



การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย
ดินขาวเผาและกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง

โดย

ศุภมิตร นันทพัฒนานุกูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2567

A STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF ASPHALT
CONCRETE MODIFIED WITH METAKAOLIN AND SUPRA -
GRAPHENE QUANTUM DOTS

BY

SUPPAMIT NUNTAWATTANANUKUL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2024

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
วิทยานิพนธ์

ของ

ศุภมิตร นันทวัฒนานุกูล

เรื่อง

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาและ
กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 6 มิถุนายน พ.ศ. 2568

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

วิมล เหนือคลอง

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมล เหนือคลอง)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Jintara L.

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตหรา ลาวงศ์เกิด)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

สุวิมล

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ศุภมิตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลาภยศ ประสิทธิ์ไศรินทร์)

คณบดี

(ศาสตราจารย์ ดร.สัญญา มิตรเอม)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาและกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง
ชื่อผู้เขียน	ศุภมิตร นันทวัฒนากุล
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตหรา ลาวงศ์เกิด
ปีการศึกษา	2567

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติมดินขาวเผา (Metakaolin) และกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (S-GQDs) ต่อคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การปรับปรุงด้วยดินขาวเผาเพียงอย่างเดียว การปรับปรุงด้วย S-GQDs เพียงอย่างเดียว และการปรับปรุงด้วยร่วมกัน พบว่าอัตราส่วนดินขาวเผา 2% ให้ค่าคุณสมบัติสูงในหลายด้านและยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานความสามารถในการยึดตัว ขณะที่การเติม S-GQDs เพียงอย่างเดียว พบว่าอัตราส่วนไม่เกิน 2% โดยเฉพาะช่วง 0.5–1% สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความคงทนได้โดยไม่กระทบต่อความเหนียวของวัสดุ สูตรการปรับปรุงด้วยร่วมกันที่ใช้ดินขาวเผา 2% กับ S-GQDs 0.5% (M-SG1) ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในภาพรวม โดยให้ค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าความสามารถในการคืนตัว (ITS_m) สูง พร้อมทั้งคงความสามารถในการยึดตัวและค่าการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อนในเกณฑ์ที่ปลอดภัย โดย S-GQDs ช่วยขัดผิวอนุภาคดินขาวเผาในกระบวนการผสมร้อน ส่งผลให้เกิดโครงสร้างวัสดุที่หนาแน่นและแข็งแรง อย่างไรก็ตาม การเติม S-GQDs มากเกินไปอาจเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินขาวเผาและลดคุณภาพวัสดุ

คำสำคัญ: ดินขาวเผา, กราฟีนควอนตัมดอท, แอสฟัลต์คอนกรีต, แอสฟัลต์ซีเมนต์

Thesis Title	A STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE MODIFIED WITH METAKAOLIN AND SUPRA - GRAPHENE QUANTUM DOTS
Author	SUPPAMIT NUNTAWATTANANUKUL
Degree	Master of Engineering
Major Field/Faculty/University	Civil Engineering Faculty of Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Assist. Prof. Dr. Jintara Lawongkerd
Academic Year	2024

ABSTRACT

This research investigates the effects of Metakaolin (MK) and Superstructure Graphene Quantum Dots (S-GQDs) on the mechanical properties of asphalt concrete. The study is divided into three parts: using MK alone, using S-GQDs alone, and combining both. Results show that 2% MK yields high mechanical properties while maintaining adequate ductility (≥ 1000 mm). When using only S-GQDs, the optimal range is found to be $\leq 2\%$, especially between 0.5–1%, which improves strength and stability without compromising flexibility. The combined mix of 2% MK and 0.5% S-GQDs (M-SG1) demonstrates the best overall performance, achieving high stability and indirect tensile modulus (ITSm), while preserving ductility and thermal stability. The presence of S-GQDs enhances the surface interaction with MK particles during hot-mix processing, resulting in denser and more cohesive structure. However, excessive S-GQDs may alter the MK structure and reduce material quality.

Keywords: Metakaolin, Graphene Quantum Dots, Asphalt Concrete, Asphalt Cement

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตหรา ลาวงศ์เกิด ที่ให้อิสระทางความคิดในการคิดค้นหัวข้องานวิจัย ให้คำปรึกษาและแนวทางในการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมถึงเป็นผู้สนับสนุนในอีกหลาย ๆ ด้าน อีกทั้งขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภูมิ เหนือคลอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ ที่เป็นกรรมการตรวจสอบและให้คำแนะนำ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลาภยศ ประสิทธิ์ไศภิน ที่เป็นกรรมการตรวจสอบและให้คำแนะนำรวมถึงเป็นผู้สนับสนุนวัสดุทดสอบ

ขอขอบคุณทุนในการทำวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัททีปโก้ แอสฟัลท์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ได้การสนับสนุนด้านวัสดุ สำหรับทำการวิจัยเป็นจำนวนมาก รวมถึง ขอขอบคุณ คุณสมพันธ์ ลีลาปัญญาภรณ์ ผู้จัดการอาวุโส ส่วนงานขายผลิตภัณฑ์พิเศษ บริษัททีปโก้ แอสฟัลท์ ที่เป็นผู้ประสานงานในการติดต่อให้การสนับสนุน และคำแนะนำสำหรับงานวิจัย อีกทั้ง ขอขอบคุณ พี่สุวิน พี่เอ พี่ตึก พี่เจ้าหน้าที่แลปทีปโก้ ที่ให้คำแนะนำ รวมถึงทดสอบตัวอย่าง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว เพื่อน น้อง ที่ให้การสนับสนุนรวมถึงให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน และยังเป็นกำลังใจที่ดีในการทำวิจัยเสมอมา และขอขอบคุณตัวเองในทุก ๆ เรื่อง รวมถึงทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะมีประโยชน์ในการเป็นแนวทางในการศึกษาต่อและประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่ผู้ที่เกี่ยวข้องไม่มากก็น้อย

ศุภมิตร นันทวัฒนานุกุล

(4)

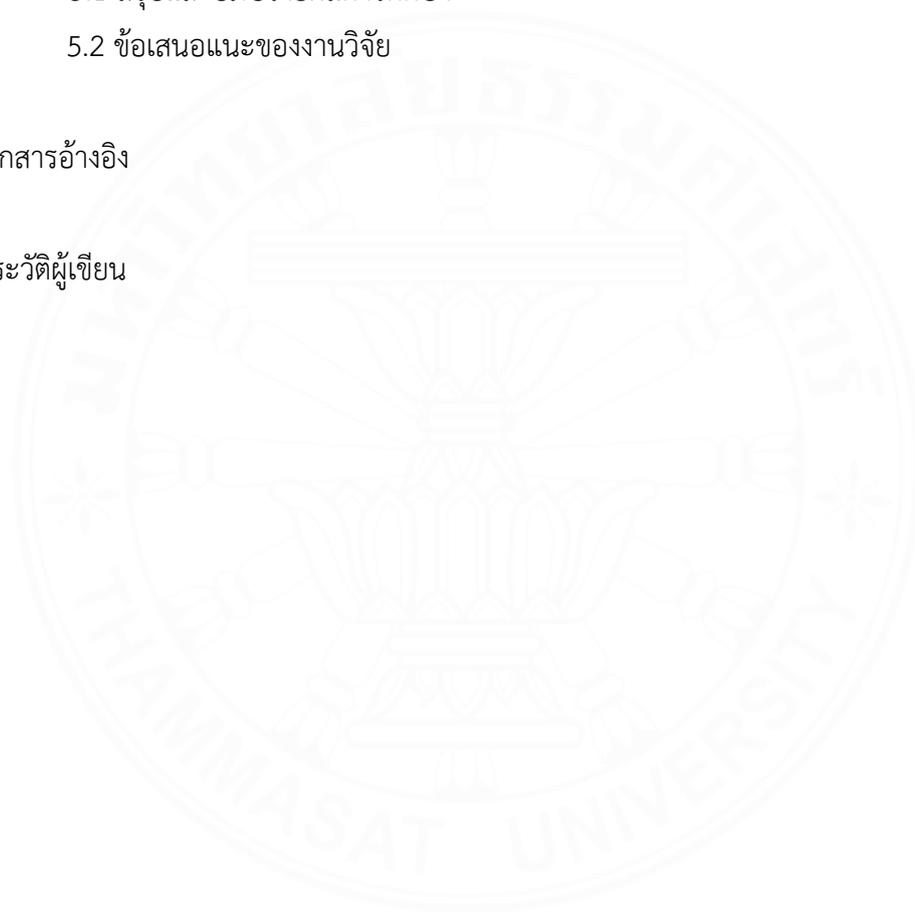
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
Abstract	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญ	(4)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(11)
สารบัญสมการ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แอสฟัลต์คอนกรีต	5
2.1.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement)	6
2.1.2 มวลรวม (Aggregate)	7
2.1.3 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต	8

2.2 ดินขาวเผา	11
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดินขาวเผา	11
2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำดินขาวเผามาปรับใช้กับผิวทาง	12
2.3 กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (Supra Graphene Quantum Dots, SGQDS)	14
2.3.1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง	14
2.4 การศึกษาดินขาวเผาร่วมกับกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง	17
2.5 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ	18
2.5.1 การทดสอบมาร์แชลล์ (Marshall Test)	18
2.5.2 การทดสอบโมดูลัสความแข็งแบบแรงดึงทางอ้อม (ITSM)	19
2.5.3 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ (Penetration Test)	19
2.5.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test)	19
2.5.5 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point – Open Cup)	20
2.5.6 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating)	20
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	21
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	21
3.1.1 มวลรวม (Aggregate)	21
3.1.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70	22
3.1.3 ดินขาวเผา	23
3.1.4 กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง	23
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	24
3.3 สถานที่ในการทดสอบ	24
3.4 ขั้นตอนการทดสอบ	25
3.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและทดสอบตัวอย่าง	25
3.5.1 การทดลองคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธี Marshall	25
3.5.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคั้นตัว (Indirect Tensile Stiffness Modulus: ITSM)	29

3.5.3 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ (Penetration Test)	30
3.5.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test)	31
3.5.5 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point – Open Cup)	31
3.5.6 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating)	32
บทที่ 4 ผลการศึกษา	33
4.1 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุควมรวมและอัตราส่วนการออกแบบ	33
4.2 การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต/แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ดินขาวเผา	34
4.2.1 การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall	34
4.2.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (ITSM)	43
4.2.3 การทดสอบการเพนิเทรชัน (Penetration Test)	45
4.2.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test)	47
4.2.5 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point Test: Open Cup)	48
4.2.6 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating)	49
4.3 การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต/แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยกราฟีนควอนตัมคอตแบบพัฒนาโครงสร้าง	50
4.3.1 การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall	50
4.3.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (ITSM)	58
4.3.3 การทดสอบการเพนิเทรชัน (Penetration Test)	61
4.3.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test)	62
4.3.5 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point Test: Open Cup)	63
4.3.6 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating)	64
4.4 การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต/แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ ด้วยดินขาวเผาและกราฟีนควอนตัมคอตแบบพัฒนาโครงสร้าง	67
4.4.1 การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall	67
4.4.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (ITSM)	74
4.4.3 การทดสอบการเพนิเทรชัน (Penetration Test)	77

	(7)
4.4.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test)	78
4.4.5 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point Test: Open Cup)	79
4.4.6 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating)	80
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	83
5.1 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา	83
5.2 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย	84
เอกสารอ้างอิง	85
ประวัติผู้เขียน	91



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณลักษณะที่ต้องการของแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามข้อกำหนด ทล. -ก. 401/2531 (DH. -SP 401/2531)	7
2.2	ขนาดคละของมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์	9
2.3	ขนาดคละของวัสดุผสมแทรก	9
2.4	ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต	10
2.5	เกณฑ์ความเคื่อนที่ยอมให้สำหรับส่วนผสมเฉพาะงาน	11
3.1	คุณสมบัติมาตรฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์	21
4.1	ผลการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรงและอัตราส่วนของมวลรวม	33
4.2	ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมวลรวม	34
4.3	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีต ตัวควบคุม	35
4.4	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีต ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2	36
4.5	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีต ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 4	37
4.6	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีต ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 6	38
4.7	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีต ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 8	39
4.8	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีต ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 10	40
4.9	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa) ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุง คุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4 และ 6 ทดสอบ 4 อุณหภูมิ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส	44
4.10	ผลการทดสอบการเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	45

4.11	ผลการทดสอบความสามารถในการยึดตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	47
4.12	ผลการทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	48
4.13	ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	49
4.14	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2	51
4.15	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 4	52
4.16	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 6	53
4.17	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 8	54
4.18	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 10	55
4.19	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa) ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4 และ 6 ทดสอบ 4 อุณหภูมิ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส	59
4.20	ผลการทดสอบการเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	61
4.21	ผลการทดสอบความสามารถในการยึดตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 4, 6, 8 และ 10	62
4.22	ผลการทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	63
4.23	ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	64

4.24	อัตราส่วนที่เหมาะสมของการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยดินขาวเผา / กราฟีนควมตัมดอท	67
4.25	อัตราส่วน M-SG ที่ออกแบบ	67
4.26	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5	68
4.27	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:1	69
4.28	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:1.5	70
4.29	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:2	71
4.30	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa) ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5 และ 2:1 ทดสอบ 4 อุณหภูมิ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส	75
4.31	ผลการทดสอบการเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2	77
4.32	ผลการทดสอบความสามารถในการยึดตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2	78
4.33	ผลการทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2	79
4.34	ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2	80

สารบัญญภาพ

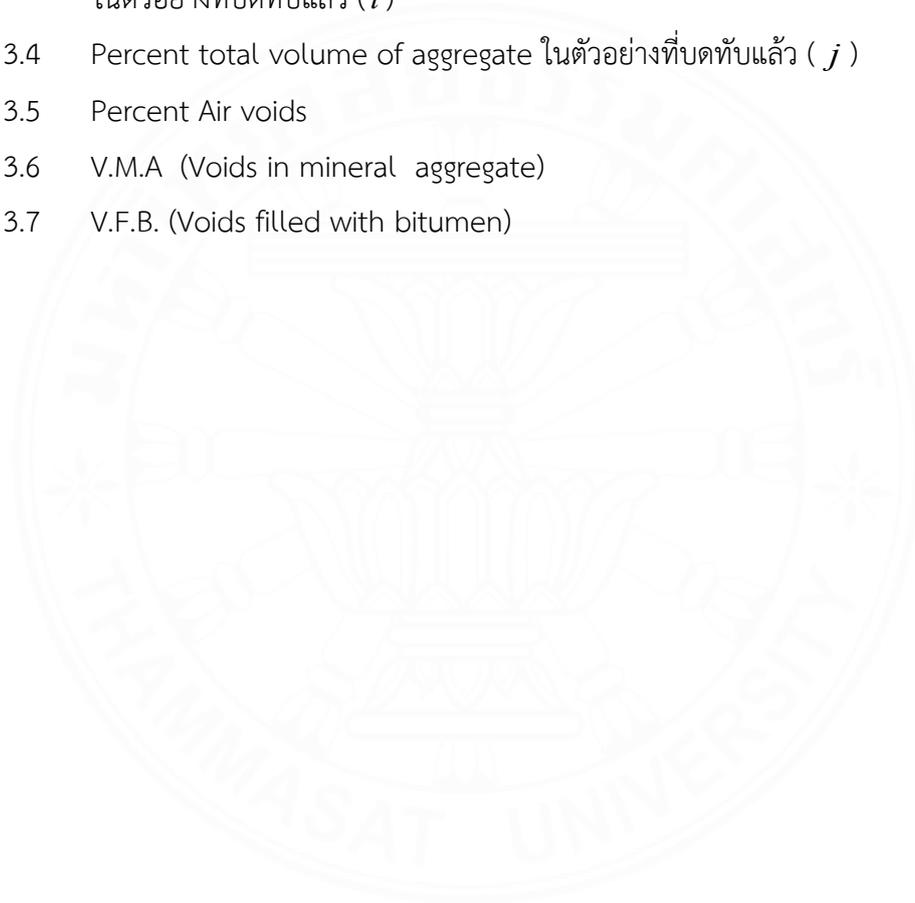
ภาพที่	หน้า
3.1 มวลรวม (Aggregate) (โรงโม่หิน ไทยสเลอรี วังน้อย จ.พระนครศรีอยุธยา)	20
3.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 (บริษัททีปโก้แอสฟัลต์)	21
3.3 ดินขาวเผา	22
3.4 กราฟีนคอรอนต์มดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (SGQDs)	23
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ	24
3.6 ตัวอย่างทดสอบที่นำออกจากแบบ	25
3.7 การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall	27
3.8 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว	29
3.9 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ	30
3.10 การทดสอบความสามารถในการยึดตัว	31
3.11 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด	32
3.12 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน	32
4.1 การกระจายของมวลรวมตามอัตราส่วนมวลรวม	33
4.2 มวลรวมที่ใช้หลังการออกแบบอัตราส่วนมวลรวม	34
4.3 ค่าเสถียรภาพ (Stability) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาว เผาอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	41
4.4 ค่าการยุบตัว (Flow) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา อัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	42
4.5 ค่าช่องว่างอากาศ (Air Voids) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย ดินขาวเผาอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	43
4.6 ค่าเสถียรภาพ (Stability) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	56
4.7 ค่าการยุบตัว (Flow) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	57
4.8 ค่าช่องว่างอากาศ (Air Voids) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10	57

- 4.9 ค่าเสถียรภาพ (Stability) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK 72
ร่วมกับ SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2
- 4.10 ค่าการยุบตัว (Flow) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK 73
ร่วมกับ SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2
- 4.11 ค่าช่องว่างอากาศ (Air Voids) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย 73
MK ร่วมกับ SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2



สารบัญสมการ

สมการที่		หน้า
3.1	Effective asphalt cement by weight of mix (b)	27
3.2	Bulk Specific Gravity of Specimen (g)	28
3.3	Percent total volume of effective asphalt cement ในตัวอย่างที่บดทับแล้ว (i)	28
3.4	Percent total volume of aggregate ในตัวอย่างที่บดทับแล้ว (j)	28
3.5	Percent Air voids	28
3.6	V.M.A (Voids in mineral aggregate)	28
3.7	V.F.B. (Voids filled with bitumen)	29



บทที่ 1

บทนำ

การศึกษาเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย กราฟีนควอนตัมดอท โดยมีที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ข้อมูลในปัจจุบันจากกระทรวงคมนาคม เมื่อปี พ.ศ.2565 พบว่าโครงสร้างพื้นฐานถนนประเภทถนนลาดยาง ในสายทางกรมทางหลวง มีระยะทาง 49,489 กิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 94.62 ของระยะทางถนนทุกประเภท และในสายทางกรมทางหลวงชนบท มีระยะทาง 46,232 กิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 93.12 ของระยะทางถนนทุกประเภท และยังมีอัตราการเพิ่มขึ้นของระยะทางถนนลาดยางมากที่สุด เมื่อเทียบกับถนนประเภทอื่นๆ เนื่องด้วยถนนลาดยางใช้เวลาในการก่อสร้างน้อย ซ่อมแซมง่าย งบประมาณการก่อสร้างที่ถูกกว่าถนนคอนกรีต ทำให้ถนนลาดยางเป็นที่นิยมในการก่อสร้างของประเทศต่างๆ ทั่วโลก

โครงสร้างของถนนลาดยางถูกออกแบบให้มีการกระจายหน่วยแรงในแนวดิ่ง ทำให้บริเวณผิวทางมีแรงกระทำสูงที่สุด ดังนั้นในการออกแบบหรือการพัฒนาถนนลาดยาง จึงเน้นไปที่ชั้นผิวทางจราจร โดยผิวทางจราจรหรือผิวทางประเภทแอสฟัลต์คอนกรีตประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) และมวลรวม (Aggregate) ผ่านกระบวนการผสมที่อุณหภูมิสูง และบดอัดเป็นผิวทางของถนนลาดยาง โดยในประเทศไทยปัญหาส่วนใหญ่ของผิวทางเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพร่างโดยถาวร (Permanent Deformation) และการแตกร้าวเนื่องจากการอ่อนล้าจากการรับน้ำหนัก (Fatigue Cracking) โดยมีสาเหตุหลักๆจากอุณหภูมิ น้ำหนักบรรทุก รวมไปถึงปริมาณการจราจร ซึ่งปัญหานี้ก่อให้เกิดความเสียหายต่อการคมนาคม และทำให้ต้องมีการปรับปรุงซ่อมแซมผิวทางเป็นจำนวนมาก จากปัญหาความเสียหายของผิวทางที่กล่าวนั้นทำให้ต้องมีการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยในการปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตเช่น การปรับปรุงมวลรวมให้มีกำลังรับแรงที่ดีขึ้น และอีกวิธีหนึ่งคือการปรับปรุงคุณภาพน้ำยาง นักวิจัยยังคงศึกษาหาวัสดุอื่นๆ เพื่อนำมาปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น ได้มีการนำวัสดุประเภทปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) ซึ่งเป็นสารเติมเต็ม เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเสถียรภาพของวัสดุ รวมถึงช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการลดการใช้ซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่สำคัญในอุตสาหกรรมก่อสร้างทางหลวง วัสดุปอซโซลานเหล่านี้ ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash), ตะกรันเตาหลอม (Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS), เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) และดินขาวเผา (Metakaolin หรือ Calcined Kaolin, MK) โดยในบรรดาวัสดุเหล่านี้ ดินขาวเผาได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากการเผาดินขาวที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีซิลิกาและอะลูมินาในภาพแบบที่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบในซีเมนต์ได้ดี คุณสมบัตินี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและทนทานของวัสดุที่ผสมดินขาวเผาเข้าไป

นอกจากจะมีการศึกษาค้นคว้าวัสดุใหม่เพื่อนำมาพัฒนาร่วมกับแอสฟัลต์คอนกรีตแล้วนั้น ยังมีแนวทางนำวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยมีการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งหลายประเภทเพื่อนำมาพัฒนาผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เช่น การใช้ผิวทางเดิมมาเป็นมวลรวมในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อผลิตผิวทางใหม่ การนำเถ้าลอยที่ได้จากโรงงานไฟฟ้ามาเป็นวัสดุผสมเพิ่มทั้งในคอนกรีตและโครงสร้างทาง หรือแม้กระทั่งการสกัดอะตอมของคาร์บอน ออกมาในภาพแบบพันธะต่างๆ ที่มีขนาดเล็กกลง เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการจับตัวกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ดีขึ้น ซึ่งในปัจจุบันมีพันธะอะตอมของคาร์บอนที่น่าสนใจในการศึกษาในหลายอุตสาหกรรม คือ กราฟีน (Graphene) เนื่องจากกราฟีนมีความแข็งแรงมากเพราะมีลักษณะโครงสร้างแบบแผ่นที่เรียงต่อกันแบบเฮกซาโกนัล (Hexagonal) โดยได้มีการนำกราฟีนในภาพแบบพันธะต่างๆ มาใช้ในการศึกษาปรับปรุงคุณสมบัติงานผิวทางแอสฟัลต์ เช่น กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) และ กราฟีนควอนตัมดอท (Graphene quantum dots) รวมไปถึง กราฟีนในภาพแบบพัฒนาโครงสร้างด้วยเทคโนโลยีและวิจัยตามยุคสมัย ให้มีความสามารถในด้านต่างๆ ได้ดีขึ้น โดยจะเรียกว่า กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (Supra Graphene quantum dots : SGQDS)

การศึกษานี้จะทำการทดลองศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8, 10 ของน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้างในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8, 10 ของน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 และอัตราส่วนที่ดีที่สุดของการใช้ดินขาวเผาและกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง โดยนำมาทดสอบด้านการรับกำลังรับแรง ความต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความล้าแบบให้แรงดึงทางอ้อม และคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ รวมถึงเป็นแนวทางในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของดินขาวเผาและกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง เพื่อให้สามารถนำไปปรับใช้กับการก่อสร้างจริงได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

วัตถุประสงค์ของการศึกษาเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา (MK) และกราฟีนควอนตัมคอตแบบพัฒนาโครงสร้าง (SGQDS) มีดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทน ความต้านทานแบบให้แรงดึงทางอ้อม ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย

- MK ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์
- SGQDS ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์
- MK ร่วมกับ SGQDS ในอัตราส่วนที่ดีที่สุดเมื่อทดสอบค่าคุณสมบัติเชิงกลของทั้งวัสดุผสมเพิ่มทั้งสอง

1.2.2 เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย MK, SGQDS และ MK ร่วมกับ SGQDS

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์

- MK ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์
- SGQDS ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์
- MK ร่วมกับ SGQDS ในอัตราส่วนที่ดีที่สุดเมื่อทดสอบค่าคุณสมบัติเชิงกลของทั้งวัสดุผสมเพิ่มทั้งสอง

1.2.4 เพื่อศึกษาความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพของดินขาวเผาและกราฟีนแบบพัฒนาโครงสร้าง สำหรับการนำไปปรับใช้กับงานโครงสร้างถนน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตการศึกษาเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกราฟีนควอนตัมคอต มีดังนี้

1.3.1 วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษา ประเภท แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 ตามมาตรฐานข้อกำหนดที่ ทล. -ก.401/2531 (DH. -SP 401/2531) “Specification for Asphalt Cement”

