones, A. (1996). Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. Cement and concrete research, 26(10), 1537-1544.

[5] Jindal, B. B., Alomayri, T., Hasan, A., & Kaze, C. R. (2022). Geopolymer concrete with metakaolin for sustainability: a comprehensive review on raw material's properties, synthesis, performance, and potential application. Environmental Science and Pollution Research, 1-26.

[6] Homayoonmehr, R., Ramezanianpour, A. A., & Mirdarsoltany, M. (2021). Influence of metakaolin on fresh properties, mechanical properties and corrosion resistance of concrete and its sustainability issues: A review. Journal of Building Engineering, 44, 103011.

[7] กรมทางหลวง (2532). ทล.-ม. 408/2532 แอสฟัลต์คอนกรีต (Hot-Mix Asphalt).

[8] กรมทางหลวง (2517) ทล.-ม. 604/2517 วิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธี Marshall