1.3.2 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม.408/2532 (DH. -S 408/2532) “Asphalt Concrete or Hot-Mix Asphalt”

1.3.3 การทดลองคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีต ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล. -ท. 604/2517 (DH-T 604/2517 , ASTM. D-1559) “วิธีการทดลองแอสฟัลต์ติกคอนกรีต โดยวิธี Marshall”

1.3.4 การทดสอบค่าโมดูลัสความแข็งแบบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Stiffness Modulus: ITSM) มาตรฐาน BS EN 12697-26 (Annex C) หรือเทียบเท่า ASTM D4123 “Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures”

1.3.5 การทดสอบการเพนิเทรชัน (Penetration Test) ตามมาตรฐาน ASTM D5 “Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials”

1.3.6 การทดสอบความเหนียว (Ductility Test) ตามมาตรฐาน ASTM D113 “Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials”

1.3.7 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point Test: Open Cup) ตามมาตรฐาน ASTM D92 “Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup”

1.3.8 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating) อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D6 หรือ D1754 เพื่อหาค่าการสูญเสียมวลของแอสฟัลต์ซีเมนต์หลังผ่านการให้ความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง

1.4.1 ได้ทราบถึงคุณสมบัติเชิงกล ด้านความคงทน ความต้านทานการเสียหายอย่างโดยแรงกระทำด้านข้าง ของแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาและกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง

1.4.2 ได้ทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาและกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง

1.4.3 ได้ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล เพื่อนำไปต่อยอดในงานพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติของงานโครงสร้างถนนด้วยดินขาวเผาและกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้างในด้านอื่นๆได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย กราฟีนควอนตัมดอท โดยมีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นแนวทางการวิจัยดังต่อไปนี้

2.1 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)

แอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึงวัสดุที่ได้จาก การผสมร้อนระหว่างมวลรวม (Aggregate) กับ แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) ที่โรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete Mixing Plant) โดยการควบคุมอัตราส่วนผสมและอุณหภูมิตามที่กำหนด มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในงานก่อสร้าง งานบูรณะและบำรุงทาง โดยการปูหรือเกลี่ยแต่งและบดทับ บนชั้นทางใดๆ ที่ได้เตรียมไว้และผ่านการ ตรวจสอบแล้ว ให้ถูกต้องตามแนว ระดับ ความลาดขนาด ตลอดจนสภาพตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ คุณสมบัติที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบส่วนผสม

1. เสถียรภาพ (Stability) ความสามารถในการรับน้ำหนักโดยที่ไม่ทำให้เกิดร่องล้อหรือ เป็นคลื่น หรือมีการเปลี่ยนแปลงสภาพร่างไปจากเดิม โดยทั่วไปแล้วความมี เสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับความเสียดทานภายในและแรงยึด ประสานระหว่างอนุภาคของมวลรวม
2. ความทนทาน (Durability) ความต้านทานต่อความเสื่อมสภาพปัจจัยที่ทำให้ แอสฟัลต์คอนกรีตเสื่อมสภาพส่วนใหญ่เกิดมาจากสภาพการใช้งานและอุณหภูมิของ อากาศที่มีการเปลี่ยนแปลง
3. ความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำและอากาศ (Impermeability) เป็นคุณสมบัติที่ สำคัญของแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะส่งผลโดยตรงต่อความทนทานของแอสฟัลต์ คอนกรีต
4. ความสามารถในการปูหรือบดอัด (Workability) คุณสมบัติที่สำคัญของแอสฟัลต์ คอนกรีต เนื่องจาก ต้อง สามารถทำการปูและบดอัดได้ง่าย ไม่เหนียวหรืออ่อน จนเกินไป

5. ความสามารถในการยืดหยุ่นตัว (Flexibility) เป็นคุณสมบัติที่ต้องการอย่างมาก ในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต เนื่องจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะเกิดการแอ่นตัวและทรุดลงเมื่อมีการรับน้ำหนักจากด้านบน เนื่องจากชั้นดินที่อยู่ข้างล่างเกิดการขยายตัว
6. ความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance) คือความสามารถในการตัดโค้งแบบซ้ำๆ ที่เกิดจากน้ำหนักมากระทำ ปริมาตรของช่องว่างอากาศ ปริมาณแอสฟัลต์ และความหนืดของแอสฟัลต์ จะมีผลต่อความต้านทานต่อการล้าของแอสฟัลต์ และยังเป็นปัญหาหลักในเรื่องอายุการใช้งานของถนน
7. ความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid Resistance) เป็นคุณสมบัติอีกประการ หนึ่งของแอสฟัลต์คอนกรีตที่สำคัญ เนื่องจากสามารถช่วยลดปริมาณอุบัติเหตุ ที่เกิดจากการลื่นไถลของชั้นผิวทาง

2.1.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) เป็น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม มีความแข็งแรง ยึดเกาะกับวัสดุ เช่น หิน ได้เป็นอย่างดี ใช้สำหรับการก่อสร้างทางและบำรุงผิวจราจร งานปรับระดับ งานเสริมผิว โดยการให้ความร้อนแอสฟัลต์ซีเมนต์และหิน จนได้อุณหภูมิที่กำหนด มาผสมกันในอัตราส่วนที่ถูกต้อง แอสฟัลต์ซีเมนต์จะแบ่งเป็นเกรดต่างๆตามค่าเพนิเทรชัน เป็น 6 เกรด คือ 40-50, 50-60, 60-70, 80-100, 120-150 และ 200-300 โดยเกรดที่นิยมใช้ในประเทศไทย คือ 60-70

คุณสมบัติที่สำคัญของการออกแบบแอสฟัลต์ซีเมนต์

1. ทำตัวยึดประสานกับวัสดุมวลรวม คือทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมวัสดุต่างๆให้ติดกัน เช่นการผสมยางมะตอยกับหินขนาดต่างๆเพื่อใช้ทำผิวทาง
2. ป้องกันการไหลซึมผิวทางลงไปทำความเสียหายที่ชั้นพื้นทาง คือเมื่อวัสดุเคลือบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์แล้ว จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่านไปยังชั้นใต้พื้นทาง
3. มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เช่น แสงแดด กรดต่าง และเกลือ
4. มีความยืดหยุ่นและทนทานต่อแรงสั่นสะเทือน แรงกดได้ดี

โดยมีค่าคุณสมบัติมาตรฐานตาม ข้อกำหนด ทล. -ก. 401/2531 (DH. -SP 401/2531) [1] ดังนี้

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะที่ต้องการของแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามข้อกำหนด ทล. -ก. 401/2531 (DH. -SP 401/2531)

คุณลักษณะที่ต้องการ	หน่วย	มาตรฐานที่กำหนด
1. เพนิเทรชัน (Penetration) ที่ 25 °C น้ำหนักกด 100 g. เวลา 5 วินาที	0.1 mm.	60-70
2. Softening Point ไม่น้อยกว่า	°C	44-55
3. จุดวาบไฟไม่น้อยกว่า	%	232
4. การละลายใน Trichloroethylene ไม่น้อยกว่า	cm.	99.0
5. การยืดดึง (Ductility) ที่ 25 °C อัตราความเร็ว ของเครื่องดึง 5 cm./นาที ไม่น้อยกว่า	cm.	100
<u>ภาคที่เหลือจากการอบ</u> 6. น้ำหนักสูญหายไปเมื่อให้ความร้อนไม่เกิน	%	0.8
7. เพนิเทรชัน ร้อยละของเพนิเทรชันเดิม ไม่น้อยกว่า	%	54
8. การยืดดึง (Ductility) ที่ 25 °C อัตราความเร็ว ของเครื่องดึง 5 cm./นาที ไม่น้อยกว่า	cm.	50

2.1.2 มวลรวม (Aggregate)

มวลรวมหรือวัสดุผสม (Aggregate) ประกอบไปด้วย กรวด ทราย หินเป็นส่วนผสมสำคัญของการผสมคอนกรีตหรือแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมวลรวมทำหน้าที่เป็นวัสดุรับแรงภายนอกมากระทำทั้งหมดนอกจากนี้ขนาดและลักษณะของหินยังมีผลต่อการรับแรงดัดนั้นเพื่อให้ได้คุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต ขึ้นอยู่กับการออกแบบของการคละกันของขนาดมวลรวม หากเลือกใช้มวลรวมที่เหมาะสมจะ สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้แต่ ยังต้องคงคุณภาพของตัวแอสฟัลต์คอนกรีต โดยจะสามารถแบ่งมวลรวมตามขนาดได้ 2 แบบ ได้แก่ มวลรวมหยาบ (Coarse

Aggregate) และมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) หากมวลรวมในส่วนที่ละเอียดไม่เพียงพอ สามารถเพิ่มวัสดุแทรก (Mineral Filler) และยังสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของตัวแอสฟัลต์คอนกรีตได้

2.1.2.1 มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

มวลรวมหยาบเป็นมวลรวมตามขนาดที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐานโดยจะมีขนาดตั้งแต่ 4.5 มิลลิเมตรขึ้นไป หรือเทียบกับตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ขึ้นไป จะต้องเป็นวัสดุที่มีมาตรฐาน

2.1.2.2 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

มวลรวมละเอียด เป็นมวลรวมที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แต่ต้องไม่น้อยกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือเมื่อเทียบกับตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 ขณะที่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร ส่วนใหญ่จะเป็นหินฝุ่น หรือทรายแม่น้ำ สามารถให้ใช้ได้ และต้องไม่มีสิ่งไม่พึงประสงค์ปะปนอยู่กับมวล

2.1.3 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

ในส่วนของการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับการศึกษาเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกราฟีนควอนตัมดอท อ้างอิงตามการออกแบบตามมาตรฐานที่ ทล. -ม. 408/2532 (DH. -S 408/2532) [2] แอสฟัลต์คอนกรีต

การออกแบบมวลรวมประกอบด้วยมวลหยาบและมวลละเอียดโดยมีขนาดคละของมวลรวมในแต่ละชั้น ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดคละของมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์

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

วัสดุผสมแทรก (Mineral Filler) ใช้ในกรณีเมื่อมวลหยาบกับมวลละเอียดผสมกันแล้ว มวลละเอียดยังไม่เพียงพอ โดยมีขนาดคละของวัสดุผสมแทรกดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ขนาดคละของวัสดุผสมแทรก

ขนาดตะแกรง(มิลลิเมตร)	ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล
0.600 #30	100
0.300 #50	75-100
0.075 #200	55-100

ข้อกำหนดในหารออกแบบของแอสฟัลต์คอนกรีตให้เป็นไปตามตารางที่ 2.4 และตารางค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

ชั้นทาง		Wearing Course		Binder Course	Base Course
ขนาดที่เรียกใช้	มิลลิเมตร	9.5	12.5	19	25
	(นิ้ว)	(3/8)	(1/2)	(3/4)	(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

หมายเหตุ

1. การทดลองเพื่อออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ให้ดำเนินการตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท 604/2517 “วิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธี Marshall” [3]
2. การออกแบบไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีตออกแบบตามกำหนดตารางที่ 2.5 ให้ใช้มวลรวมขนาด 12.5 มิลลิเมตร ยกเว้น กรณีที่แบบกำหนดให้ใช้ชั้นรองผิวทางเป็นไหล่ทางด้วย ให้ใช้ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตของชั้นรองผิวทาง เป็นข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตไหล่ทาง
3. การทดลองหาค่าร้อยละดัชนีความแข็งแรง ให้ใช้วิธี Ontario Vacuum Immersion Marshall Test หรือวิธีอื่นที่เทียบเท่าการทดลอง รายงานนี้กรมทางหลวงจะพิจารณาทำการทดลองตามความเหมาะสม

ตารางที่ 2.5 เกณฑ์ความคลื่อนที่ยอมรับสำหรับส่วนผสมเฉพาะงาน

วัสดุ	เปอร์เซ็นต์
1) มวลรวม	
1.1 ผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร (เบอร์ 8) และขนาดใหญ่กว่า	±5
1.2 ผ่านตะแกรงขนาด 1.18 มิลลิเมตร (เบอร์ 16) 0.600 มิลลิเมตร (เบอร์ 30) และ 0.300 มิลลิเมตร (เบอร์ 50)	±4
1.3 ผ่านตะแกรงขนาด 0.150 มิลลิเมตร (เบอร์ 100)	±3
1.4 ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200)	±2
2) แอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ	
2.1 ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ	±0.3

2.2 ดินขาวเผา (Calcined Kaolin, Metakaolin)

ดินขาวเผา (Calcined Kaolin) เป็นวัสดุที่ได้จากการนำดินขาวบริสุทธิ์ (Kaolinite) ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวประเภทหนึ่ง มาเผาด้วยอุณหภูมิสูง (ประมาณ 600–1000°C) เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากแบบเรียงตัวเป็นแบบไร้ภาพผลึก (amorphous structure) ซึ่งส่งผลให้เกิดคุณสมบัติใหม่ทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างจากดินขาวธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโพซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

วัสดุดินขาวเผาจึงได้รับความสนใจอย่างมากในงานวิศวกรรมโยธาและวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะในงานที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตมวลรวม แอสฟัลต์ หรือการเสริมสมบัติวัสดุ เนื่องจากสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็งแรง ความทนทาน และการต้านทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี

นอกจากนี้ กระบวนการผลิตดินขาวเผายังสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่หรือเซรามิกมาใช้ซ้ำ จึงช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดินขาวเผา

ดินขาวเผา เป็นวัสดุที่ได้จากการเผา Kaolinite ที่อุณหภูมิประมาณ 600–800°C ทำให้โครงสร้างผลึกของดินขาวเปลี่ยนเป็นแบบ Amorphous ซึ่งส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยา โพซโซลานิก ได้ดีมาก โดยปฏิกิริยานี้คือการที่ดินขาวเผาทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และน้ำ เพื่อสร้าง แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งช่วยเสริมความแข็งแรงและความทนทานในวัสดุก่อสร้าง เช่น ปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต [9-11]

โดยก่อนที่ดินขาวเผาจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาต่างๆ ได้มีงานวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติของดินขาวที่นำมาเผาด้วยอุณหภูมิต่างๆ Murat M. (1994), Badogiannis และคณะ (2004), Fernandez และคณะ (2011) ทำการศึกษา อิทธิพลของอุณหภูมิการเผาต่อโครงสร้างและความว่องไวของดินขาวเผา พบว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง ประมาณ 750–800°C จะได้วัสดุที่มีโครงสร้างไร้ภาพและมีค่าปฏิกิริยาโพซโซลานิกสูงสุด เนื่องจากการสลายตัวของโครงสร้างเคโอลิไนต์ที่สมบูรณ์ที่สุดในช่วงอุณหภูมินี้ [12-14] ทำให้มีนักวิจัยศึกษาคุณสมบัติของดินขาวเผาเมื่อนำมาปรับใช้กับอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล รวมถึงคุณสมบัติอื่นๆให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

Bai J. และคณะ (2003) Badogiannis และคณะ (2004) และ Li J. (2023) ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เมื่อถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการใส่ดินขาวเผา เพื่อศึกษาคุณสมบัติของปฏิกิริยาโพซโซลานิกที่เกิดขึ้นในดินขาวเผา ได้ผลการศึกษาว่า ดินขาวเผาสามารถเพิ่มกำลังอัดและกำลังอัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกล [15-17] นอกจากนี้ยังทำให้รูพรุนของคอนกรีตมีปริมาณที่ลดลง รวมถึงมีงานวิจัยที่ศึกษาปริมาณของดินขาวเผาที่เหมาะสมต่อการปรับใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในคอนกรีต เช่น Abdullah R. A. et al. (2023) ได้ทำการศึกษาการใช้ดินขาวเผา เป็นวัสดุเสริมในคอนกรีต โดยทดแทนปูนซีเมนต์ตั้งแต่ 5%–35% พบว่าที่อัตราส่วน 10%–15% ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด และยังช่วยลดการดูดซึมน้ำและการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีอีกด้วย [18]

จากงานวิจัยที่กล่าวมาทำให้ทราบถึงคุณสมบัติโพซโซลานิกในดินขาวเผา และประสิทธิภาพของดินขาวเผาที่สามารถนำมาปรับใช้ได้กับงานก่อสร้างประเภทคอนกรีต และยังคงมีการศึกษาในวัสดุดินขาวเผาอย่างต่อเนื่อง

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำดินขาวเผามาปรับใช้กับผิวทาง

การนำดินขาวเผามาปรับใช้กับงานผิวทางประเภทแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น มีการศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติ เนื่องจากการศึกษาความสามารถของดินขาวเผาเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต จึงเป็นที่น่าสนใจในการนำดินขาวเผามาพัฒนาร่วมกับโครงสร้างผิวทางประเภทแอสฟัลต์คอนกรีต โดยได้มีการยกตัวอย่าง งานวิจัยศึกษาการนำดินขาวเผากับงานผิวทางประเภทแอสฟัลต์คอนกรีตดังนี้

Marín-García และคณะ (2019) ได้ทำการเปรียบเทียบการใช้ฟิลเลอร์จาก ดินขาวเผา กับดินขาวที่ไม่ผ่านการเผา และฟิลเลอร์หินปูนในแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่าการใช้ดินขาวเผา ช่วยเพิ่มความเสถียรของมาร์แชลล์ (Marshall Stability) และความต้านทานต่อความชื้นของส่วนผสมได้อย่างมีนัยสำคัญ [19]

Ibrahim, H. A และคณะ (2019) ทดลองใช้ดินขาวเผาเป็น ฟิลเลอร์ในแอสฟัลต์คอนกรีต แทนหินปูนละเอียด พบว่าช่วยเพิ่มค่าความเสถียรของมาร์แชลล์ (Marshall Stability), ลดค่าการยุบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีต (Flow) และเพิ่มความต้านทานต่อความชื้นในสภาวะโหลดซ้ำ [20]

Chouksey, A. และคณะ (2024) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ ผงดินขาวเผา เป็นฟิลเลอร์ในแอสฟัลต์ผสมร้อน โดยแทนที่ฟิลเลอร์หินปูนในสัดส่วน 25%, 50%, 75%, และ 100% พบว่าการแทนที่ 50% ให้ผลดีที่สุดในการเพิ่มความเสถียรของมาร์แชลล์ และลดปริมาณยางมะตอยที่ต้องใช้ [21]

Hu, C และคณะ (2025) ศึกษาผลของการผสม ดินขาวเผา ในสัดส่วน 5%, 10%, 15%, และ 20% โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ซีเมนต์ พบว่าการเติมดินขาวเผา ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อ (rutting) ของแอสฟัลต์ นอกจากนี้ยังช่วยชะลอการเสื่อมสภาพจากออกซิเดชัน ทำให้แอสฟัลต์มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น [22]

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนของ การปรับปรุงคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยดินขาวเผา พบว่าอัตราส่วนของการเติม ดินขาวเผา (Metakaolin) ในแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการศึกษาในอดีตมักอยู่ในช่วง 5% ถึง 20% โดยมวลของแอสฟัลต์ซีเมนต์ หรือ ในสัดส่วนโดยมวลของปริมาณหินฝุ่น หรือ ฟิลเลอร์ ซึ่งช่วยเสริมคุณสมบัติเชิงกล เช่น ความเสถียรของมาร์แชลล์ ความต้านทานต่อความชื้น และแรงดึงทางอ้อม (ITS) ได้อย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ ได้มีการออกแบบเพื่อทดลอง ใช้อัตราส่วนดินขาวเผาที่น้อยกว่า งานวิจัยก่อนหน้า ทั้งนี้เพื่อลด ต้นทุนการผลิต และหลีกเลี่ยงการลงทุนเกินจำเป็นในภาคปฏิบัติ โดยเน้นให้การเติมดินขาวเผายังคงสามารถส่งผลต่อ คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำยางแอสฟัลต์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ทำให้ ปริมาณรูพรุน (Air Voids) ของแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มขึ้นจนส่งผลเสียต่อความหนาแน่นและอายุการใช้งานของโครงสร้างทาง

การกำหนดอัตราส่วนที่เหมาะสมจึงเป็นการ สมดุลระหว่างสมรรถนะทางวิศวกรรมกับความคุ้มค่า และความเหมาะสมของประเภทและปริมาณของมวลรวม รวมถึงชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ของแต่ละประเทศ

2.3 กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (Supra Graphene Quantum Dots, SGQDS)

กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (Supra Graphene Quantum Dots, SGQDS) เป็นวัสดุที่เพิ่งเริ่มมีการศึกษา และสังเคราะห์ได้จากคาร์บอนประเภทต่างๆ ซึ่งโดยมีพื้นฐานทางโครงสร้างมาจาก กราฟีน (Graphene) ที่ได้รับความสนใจและนำมาศึกษา ในวงการวิทยาศาสตร์วิจัย เพราะมีคุณสมบัติที่น่าสนใจและมีความสำคัญในหลายด้านของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีคุณสมบัติที่น่าสนใจในด้านต่างๆ โดยการวิจัยและพัฒนาในด้านควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้างยังอยู่ในระหว่างการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้เข้าใจและใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติของกราฟีนควอนตัมดอทอย่างเต็มที่ได้ในอุตสาหกรรมและงานวิจัยต่าง ๆ ในอนาคต

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง

กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง เป็นวัสดุขนาดนาโน มีขนาดในระดับ นาโนเมตรซึ่งมีคุณสมบัติที่น่าสนใจและความสามารถในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านความแข็งแรง การนำไฟฟ้า แสง เป็นต้น [23] ทำให้เป็นที่สนใจของนักวิจัยในการพัฒนาตัวกราฟีนควอนตัมดอทและวัสดุขนาดนาโน [24]

โดยกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง มีที่มาจากการเริ่มศึกษาคาร์บอนเมื่อกลางศตวรรษที่ 19 เนื่องจากวัสดุประเภทคาร์บอนมีความสำคัญต่อการเติบโตของอุตสาหกรรมต่างๆ และมีการเริ่มศึกษาจากการสังเคราะห์กราฟไฟท์ออกไซด์ในด้านคุณสมบัติทางโครงสร้างและการนำไฟฟ้า [25] และได้มีการศึกษาค้นคว้าในเรื่องคาร์บอนรวมไปถึงการค้นพบภาพทรงต่างๆ ของคาร์บอน เช่น Smalley (1985) ค้นพบภาพทรงของพันธะแบบทรงกลม หรือ Iijima (1991) ค้นพบท่อนาโนคาร์บอน [26] และค้นพบตามมามากมาย

จนถึงปี 2008 มีการค้นพบ กราฟีนควอนตัมดอท ที่อยู่ในประเภทคาร์บอนนาโนอัลโลโทรป [27] โดยมีการสกัดกราฟีนควอนตัมดอทออกมาจาก แกรไฟต์ หรือ คาร์บอนไฟเบอร์ [28,29] ทำให้กราฟีนควอนตัมดอท มีคุณสมบัติที่ดีกว่าเนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดมาก และมีการกระจายตัวสูง หลังจากนั้นนักวิจัยได้มีการพัฒนาตัวกราฟีนควอนตัมดอทไปในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การนำไปพัฒนาในเรื่องของการนำไฟฟ้า [30-32] การนำไปพัฒนาทางด้านการแพทย์โดยการใส่ตัวยาเข้าไปเพื่อช่วยในเรื่องของการรักษามะเร็ง [33] และการพัฒนาทางด้านการสังเคราะห์ตัวกราฟีนควอนตัมดอทและการใช้งานในด้าน การเรืองแสง [34]

การพัฒนาเข้าสู่อุตสาหกรรมการก่อสร้าง ตั้งแต่พันธะกราฟีน ที่ได้มีการพัฒนาปรับปรุงใส่กับการผสมคอนกรีต เพื่อช่วยในด้านกำลัง [35] หรือพันธะกราฟีนออกไซด์ ที่มีการศึกษาในด้านของคุณสมบัติเชิงกล รวมไปถึงคุณสมบัติอื่นๆ [36] จนมาถึงพันธะกราฟีนควอนตัมดอทและ

ซูปรากรราฟีนควอนตัมดอท ที่ได้มีการศึกษากับตัวซีเมนต์และคอนกรีตคอมโพสิต ในด้านคุณสมบัติเชิงกล เชิงเคมี และการนำไฟฟ้า [37-39]

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกรราฟีนควอนตัมดอทมาปรับใช้กับผิวทาง

การนำกรราฟีนควอนตัมดอทมาปรับใช้กับงานผิวทางประเภทแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น มีการปรับปรุงคุณภาพมาโดยตลอด ตั้งแต่การปรับปรุงคุณภาพน้ำยางจนถึงการซ่อมแซมงานผิวทาง เนื่องจากพันธะกรราฟีน เป็นพันธะที่มีความแข็งแรง เมื่อนำมาปรับปรุงร่วมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้เพิ่มคุณสมบัติในด้านต่างๆได้เป็นอย่างดี [47,48]

ในช่วงเวลาที่มีการศึกษาคาร์บอน และได้มีการนำไปพัฒนาในหลากหลายอุตสาหกรรม จนมาถึงประเภทงานแอสฟัลต์คอนกรีต ได้มี Liu, X และ Wu, S (2011) ที่ได้มีการนำตัวคาร์บอนไฟเบอร์ และ กราไฟต์ มาเป็นวัสดุผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และ การนำไฟฟ้า โดยสรุปได้ว่า คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น [40] และศึกษาเกี่ยวกับนำ ท่อนาโนคาร์บอนมาปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีตในด้านคุณสมบัติเชิงกลและเรื่องความเสถียรของอุณหภูมิก็ได้ผลสรุปออกมาว่า สามารถเพิ่มความแข็งแรงและช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความเสถียรของอุณหภูมิได้ดีขึ้น [41,42]

Bissada และคณะ (2016) [46] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้ได้ทราบถึง องค์ประกอบทางเคมีของแอสฟัลต์ซีเมนต์ Shishehbor และคณะ [49] จึงได้นำไปศึกษาต่อในเรื่องของการปรับปรุงทำให้ได้ทราบว่า การปรับปรุงคุณภาพของตัวแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น พันธะประเภทกรราฟีนควรถูกนำไปปรับปรุงในด้านของแอสฟัลต์ซีเมนต์มากกว่าการนำมาปรับปรุงร่วมกับมวลรวม เนื่องจาก องค์ประกอบทางเคมีของแอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่ามวลรวม

การปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตในเรื่องสารผสมเพิ่มมีมาอย่างต่อเนื่อง เช่น การปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ด้วยการใส่โพลีเมอร์ และได้รับผลการทดสอบด้านคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเป็นอย่างมาก [43-45] ทำให้มีงานวิจัยในเรื่อง การใส่สารผสมเพิ่มประเภทโพลีเมอร์มาทดสอบร่วมกับคาร์บอน ในงานวิจัยของ Zhao, P และคณะ [50] ได้มีการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใส่คาร์บอนควอนตัมดอทเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใส่สารผสมเพิ่มประเภทโพลีเมอร์และคาร์บอนควอนตัมดอท ได้ข้อสรุปออกมาว่า การใส่พันธะของคาร์บอนลงไปด้วยกับสารผสมเพิ่มประเภทโพลีเมอร์จะยิ่งช่วยเพิ่มสมรรถภาพทางการใช้งานได้ดียิ่งขึ้น และลดการแตกร้าวเนื่องจากถูกน้ำหนักกระทำได้ดีมากกว่าการใส่สารผสมเพิ่มประเภทโพลีเมอร์เพียงอย่างเดียว

การนำพันธะของคาร์บอนในภาพแบบต่างๆมาทำการศึกษาร่วมกับสารผสมเพิ่มประเภทโพลีเมอร์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตมีอีกหลายงานวิจัย เช่น

Lin และคณะ (2019) [51] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วย กราฟีนออกไซด์ และผงยาง เพื่อเทียบเคียงกับสารผสมเพิ่มประเภทโพลีเมอร์ นอกจากนี้จะเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของผิวทางเพื่อรองรับการจราจรที่หนาแน่นมากขึ้นแล้ว ยังเพิ่มความสามารถทางด้านอุณหภูมิ สำหรับพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันมากของอุณหภูมิในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

Yoo และคณะ ในปี 2019 [52] ได้ทำการศึกษาในด้านคุณสมบัติเชิงกลและการรักษาตัวเองของแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยการใส่ เส้นใยคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอนและเส้นใยแกรไฟต์ สรุปได้ว่า การเพิ่มพันธะคาร์บอนนั้นสามารถเพิ่มความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึงทางอ้อม และลดความพรุนของแอสฟัลต์คอนกรีตได้เป็นอย่างดี และแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุคาร์บอนผสมอยู่ด้วย จะมีความสามารถในการรักษาตัวเองได้ดีมากกว่าเดิม 40%

Lu และคณะในปี 2022 [53] ทำการศึกษาการใส่สารผสมเพิ่มประเภทโพลีเมอร์ร่วมกับกราฟีนควอนตัมดอท และเนื่องจากการนำกราฟีนควอนตัมดอทมาใช้ในงานแอสฟัลต์เป็นงานแรกๆ ทางผู้วิจัยจึงได้ใส่ส่วนผสมในอัตราส่วนที่เท่ากัน (ร้อยละ 5 ของน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์) เพื่อเป็นการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต ได้ผลสรุปว่า การใส่กราฟีนควอนตัมดอทและสารผสมเพิ่มประเภทโพลีเมอร์สามารถเพิ่มความต้านทานความเสียหายถาวรได้ดีขึ้น และสรุปเพิ่มอีกว่า เมื่อใส่ส่วนผสมประเภทกราฟีนที่มีขนาดเล็กลงเพื่อปรับปรุงคุณภาพ จะยิ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการเพิ่มมุมเสียดทานภายในทำให้มีความต้านทานแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ในปี 2023 Wang, และคณะ [54] ได้ทำการศึกษาเรื่องคุณสมบัติของ กราฟีนต่อการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ และได้ผลการทดสอบว่า พันธะของ กราฟีนจะช่วยในเรื่องความเสถียรภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในเรื่องของการยึดเกาะ รวมไปถึงอุณหภูมิด้วย ยิ่งเป็นการตอกย้ำความสามารถของพันธะกราฟีน ในการนำมาพัฒนาปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีต

และวิจัยล่าสุดในเรื่องการปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยพันธะกราฟีนของ Sengottuvelul4kr และคณะ ในปี 2024 [55] ทำการศึกษา กราฟีนออกไซด์ที่ถูกนำมาปรับปรุงในแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพื่อหา อัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสม เพื่อให้ได้คุณภาพและคุณสมบัติที่ดีที่สุด ได้ผลการทดลองว่า การใส่ กราฟีนออกไซด์ ที่ร้อยละ 2 ของน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเสียดทานของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ดีที่สุด

จากงานวิจัยที่กล่าวมาแสดงถึงความสนใจของนักวิจัยที่ยังคงมีการศึกษา กราฟีน มาอย่างต่อเนื่อง ทำให้เป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

2.4 การศึกษาดินขาวเผาพร้อมกับกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง

การศึกษาดินขาวเผาพร้อมกับกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้างเพื่อเป็นแนวทาง และความเป็นไปได้ในการนำดินขาวเผา มาศึกษา ร่วมกับ กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง ในงานวิจัยนี้ โดยได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Long, Liu และ He (2023) [56] ได้เสนอวิธีการกระจายตัวของดินขาวเผา (Metakaolin) โดยใช้นวัตกรรม Graphene Quantum Dots (GQDs) ร่วมกับคลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic dispersion) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการเสริมสมรรถนะของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติม GQDs ช่วยลดการรวมตัวเป็นกลุ่ม (agglomeration) ของอนุภาคดินขาวเผา ทำให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น ส่งผลให้กระบวนการไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเมื่อเติมดินขาวเผาที่ผ่านการปรับปรุงด้วย GQDs ในปริมาณเพียง 1.0% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วันเพิ่มขึ้นถึง 31.03% เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการใช้ GQDs เป็นตัวช่วยกระจายวัสดุเสริมแร่ที่มีต้นทุนต่ำ เพื่อพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพสูงในอนาคต

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าการใช้ดินขาวเผา (Metakaolin: MK) ร่วมกับกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (Supra Graphene Quantum Dots : SGQDS) ผ่านกระบวนการกระจายตัวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Dispersion) สามารถช่วยให้อนุภาค MK กระจายตัวได้ดีขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ เพิ่มความสม่ำเสมอในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุและส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล เช่น กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่น ด้วยแนวคิดนี้ จึงเกิดการประยุกต์ใช้วัสดุทั้งสองชนิดในภาพแบบ ผงละเอียด โดยตรงในกระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมร้อน (Hot Mix Asphalt: HMA) ซึ่งมีสถานะความร้อนและแรงกวนสูงอย่างต่อเนื่อง อันอาจส่งผลคล้ายคลึงกับกระบวนการ ultrasonic ช่วยให้ SGQDS ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยกระจายอนุภาคแร่ (nano-dispersing aid) ได้ในระดับหนึ่ง ทั้งนี้คาดว่า การผสม SGQDS ร่วมกับ MK จะช่วยลดปัญหาการรวมกลุ่มของอนุภาคดินขาวเผา เพิ่มปฏิสัมพันธ์กับยางแอสฟัลต์ และส่งผลต่อสมรรถนะของ HMA ทั้งด้านความแข็งแรง และความทนทานต่อการเสียดสีการเสียดสี

ในปัจจุบัน ยังไม่มีรายงานวิจัยที่ศึกษาการใช้ SGQDS ร่วมกับ MK ในงานแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมร้อน อย่างเป็นระบบ ทำให้การศึกษานี้มีความสำคัญต่อการพัฒนาวัสดุก่อสร้างยุคใหม่ โดยเฉพาะในบริบทของวัสดุเสริมสมรรถนะระดับนาโน (nano-modifiers) ที่สามารถช่วยยืดอายุการใช้งานโครงสร้างถนน และลดผลกระทบต่อด้านต้นทุนและสิ่งแวดล้อมในระยะยาว งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางใหม่ที่ผสานวัสดุสองชนิดที่มีศักยภาพสูงไว้ด้วยกัน เพื่อการพัฒนาส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีประสิทธิภาพสูงในอนาคต

2.5 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

ในการศึกษานี้ มีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานแอสฟัลต์ซีเมนต์และแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อประเมินสมรรถนะของส่วนผสมทั้งในด้านความแข็งแรง การเสียวภาพ และเสถียรภาพภายใต้สภาวะใช้งานจริง การทดสอบแต่ละประเภทที่กำหนดมา มีมาตรฐานสากลและกรรมทางหลวง ซึ่งสามารถสะท้อนถึงพฤติกรรมของวัสดุได้ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว โดยมีการทดสอบดังนี้

2.5.1 การทดสอบมาร์แชลล์ (Marshall Test)

การทดสอบมาร์แชลล์เป็นวิธีการประเมินสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตภายใต้แรงกด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความมั่นคง (Marshall Stability) และค่าการยุบตัว (Flow Value) ของตัวอย่างที่ผ่านการกดทดสอบภายใต้อุณหภูมิประมาณ 60°C ตามมาตรฐาน ASTM D1559 และ ทล.-ท. 604/2517 [3] ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะถูกเตรียมในแม่พิมพ์ทรงกระบอก และทดสอบโดยการกดลงด้วยแรงแนวตั้งจนเกิดการเสียวภาพ ค่าความมั่นคงที่วัดได้เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการต้านทานแรงกด ในขณะที่ค่าการยุบตัวแสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนภาพก่อนวิกฤต ผลลัพธ์ทั้งสองค่ามีความสำคัญในการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างถนน และการปรับส่วนผสมให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง

2.5.2 การทดสอบโมดูลัสความแข็งแบบแรงดึงทางอ้อม (ITSM)

การทดสอบ Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) เป็นการประเมินความแข็งหรือความต้านทานต่อการเสียวภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้การกระทำแรงดึงแบบไม่ตรงแกน (indirect tensile load) บนตัวอย่างทรงกระบอกในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิ โดยทั่วไปอยู่ที่ 20°C หรือ 25°C ตามมาตรฐาน BS EN 12697-26 (Annex C) หรือ ASTM D4123 [4] ค่าที่ได้เรียกว่า Stiffness Modulus มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (MPa) แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเปลี่ยนภาพถาวร และความสามารถในการคืนตัวหลังรับแรงซ้ำ เหมาะสำหรับวิเคราะห์ความคงตัวของถนนภายใต้โหลดจราจรระยะยาว

2.5.3 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ (Penetration Test)

Penetration Test เป็นการทดสอบมาตรฐานที่ใช้วัดระดับความแข็งหรือความนุ่มของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยใช้เข็มปลายมนกดลงบนผิวของแอสฟัลต์ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C และ

น้ำหนักคงที่ภายในเวลา 5 วินาที ตามมาตรฐาน ASTM D5 [5] ระยะการจุ่มของเข็มที่วัดได้ในหน่วย 0.1 มิลลิเมตร (dmm) จะบ่งบอกความแข็งของวัสดุ แอสฟัลต์ที่มีค่า Penetration ต่ำแสดงว่าแข็ง ในขณะที่ค่าสูงแสดงถึงความนุ่ม ค่านี้มีความสำคัญในการกำหนดช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานของวัสดุ โดยเฉพาะในสภาพอากาศที่ต่างกัน

2.5.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test)

การทดสอบความสามารถในการยืดตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำเพื่อวัดระยะที่วัสดุสามารถยืดออกได้ก่อนจะขาด โดยใช้ตัวอย่างในภาพแบบมาตรฐานภายใต้อุณหภูมิ 25°C และดึงด้วยความเร็วคงที่ 5 ซม./นาที ตามมาตรฐาน ASTM D113 [6] ค่าความเหนียวมีหน่วยเป็นเซนติเมตร (cm) เป็นตัวชี้วัดความสามารถของวัสดุในการดูดซับแรงดึงหรือการขยายตัวโดยไม่แตกร้าว ทดสอบนี้มีความสำคัญต่อการประเมินความทนทานของวัสดุภายใต้แรงภายนอก เช่น การหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิหรือรอยร้าวจากแรงล้า

2.5.5 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point – Open Cup)

Flash Point เป็นการวัดอุณหภูมิที่ไอของวัสดุแอสฟัลต์เริ่มติดไฟเมื่อสัมผัสกับเปลวไฟในภาชนะเปิด ตามมาตรฐาน ASTM D92 [7] จุดวาบไฟแสดงถึงระดับความปลอดภัยในการใช้งานและการเก็บรักษาแอสฟัลต์ โดยวัสดุที่มี Flash Point สูงจะปลอดภัยกว่าระหว่างการขนส่งและผสมในโรงงานผสมร้อน ค่าที่วัดได้จะมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C) และนิยมใช้เป็นตัวชี้วัดความเสี่ยงในการเกิดเพลิงไหม้ในกระบวนการผลิต

2.5.6 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating)

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการสูญเสียองค์ประกอบเบา เช่น น้ำมันหรือของเหลวในแอสฟัลต์ซีเมนต์หลังจากได้รับความร้อนในเตาอบตามมาตรฐาน ASTM D6 หรือ D1754 [8] ตัวอย่างแอสฟัลต์จะถูกให้ความร้อนภายใต้อุณหภูมิและระยะเวลาที่ควบคุม ค่าที่ได้คือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลงจากเดิม ไขว้เคราะห์ความทนทานของแอสฟัลต์ต่อสภาวะอุณหภูมิสูง เช่น ระหว่างการผลิตและการใช้งานจริง ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดความเปราะของวัสดุ

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

จากการศึกษาเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาและกราไฟนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง โดยมีวิธีการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาและกราไฟนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้างมีวัสดุที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

3.1.1 มวลรวม (Aggregate)

วัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย หินหยาบ, หินละเอียด และ วัสดุเติม (Filler) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวัสดุทั้งหมดผ่านการตรวจสอบคุณสมบัติตามมาตรฐานของ กรมทางหลวง ทล.-ม.408/2532 (DH-S 408/2532) "ข้อกำหนดของแอสฟัลต์คอนกรีต" และได้ออกแบบส่วนผสมวัสดุมวลรวมดำเนินการตามมาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ม.408/2532)



ภาพที่ 3.1 มวลรวม (Aggregate)
(โรงโม่หิน ไทยสเลอรี่ วังน้อย จ.พระนครศรีอยุธยา)

3.1.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70

แอสฟัลต์ซีเมนต์จากบริษัททีปโก้แอสฟัลต์จำกัด (มหาชน) ประเภท AC60/70 ที่ได้มาตรฐานตามมาตรฐานข้อกำหนดที่ ทล. -ก.401/2531 โดยมีค่าคุณสมบัติมาตรฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 (บริษัททีปโก้แอสฟัลต์)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติมาตรฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์

Test	Unit	Method	Specification	Result
Penetration at 25c, load 100 g., 5 s	-	ASTM D5	60-70	64
Softening Point	c	ASTM D36	45-55	47.4
Ductility at 25c, Speed 5 cm/min	cm	ASTM D113	100	150+
Flash Point Cleveland Open Cup	c	ASTM D92	232	338
Solubility in Trichloroethylene	%wt	ASTM D2042	99	99.97
Density 15c	g/cm ³	ASTM D70	Report	1.0579
Dynamic shear, G*/Sind 64c	kPa	AASHTO T315	1	1.17
Weight loss on heating	%wt	ASTM D1754	<0.8	-0.02

3.1.3 ดินขาวเผา (Metakaolin)

ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ ดินขาวเผา (Metakaolin) ที่ได้จากการนำ ดินขาว (Kaolin) ซึ่งเป็นแร่ลูมิโนซิลิเกตธรรมชาติ มาผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 650–800°C ซึ่งมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมี โดยเฉพาะ ปฏิกิริยาโพซโซลานิก กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ดินขาวเผาที่ใช้ในการวิจัยนี้มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวนวล มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมครอน (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มากกว่า 90%) มีองค์ประกอบทางเคมีหลัก ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2), อะลูมินา (Al_2O_3) และมีปริมาณเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ต่ำ ซึ่งส่งผลให้มีความบริสุทธิ์และความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโพซโซลานิกสูง



ภาพที่ 3.3 ดินขาวเผา

3.1.4 กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (Supra Graphene Quantum Dots, SGQDs)

กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (Supra Graphene Quantum Dots) ที่ใช้การศึกษานี้ ซึ่งได้มาจากกระบวนการ สกัดและแยกคาร์บอนระดับนาโน ที่เกิดจากการเผาวัสดุชีวมวลหรือวัสดุคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาวะควบคุม ซึ่งทำให้เกิด โครงสร้างผลึกของคาร์บอนที่มีความเสถียรสูงในระดับนาโน โดยเฉพาะในภาพของ แผ่นเกล็ดกราฟีนขนาดเล็ก (Quantum-scaled graphene flakes) มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีดำมันวาว และมีลักษณะคล้ายเกล็ดเล็กหนึ่งในคุณสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุนี้คือ ความสามารถในการกระจายตัวได้เองเมื่อได้รับความร้อน โดยเฉพาะในสภาวะของการผสมวัสดุแบบร้อน (Hot Mix) ซึ่งแรงกวนและอุณหภูมิสูงจะช่วยให้โครงสร้าง SGQDs แทรกซึมและกระจายตัวภายในเนื้อวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 3.4 กราฟีนคovanค้ดตอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (SGQDs)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการผสมตัวอย่าง

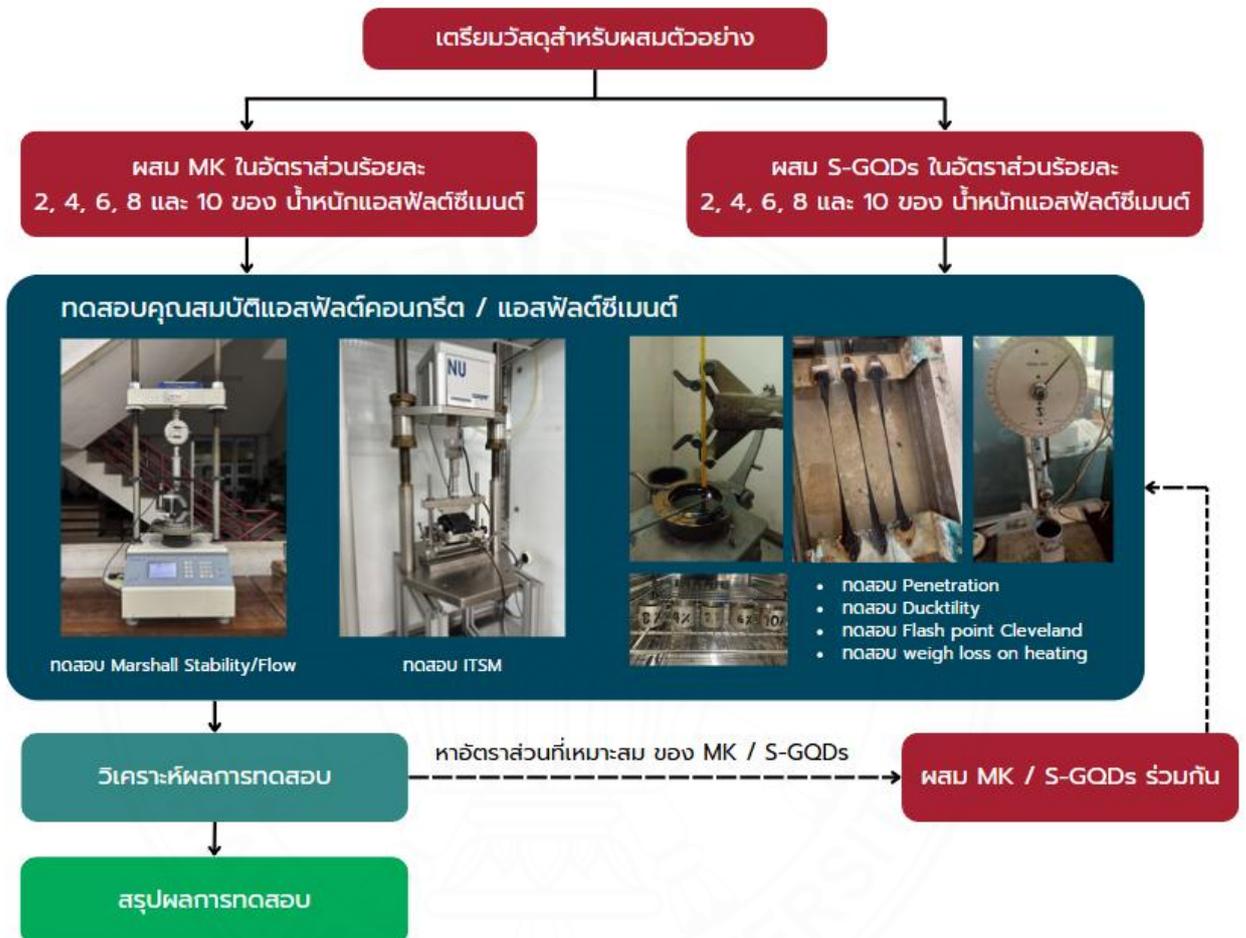
- 3.2.1 เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง
- 3.2.2 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน
- 3.2.3 ตะแกรงร่อนเบอร์ 200 ถึง เบอร์ 1/2
- 3.2.4 อุปกรณ์ให้ความร้อน
- 3.2.5 กระทะและอุปกรณ์ผสม
- 3.2.6 ค้อนสำหรับบดอัด
- 3.2.7 เครื่องบดอัดแอสฟัลต์คอนกรีต Marshall
- 3.2.8 โมลด์สำหรับแอสฟัลต์ผสมร้อน
- 3.2.8 หม้อให้ความร้อนสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต
- 3.2.9 เครื่องดันตัวอย่างแอสฟัลต์

3.3 สถานที่ในการทดสอบ

- อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
- อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
- ศูนย์ทดสอบ บริษัททีบีโก้แอสฟัลต์ จำกัด (มหาชน) พระประแดง สมุทรปราการ

3.4 ขั้นตอนการทดสอบ

ในการศึกษางานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบขั้นตอนการทดสอบของงานวิจัยไว้ดังนี้



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการทดสอบ

3.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและทดสอบตัวอย่าง

ในขั้นตอนการดำเนินการทดสอบจะแบ่งเป็น 6 การทดสอบและมีขั้นตอนการผสมตัวอย่าง และทดสอบดังนี้

3.5.1 การทดลองคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธี Marshall

ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ท. 604/2517 (DH-T 604/2517 , ASTM. D-1559) “วิธีการทดลองแอสฟัลต์ติกคอนกรีต โดยวิธี Marshall”

1. ทำการออกแบบมวลรวมและแอสฟัลต์ โดยทดสอบมวลรวมตามวิธีการทดสอบ ดังต่อไปนี้

- ทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง ตามมาตรฐานการทดลอง ทล.-ท. 204/2516
- ทดลองหาเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ตามมาตรฐานการทดลอง ทล.-ท. 205/2517
- ทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ ตามมาตรฐานการทดลอง ทล.-ท. 207/2517
- ทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดละเอียด ตามมาตรฐานการทดลอง ทล.-ท. 208/2518

ทำการออกแบบอัตราส่วนผสมมวลรวมตามตารางที่ 2.2 และซึ่งปริมาณมวลรวมให้ได้ 1,150 กรัม และแอสฟัลต์ซีเมนต์กำหนดที่ ร้อยละ 5

2. ผสมมวลรวมและแอสฟัลต์แล้วนำไปอัดด้วยจำนวนครั้งและอุณหภูมิที่กำหนดตามตารางที่ 2.4 โดยในการทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธี Marshall จะทำการเตรียม 5 ตัวอย่างต่อสูตรอัตราส่วนผสมแล้วนำมาเฉลี่ยค่าทดสอบ

- MK อัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์
- SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์
- MK และ SGQDs ในอัตราส่วนที่ออกวิเคราะห์และออกแบบหลังจากทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสม MK และ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสม SGQDs

3. พักแอสฟัลต์คอนกรีตไว้ใน Mold จนอุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส จึงนำตัวอย่างออกจากแบบ โดยใช้เครื่องดันตัวอย่าง



ภาพที่ 3.6 ตัวอย่างทดสอบที่นำออกจากแบบ

4. ทำการทดลองหาความแน่นของตัวอย่างโดย
 - ก. นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักในอากาศ (d)
 - ข. นำตัวอย่างไปแช่น้ำในธรรมดาประมาณ 5 นาที แล้วนำตัวอย่างขึ้น เช็ดตัวอย่างให้แห้ง ชั่งน้ำหนักในอากาศ (d_1)
 - ค. นำตัวอย่างภาชนะ ข. ไปชั่งน้ำหนักในน้ำ (e)
5. การทดสอบหาค่า Stability และ Flow
 - ก. นำตัวอย่างที่เสร็จจากการทดสอบข้อ 4 แล้วไปแช่น้ำที่มีอุณหภูมิ $60 \pm 1^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ไม่น้อยกว่านั้น
 - ข. เมื่อนำตัวอย่างจากน้ำออกมายังภาชนะจากข้อดังกล่าวนี้ เช็ดให้ตัวอย่างแห้งแล้วนำไปใส่ในแบบทดสอบ Stability เพื่อไปหาค่า Stability และ Flow
 - ค. นำแบบทดสอบ Stability ที่ใส่ตัวอย่าง ไปวางบนเครื่องทดสอบ Marshall ให้แบบทดสอบ Stability อยู่ตรงกับ axis ซึ่งมีลักษณะเป็น proving ring สำหรับวัดน้ำหนักกด
 - ง. เดินเครื่องให้แบบทดสอบ Stability เคลื่อนไปสัมพันธ์กับแท่นกดจนกระทั่งเข็มของ dial gauge ที่ติดกับ proving ring ชยับๆ หยุดเข็มตรงค่าการรับแรงของ dial gauge ที่แสดงค่ามากที่สุดที่เข็มแสดงค่าไว้
 - จ. เมื่อเครื่องวัด Flow ไปจนกระทั่งเข็มของ dial gauge ซึ่งติดกับแบบทดสอบ Stability ชยับ เข็มของเครื่องวัด Flow ให้อยู่ที่ศูนย์ 0 ใช้มือบันทึกตัวเลขของ Flow ให้แม่นยำทันที

- ฉ. เดินเครื่องให้ค่าที่ผลของการทดสอบค่า Stability โดยอ่านค่าที่น้ำหนักรสูงสุด จาก Proving ring เป็นค่าที่ค่าได้ (measured) ซึ่งต้องเปลี่ยนเป็น (adjust) สำหรับค่านี้ด้วยการคูณด้วย 6.35 เซนติเมตร (2.5 นิ้ว)
- ช. ขณะที่ทำการทดสอบหาค่า Stability เข้ม Dial gauge ของเครื่องวัด Flow จะแสดงที่ ค่าค่า Flow จาก Dial gauge ที่อ่านค่าสูงสุด



ภาพที่ 3.7 การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall

6. การคำนวณคำนวณหาค่า Bulk Specific gravity, V.M.A. (Voids in mineral aggregate) Air Void และ V.F.B. (Voids filled with bitumen) ดังนี้
- คำนวณหา Effective asphalt cement by weight of mix (b)

$$b_1 = b - \frac{x(100-b)}{100} \quad (3.1)$$

b = % asphalt cement by weight of mix

x = asphalt lost by absorption

- คำนวณหา Bulk Specific Gravity of Specimen (g)

$$g = \frac{d}{d - e} \quad (3.2)$$

d = weight of specimen in air (gm)

d_1 = weight of specimen at saturated surface dry condition (gm.)

e = weight of saturated Specimen immersed in water

- คำนวณหา Percent total volume of effective asphalt cement ในตัวอย่างที่บดทับแล้ว (i)

$$i = \frac{b_1 g}{G_{ag}} \quad (3.3)$$

G_{ag} = Bulk Specific Gravity of Asphalt Cement

- คำนวณหา Percent total volume of aggregate ในตัวอย่างที่บดทับแล้ว (j)

$$j = \frac{(100 - b)}{G_{ac}} \quad (3.4)$$

G_{ac} = Bulk Specific Gravity of Blended Agg.

- คำนวณหา Percent Air voids ในตัวอย่างที่บดทับแล้ว

$$\text{Air Voids} = 100 - i - j \quad (3.5)$$

- คำนวณหา V.M.A (Voids in mineral aggregate)

$$\text{V.M.A.} = 100 - j \quad (3.6)$$

- คำนวณหา V.F.B. (Voids filled with bitumen)

$$V.F.B. = 100 \frac{i}{j} \quad (3.7)$$

3.5.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคั้นตัว (Indirect Tensile Stiffness Modulus : ITSM)

การทดสอบหาค่าโมดูลัสคั้นตัว (Indirect Tensile Stiffness Modulus : ITSM) มาตรฐานการทดสอบที่ ASTM D4123 “Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures” ในห้องทดสอบที่ศูนย์ทดสอบ บริษัททีปโก้ แอสฟัลต์ จำกัด (มหาชน) พระประแดง



ภาพที่ 3.8 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคั้นตัว

1. ใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับ การเตรียมตัวอย่างทดสอบ Marshall ในหัวข้อ 3.6.1 (ข้อ 1 -3)
2. นำก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบไปอบที่อุณหภูมิที่กำหนดไว้ (15, 20 , 30, 40)

3. วัดค่าความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง บันทึกค่าที่ใช้แล้วเปิดเครื่อง ทดสอบ
4. วางก้อนตัวอย่างลงบนแกนของเครื่องให้อยู่กึ่งกลางแกน ขยับก้านปลาให้สัมผัสกับก้อน ตัวอย่างแล้วล็อคเพื่อให้ก้อนตัวอย่างอยู่กับที่
5. ใส่และปรับอุปกรณ์ไอโซมิเตอร์ ให้สัมผัสกับก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์ แล้วนำอุปกรณ์เข้าไป วางบนเครื่องทดสอบโดยให้อุปกรณ์ตรงกับเครื่องมือทดสอบ
6. อ่านค่าที่ได้จากโปรแกรมทดสอบ

3.5.3 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ (Penetration Test)

การทดสอบค่าการเจาะทะลุของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Penetration) ทดสอบตามมาตรฐาน ทล.-ท. 403/2518 ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T46 โดยใช้เข็มมาตรฐานกดลงบนผิวหน้าของตัวอย่างในลักษณะอิสระภายใต้แรงและน้ำหนักที่กำหนด เป็นเวลา 5 วินาที ที่อุณหภูมิห้องควบคุม 25°C การทดสอบทำจำนวน 3 ครั้ง โดยให้ตำแหน่งที่กดแต่ละครั้งอยู่ห่างจากขอบภาชนะไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากความไม่สม่ำเสมอของขอบตัวอย่าง ค่าที่ได้จะแสดงเป็นระยะการเจาะลึกของ ซึ่งจะแสดงถึงความอ่อนหรือแข็งของแอสฟัลต์ซีเมนต์นั้น



ภาพที่ 3.9 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุ

3.5.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test)

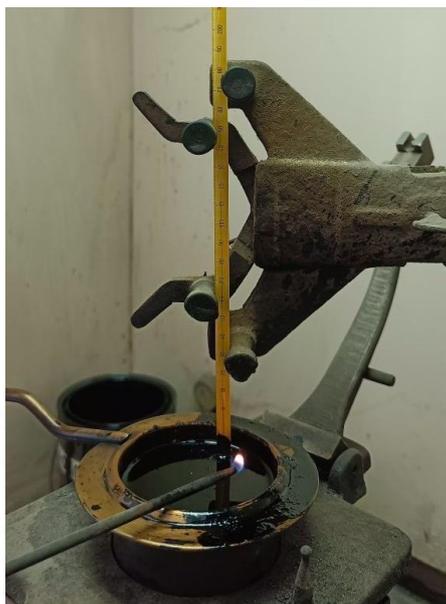
การทดสอบความสามารถในการยืดตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทดสอบตามมาตรฐาน ทล.-ท. 405/2519 ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T51 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวัดระยะทางที่วัสดุสามารถยืดออกได้ก่อนที่ตัวอย่างจะขาดจากกัน ตัวอย่างแอสฟัลต์จะถูกหล่อในแม่พิมพ์ที่กำหนด และทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิที่ควบคุมไว้ที่ 25°C จากนั้นจึงทำการดึงตัวอย่างออกด้วยความเร็วคงที่ 5 เซนติเมตรต่ออนาที จนวัสดุขาดออกจากกัน ระยะทางที่วัสดุสามารถยืดได้ก่อนขาดจะถูกบันทึกเป็นค่าความสามารถในการยืดตัว หรือ Ductility ซึ่งมีหน่วยเป็นเซนติเมตร (cm) โดยค่านี้ยิ่งสูง ยิ่งแสดงถึงความเหนียวและความสามารถในการต้านทานรอยร้าวของวัสดุได้ดีมากขึ้น



ภาพที่ 3.10 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว

3.5.5 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point – Open Cup)

การทดสอบจุดวาบไฟของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในครั้งนี้ ทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 406/2519 ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T-48 หรือ ASTM D92 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่แอสฟัลต์ซีเมนต์เริ่มระเหยจนสามารถติดไฟได้เมื่อสัมผัสกับเปลวไฟในภาชนะเปิด การทดสอบใช้ภาชนะ Cleveland Open Cup โดยให้ความร้อนกับตัวอย่างด้วยอัตราคงที่ตามที่กำหนด และทำการจุดเปลวไฟทดสอบที่บริเวณผิวของตัวอย่างเป็นระยะเพื่อสังเกตการติดไฟ เมื่อแอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถติดไฟได้แม้เพียงชั่วขณะ จะถือว่าเป็นค่า "จุดวาบไฟ" (Flash Point) ซึ่งแสดงเป็นอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส (°C) โดยค่าดังกล่าวมีความสำคัญต่อการพิจารณาความปลอดภัยในการขนส่ง การเก็บรักษา และการใช้งานในกระบวนการผสมวัสดุแบบร้อน



ภาพที่ 3.11 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด

3.5.6 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating)

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในครั้งนี้ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6 หรือเทียบเท่า AASHTO T-47 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวัดปริมาณการสูญเสียมวลของแอสฟัลต์ซีเมนต์หลังจากผ่านการให้ความร้อนภายใต้สภาวะที่ควบคุม ตัวอย่างแอสฟัลต์จะถูกชั่งน้ำหนักและกระจายลงในถาดโลหะบาง จากนั้นนำไปวางในเตาอบที่อุณหภูมิ 163°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในภาชนะปิดกันความชื้น (desiccator) และทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก โดยค่าที่ได้ใช้เป็นตัวชี้วัดความเสถียรของแอสฟัลต์ซีเมนต์ต่อความร้อน ซึ่งเกี่ยวข้องกับความคงทนของคุณสมบัติของวัสดุในระหว่างการผลิต การขนส่ง และการใช้งานจริงในสนาม



ภาพที่ 3.12 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน

บทที่ 4

ผลการศึกษา

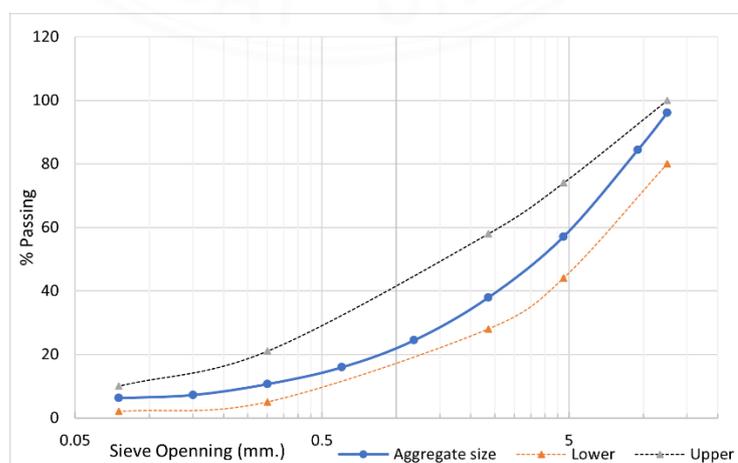
ในการทดสอบเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยดินขาว เผาและกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง มีผลการทดสอบเป็นลำดับ ดังนี้

4.1 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุผสมรวมและอัตราส่วนการออกแบบ

ผลการทดสอบวัสดุผสมรวมที่ใช้ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรงและอัตราส่วนของมวลรวม

	mm	filler	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Combined	Desired
3/4 "	19	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100	100
1/2"	12.5	100.00	100.00	100.00	80.67	8.60	96.13414634	80-100
3/8"	9.5	100.00	100.00	100.00	22.07	0.42	84.41463415	-
#4	4.75	100.00	98.40	36.24	0.24	0.13	57.09532844	44-74
#8	2.36	100.00	77.31	5.88	0.00	0.00	37.98190045	28-58
#16	1.18	100.00	46.73	2.28	0.00	0.00	24.48927164	-
#30	0.6	99.21	26.35	1.33	0.00	0.00	15.96383148	-
#50	0.3	94.07	14.81	0.19	0.00	0.00	10.6930479	5-21
#100	0.15	76.28	8.65	0.00	0.00	0.00	7.275767711	-
#200	0.075	64.43	7.69	0.00	0.00	0.00	6.29826695	2-10
pan		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	-
Mix proportion		5	40	35	20	0	100	



ภาพที่ 4.1 การกระจายของมวลรวมตามอัตราส่วนมวลรวม



ภาพที่ 4.2 มวลรวมที่ใช้หลังการออกแบบอัตราส่วนผสมมวลรวม

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมวลรวม

Description	Method	filler	Bin1	Bin2	Bin3	Total
Mix Proportion (%)		5	40	35	20	100
Bulk Specification Gravity OD	ASTM C127/128	-	2.659	2.54	2.65	
Bulk Specification Gravity SSD	ASTM C127/128	2.7	2.694	2.58	2.665	
Apparent Specific Gravity	ASTM C127/128	-	2.756	2.98	2.683	
Water Absorption	ASTM C127/128	-	0.92	0.45	0.353	

4.2 การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต/แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา

ในการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต/แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา มีผลการทดสอบโดยเรียงตามลำดับการทดสอบดังนี้

4.2.1 การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall

การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธี Marshall ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล. -ท. 604/2517 (DH-T 604/2517 , ASTM. D-1559) ของการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผา มีจำนวนตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ 5 ตัวอย่าง (A1.1 - A1.5)
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม ดินขาวเผา ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ อัตราส่วนละ 5 ตัวอย่าง (MK2.1-MK2.5, MK4.1-MK4.5, MK6.1-MK6.5, MK8.1-MK8.5 และ MK10.1-MK10.5)

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตตัวควบคุมที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 11,127.44 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.37 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตตัวควบคุม

NO.	A1.1	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1202.7	1175.9	1211.7	1225.4	1192.5
น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g.)	1204.5	1177.2	1214.2	1228.1	1195.5
น้ำหนักในน้ำ (g.)	700	684	707.1	715.1	695.4
ปริมาตรรวม (ml.)	504.5	493.2	507.1	513	500.1
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.38	2.38	2.39	2.39	2.38
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.39				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.48	10.48	10.50	10.50	10.48
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.71	85.72	85.91	85.88	85.73
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.29	14.28	14.09	14.12	14.27
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (%)	3.81	3.80	3.59	3.62	3.79
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (%)	3.72				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	73.34	73.40	74.55	74.38	73.47
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	10202.40	11379.60	12550.10	12640.20	10006.20
อัตราส่วนการปรับแก้	0.96	0.98	1	0.96	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	9794.304	11152.008	12550.1	12134.592	10006.2
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	11127.44				
อัตราการไหล (mm.)	3.4	3	3.12	3.23	4.1
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.37				

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 14,050.46 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.60 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2

NO.	MK2.1	MK2.2	MK2.3	MK2.4	MK2.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1196.8	1220.3	1199.7	1214.9	1186.6
น้ำหนักก้อนตัวผิวแห้ง (g.)	1201.9	1224.3	1203	1217.6	1190.2
น้ำหนักในน้ำ (g.)	700.7	715.6	702.2	712.2	688.4
ปริมาตรรวม (ml.)	501.2	508.7	500.8	505.4	501.8
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.39	2.40	2.40	2.40	2.36
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.39				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.49	10.54	10.53	10.57	10.39
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.85	86.25	86.13	86.43	85.02
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.15	13.75	13.87	13.57	14.98
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (%)	3.65	3.21	3.34	3.01	4.59
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (%)	3.56				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	74.19	76.68	75.92	77.85	69.39
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	13590.00	16186.50	13870.80	13439.70	14570.20
อัตราส่วนการปรับแก้	0.96	0.98	1	0.96	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	13046.4	15862.77	13870.8	12902.112	14570.2
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	14050.46				
อัตราการไหล (mm.)	3.6	3.7	3.7	3.6	3.4
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.60				

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 4 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 15,199.54 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.74 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 4

NO.	MK4.1	MK4.2	MK4.3	MK4.4	MK4.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1212	1213	1198.5	1200.1	1211
น้ำหนักก้อนตัวผิวแห้ง (g.)	1215.3	1216	1201.4	1203.1	1214.1
น้ำหนักในน้ำ (g.)	705.2	706.2	699.5	699.1	707.1
ปริมาตรรวม (mL.)	510.1	509.8	501.9	504	507
ความหนาแน่นรวม (g./mL.)	2.38	2.38	2.39	2.38	2.39
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./mL.)	2.38				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.44	10.46	10.50	10.47	10.50
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.43	85.55	85.86	85.61	85.88
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.57	14.45	14.14	14.39	14.12
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (%)	4.13	3.99	3.65	3.92	3.62
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (%)	3.86				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	71.66	72.37	74.21	72.74	74.35
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	18001.35	16775.10	14077.35	15068.16	13734.00
อัตราส่วนการปรับแก้	0.96	0.98	1	0.96	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	17281.296	16439.598	14077.35	14465.434	13734
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	15199.54				
อัตราการไหล (mm.)	3.8	3.8	3.8	3.6	3.7
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.74				

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 6 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 13,132.80 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.82 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 6

NO.	MK6.1	MK6.2	MK6.3	MK6.4	MK6.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1167.6	1193.9	1217.9	1190.9	1193.1
น้ำหนักก้อนตัวผิวแห้ง (g.)	1169	1196.4	1221.8	1194.8	1196.7
น้ำหนักในน้ำ (g.)	670.2	694.7	713.9	699.8	696.3
ปริมาตรรวม (mL.)	498.8	501.7	507.9	495	500.4
ความหนาแน่นรวม (g./mL.)	2.34	2.38	2.40	2.41	2.38
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./mL.)	2.38				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.29	10.46	10.54	10.57	10.48
ปริมาตรมวลรวม (g.)	84.16	85.56	86.22	86.50	85.73
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	15.84	14.44	13.78	13.50	14.27
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (%)	5.55	3.98	3.25	2.92	3.79
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (%)	3.90				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	64.96	72.44	76.46	78.33	73.42
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	14077.35	13292.55	12831.48	14204.88	12654.90
อัตราส่วนการปรับแก้	0.96	0.98	1	0.96	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	13514.256	13026.699	12831.48	13636.685	12654.9
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	13132.80				
อัตราการไหล (mm.)	4.6	4.4	3.1	3.6	3.4
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.82				

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 8 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 12,295.27 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.98 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 8

NO.	MK8.1	MK8.2	MK8.3	MK8.4	MK8.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1205.1	1191.8	1230.7	1204.8	1200.8
น้ำหนักก้อนตัวผิวแห้ง (g.)	1207.7	1195.6	1233.8	1207.3	1203.9
น้ำหนักในน้ำ (g.)	701.3	682.3	709.2	700.3	692.2
ปริมาตรรวม (mL.)	506.4	513.3	524.6	507	511.7
ความหนาแน่นรวม (g./mL.)	2.38	2.32	2.35	2.38	2.35
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./mL.)	2.35				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.46	10.20	10.31	10.44	10.31
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.56	83.48	84.35	85.44	84.37
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.44	16.52	15.65	14.56	15.63
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (%)	3.98	6.31	5.34	4.12	5.31
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (%)	5.01				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	72.44	61.77	65.88	71.73	66.01
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	12066.30	12017.25	13684.95	12164.40	12753.00
อัตราส่วนการปรับแก้	0.96	0.98	1	0.96	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	11583.648	11776.905	13684.95	11677.824	12753
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	12295.27				
อัตราการไหล (mm.)	3.9	3.9	4	4.1	4
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.98				

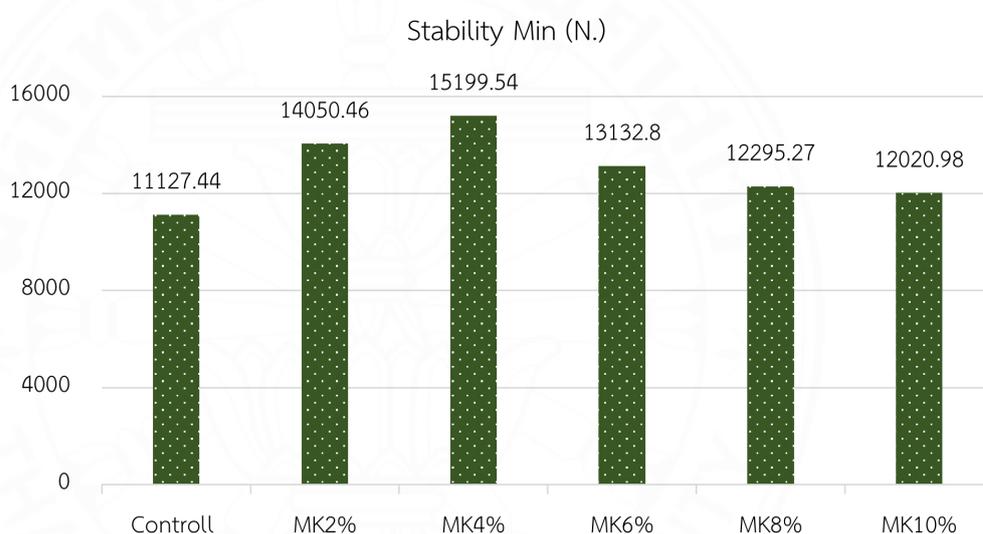
ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 12,020.98 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 4.10 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 10

NO.	MK10.1	MK10.2	MK10.3	MK10.4	MK10.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1209.7	1182.2	1202.1	1201.1	1198.2
น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g.)	1215.4	1190.1	1208.6	1206.2	1204.1
น้ำหนักในน้ำ (g.)	694.5	683.2	698.1	697.7	697.5
ปริมาตรรวม (ml.)	520.9	506.9	510.5	508.5	506.6
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.32	2.33	2.35	2.36	2.37
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.35				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.21	10.25	10.35	10.38	10.40
ปริมาตรมวลรวม (g.)	83.50	83.85	84.66	84.93	85.04
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	16.50	16.15	15.34	15.07	14.96
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (%)	6.29	5.90	4.99	4.69	4.57
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (%)	5.29				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	61.85	63.48	67.48	68.87	69.48
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	11526.75	12213.45	12851.10	12556.80	12164.40
อัตราส่วนการปรับแก้	0.96	0.98	1	0.96	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	11065.68	11969.181	12851.1	12054.528	12164.4
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	12020.98				
อัตราการไหล (mm.)	4	4.1	4	4.2	4.2
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	4.10				

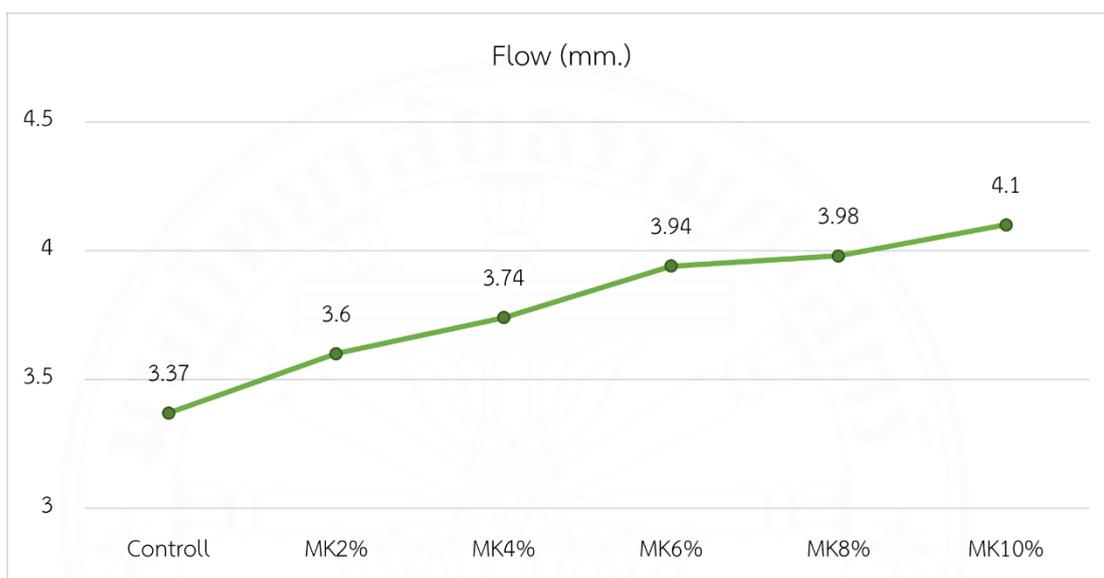
จากผลการทดสอบในแต่ละอัตราส่วนที่ได้แสดงดังตารางตามลำดับนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบผลของค่าเสถียรภาพ (Stability) ค่าการยุบตัว (Flow) และช่องว่างอากาศในแอสฟัลต์คอนกรีต (Air Voids) ได้ดังนี้

การเติมดินขาวเผาในแอสฟัลต์คอนกรีตมีผลทำให้ค่าความเสถียรภาพเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับตัวทดสอบควบคุม (11,127.44 N) โดยอัตราส่วน 4% ให้ค่าความเสถียรภาพสูงที่สุดที่ 15,199.54 N รองลงมาคือ MK2% (14,050.46 N) และ MK6% (13,132.8 N) อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนดินขาวเผาเป็น 8% และ 10% ค่าความเสถียรภาพเริ่มลดลง เหลือ 12,295.27 N และ 12,020.98 N ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.3



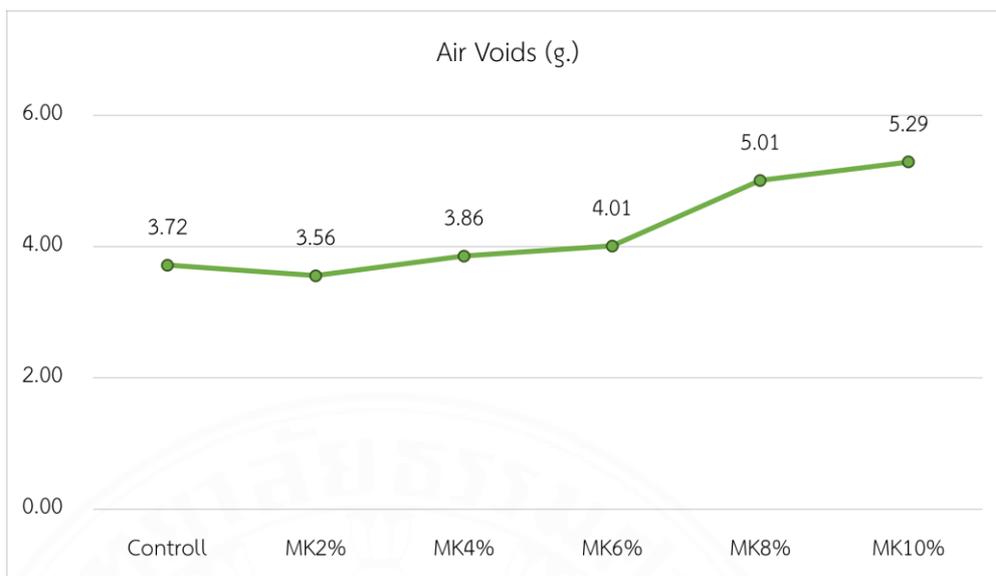
ภาพที่ 4.3 ค่าเสถียรภาพ (Stability) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

ค่าการยุบตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณดินขาวเผา โดยตัวทดสอบควบคุมมีค่าการยุบตัวที่น้อยสุดที่ 3.37 มม. และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง 4.10 มม. ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานที่ MK10% การเพิ่มค่าการยุบตัวแสดงถึงพฤติกรรมวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนสภาพได้มากขึ้น ซึ่งในปริมาณเล็กน้อยอาจช่วยลดความเปราะ แต่หากเพิ่มมากเกินไปอาจทำให้วัสดุเสียความมั่นคงทางโครงสร้าง ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ค่าการยุบตัว (Flow) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา อัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

ค่าช่องว่างอากาศของตัวทดสอบควบคุมเริ่มต้นที่ 3.72% และลดลงเล็กน้อยที่ MK2% (3.56%) ก่อนจะเพิ่มขึ้นอีกที่ MK4% (3.86%) และเพิ่มต่อเนื่องถึงระดับสูงสุดที่ MK10% (5.29%) ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานที่กำหนด (3% - 5%) ดังภาพที่ 4.5 การเพิ่มขึ้นของ Air Voids เมื่อเพิ่มอัตราส่วนดินขาวเผา อาจมาจากการที่วัสดุเสริมแต่งมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับมวลรวมหรือแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำให้มีการกระจายตัวไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ช่องว่างภายในผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจกระทบต่อความทนทานและการซึมน้ำของวัสดุในระยะยาว



ภาพที่ 4.5 ค่าช่องว่างอากาศ (Air Voids) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

4.2.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (ITSM)

การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผาได้เลือกอัตราส่วนผสมจากผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Stability) ด้วยวิธี Marshall โดยเลือกที่อัตราส่วน 2%, 4% และ 6% เนื่องจาก

- อัตราส่วน 2% เป็นสัดส่วนที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถเพิ่มค่าเสถียรภาพได้ดีในขณะที่ใช้ปริมาณวัสดุเสริมแต่งในระดับต่ำ
- อัตราส่วน 4% เป็นค่าที่ให้ค่าเสถียรภาพสูงสุดในการทดสอบ
- อัตราส่วน 6% เริ่มแสดงแนวโน้มของค่าเสถียรภาพที่ลดลงจากจุดสูงสุดดังกล่าว จึงเลือกทั้งสามอัตราส่วนดังกล่าวเพื่อนำไปทดสอบพฤติกรรมเชิงกลเพิ่มเติมผ่านค่า

โมดูลัสคืนตัวเพื่อประเมินผลของการเสริมดินขาวเผาต่อความสามารถในการคืนสภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต และทำการทดสอบ 4 อุณหภูมิ ได้แก่ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส มีจำนวนตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ 2 ตัวอย่าง
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม ดินขาวเผา ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4 และ 6 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ อัตราส่วนละ 2 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วน 2%, 4% และ 6% ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทดสอบ 4 อุณหภูมิ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส มีผลการทดสอบเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa) ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4 และ 6 ทดสอบ 4 อุณหภูมิ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	15	20	30	40
A 1.1	9168	5626	2058	750
A 1.2	9013	5481	1903	657
Average Control	9090.5	5553.5	1980.5	703.5
MK 2.1	6601	4039	1257	527
MK 2.2	9987	6572	2209	919
Average MK 2%	8294	5305.5	1733	723
MK 4.1	9844	6445	2249	875
MK 4.2	7892	5072	1628	693
Average MK 4%	8868	5758.5	1938.5	784
MK 6.1	6774	4207	1405	657
MK 6.2	8872	5393	1627	725
Average MK 6%	7823	4800	1516	691

*การทดสอบ ITSm ไม่มีค่ามาตรฐาน โดยส่วนมากกำหนดเป็นช่วงๆ ตามอุณหภูมิ

จากตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วน 2%, 4% และ 6% ที่อุณหภูมิ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส พบว่าในทุกสูตรผสม ค่าโมดูลัสคืนตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมปกติของวัสดุแอสฟัลต์ที่มีความไวต่ออุณหภูมิ

- อุณหภูมิ 15°C ตัวทดสอบควบคุมให้ค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยสูงที่สุดที่ 9090.5 MPa รองลงมาคืออัตราส่วน MK 4% (8868 MPa), MK 6% (7823 MPa) และ MK 2% (8294 MPa) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมดินขาวเผายังไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้น้อยกว่าตัวทดสอบควบคุมที่อุณหภูมิต่ำ

- อุณหภูมิ 20°C อัตราส่วน MK 4% ให้ค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 5758.5 MPa ซึ่งสูงกว่าตัวทดสอบควบคุม (5553.5 MPa) แสดงถึงศักยภาพของการเติมดินขาวเผาในการคงความแข็งแรงภายใต้อุณหภูมิระดับปานกลางได้ดีกว่า
- อุณหภูมิ 30°C อัตราส่วน MK 4% ยังคงให้ค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 1938.5 MPa สูงกว่าอัตราส่วนอื่นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้น
- อุณหภูมิ 40°C ซึ่งใกล้เคียงกับสภาพอากาศจริงของประเทศไทย อัตราส่วน MK 4% ยังให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวสูงที่สุดที่ 784 MPa เมื่อเทียบกับตัวทดสอบควบคุม (703.5 MPa), MK 6% (691 MPa) และ MK 2% (723 MPa) ซึ่งสะท้อนว่าดินขาวเผาในอัตราส่วน 4% มีส่วนช่วยเสริมความสามารถในการคั้นภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ดีที่สุดภายใต้สภาพอุณหภูมิสูง

การเติมดินขาวเผาในอัตราส่วน 4% ให้ผลเชิงบวกต่อค่าโมดูลัสคั้นตัวในอุณหภูมิมิถุนายนถึงสูงอย่างต่อเนื่อง และสามารถรักษาคุณสมบัติทางกลได้ดีกว่าสูตรควบคุม โดยเฉพาะในสภาวะที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการใช้งานจริง

4.2.3 การทดสอบการเพนิเทรชัน (Penetration Test)

การทดสอบการเพนิเทรชัน (Penetration Test) ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 403/2518 ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T46 ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา มีตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม ดินขาวเผา ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

Penetration	Control	MK2%	MK4%	MK6%	MK8%	MK10%
ทดสอบครั้งที่ 1	65	63	59	51	45	42
ทดสอบครั้งที่ 2	64	63	57	49	47	42
ทดสอบครั้งที่ 3	64	61	54	52	48	31
ค่าเฉลี่ย	64.33	62.33	56.67	50.67	46.67	38.33

*ค่ามาตรฐานการทดสอบการเพนิเทรชัน อยู่ที่ 60 – 70 (ไม่มีหน่วย)

จากตารางที่ 4.10 ซึ่งแสดงผลการทดสอบค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% โดยเปรียบเทียบกับตัวทดสอบควบคุม พบว่า ค่าเพนิเทรชันมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณดินขาวเผาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของความแข็งของวัสดุ

ตัวทดสอบควบคุมให้ค่าเฉลี่ยเพนิเทรชันเท่ากับ 64.33 ซึ่งอยู่ภายในช่วงมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 60–70 หน่วย ขณะที่เมื่อเติมดินขาวเผาในอัตราส่วน 2% ค่าเฉลี่ยลดลงเล็กน้อยอยู่ที่ 62.33 ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐาน แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 4% ค่าเฉลี่ยเพนิเทรชันลดลงชัดเจนเหลือ 56.67 ซึ่งต่ำกว่าค่าต่ำสุดตามเกณฑ์

สำหรับอัตราส่วน 6%, 8% และ 10% ค่าเฉลี่ยเพนิเทรชันอยู่ที่ 50.67, 46.67 และ 38.33 ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่า การเติมดินขาวเผาในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความแข็งเพิ่มขึ้น และอาจมีผลต่อสมรรถนะด้านความสามารถในการเปลี่ยนภาพและความยืดหยุ่นของวัสดุ

โดยสรุป ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเติมดินขาวเผา มีผลในการลดค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อใช้อัตราส่วนเกิน 2% ซึ่งอาจเหมาะสมสำหรับการใช้งานในพื้นที่ที่ต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง แต่ในขณะเดียวกันควรพิจารณาไม่ให้ค่าลดลงต่ำเกินไปจนส่งผลกระทบต่อความยืดหยุ่นของผิวทาง

4.2.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test)

การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test) ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 405/2519 ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T51 ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา มีตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม ดินขาวเผา ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบความสามารถในการยืดตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

Ductility	Control	MK2%	MK4%	MK6%	MK8%	MK10%
ระยะที่ยืดออก (mm.)	1500+	1120	655	525	410	215

*ค่ามาตรฐานการทดสอบความสามารถในการยืดตัวกำหนดไว้ มีค่ามากกว่า 1000 มม.

จากผลการทดสอบความสามารถในการยืดตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% เปรียบเทียบกับตัวทดสอบควบคุม พบว่า ค่า Ductility มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของดินขาวเผาที่เพิ่มขึ้น

ตัวทดสอบควบคุมให้ค่าความสามารถในการยืดตัว สูงกว่า 1500 มม. ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนดไว้ที่ 1000 มม. แสดงถึงความสามารถในการยืดตัวได้ดี ขณะที่อัตราส่วน MK2% ยังมีค่าใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐานที่ 1120 มม. และถือว่ายังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณดินขาวเผาเป็น 4% ค่าความสามารถในการยืดตัว ลดลงเหลือ 655 มม. ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐาน และลดลงต่อเนื่องที่อัตราส่วน MK6% (525 มม.), MK8% (410 มม.) และต่ำที่สุดที่ MK10% (215 มม.) แสดงให้เห็นว่า การเติมดินขาวเผาในปริมาณมากมีผลกระทบต่อความสามารถในการยืดตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างของวัสดุที่แข็งขึ้นแต่เปราะมากขึ้น ทำให้ความเหนียวและความยืดหยุ่นลดลง

4.2.5 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point Test: Open Cup)

การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point Test: Open Cup) ตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 406/2519 ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T-48 หรือ ASTM D92 ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา มีตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม ดินขาวเผา ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

Flash point	Control	MK2%	MK4%	MK6%	MK8%	MK10%
อุณหภูมิจุดวาบไฟ (°C)	338	315.1	326	331.9	335.8	339.1

*ค่ามาตรฐานจุดวาบไฟกำหนดไว้ มีค่ามากกว่า 232°C

จากผลการทดสอบจุดวาบไฟของ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% เปรียบเทียบกับตัวทดสอบควบคุม พบว่า ผลการทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยดินขาวเผา ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 พบว่าอุณหภูมิของจุดวาบไฟของตัวอย่างทั้งหมดมีค่ามากกว่ามาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนดไว้ที่ 232°C โดยตัวทดสอบควบคุมมีค่าเท่ากับ 338°C และในกลุ่มที่เติม MK มีค่าระหว่าง 311.5°C ถึง 339.1°C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุทุกอัตราส่วนยังคงมีความปลอดภัยในด้านความไวไฟ โดยไม่มีอัตราส่วนใดที่ทำให้จุดวาบไฟลดลงต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ทั้งนี้แม้ว่าในอัตราส่วน 2% จะให้ค่าต่ำสุดที่ 315.1°C แต่ก็ยังถือว่าสูงเพียงพอและปลอดภัยต่อการใช้งานในงานทางด้านวิศวกรรมทางหลวง

4.2.6 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating)

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating) ตามมาตรฐาน ASTM D6 หรือเทียบเท่า AASHTO T-47 ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา มีตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม ดินขาวเผา ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของ ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

Weight loss on heating	Control	MK2%	MK4%	MK6%	MK8%	MK10%
น้ำหนักก่อนเข้าอบ	65.1	64.9	65.2	60.8	66.1	63.1
น้ำหนักหลังเข้าอบ	65.09	64.8	65.2	60.8	66.1	63.1
% น้ำหนักแอสฟัลต์ที่หายไป (%wt)	0.02	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00

*ค่ามาตรฐานของการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน กำหนดไว้ ไม่ควรเกิน 0.8%wt

จากตารางที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อนของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 พบว่าทุกอัตราส่วนได้ค่าการสูญเสีย ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.8% อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมดินขาวเผา มีความคงตัวทางความร้อนที่ดี และไม่ส่งผลให้เกิดการระเหยหรือสูญเสียองค์ประกอบเมื่อได้รับความร้อน จึงมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูง

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% พบว่าอัตราส่วน 4% แม้จะให้ค่าความเสถียรภาพ (Stability) และค่ามอดูลัสคืนตัว (ITSm) สูงที่สุด แต่เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติด้านความสามารถในการยืดตัว (Ductility) กลับพบว่ามีค่าเพียง 655 มม. ซึ่ง ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนดไว้ที่ 1000 มม. จึงอาจส่งผลต่อความเหนียวและการต้านทานการแตกร้าวของวัสดุในระยะยาว ทำให้พิจารณาว่าอัตราส่วน 2% เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปศึกษาต่อ โดยสามารถอธิบายตามลำดับหัวข้อดังนี้

- ค่าเสถียรภาพ (Stability) ให้ค่าความเสถียรภาพที่ 14,050.46 N ซึ่งสูงกว่าตัวควบคุม (11,127.44 N) เป็นลำดับที่สองรองจาก 4% เท่านั้น
- ค่าการยุบตัว (Flow) มีค่าอยู่ที่ 3.60 mm ซึ่งเพิ่มขึ้นจากตัวควบคุมเพียงเล็กน้อย (3.37 mm) ยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ไม่เปราะและไม่ยุบตัวมากเกินไป
- ค่าโมดูลัสคีนตัว (ITSm) มีค่า 723 MPa ที่ 40°C ซึ่งแม้จะต่ำกว่า MK4% (784 MPa) แต่ยังคงสูงกว่าตัวควบคุม แสดงถึงความสามารถในการคืนสภาพได้ดี
- ค่าเพนิเทรชัน (Penetration) มีค่าเฉลี่ยของค่าเพนิเทรชันอยู่ที่ 62.33 ซึ่ง ยังอยู่ในช่วงมาตรฐานที่กำหนด (60–70) แสดงถึงความแข็งที่เพิ่มขึ้นแต่ไม่แข็งจนเกินไปเมื่อเทียบกับตัวควบคุม
- ความสามารถในการยืดตัว (Ductility) ให้ค่าความสามารถในการยืดตัวที่ 1120 mm ซึ่งเป็น เพียงอัตราส่วนเดียวที่ยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (≥ 1000 mm) และสูงกว่าทุกอัตราส่วนอื่น ๆ อย่างชัดเจน แสดงถึงความเหนียวและความยืดหยุ่นของวัสดุที่ดี
- ค่าจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด มีค่าอุณหภูมิของจุดวาบไฟอยู่ที่ 338°C สูงกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำ (232°C) อย่างมาก แสดงถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิตและใช้งาน
- การสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating) มีการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (0.20%) ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่ให้เป็น 0.80% แสดงถึงความคงตัวทางความร้อนที่ดี

4.3 การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต/แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง

ในการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต/แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง มีผลการทดสอบโดยเรียงตามลำดับการทดสอบดังนี้

4.3.1 การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall

การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธี Marshall ของการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง มีจำนวนตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตผสมกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยแต่ละอัตราส่วนมีจำนวน 5 ตัวอย่าง ได้แก่ (SG 2.1 - SG 2.5, SG4.1 - SG4.5, SGs6.1 - SG6.5, SG8.1 - SG8.5 และ SG10.1 - SG10.5)

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยกราฟีน ควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง ในอัตราส่วนร้อยละ 2 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 13,195.05 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.40 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2

NO.	SG 2.1	SG 2.2	SG 2.3	SG 2.4	SG 2.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1198.3	1196.4	1206.4	1199	1197.6
น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g.)	1201.1	1200.1	1209.4	1202.5	1201.4
น้ำหนักในน้ำ (g.)	699.1	697.1	705.4	697.2	700.1
ปริมาตรรวม (ml.)	502	503	504	505.3	501.3
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.39	2.38	2.39	2.37	2.39
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.38				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.49	10.45	10.52	10.43	10.50
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.83	85.52	86.06	85.31	85.90
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.17	14.48	13.94	14.69	14.10
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	3.68	4.03	3.42	4.26	3.61
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)	3.80				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	74.01	72.19	75.48	71.02	74.44
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	12360.60	12870.20	12851.10	13439.70	15205.50
อัตราส่วนการปรับแก้	0.96	0.98	1	1	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	11866.176	12612.796	12851.1	13439.7	15205.5
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	13195.05				
อัตราการไหล (mm.)	3.1	4.2	3.3	2.5	3.9
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.40				

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการพินควอนตัมคอตแบบพัฒนาโครงสร้าง ในอัตราส่วนร้อยละ 4 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 13,569.98 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.50 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 4

NO.	SG 4.1	SG 4.2	SG 4.3	SG 4.4	SG 4.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1188.1	1215.1	1197.9	1201.2	1188
น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g.)	1191.7	1218.4	1202.2	1204.7	1191.6
น้ำหนักในน้ำ (g.)	692.4	708.4	699.1	700.1	691.5
ปริมาตรรวม (ml.)	499.3	510	503.1	504.6	500.1
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.38	2.38	2.38	2.38	2.38
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.38				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.46	10.47	10.46	10.46	10.44
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.55	85.66	85.61	85.59	85.41
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.45	14.34	14.39	14.41	14.59
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	3.99	3.86	3.93	3.95	4.15
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)	3.97				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	72.40	73.04	72.72	72.60	71.56
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	12458.70	15990.30	14028.30	13439.70	12949.20
อัตราส่วนการปรับแก้	0.96	1	1	1	0.96
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	11960.352	15990.3	14028.3	13439.7	12431.232
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	13569.98				
อัตราการไหล (mm.)	3.7	3.9	3.9	2.9	3.1
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.50				

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการพินควอนตัมคอตแบบพัฒนาโครงสร้าง ในอัตราส่วนร้อยละ 6 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 12,173.82 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.73 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 6

NO.	SG 6.1	SG 6.2	SG 6.3	SG 6.4	SG 6.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1204.9	1197	1200.4	1214.5	1211.9
น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g.)	1209.6	1202.7	1205.4	1219.9	1218.3
น้ำหนักในน้ำ (g.)	697.7	688.8	694.1	703.9	697.2
ปริมาตรรวม (ml.)	511.9	513.9	511.3	516	521.1
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.35	2.33	2.35	2.35	2.33
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.34				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.35	10.24	10.32	10.34	10.22
ปริมาตรมวลรวม (g.)	84.63	83.75	84.41	84.63	83.62
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	15.37	16.25	15.59	15.37	16.38
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	5.03	6.02	5.27	5.03	6.16
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)	5.50				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	67.30	62.99	66.20	67.28	62.39
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	12262.50	11085.30	12262.50	13734.00	12458.70
อัตราส่วนการปรับแก้	0.96	0.96	1	1	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	11772	10641.888	12262.5	13734	12458.7
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	12173.82				
อัตราการไหล (mm.)	3.9	3.7	3.55	3.55	3.95
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.73				

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการพินควอนตัมคอตแบบพัฒนาโครงสร้าง ในอัตราส่วนร้อยละ 8 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 11,581.69 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.89 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 8

NO.	SG 8.1	SG 8.2	SG 8.3	SG 8.4	SG 8.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1199.6	1219	1197.6	1193.2	1182.1
น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g.)	1206.7	1226	1203.8	1199.1	1189.6
น้ำหนักในน้ำ (g.)	684	700	689.8	689.8	675.2
ปริมาตรรวม (ml.)	522.7	526	514	509.3	514.4
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.30	2.32	2.33	2.34	2.30
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.32				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.09	10.19	10.24	10.30	10.10
ปริมาตรมวลรวม (g.)	82.52	83.32	83.77	84.24	82.62
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	17.48	16.68	16.23	15.76	17.38
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	7.40	6.49	5.99	5.47	7.28
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)	6.52				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	57.69	61.08	63.11	65.32	58.13
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	11379.60	11281.50	10594.80	12360.60	13047.30
อัตราส่วนการปรับแก้	1	1	1	0.96	0.98
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	11379.6	11281.5	10594.8	11866.176	12786.354
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	11581.69				
อัตราการไหล (mm.)	4.6	3.45	4.2	3.55	3.65
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.89				

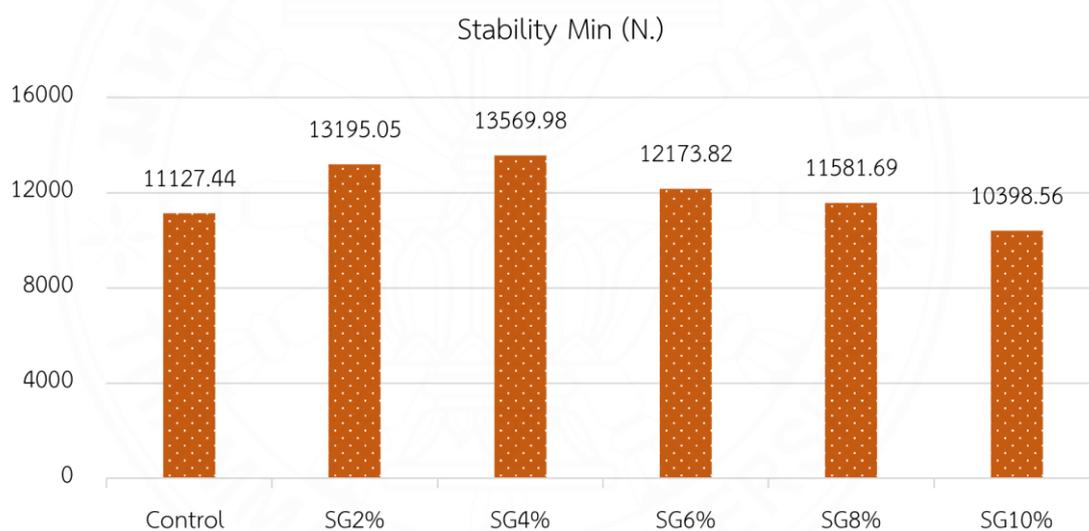
ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการพินควอนตัมดอกทแบบพัฒนาโครงสร้าง ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 10,398.56 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.80 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 10

NO.	SG 10.1	SG 10.2	SG 10.3	SG 10.4	SG 10.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1221.8	1202.4	1213.8	1201.4	1203.2
น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g.)	1228.9	1212.2	1218.6	1208.6	1214.7
น้ำหนักในน้ำ (g.)	687.4	673.3	699.3	685	684.3
ปริมาตรรวม (ml.)	541.5	538.9	519.3	523.6	530.4
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.26	2.23	2.34	2.29	2.27
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.28				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	9.92	9.81	10.27	10.08	9.97
ปริมาตรมวลรวม (g.)	81.13	80.22	84.04	82.50	81.56
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	18.87	19.78	15.96	17.50	18.44
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	8.96	9.97	5.69	7.42	8.47
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)	8.10				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	52.54	49.58	64.36	57.62	54.07
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	11889.00	10812.00	10398.60	9908.10	9417.60
อัตราส่วนการปรับแก้	1	0.96	1	1	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	11889	10379.52	10398.6	9908.1	9417.6
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	10398.56				
อัตราการไหล (mm.)	3.9	3.91	3.7	3.75	3.76
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.80				

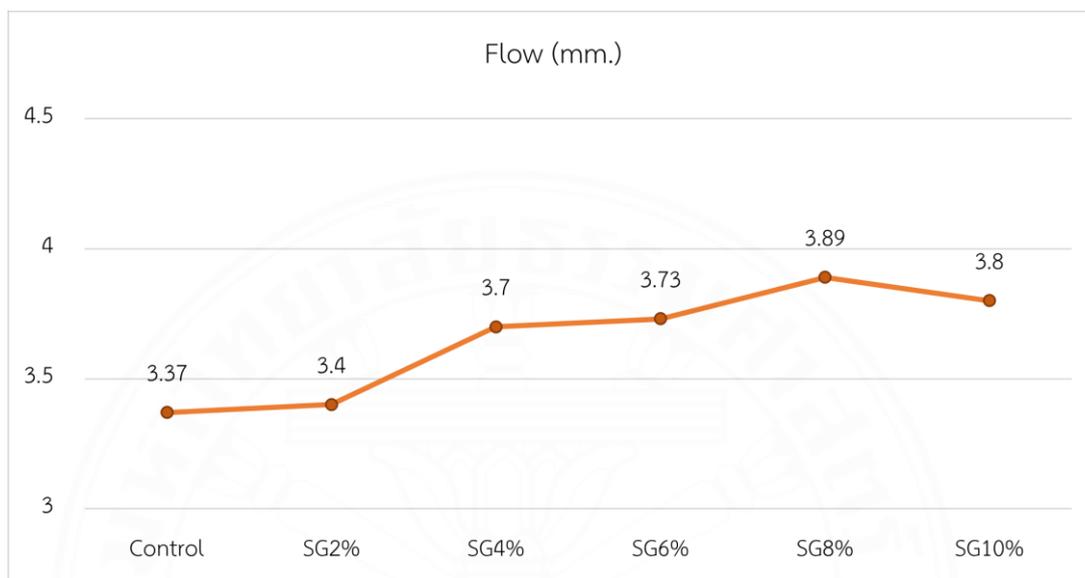
จากผลการทดสอบในแต่ละอัตราส่วนที่ได้แสดงดังตารางตามลำดับนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบผลของค่าเสถียรภาพ (Stability) ค่าการยุบตัว (Flow) และช่องว่างอากาศในแอสฟัลต์คอนกรีต (Air Voids) ได้ดังนี้

จากผลการทดสอบพบว่า SGQDs ช่วยเพิ่มค่าความเสถียรภาพเมื่อเทียบกับตัวทดสอบควบคุม (11,127.44 N) โดยเฉพาะในอัตราส่วน SGQDs 4% ซึ่งให้ค่าความเสถียรภาพสูงสุดที่ 13,569.98 N รองลงมาคือ SGQDs 2% (13,195.05 N) และ SGQDs 6% (12,173.82 N) แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน 2-4% มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความมั่นคงของวัสดุอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 8% และ 10% ค่าความเสถียรภาพกลับลดลงเหลือ 11,581.69 N และ 10,398.56 N ตามลำดับ สะท้อนถึงการเริ่มลดทอนคุณสมบัติเมื่อเติมในปริมาณมากเกินไป แสดงค่าดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ค่าเสถียรภาพ (Stability) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

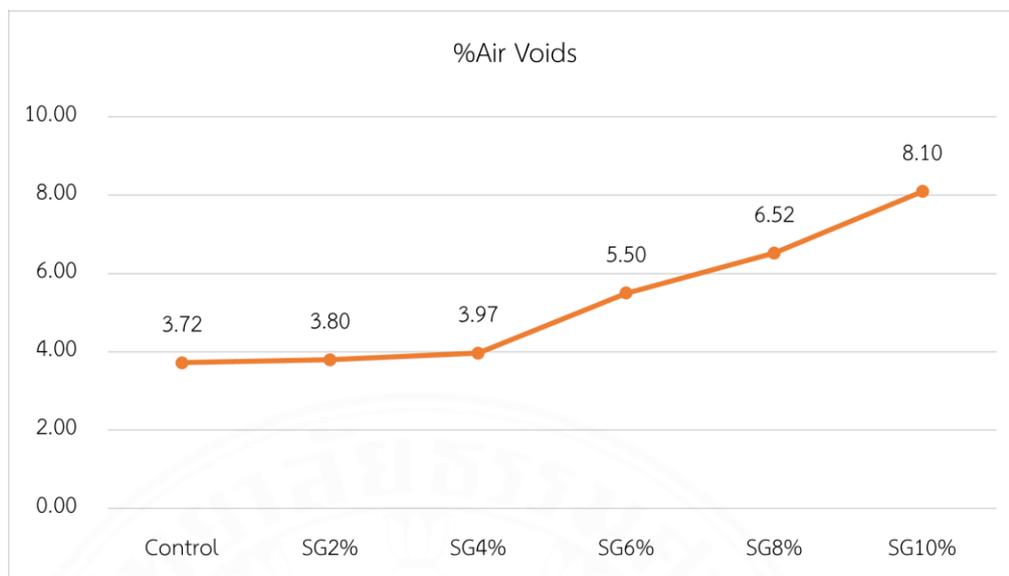
ค่าการยุบตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณ SGQDs โดยตัวทดสอบควบคุมมีค่าการยุบตัวที่น้อยสุดที่ 3.37 มม. และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงปริมาณ SGQDs 8% ได้ค่าการยุบตัว 3.89 มม. และลดลงเล็กน้อยที่ SGQDs 10% ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ค่าการยุบตัว (Flow) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

โดยในการทดสอบค่าการยุบตัวที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs ทุกอัตราส่วนค่าการยุบตัวอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด การเพิ่มค่าการยุบตัวแสดงถึงพฤติกรรมวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนภาพได้มากขึ้น ซึ่งในปริมาณเล็กน้อยอาจช่วยลดความเปราะ แต่หากเพิ่มมากเกินไปอาจทำให้วัสดุเสียความมั่นคงทางโครงสร้าง

ผลการทดสอบค่าช่องว่างอากาศ (%Air Voids) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (SGQDs) พบว่า ค่า Air Voids มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ SGQDs ที่เติมลงไปในส่วนผสม โดยค่าเริ่มต้นของตัวอย่างควบคุมอยู่ที่ 3.72% และเพิ่มขึ้นเป็น 3.80%, 3.97%, 5.50%, 6.52% และสูงสุดที่ 8.10% สำหรับอัตราส่วน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 ค่าช่องว่างอากาศ (Air Voids) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

จากแนวโน้มดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การเติม SGQDs ในปริมาณมากเกินไปส่งผลให้ช่องว่างอากาศภายในเนื้อวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการที่อนุภาคของ SGQDs ทำปฏิกิริยากับแอสฟัลต์ซีเมนต์เมื่อผสมด้วยความร้อนสูงเกินไป หรือโครงสร้างภายในมีลักษณะไม่หนาแน่น ส่งผลต่อความทนทานและการซึมน้ำในระยะยาว โดยเกณฑ์ทั่วไปของค่าช่องว่างอากาศในแอสฟัลต์คอนกรีตควรอยู่ในช่วงประมาณ 3–5% เพื่อให้วัสดุมีความหนาแน่นเหมาะสม ไม่เปราะ และไม่ซึมน้ำมากเกินไป ดังนั้น อัตราส่วนที่ให้ค่า Air Voids อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ได้แก่ SGQDs 2% (3.80%) และ SGQDs 4% (3.97%) ขณะที่อัตราส่วนตั้งแต่ 6% ขึ้นไปเริ่มแสดงค่าที่สูงเกินเกณฑ์ ซึ่งอาจส่งผลเสียต่ออายุการใช้งานของผิวทางในสภาวะแวดล้อมจริง

4.3.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (ITSM)

การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยกราไฟนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง ได้เลือกอัตราส่วนผสมจากผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Stability) ด้วยวิธี Marshall โดยเลือกที่อัตราส่วน 2%, 4% และ 6% เนื่องจาก

- อัตราส่วน 2% เป็นสัดส่วนที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถเพิ่มค่าเสถียรภาพได้ดีในขณะที่ใช้ปริมาณวัสดุเสริมแต่งในระดับต่ำ
- อัตราส่วน 4% เป็นค่าที่ให้ค่าเสถียรภาพสูงสุดในการทดสอบ
- อัตราส่วน 6% เริ่มแสดงแนวโน้มของค่าเสถียรภาพที่ลดลงจากจุดสูงสุดดังกล่าว

จึงเลือกทั้งสามอัตราส่วนดังกล่าวเพื่อนำไปทดสอบพฤติกรรมเชิงกลเพิ่มเติมผ่านค่าโมดูลัสคืบตัวเพื่อประเมินผลของการเสริมกราไฟนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง ต่อความสามารถในการคืบตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต และทำการทดสอบ 4 อุณหภูมิ ได้แก่ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส มีจำนวนตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ 2 ตัวอย่าง
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม กราไฟนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4 และ 6 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ อัตราส่วนละ 2 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยกราไฟนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง ในอัตราส่วน 2%, 4% และ 6% ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทดสอบ 4 อุณหภูมิ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส มีผลการทดสอบเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืบตัว (MPa) ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4 และ 6 ทดสอบ 4 อุณหภูมิ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	15	20	30	40
A 1.1	9168	5626	2058	750
A 1.2	9013	5481	1903	657
Average Controll	9090.5	5553.5	1980.5	703.5
SGQDs 2.1	9004	5578	2052	727
SGQDs 2.2	8950	5568	2046	844
Average SGQDs 2%	8977	5573	2049	785.5
SGQDs 4.1	9086	5658	2130	809
SGQDs 4.2	9615	5963	2277	885
Average SGQDs 4%	9350.5	5810.5	2203.5	847
SGQDs 6.1	9839	6063	2294	871
SGQDs 6.2	9117	5590	2127	723
Average SGQDs 6%	9478	5826.5	2210.5	797

*การทดสอบ ITSm ไม่มีค่ามาตรฐาน โดยส่วนมากกำหนดเป็นช่วงๆ ตามอุณหภูมิ

จากตารางที่ 4.19 แสดงผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วย SGQDs ในอัตราส่วน 2%, 4% และ 6% ที่อุณหภูมิ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส พบว่าในทุกสูตรผสม ค่าโมดูลัสคืบตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมปกติของวัสดุแอสฟัลต์ที่มีความไวต่ออุณหภูมิ

- อุณหภูมิ 15°C อัตราส่วน SGQDs 6% ให้ค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ยสูงที่สุดที่ 9478 MPa รองลงมาคืออัตราส่วน SGQDs 4% (9350.5 MPa), ตัวควบคุม (9090.5 MPa) และ SGQDs 2% (8877 MPa) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสม SGQDs ทุกอัตราส่วนสามารถเพิ่มความสามารถในการคืบตัวได้มากกว่าตัวอย่างควบคุมในสภาวะอุณหภูมิต่ำ
- อุณหภูมิ 20°C อัตราส่วน SGQDs 6% ยังคงให้ค่าเฉลี่ยสูงที่สุดที่ 5826.5 MPa ซึ่งสูงกว่าตัวควบคุม (5553.5 MPa) และสูงกว่า SGQDs 2% (5573 MPa) และ 4% (5810.5 MPa) แสดงถึงศักยภาพของอัตราส่วน 6% ในการคงความแข็งแรงภายใต้อุณหภูมิระดับปานกลางได้ดีที่สุด
- อุณหภูมิ 30°C อัตราส่วน SGQDs 6% ยังคงให้ค่าเฉลี่ยสูงที่สุดที่ 2210.5 MPa รองลงมาคือ SGQDs 4% (2203.5 MPa), SGQDs 2% (2049 MPa) และตัวควบคุม (1980.5 MPa) ซึ่งแสดงถึงความเสถียรในการรับแรงที่อุณหภูมิสูง
- อุณหภูมิ 40°C ซึ่งใกล้เคียงกับสภาพอากาศของประเทศไทย อัตราส่วน SGQDs 4% ให้ค่าโมดูลัสคืบตัวเฉลี่ยสูงที่สุดที่ 847 MPa ตามด้วย SGQDs 6% (797 MPa), SGQDs 2% (785.5 MPa) และตัวควบคุม (703.5 MPa) สะท้อนว่าอัตราส่วน SGQDs 4% มีประสิทธิภาพในการต้านทานการเสียหายที่อุณหภูมิสูงได้ดีที่สุดในบรรดาทุกอัตราส่วน

การเติมดินขาวเฝ้าในอัตราส่วน 4% ให้ผลเชิงบวกต่อค่าโมดูลัสคืบตัวในอุณหภูมิกลางถึงสูงอย่างต่อเนื่อง และสามารถรักษาคุณสมบัติทางกลได้ดีกว่าตัวควบคุม โดยเฉพาะในสภาวะที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการใช้งานจริง

4.3.3 การทดสอบการเพนิเทรชัน (Penetration Test)

การทดสอบการเพนิเทรชัน (Penetration Test) ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 403/2518 ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T46 ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs มีตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบการเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

Penetration	Control	SGQDs 2%	SGQDs 4%	SGQDs 6%	SGQDs 8%	SGQDs 10%
ทดสอบครั้งที่ 1	65	61	61	58	56	52
ทดสอบครั้งที่ 2	64	61	59	54	55.5	49
ทดสอบครั้งที่ 3	64	60	55	52	51	48.5
ค่าเฉลี่ย	64.33	60.67	58.33	54.67	54.17	49.83

*ค่ามาตรฐานการทดสอบการเพนิเทรชัน อยู่ที่ 60 – 70 (ไม่มีหน่วย)

จากตารางที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบค่าการเพนิเทรชัน (Penetration) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (SGQDs) ในอัตราส่วน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% พบว่า ค่าเพนิเทรชันมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ SGQDs ที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม โดยตัวควบคุมให้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 64.33 ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานที่กำหนด (60–70) ขณะที่อัตราส่วน SGQDs 2% ให้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 60.67 ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงมาตรฐานเช่นกัน

เมื่อเพิ่มปริมาณ SGQDs เป็น 4% ค่าเฉลี่ยลดลงเหลือ 58.33 และต่ำกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำ โดยมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่องจนถึงอัตราส่วน 10% ที่มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดที่ 49.83 การลดลงของค่าเพนิเทรชันแสดงให้เห็นว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์มีความแข็งเพิ่มขึ้นจากการเติม SGQDs ซึ่งอาจมีผลดีในแง่ของความต้านทานการเสียหายถาวร (rutting resistance) แต่หากลดต่ำเกินไปอาจทำให้วัสดุเปราะและขาดความยืดหยุ่น

ดังนั้น อัตราส่วน SGQDs 2% เป็นเพียงอัตราส่วนเดียวที่ยังคงค่าเพนิเทรชันให้อยู่ในช่วงมาตรฐานที่กำหนด และสมดุลระหว่างความแข็งกับความยืดหยุ่นได้ดีที่สุดในบรรดาอัตราส่วนที่ทดสอบ

4.3.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test)

การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test) ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 405/2519 ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T51 ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs มีตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (เนื่องจากทดสอบตั้งแต่ SGQDs 2% ขึ้นไป ไม่ผ่านมาตรฐาน โดยที่ SGQDs 2% ให้ค่าที่ผ่านมาตรฐานมาเพียงเล็กน้อย)

ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบความสามารถในการยืดตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 4, 6, 8 และ 10

Ductility	Control	SGQDs 0.2%	SGQDs 0.4%	SGQDs 0.6%	SGQDs 0.8%	SGQDs 1%
ระยะที่ยืดออก (mm.)	1500+	1500+	1500+	1500+	1500+	1420
Ductility	SGQDs 2%	SGQDs 4%	SGQDs 6%	SGQDs 8%	SGQDs 10%	
ระยะที่ยืดออก (mm.)	1030	470	290	264	178	

*ค่ามาตรฐานการทดสอบความสามารถในการยืดตัวกำหนดไว้ มีค่ามากกว่า 1000 มม.

จากผลการทดสอบค่าความสามารถในการยืดตัว (Ductility) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (SGQDs) พบว่าอัตราส่วนตั้งแต่ 0.2% ถึง 1% ให้ค่าการยืดตัวมากกว่า 1000 มม. โดยเฉพาะช่วง 0.2%–0.8% มีค่ามากกว่า 1500 มม. ทั้งหมด ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและแสดงถึงความยืดหยุ่นของวัสดุที่ดีเยี่ยม ขณะที่อัตราส่วน SGQDs 1% ยังให้ค่าอยู่ที่ 1420 มม. ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 2% ค่าการยืดตัวลดลงเหลือ 1030 มม. ซึ่งผ่านค่ามาตรฐานมาเพียงเล็กน้อย และลดลงต่อเนื่องในอัตราส่วนที่สูงขึ้น โดย SGQDs 4%, 6%, 8% และ 10% ให้ค่า Ductility อยู่ที่ 470, 290, 264 และ 178 มม. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติม SGQDs ในอัตราส่วนเกิน 2% จะส่งผลกระทบต่อความยืดหยุ่นของแอสฟัลต์ซีเมนต์อย่างชัดเจน และอาจทำให้วัสดุแข็งและเปราะจนไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน

4.3.5 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point Test: Open Cup)

การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point Test: Open Cup) ตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 406/2519 ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T-48 หรือ ASTM D92 ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs มีตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์

ตารางที่ 4.22 ผลการทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

Flash point	Control	SGQDs 2%	SGQDs 4%	SGQDs 6%	SGQDs 8%	SGQDs 10%
อุณหภูมิจุดวาบไฟ (°C)	338	320.3	316.4	314.2	312.8	309

*ค่ามาตรฐานจุดวาบไฟกำหนดไว้ มีค่ามากกว่า 232°C

จากผลการทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (SGQDs) ในอัตราส่วน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% พบว่าทุกอัตราส่วนยังคงมีค่าอุณหภูมิของจุดวาบไฟสูงกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนดไว้ที่ 232°C อย่างชัดเจน โดยตัวอย่างควบคุมให้ค่าจุดวาบไฟสูงสุดที่ 338°C ขณะที่กลุ่มตัวอย่างผสม SGQDs มีค่าลดลงเล็กน้อยตามลำดับอัตราส่วน โดยอยู่ระหว่าง 320.3°C ถึง 309°C แม้อัตราส่วน SGQDs 10% จะให้ค่าต่ำสุดที่ 309°C แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยและเหมาะสมต่อการใช้งานทางวิศวกรรม ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่า การเติม SGQDs ไม่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการใช้งานแอสฟัลต์ซีเมนต์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง

4.3.6 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating)

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating) ตามมาตรฐาน ASTM D6 หรือเทียบเท่า AASHTO T-47 ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs มีตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์

ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10

Weight loss on heating	Control	SGQDs 2%	SGQDs 4%	SGQDs 6%	SGQDs 8%	SGQDs 10%
น้ำหนักก่อนเข้าอบ	65.1	65.5	66.5	67.7	66.6	68.1
น้ำหนักหลังเข้าอบ	65.09	65.3	65.9	66.8	65.6	66.7
% น้ำหนักแอสฟัลต์ที่หายไป (%wt)	0.02	0.40	1.18	1.76	1.97	2.76

*ค่ามาตรฐานของการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน กำหนดไว้ ไม่ควรเกิน 0.8%wt

จากผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (SGQDs) พบว่า เมื่ออัตราส่วนของ SGQDs เพิ่มขึ้น ค่าการสูญเสียน้ำหนักก็เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยตัวควบคุมมีค่าสูญเสียต่ำสุดเพียง 0.02%wt และ SGQDs 2% อยู่ที่ 0.40%wt ซึ่งยังไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่ควรเกิน 0.8%wt แต่ตั้งแต่อัตราส่วน 4% เป็นต้นไป ค่าเริ่มเกินค่ามาตรฐานอย่างชัดเจน โดย SGQDs 4%, 6%, 8% และ 10% มีค่าสูญเสียเท่ากับ 1.18%, 1.76%, 1.97% และ 2.76% ตามลำดับ

ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า การเติม SGQDs ในปริมาณสูงมีแนวโน้มลดความคงตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของวัสดุในกระบวนการผลิตหรือใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูง ดังนั้น อัตราส่วน SGQDs 2% เป็นอัตราส่วนสูงสุดที่ยังสามารถควบคุมค่าการสูญเสียน้ำหนักให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และเหมาะสมที่สุดในด้านความทนทานต่อความร้อน

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (SGQDs) ในอัตราส่วน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% พบว่าแม้อัตราส่วน 4% จะให้ค่าความเสถียรภาพ (Stability) และค่าโมดูลัสคืนตัว (ITSm) สูงที่สุด แต่เมื่อพิจารณาความสามารถในการยืดตัว (Ductility) กลับพบว่ามีค่าเพียง 470 มม. ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดไว้ที่ 1000 มม. และอัตราส่วนที่สูงกว่ายิ่งให้ค่า Ductility ต่ำลงเรื่อย ๆ แสดงถึงความเปราะบางของวัสดุที่เพิ่มขึ้น ทำให้พิจารณาว่าอัตราส่วนไม่เกิน 1% โดยเฉพาะในช่วง 0.2–1% เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดในแง่คุณสมบัติวัสดุและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุน เนื่องจากสามารถใช้ปริมาณสารเติมแต่งในระดับต่ำแต่ยังให้ผลที่ดีต่อคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตอย่างครบถ้วน ดังนี้

- ค่าเสถียรภาพ (Stability) SGQDs 2% ให้ค่าความเสถียรภาพที่ 13,195.05 N ซึ่งสูงกว่าตัวควบคุม (11,127.44 N) และเป็นรองเพียงอัตราส่วน 4% เท่านั้น แสดงถึงการเพิ่มความแข็งแรงในการรับแรงกดของวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ
- ค่าการยุบตัว (Flow) ของ SGQDs 2% เท่ากับ 3.40 mm ใกล้เคียงกับตัวควบคุม (3.37 mm) และต่ำกว่าอัตราส่วนที่สูงขึ้น ซึ่งช่วยลดโอกาสการยุบตัวมากเกินไปในโครงสร้างผิวทาง
- ค่าโมดูลัสคืนตัว (ITSm) ที่อุณหภูมิ 40°C อัตราส่วน 2% ให้ค่า ITSm เฉลี่ย 785.5 MPa สูงกว่าตัวควบคุม (703.5 MPa) และใกล้เคียงกับค่า ITSm สูงสุดของอัตราส่วน 4% (847 MPa) แสดงถึงความสามารถในการคืนสภาพได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูง
- ค่าเพนิเทรชัน (Penetration) ค่าเฉลี่ยของ SGQDs 2% อยู่ที่ 60.67 ซึ่งยังผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (60–70) และลดลงอย่างพอดีเมื่อเทียบกับตัวควบคุม (64.33) บ่งบอกถึงความแข็งที่เพิ่มขึ้นอย่างเหมาะสม ไม่แข็งเกินไป
- ความสามารถในการยืดตัว (Ductility) อัตราส่วน 2% ให้ค่า 1030 มม. ซึ่งผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานที่ 1000 มม. แต่ยังคงสูงกว่าทุกอัตราส่วนที่มากกว่าชัดเจน และเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน $\leq 1\%$ ซึ่งให้ค่ามากกว่า 1000 มม. ทุกช่วง (สูงถึง 1500+) จะเห็นว่า อัตราส่วนไม่เกิน 2% เหมาะสมที่สุดในแง่ความเหนียวและความยืดหยุ่นของวัสดุ
- ค่าจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด อัตราส่วน 2% ให้ค่าอุณหภูมิของจุดวาบไฟที่ 320.3°C สูงกว่ามาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนด (232°C) อย่างมาก จึงปลอดภัยต่อการใช้งานในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับความร้อน

- การสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating) อัตราส่วน 2% มีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อนเพียง 0.40% ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.80% แสดงถึงความคงตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์เมื่อสัมผัสความร้อน

จากการพิจารณาทุกหัวข้อร่วมกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนไม่เกิน 2% เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด เพราะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งด้านความแข็งแรง ความปลอดภัย และเสถียรภาพทางความร้อน ขณะเดียวกันยังช่วยลดต้นทุนด้านวัสดุและปริมาณการใช้สารเสริมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



4.4 การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต/แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา และกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง

ในการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต/แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา และกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง เลือกจากผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวเผา และการปรับปรุงคุณภาพกราฟีนควอนตัมดอท จากหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 โดยมีผลการทดสอบที่เลือกดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 อัตราส่วนที่เหมาะสมของการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยดินขาวเผา / กราฟีนควอนตัมดอท

การปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีต	อัตราส่วนที่เหมาะสม
ดินขาวเผา (MK)	ไม่ควรเกิน 2%
กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (SGQDs)	ไม่ควรเกิน 2%

จากผลการทดสอบแสดงอัตราส่วนที่เหมาะสม และวิเคราะห์จากงานวิจัยที่มีมาและผลการทดสอบได้เลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของ การปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีต/แอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยดินขาวเผา ร่วมกับกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (M-SG) ดังนี้

ตารางที่ 4.25 อัตราส่วน M-SG ที่ออกแบบ

อัตราส่วน M-SG	% MK ต่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์	% SGQDs ต่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์
M-SG 1	2%	0.5%
M-SG 2	2%	1%
M-SG 3	2%	1.5%
M-SG 4	2%	2%

โดยในการศึกษา MK ร่วมกับ SGQDs เพื่อเป็นการศึกษาความสามารถของ SGQDs ในการเพิ่มประสิทธิภาพของ MK ในการเพิ่มคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีต/แอสฟัลต์ซีเมนต์ มีผลการทดสอบโดยเรียงตามลำดับดังนี้

4.4.1 การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall

การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธี Marshall ของการปรับปรุงคุณสมบัติด้วย MK ร่วมกับ SGQDs มีจำนวนตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีต MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2 โดยแต่ละอัตราส่วนมีจำนวน 5 ตัวอย่าง ได้แก่ (M-SG 1.1 - M-SG 1.5, M-SG 2.1 - M-SG 2.5, M-SG 3.1 - M-SG 3.5 และ M-SG 4.1 - M-SG 4.5)

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 14,960.64 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.58 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5

NO.	M-SG 1.1	M-SG 1.2	M-SG 1.3	M-SG 1.4	M-SG 1.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1175.7	1202	1209.9	1212.6	1210.5
น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g.)	1179.6	1207.2	1214	1215.1	1214.1
น้ำหนักในน้ำ (g.)	687.2	703.1	707.2	707	707.8
ปริมาตรรวม (ml.)	492.4	504.1	506.8	508.1	506.3
ความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.39	2.38	2.39	2.39	2.39
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./ml.)	2.39				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.49	10.48	10.49	10.49	10.51
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.85	85.73	85.84	85.81	85.96
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.15	14.27	14.16	14.19	14.04
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	3.66	3.79	3.67	3.70	3.53
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)	3.67				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	74.16	73.45	74.08	73.90	74.86
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	15597.90	14911.20	15009.30	14911.20	15303.60
อัตราส่วนการปรับแก้	0.96	1	1	1	0.98
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	14973.984	14911.2	15009.3	14911.2	14997.528
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	14960.64				
อัตราการไหล (mm.)	3.8	3.4	3.5	3.5	3.7
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.58				

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:1 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 11,897.49 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.74 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:1

NO.	M-SG 2.1	M-SG 2.2	M-SG 2.3	M-SG 2.4	M-SG 2.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1199.2	1206.8	1198.3	1192.5	1199
น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g.)	1202	1209.5	1201.1	1195.5	1202.5
น้ำหนักในน้ำ (g.)	699.7	702.4	699.1	695.4	697.2
ปริมาตรรวม (mL.)	502.3	507.1	502	500.1	505.3
ความหนาแน่นรวม (g./mL.)	2.39	2.38	2.39	2.38	2.37
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./mL.)	2.38				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.49	10.46	10.49	10.48	10.43
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.84	85.56	85.83	85.73	85.31
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.16	14.44	14.17	14.27	14.69
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	3.67	3.98	3.68	3.79	4.26
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)	3.87				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	74.09	72.46	74.01	73.47	71.02
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	11772.00	11379.60	12450.70	11830.80	12980.40
อัตราส่วนการปรับแก้	0.96	0.96	1	1	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	11301.12	10924.416	12450.7	11830.8	12980.4
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	11897.49				
อัตราการไหล (mm.)	3.7	3.7	3.8	3.8	3.7
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.74				

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:1.5 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 11,450.69 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 3.94 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:1.5

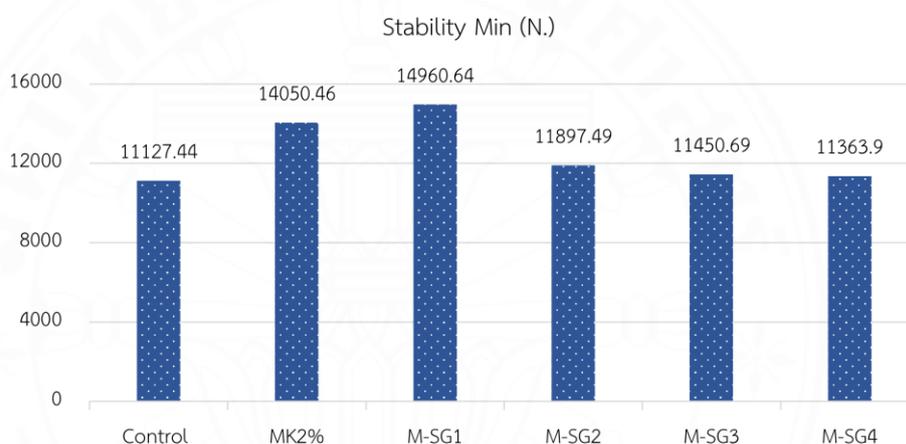
NO.	M-SG 3.1	M-SG 3.2	M-SG 3.3	M-SG 3.4	M-SG 3.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1205.5	1189.6	1197.5	1198.4	1200.1
น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g.)	1208.5	1193.4	1201.5	1202.8	1204.7
น้ำหนักในน้ำ (g.)	699.1	689.4	695.4	695.8	697.8
ปริมาตรรวม (mL.)	509.4	504	506.1	507	506.9
ความหนาแน่นรวม (g./mL.)	2.37	2.36	2.37	2.36	2.37
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./mL.)	2.36				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.40	10.37	10.40	10.39	10.41
ปริมาตรมวลรวม (g.)	85.09	84.86	85.07	84.99	85.12
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	14.91	15.14	14.93	15.01	14.88
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	4.51	4.76	4.53	4.63	4.47
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)	4.58				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	69.74	68.54	69.67	69.19	69.95
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	11183.40	11673.90	11854.40	11785.50	11458.90
อัตราส่วนการปรับแก้	1	0.96	1	0.98	1
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	11183.4	11206.944	11854.4	11549.79	11458.9
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	11450.69				
อัตราการไหล (mm.)	3.8	3.9	3.9	4	4.1
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	3.94				

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:2 ที่ออกแบบได้ค่าเสถียรภาพ (Stability) เฉลี่ยอยู่ที่ 11,363.90 นิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าตามมาตรฐานกำหนด และค่าการยุบตัว (Flow) เฉลี่ยอยู่ที่ 4.32 มม. เป็นค่าที่อยู่ในช่วงมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าการทดสอบอื่นๆ ดังตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.29 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:2

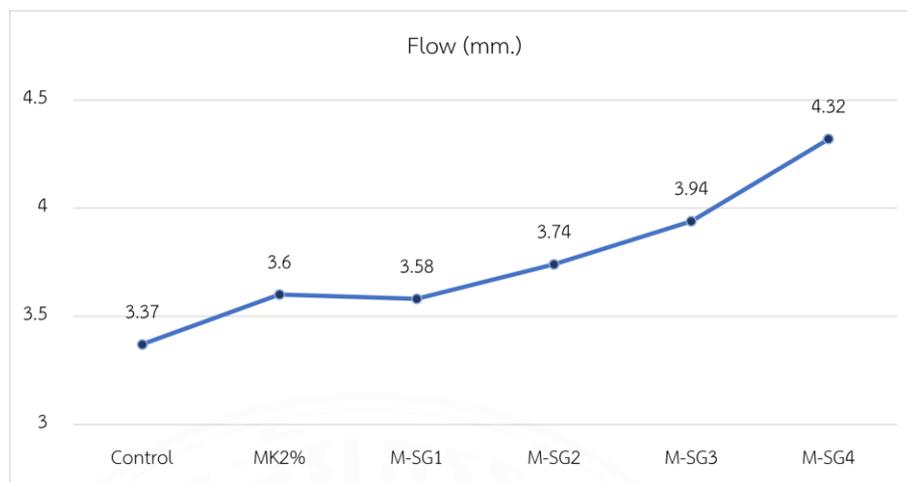
NO.	M-SG 4.1	M-SG 4.2	M-SG 4.3	M-SG 4.4	M-SG 4.5
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ (%)	5				
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (%)	4.76				
ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (%)	4.48				
Density					
น้ำหนักในอากาศ (g.)	1188.5	1206.7	1190.4	1201.3	1200
น้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง (g.)	1209.2	1212.9	1196.7	1207.6	1205.1
น้ำหนักในน้ำ (g.)	704.4	701.3	696.2	699.2	698.4
ปริมาตรรวม (mL.)	504.8	511.6	500.5	508.4	506.7
ความหนาแน่นรวม (g./mL.)	2.35	2.36	2.38	2.36	2.37
ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวม (g./mL.)	2.36				
Voids Analysis					
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (g.)	10.35	10.37	10.45	10.39	10.41
ปริมาตรมวลรวม (g.)	84.65	84.81	85.52	84.96	85.15
ช่องว่างของมวลรวม V.M.A. (g.)	15.35	15.19	14.48	15.04	14.85
ช่องว่างอากาศ (Air Voids) (g.)	5.00	4.83	4.03	4.66	4.44
เฉลี่ยช่องว่างอากาศ (g.)	4.59				
ช่องว่างบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (V.F.B)	67.42	68.22	72.17	69.04	70.09
Stability/Flow					
ค่าเสถียรภาพ (N.)	11085.30	11772.00	11870.10	11575.80	11183.40
อัตราส่วนการปรับแก้	0.96	1	1	1	0.98
ค่าปรับแก้ความเสถียรภาพ (N.)	10641.888	11772	11870.1	11575.8	10959.732
ค่าเฉลี่ยความเสถียรภาพ (N.)	11363.90				
อัตราการไหล (mm.)	4.1	4.5	4.3	4.4	4.3
ค่าเฉลี่ยอัตราการไหล (mm.)	4.32				

จากผลการทดสอบค่าเสถียรภาพพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมดินขาวเผาร้อยละ 2 ร่วมกับกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้างในอัตราร้อยละ 0.5 (S-MK1) ให้ค่าเสถียรภาพสูงที่สุดที่ 14,960.64 N รองลงมาคือกลุ่ม MK2% ที่ไม่มีการเติม S-GQDs โดยให้ค่า 14,050.46 N ดังภาพที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าการเติมกราฟีนควอนตัมดอทในปริมาณเล็กน้อยมีส่วนช่วยขัดผิวของดินขาวเผาระหว่างกระบวนการผสมแบบร้อน (Hot Mix) ทำให้เกิดการยึดเกาะและกระจายตัวของอนุภาคได้ดีขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างแอสฟัลต์มีความต้านทานต่อแรงเฉือนได้สูงขึ้น แต่หากเติมในอัตราที่สูงเกินไป เช่น S-MK3 และ S-MK4 ค่าความเสถียรภาพกลับลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการที่ S-GQDs เปลี่ยนแปลงโครงสร้างดินขาวเผาเติม ทำให้สูญเสียสมดุลในการเสริมแรงของแอสฟัลต์คอนกรีต



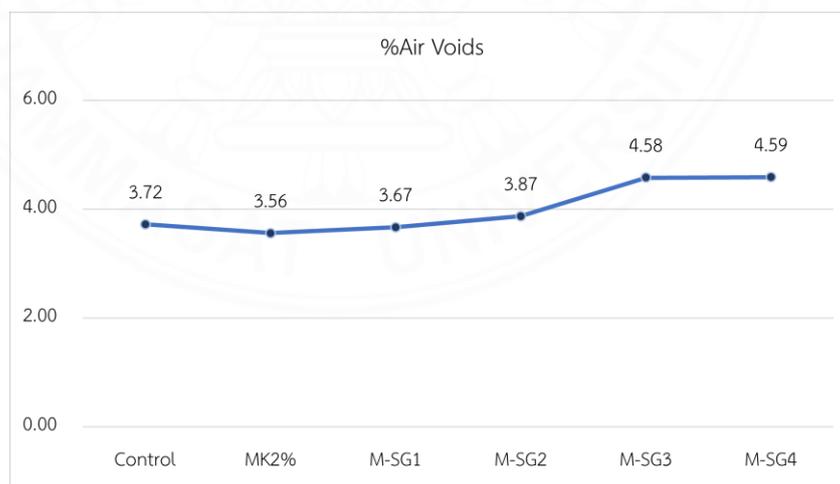
ภาพที่ 4.9 ค่าเสถียรภาพ (Stability) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2

ค่าการยุบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติม S-GQDs ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น โดยกลุ่ม S-MK4 ให้ค่า Flow สูงสุดที่ 4.32 mm ซึ่งมากเกินไปในช่วงที่เหมาะสม ขณะที่กลุ่ม S-MK1 ให้ค่า Flow เท่ากับ 3.58 mm เพิ่มขึ้นจากกลุ่มควบคุม (3.37 mm) และใกล้เคียงกับ MK2% (3.60 mm) ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งานภาคสนาม ไม่เปราะและไม่อ่อนตัวเกินไป จึงแสดงว่าการเติม S-GQDs ในอัตรา 0.5% สามารถปรับปรุงคุณสมบัติการเปลี่ยนสภาพของวัสดุให้มีความยืดหยุ่นที่สมดุล



ภาพที่ 4.10 ค่าการยุบตัว (Flow) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2

ค่าช่องว่างอากาศของแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าต่ำที่สุดในกลุ่ม MK2% (3.56%) ขณะที่กลุ่ม S-MK1 และ S-MK2 ซึ่งเติม S-GQDs ที่ 0.5% และ 1% ตามลำดับ ให้ค่าอยู่ที่ 3.67% และ 3.87% ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมไม่เกิน 4% แสดงถึงความหนาแน่นของโครงสร้างที่ดี และคาดว่าจะมีความต้านทานต่อการแทรกซึมของน้ำและอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ค่าช่องว่างจะเพิ่มขึ้นชัดเจนเมื่ออัตราการเติม S-GQDs เกิน 1.5% เช่นในกลุ่ม S-MK3 และ S-MK4 ที่มีค่าเกิน 4.5% ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความทนทานในระยะยาว



ภาพที่ 4.11 ค่าช่องว่างอากาศ (Air Voids) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs อัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมดินขาวเผาร้อยละ 2 (MK2%) และเสริมด้วยกราไฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (S-GQDs) ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5–2 พบว่าอัตราส่วน S-MK1 (ดินขาวเผา 2% + S-GQDs 0.5%) ให้ค่าความเสถียรภาพ (Stability) สูงที่สุดที่ 14,960.64 N สูงกว่าทั้งกลุ่ม MK2% (14,050.46 N) และกลุ่มควบคุม (11,127.44 N) แสดงถึงประสิทธิภาพของ S-GQDs ในการช่วยขัดผิวของดินขาวเผาให้เกิดการยึดเกาะและกระจายตัวดีขึ้นเมื่อผสมแบบ Hot Mix ขณะเดียวกัน ค่าการยุบตัว (Flow) ของ S-MK1 อยู่ที่ 3.58 mm ซึ่งเพิ่มขึ้นจากค่าควบคุมเพียงเล็กน้อยและยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมไม่เกินเกณฑ์ แสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนสภาพได้ดีโดยไม่เสียความมั่นคงทางโครงสร้าง ส่วนค่าช่องว่างอากาศ (Air Voids) ของ S-MK1 อยู่ที่ 3.67% อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งานตามเกณฑ์มาตรฐาน (3–5%) และไม่เพิ่มขึ้นมากจนกระทบต่อความหนาแน่นหรือทำให้วัสดุเปราะ ทั้งนี้จากแนวโน้มโดยรวมพบว่า การเติม S-GQDs ในปริมาณมากเกินไปส่งผลให้ทั้งค่าเสถียรภาพลดลง ค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้นเกินช่วงที่เหมาะสม และค่าช่องว่างอากาศเพิ่มสูงเกิน 4.5% ซึ่งอาจเกิดจากการที่อนุภาค S-GQDs ไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินขาวเผาเดิมในระดับนาโน ส่งผลให้วัสดุสูญเสียความต่อเนื่องและความคงตัวทางกายภาพในระยะยาว ดังนั้น อัตราส่วน S-GQDs 0.5% ถือเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการเสริมประสิทธิภาพของดินขาวเผาในแอสฟัลต์คอนกรีต ทั้งในแง่ของสมรรถนะวัสดุและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

4.4.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (ITSM)

การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ได้เลือกอัตราส่วนผสมจากผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Stability) ด้วยวิธี Marshall โดยเลือกที่อัตราส่วน 2:0.5 และ 2:1 เนื่องจาก

- อัตราส่วน 2:0.5 เป็นค่าที่ให้ค่าเสถียรภาพสูงสุดในการทดสอบ
- อัตราส่วน 2:1 เริ่มแสดงแนวโน้มของค่าเสถียรภาพที่ลดลงจากจุดสูงสุดดังกล่าว จึงเลือกทั้งสองอัตราส่วนดังกล่าวเพื่อนำไปทดสอบพฤติกรรมเชิงกลเพิ่มเติมผ่านค่า

โมดูลัสคืนตัวเพื่อประเมินผลของการปรับปรุงด้วยด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ต่อความสามารถในการคืนสภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต และทำการทดสอบ 4 อุณหภูมิ ได้แก่ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส มีจำนวนตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ 2 ตัวอย่าง
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม MK2% 2 ตัวอย่าง
- แอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5 และ 2:1 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ อัตราส่วนละ 2 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5 และ 2:1 ของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทดสอบ 4 อุณหภูมิ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส มีผลการทดสอบเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมและแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสม MK2% ดังตารางที่ 4.30

ตารางที่ 4.30 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัว (MPa) ของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5 และ 2:1 ทดสอบ 4 อุณหภูมิ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	15	20	30	40
A 1.1	9168	5626	2058	750
A 1.2	9013	5481	1903	657
Average Control	9090.5	5553.5	1980.5	703.5
MK 2.1	6601	4039	1257	527
MK 2.2	9987	6572	2209	919
Average MK 2%	8294	5305.5	1733	723
M-SG 1.1	9763	6413	2040	870
M-SG 1.2	9407	6187	1988	837
Average M-SG 1.1-1.2	9585	6300	2014	853.5
M-SG 2.1	9012	5800	1879	813
M-SG 2.2	8982	5787	1897	794
Average M-SG 2.1-2.2	8997	5793.5	1888	803.5

*การทดสอบ ITSm ไม่มีค่ามาตรฐาน โดยส่วนมากกำหนดเป็นช่วงๆ ตามอุณหภูมิ

จากตารางที่ 4.30 แสดงผลการทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผา (MK) ร้อยละ 2 ร่วมกับกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (S-GQDs) ในอัตราส่วน 2:0.5 และ 2:1 โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมและกลุ่มที่เติม MK 2% เพียงอย่างเดียว ที่อุณหภูมิ 15, 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส พบว่าโมดูลัสคั้นตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมทั่วไปของวัสดุแอสฟัลต์ที่ไวต่ออุณหภูมิ

- อุณหภูมิ 15°C กลุ่ม M-SG 1 (2:0.5) ให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวเฉลี่ยสูงที่สุดที่ 9585 MPa รองลงมาคือ M-SG 2 (2:1) ที่ 8997 MPa, ตัวควบคุม (9090.5 MPa) และ MK 2% (8294 MPa) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า S-GQDs ช่วยเพิ่มความสามารถ

ในการคืนตัวของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าทั้งตัวควบคุมและตัวทดสอบที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK อย่างเดียว

- อุณหภูมิ 20°C ค่าเฉลี่ยของ M-SG 1 ยังคงสูงที่สุดที่ 6300 MPa รองลงมาคือ M-SG 2 (5793.5 MPa), MK 2% (5305.5 MPa) และตัวควบคุม (5553.5 MPa) สะท้อนถึงความได้เปรียบของอัตราส่วน S-GQDs 0.5% ในการคงความแข็งแรงภายใต้อุณหภูมิกกลาง
- อุณหภูมิ 30°C M-SG 1 ยังคงให้ค่าเฉลี่ยสูงที่สุดที่ 2014 MPa รองลงมาคือ M-SG 2 (1888 MPa), MK 2% (1733 MPa) และตัวควบคุม (1980.5 MPa) ซึ่งแม้ว่า M-SG 2 จะมีค่าลดลงบ้าง แต่ยังคงสูงกว่าตัวทดสอบที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK อย่างเดียว
- อุณหภูมิ 40°C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิการใช้งานจริง M-SG 1 ให้ค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ยสูงที่สุดที่ 853.5 MPa รองลงมาคือ M-SG 2 (803.5 MPa), MK 2% (723 MPa) และตัวควบคุม (703.5 MPa) แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ S-GQDs ในการเสริมคุณสมบัติของวัสดุในสภาพแวดล้อมที่ร้อน

จากแนวโน้มดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า การเติม S-GQDs ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่น 0.5% (M-SG 1) มีส่วนช่วยขัดผิวของอนุภาคดินขาวเผา ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้นในแอสฟัลต์ซีเมนต์เมื่อผสมแบบร้อน (Hot Mix) ส่งผลให้โครงสร้างวัสดุมีความเหนียวแน่นและคืนตัวได้ดี

4.4.3 การทดสอบการเพิเธรชั้น (Penetration Test)

การทดสอบการเพิเธรชั้น (Penetration Test) ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 403/2518 ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T46 ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs มีตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ 2 ตัวอย่าง
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม MK2% 2 ตัวอย่าง
- แอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2 แทนด้วย M-SG1 – M-SG4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.31 ผลการทดสอบการเพิเธรชั้นของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2

Penetration	Control	MK2%	M-SG1	M-SG2	M-SG3	M-SG4
ทดสอบครั้งที่ 1	65	63	64	60	58	52
ทดสอบครั้งที่ 2	64	63	63	60	57	52
ทดสอบครั้งที่ 3	64	61	61	59	52	51
ค่าเฉลี่ย	64.33	62.33	62.67	59.67	55.67	51.67

*ค่ามาตรฐานการทดสอบการเพิเธรชั้น อยู่ที่ 60 – 70 (ไม่มีหน่วย)

จากตารางที่ 4.31 แสดงผลการทดสอบค่าความแข็งแบบเพิเธรชั้นของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผา (MK) ร้อยละ 2 ร่วมกับกรากฟืนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (S-GQDs) ในอัตราส่วน 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2 โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมและ MK 2% พบว่าอัตราส่วนการเติม S-GQDs ที่มากขึ้นทำให้ค่าความแข็งของวัสดุเพิ่มขึ้น (ค่าความลึกในการแทงลดลง) อย่างชัดเจน

ค่าความแข็งเฉลี่ยของเพิเธรชั้นในตัวควบคุมอยู่ที่ 64.33 ซึ่งลดลงเหลือ 62.33 เมื่อเติม MK 2% และเมื่อเติม S-GQDs โดย M-SG1 (2:0.5) มีค่าเฉลี่ย 62.67 ยังคงอยู่ในช่วงมาตรฐาน (60–70) ขณะที่ M-SG2, M-SG3 และ M-SG4 มีค่าเฉลี่ยลดลงเหลือ 59.67, 55.67 และ 51.67 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด แสดงถึงความแข็งที่เพิ่มขึ้นของวัสดุเมื่อมีการเติม S-GQDs ในปริมาณมากขึ้น แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การเติม S-GQDs ในปริมาณน้อย เช่น 0.5% (M-SG1) ช่วยเพิ่มความแข็งของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในระดับที่เหมาะสมโดยยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ขณะที่การเติมในปริมาณมากเกินไปอาจทำให้วัสดุแข็งเปราะเกินไป ส่งผลต่อความทนทานต่อแรงกระทำและการแตกร้าวในระยะยาว

4.4.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test)

การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility Test) ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 405/2519 ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T51 ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs มีตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ 2 ตัวอย่าง
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม MK2% 2 ตัวอย่าง
- แอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2 แทนด้วย M-SG1 – M-SG4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.32 ผลการทดสอบความสามารถในการยืดตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2

Ductility	Control	MK2%	M-SG1	M-SG2	M-SG3	M-SG4
ระยะที่ยืดออก (mm.)	1500+	1120	1230	750	680	610

*ค่ามาตรฐานการทดสอบความสามารถในการยืดตัวกำหนดไว้ มีค่ามากกว่า 1000 มม.

จากตารางที่ 4.32 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผา (MK) ร้อยละ 2 และการเติมกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (S-GQDs) ในอัตราส่วน 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2 พบว่า การเติม S-GQDs ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุลดลงอย่างชัดเจนโดยค่าความสามารถในการยืดตัวของตัวควบคุมอยู่ที่มากกว่า 1500 มม. และ MK2% ที่ 1120 มม. ยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนดไว้ที่ 1000 มม. เช่นเดียวกับ M-SG1 (2:0.5) ที่ให้ค่าความสามารถในการยืดตัวสูงที่สุดในกลุ่ม S-GQDs ที่ 1230 mm แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ S-GQDs เป็น 1%, 1.5% และ 2% ค่าดังกล่าวลดลงอย่างต่อเนื่องเหลือ 750 มม., 680 มม. และ 610 มม. ตามลำดับ ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การเติม S-GQDs ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น 0.5% มีบทบาทในการเสริมคุณสมบัติความเหนียวและความยืดหยุ่นของแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.5 การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point Test: Open Cup)

การทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point Test: Open Cup) ตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 406/2519 ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐาน AASHTO T-48 หรือ ASTM D92 ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs มีตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ 2 ตัวอย่าง
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม MK2% 2 ตัวอย่าง
- แอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2 แทนด้วย M-SG1 – M-SG4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.33 ผลการทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2

Flash point	Control	MK2%	M-SG1	M-SG2	M-SG3	M-SG4
อุณหภูมิจุดวาบไฟ (°C)	338	315.1	322.9	313.8	312.5	310

*ค่ามาตรฐานจุดวาบไฟกำหนดไว้ มีค่ามากกว่า 232°C

จากตารางที่ 4.33 แสดงผลการทดสอบจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผา (MK) ร้อยละ 2 และการเติมกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (S-GQDs) ในอัตราส่วน 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2 พบว่าอุณหภูมิของจุดวาบไฟในทุกสูตรยังคงมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนดไว้ที่ 232°C ซึ่งสะท้อนถึงความปลอดภัยในการใช้งานวัสดุในด้านการต้านทานการติดไฟ โดยตัวอย่างควบคุมมีค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ 338°C ขณะที่ MK2% อยู่ที่ 315.1°C และเมื่อเติม S-GQDs ลงไปพบว่าอุณหภูมิของจุดวาบไฟมีแนวโน้มลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไป โดย M-SG1 (2:0.5) อยู่ที่ 322.9°C และ M-SG2 ถึง M-SG4 มีค่าลดลงเหลือ 319.8°C, 312.5°C และ 310°C ตามลำดับ แม้ว่าจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วน S-GQDs แต่ทุกสูตรยังมีค่ามากพอที่จะรับประกันความปลอดภัยในกระบวนการผสมแบบร้อน (Hot Mix) และการใช้งานจริง

4.4.6 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating)

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating) ตามมาตรฐาน ASTM D6 หรือเทียบเท่า AASHTO T-47 ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs มีตัวอย่างการทดสอบ ดังนี้

- แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมคุณภาพ 2 ตัวอย่าง
- แอสฟัลต์คอนกรีต ผสม MK2% 2 ตัวอย่าง
- แอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2 แทนด้วย M-SG1 – M-SG4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.34 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย MK ร่วมกับ SGQDs ในอัตราส่วนร้อยละ 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2

Weight loss on heating	Control	Control	M-SG1	M-SG2	M-SG3	M-SG4
น้ำหนักก่อนเข้าอบ	65.1	65.1	66.1	65.8	70.1	70.8
น้ำหนักหลังเข้าอบ	65.09	65.09	66.1	65.7	69.9	70.5
%น้ำหนักแอสฟัลต์ที่หายไป (%wt)	0.02	0.02	0.00	0.15	0.29	0.42

*ค่ามาตรฐานของการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน กำหนดไว้ ไม่ควรเกิน 0.8%wt

จากตารางที่ 4.34 แสดงผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผา (MK) ร้อยละ 2 และกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (SGQDs) ในอัตราส่วน 2:0.5, 2:1, 2:1.5 และ 2:2 พบว่าอัตราส่วน M-SG1 แสดงค่า %wt ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่หายไปเท่ากับ 0.00% สะท้อนถึงความคงตัวทางความร้อนที่ดีเยี่ยม ส่วน M-SG2, M-SG3 และ M-SG4 มีค่าสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเป็น 0.15%, 0.29% และ 0.42% ตามลำดับ แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.8%wt

แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า กราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (SGQDs) สามารถช่วยเสริมความคงทนต่อความร้อนของแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในอัตราส่วนที่ไม่เกิน 1% ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่า SGQDs มีบทบาทในการขัดผิวและกระจายตัวร่วมกับอนุภาคของดินขาวเผาได้ดีในกระบวนการผสมแบบร้อน (Hot Mix) อย่างไรก็ตาม

ตาม การเติม SGQDs มากเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินขาวเผา และทำให้คุณสมบัติทางความร้อนลดลงเล็กน้อย จึงควรควบคุมปริมาณการเติมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วน 2% ร่วมกับกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (S-GQDs) ที่อัตราส่วนตั้งแต่ 0.5% ถึง 2% แสดงให้เห็นว่า การเติม S-GQDs ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในสูตร M-SG1 (2:0.5) ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในภาพรวม และสามารถสรุปผลการทดสอบตามลำดับหัวข้อได้ดังนี้

- ค่าเสถียรภาพ (Stability): สูตร M-SG1 ให้ค่าความเสถียรภาพสูงที่สุดที่ 14,960.64 N สูงกว่าตัวควบคุม (11,127.44 N) และ MK2% (14,050.46 N) เล็กน้อย แสดงถึงโครงสร้างภายในที่แข็งแรง โดยอาจเป็นผลจาก S-GQDs ช่วยขัดผิวอนุภาคของดินขาวเผาในกระบวนการผสมแบบ Hot Mix ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างเฟสดีขึ้น
- ค่าการยุบตัว (Flow): ค่า Flow ของสูตร M-SG1 อยู่ที่ 3.58 mm ซึ่งอยู่ในช่วงเหมาะสม ไม่ต่ำเกินไปจนเปราะ และไม่สูงเกินไปจนเสี่ยงต่อการเสียภาพ ขณะที่สูตร M-SG4 ซึ่งมีปริมาณ S-GQDs สูงถึง 2% ให้ค่า Flow สูงถึง 4.32 mm ซึ่งอาจสะท้อนถึงโครงสร้างภายในที่เริ่มหลวม
- ค่าโมดูลัสคืนตัว (ITSm): ที่อุณหภูมิ 40°C สูตร M-SG1 ให้ค่าโมดูลัสคืนตัวเฉลี่ย 853.5 MPa สูงกว่าทั้ง MK2% (723 MPa) และตัวควบคุม (703.5 MPa) อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการเติม S-GQDs ปริมาณต่ำสามารถเสริมความสามารถในการคืนสภาพของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- ค่าเพนิเทรชัน (Penetration): ค่าเฉลี่ยของสูตร M-SG1 อยู่ที่ 62.67 ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงมาตรฐาน (60–70) แสดงถึงความแข็งระดับที่เหมาะสม ขณะที่สูตร M-SG4 ให้ค่าเพียง 51.67 ซึ่งต่ำกว่าช่วงเกณฑ์และอาจสะท้อนถึงความเปราะ
- ความสามารถในการยืดตัว (Ductility): สูตร M-SG1 เป็นสูตรเดียวที่ยังคงรักษาค่าความสามารถในการยืดตัวให้อยู่เหนือเกณฑ์มาตรฐาน (>1000 mm) โดยให้ค่าสูงถึง 1230 mm ขณะที่สูตรที่มีสัดส่วน S-GQDs สูงขึ้น เช่น M-SG4 ลดลงเหลือเพียง 610 mm ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่ S-GQDs ปริมาณสูงเกินไปไปรบกวนโครงสร้างภายในของดินขาวเผา
- ค่าจุดวาบไฟแบบถ้วยเปิด (Flash Point): สูตร M-SG1 ให้ค่า Flash Point สูงสุดที่ 322.9°C สูงกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำอย่างมาก (232°C) และสูงกว่าสูตรอื่นทั้งหมด แสดงถึงความปลอดภัยในการใช้งานในสภาวะร้อน

- การสูญเสียน้ำหนักจากความร้อน (Loss on Heating): สูตร M-SG1 แสดงผลการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุดที่ 0.00% ซึ่งแสดงถึงความคงตัวทางความร้อนที่ดีที่สุดในกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด ขณะที่สูตร M-SG4 ให้ค่าสูงถึง 0.42% แม้จะยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ S-GQDs ที่เติม

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าการเติม S-GQDs ในปริมาณมากเกินไป (มากกว่า 1%) มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนโครงสร้างของดินขาวเผาแทนที่จะช่วยขัดผิว ส่งผลให้คุณสมบัติโดยรวมของแอสฟัลต์คอนกรีตลดลง ขณะที่อัตราส่วนตัวอย่าง M-SG1 (2:0.5) แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมทั้งด้านคุณสมบัติเชิงกลและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้งานจริง



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาและกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้างสามารถ สรุปและอภิปรายผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ ดังนี้

5.1 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

จากผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การเติมดินขาวเผาเพียงอย่างเดียว การเติมกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (S-GQDs) เพียงอย่างเดียว และการเติมร่วมกันของทั้งสองวัสดุ พบผลลัพธ์ที่น่าสนใจซึ่งสามารถสรุปและอภิปรายได้ดังนี้

ส่วนที่ 1: การเติมดินขาวเผา ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยดินขาวเผาในอัตราส่วน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% พบว่าอัตราส่วน 4% แม้จะให้ค่าความเสถียรภาพ (Stability) และค่ามอดูลัสคืนตัว (ITSm) สูงที่สุด แต่เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติด้านความสามารถในการยืดตัว (Ductility) กลับพบว่ามีค่าเพียง 655 มม. ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนดไว้ที่ 1000 มม. จึงอาจส่งผลกระทบต่อความเหนียวและการต้านทานการแตกร้าวของวัสดุในระยะยาว ทำให้พิจารณาว่าอัตราส่วน 2% เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปศึกษาต่อ โดยในด้านอื่น ๆ พบว่าให้ค่าคุณสมบัติสูงกว่าตัวควบคุมในทุกหัวข้อ ทั้ง Stability, Flow, ITSm, Penetration, Ductility, Flash Point และ Loss on Heating อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด แสดงถึงศักยภาพของการใช้ดินขาวเผาในปริมาณที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีต

ส่วนที่ 2: การเติมกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วย S-GQDs ในอัตราส่วน 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% พบว่าแม้อัตราส่วน 4% จะให้ค่าความเสถียรภาพและมอดูลัสคืนตัวสูงที่สุด แต่กลับมีค่า Ductility เพียง 470 มม. ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และอัตราส่วนที่สูงกว่ายิ่งให้ค่าต่ำลง แสดงถึงความเปราะที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ช่วงอัตราส่วนที่เหมาะสมอยู่ที่ไม่เกิน 2% โดยเฉพาะในช่วง 0.2–1% ซึ่งให้ผลที่ดีครอบคลุมทุกคุณสมบัติ ได้แก่ เสถียรภาพที่สูงกว่า Control การยุบตัวที่อยู่ในช่วงเหมาะสม ค่าการคืนตัวที่สูงขึ้น ค่าการเจาะที่แข็งขึ้นอย่างเหมาะสม ความยืดหยุ่นที่ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และค่าความร้อนที่ปลอดภัยในการใช้งาน รวมถึงการสูญเสียน้ำหนักที่น้อย แสดงถึงความคงตัวทางความร้อน ทั้งนี้ยังช่วยลดต้นทุนเนื่องจากใช้สารเติมแต่งในปริมาณต่ำแต่ให้ผลลัพธ์สูง

ส่วนที่ 3: การเติมร่วมกันของดินขาวเผาพร้อมกับกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง จากผลการทดสอบการเติมร่วมกันระหว่าง MK 2% และ S-GQDs ในอัตราส่วน 0.5–2% พบว่าสูตร M-SG1 (MK:S-GQDs = 2:0.5) ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในทุกด้าน ทั้งค่า Stability ที่สูงที่สุด (14,960.64 N) ค่า Flow ที่อยู่ในช่วงเหมาะสม (3.58 mm) ค่าการคืนตัว (ITSm) สูงถึง 853.5 MPa และ Ductility 1230 mm ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และให้ค่า Flash Point และ Loss on Heating อยู่ในระดับปลอดภัยสูงสุด โดยพบว่า S-GQDs ในปริมาณต่ำมีบทบาทสำคัญในการช่วยขัดผิวของอนุภาคดินขาวเผาในกระบวนการ Hot Mix ทำให้โครงสร้างภายในหนาแน่นขึ้นและยึดเกาะดีขึ้น แต่หากเติมมากเกินไป (>1%) อาจส่งผลย้อนกลับด้วยการรบกวนโครงสร้างของดินขาวเผา แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนต่ำมีความเหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ทั้งสามส่วนแสดงให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนว่า การเติมสารเสริมคุณภาพในปริมาณที่พอเหมาะ โดยเฉพาะ S-GQDs ร่วมกับดินขาวเผา 2% สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกลของแอสฟัลต์คอนกรีตได้อย่างครบถ้วน ไม่เพียงแต่เพิ่มความแข็งแรงและทนทาน แต่ยังส่งผลต่อความปลอดภัยในกระบวนการใช้งานและความเสถียรของวัสดุในสภาพอุณหภูมิสูง เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมของประเทศไทย รวมถึงเป็นการศึกษาที่สามารถแสดงผลของการเสริมกำลังของกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้าง (S-GQDs) วัสดุนาโนชนิดนี้ได้เป็นอย่างดี

5.2 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

ข้อเสนอแนะของการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยดินขาวเผาและกราฟีนควอนตัมดอทแบบพัฒนาโครงสร้างมีข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะศึกษาต่อดังนี้

- ศึกษาอัตราส่วนของ S-GQDs ในช่วงที่แคบและแม่นยำยิ่งขึ้น เพื่อระบุอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด ควรทำการทดลองเพิ่มเติมในช่วงระหว่าง 0.25–1.5% เช่น 0.25%, 0.75%, 1.25% เพื่อจับแนวโน้มความสัมพันธ์เชิงลึกระหว่างปริมาณสารเติมแต่งกับคุณสมบัติเชิงกล
- ศึกษาพฤติกรรมภายใต้การใช้งานระยะยาว (Durability) เช่น Fatigue Resistance, Moisture Damage (AASHTO T283), และ Aging Simulation เพื่อวิเคราะห์อายุการใช้งานในระยะยาว
- เปรียบเทียบกับวัสดุเสริมอื่น ๆ เช่น ซิลิกาฟุ่ม นาโนเคลย์ หรือวัสดุนาโนอื่น ๆ เพื่อประเมินข้อดี-ข้อเสียในแต่ละบริบทการใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

1. มาตรฐานข้อกำหนดที่ ทล. -ก.401/2531 (DH. -SP 401/2531) “Specification for Asphalt Cement”
2. มาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม.408/2532 (DH. -S 408/2532) “Asphalt Concrete or Hot-Mix Asphalt”
3. มาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล. -ท. 604/2517 (DH-T 604/2517 , ASTM. D-1559) “วิธีการทดลองแอสฟัลต์ติกคอนกรีต โดยวิธี Marshall”
4. มาตรฐาน ASTM D4123 “Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures”
5. มาตรฐาน ASTM D5 “Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials”
6. มาตรฐาน ASTM D113 “Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials”
7. มาตรฐาน ASTM D92 “Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup”
8. มาตรฐาน ASTM D6 "Standard Test Method for Loss on Heating of Oil and Asphaltic Compounds"
9. Zhang, M. H., & Malhotra, V. M. (2020). Pozzolanic reactions of metakaolin with calcium hydroxide: A review. *Construction and Building Materials*, 238, 117708.
10. Ridthirud, C., & Chindapasirt, P. (2010). Effect of calcination temperature on pozzolanic activity of metakaolin. *Construction and Building Materials*, 24(3), 343–349.
11. Rocha, J., & Silva, R. V. (2021). Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin. *Applied Clay Science*, 197, 105779.
12. Murat, M. (1994). “Thermal Behavior of Kaolinite: An Infrared Spectroscopic Study.” *Applied Clay Science*, 9(6), 393–409.
13. Badogiannis, E. et al. (2004). “Kaolinitic Clays as Raw Materials for Supplementary Cementing Materials.” *Cement and Concrete Composites*, 26(8), 845–852.

14. Fernandez, R. et al. (2011). "The Role of Calcination Temperature on the Reactivity of Kaolinite Clays." *Applied Clay Science*, 55, 44–49. DOI: 10.1016/j.clay.2011.09.004
15. Bai, J., Wild, S., & Sabir, B. B. (2003). Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 32(1), 113–118.
16. Badogiannis, E., Kakali, G., Dimopoulou, G., & Tsvilis, S. (2004). Metakaolin as a main cement constituent: exploitation of poor Greek kaolins. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 197–203.
17. Li, J., Zhang, Y., & Wang, H. (2023). Influence of Metakaolin on Microstructure and Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *Construction and Building Materials*, 413, 133891.
18. Abdullah, R. A., & Abdullah, K. (2023). Calcined kaolinitic clay as a supplementary cementing material and its pozzolanic effect on concrete blends characteristics: Part I. *Construction and Building Materials*, 369, 130505.
19. Marín-García, B. F., Reyes-Ortiz, O. J., & Carvajal-Muñoz, J. S. (2019). Behavior of Thermally Treated Kaolin Filler in an Asphalt Concrete Mixture. *Logos Ciencia & Tecnología*, 11(3), 19–28.
20. Marín-García, B. F., Reyes-Ortiz, O. J., & Carvajal-Muñoz, J. S. (2019). Behavior of Thermally Treated Kaolin Filler in an Asphalt Concrete Mixture. *Logos Ciencia & Tecnología*, 11(3), 19–28.
21. Chouksey, A., Kumar, R., Ahlawat, A., & Das, S. (2024). Study The Effect of Metakaolin Powder in Hot Mix Asphalt as Mineral Filler. *Journal of Polymer and Composites*, 11(10), 9–15
22. Hu, C., Tian, W., Zhu, R., & Zhang, H. (2025). Rheology and Aging Resistance of Asphalt Modified with Calcined Kaolin. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 37(3), 04023012.
23. Shen, J., Zhu, Y., Yang, X., & Li, C. (2012). Graphene quantum dots: emergent nanolights for bioimaging, sensors, catalysis and photovoltaic devices. *Chemical communications*, 48(31), 3686-3699.

24. Li, L., Wu, G., Yang, G., Peng, J., Zhao, J., & Zhu, J. J. (2013). Focusing on luminescent graphene quantum dots: current status and future perspectives. *Nanoscale*, 5(10), 4015-4039.
25. Ghaffarkhah, A., Hosseini, E., Kamkar, M., Sehat, A. A., Dordanihighi, S., Allahbakhsh, A., ... & Arjmand, M. (2022). Synthesis, applications, and prospects of graphene quantum dots: a comprehensive review. *Small*, 18(2), 2102683.
26. Rodriguez-Forteza, A., Moreno-Vicente, A., Schardt, S., Dunk, P. W., & Poblet, J. M. (2019, May). Electronic structure and properties of boron-doped endohedral metalloheterofullerenes. In *Electrochemical Society Meeting Abstracts 235* (No. 11, pp. 792-792). The Electrochemical Society, Inc..
27. Tian, P., Tang, L., Teng, K. S., & Lau, S. P. (2018). Graphene quantum dots from chemistry to applications. *Materials today chemistry*, 10, 221-258.
28. Peng, J., Gao, W., Gupta, B. K., Liu, Z., Romero-Aburto, R., Ge, L., ... & Ajayan, P. M. (2012). Graphene quantum dots derived from carbon fibers. *Nano letters*, 12(2), 844-849.
29. Zhao, H., Chang, Y., Liu, M., Gao, S., Yu, H., & Quan, X. (2013). A universal immunosensing strategy based on regulation of the interaction between graphene and graphene quantum dots. *Chemical communications*, 49(3), 234-236.
30. Jin, S. H., Kim, D. H., Jun, G. H., Hong, S. H., & Jeon, S. (2013). Tuning the photoluminescence of graphene quantum dots through the charge transfer effect of functional groups. *ACS nano*, 7(2), 1239-1245.
31. Haider, G., Roy, P., Chiang, C. W., Tan, W. C., Liou, Y. R., Chang, H. T., ... & Chen, Y. F. (2016). Electrical-polarization-induced ultrahigh responsivity photodetectors based on graphene and graphene quantum dots. *Advanced Functional Materials*, 26(4), 620-628.
32. Li, Y., Shu, H., Niu, X., & Wang, J. (2015). Electronic and optical properties of edge-functionalized graphene quantum dots and the underlying mechanism. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(44), 24950-24957.

33. Iannazzo, D., Pistone, A., Salamò, M., Galvagno, S., Romeo, R., Giofrè, S. V., ... & Di Pietro, A. (2017). Graphene quantum dots for cancer targeted drug delivery. *International journal of pharmaceutics*, 518(1-2), 185-192.
34. Tian, P., Tang, L., Teng, K. S., & Lau, S. P. (2018). Graphene quantum dots from chemistry to applications. *Materials today chemistry*, 10, 221-258.
35. Shamsaei, E., de Souza, F. B., Yao, X., Benhelal, E., Akbari, A., & Duan, W. (2018). Graphene-based nanosheets for stronger and more durable concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 183, 642-660.
36. Devi, S. C., & Khan, R. A. (2020). Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete. *Journal of Building Engineering*, 27, 101007.
37. Win, T. T., Prasittisopin, L., Nganglumpoon, R., Pinthong, P., Watmanee, S., Tolek, W., & Panpranot, J. Chemo-Physical Mechanisms of High-Strength Cement Composites with Suprastructure of Graphene Quantum Dots. Available at SSRN 4614680.
38. Win, T. T., Prasittisopin, L., Nganglumpoon, R., Pinthong, P., Watmanee, S., Tolek, W., & Panpranot, J. (2024). Chemo-physical mechanisms of high-strength cement composites with suprastructure of graphene quantum dots. *Cleaner Materials*, 100229.
39. Win, T. T., Prasittisopin, L., Nganglumpoon, R., Pinthong, P., Watmanee, S., Tolek, W., & Panpranot, J. (2024). Innovative GQDs and supra-GQDs assemblies for developing high strength and conductive cement composites. *Construction and Building Materials*, 421, 135693..
40. Liu, X., & Wu, S. (2011). Study on the graphite and carbon fiber modified asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1807-1811.
41. Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., & Dalmazzo, D. (2012). Rheological characterization of bituminous binders modified with carbon nanotubes. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 546-555.
42. Eisa, M. S., Mohamady, A., Basiouny, M. E., Abdulhamid, A., & Kim, J. R. (2022). Mechanical properties of asphalt concrete modified with carbon nanotubes (CNTs). *Case studies in construction materials*, 16, e00930.

43. Zhu, C.; Zhang, H.; Zhang, Y. Influence of layered silicate types on physical, rheological and aging properties of SBS modified asphalt with multi-dimensional nanomaterials. *Constr. Build. Mater.* 2019, 228, 116735.
44. Sun, L.; Xin, X.; Ren, J. Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperature performance. *Constr. Build. Mater.* 2017, 133, 358–366.
45. Li, X.K.; Chen, G.S.; Duan, M.W.; Yang, W.C.; Tang, S.C.; Cao, Y.D.; Luo, Y. Branched Hydroxyl Modification of SBS Using Thiol-Ene Reaction and Its Subsequent Application in Modified Asphalt. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2017, 56, 10354–10365.
46. Bissada, K. A., Tan, J., Szymczyk, E., Darnell, M., & Mei, M. (2016). Group-type characterization of crude oil and bitumen. Part I: Enhanced separation and quantification of saturates, aromatics, resins and asphaltenes (SARA). *Organic geochemistry*, 95, 21-28.
47. Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2017). Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in materials science*, 90, 75-127.
48. Ovid'Ko, I. A. (2013). Mechanical properties of graphene. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 34(1), 1-11.
49. M. Shishehbor, M.R. Pouranian, M.G. Ramezani, Molecular investigations on the interactions of graphene, crude oil fractions and mineral aggregates at low, medium and high temperatures, *Petrol. Sci. Technol.* 37 (7) (2019) 804–811.
50. Zhao, P.; Song, X.; Dong, M.; Sun, H.; Wu, W.; Zhang, R.; Sun, M.; Zhao, X. Preparation and characterization of CQDs/SBS composites and its application performance as asphalt modifier. *Constr. Build. Mater.* 2022, 320, 126312.
51. Lin, M., Wang, Z. L., Yang, P. W., & Li, P. (2019). Micro-structure and rheological properties of graphene oxide rubber asphalt. *Nanotechnology reviews*, 8(1), 227-235.

52. Lin, M., Wang, Z. L., Yang, P. W., & Li, P. (2019). Micro-structure and rheological properties of graphene oxide rubber asphalt. *Nanotechnology reviews*, 8(1), 227-235.
53. Lu, Y., Shi, N., Wang, M., Wang, X., Yin, L., Xu, Q., & Zhao, P. (2022). Research on the Preparation of Graphene Quantum Dots/SBS Composite-Modified Asphalt and Its Application Performance. *Coatings*, 12(4), 515.
54. Wang, L., Liang, F., Li, Z., & Zhao, Q. (2023). Investigation on the Rheological Properties and Microscopic Characteristics of Graphene and SBR Composite Modified Asphalt. *Coatings*, 13(7), 1279.
55. Sengottuvelu, D., Almashaqbeh, H. K., Majdoub, M., Pramanik, A., Rushing, G., Doyle, J., ... & Al-Ostaz, A. (2024). Improved Oxidation of Graphite and Graphene Nanoplatelets: Application to the Modification of Asphalt Binder. *ACS Applied Nano Materials*.
56. Long, W., Liu, B., & He, C. (2023). A facile approach to disperse metakaolin for promoting compressive strength of cement composites. *Construction and Building Materials*, 390, 131870

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายสุกมิตร นันทวัฒนานุกูล
วุฒิการศึกษา ปีการศึกษา 2565 : วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE MODIFIED WITH
METAKAOLIN

