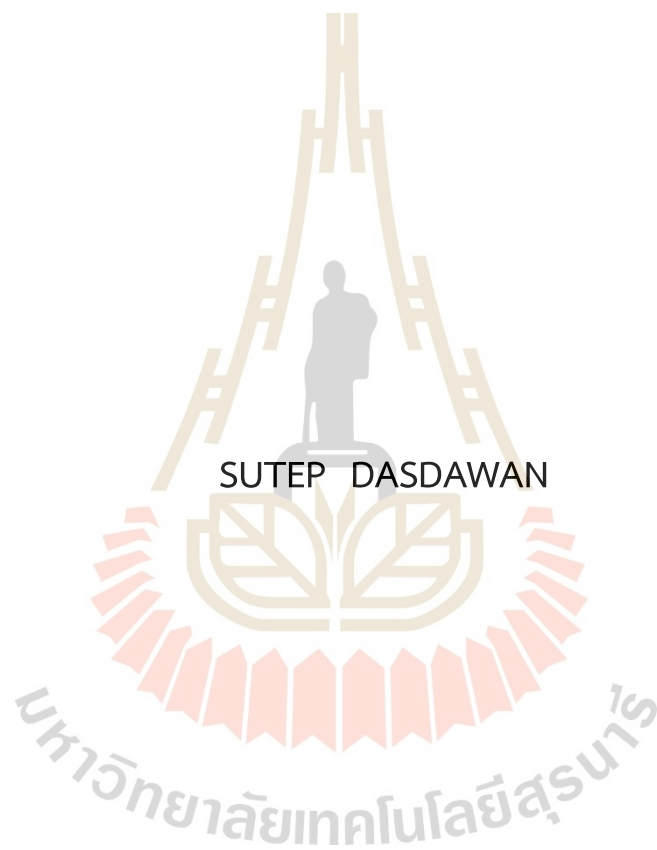


การพัฒนาศักยภาพการใช้เก้าอี้เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดใน
พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF POROUS ASPHALT
CONCRETE USING BOTTOM ASH FOR THE PAVEMENT
APPLICATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering and
Construction Management
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การพัฒนาศักยภาพการใช้เจ้าหน้าที่เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดใน
พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)

ประธานกรรมการ



(ศ. ดร.สุชสันติ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.อภิชาติ สุตดีพงษ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุเทพ ดาษดาวัลย์ : การพัฒนาศักยภาพการใช้เถ้าหนักเพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดใน
พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต (PERFORMANCE IMPROVEMENT OF POROUS
ASPHALT CONCRETE USING BOTTOM ASH FOR THE PAVEMENT APPLICATION)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุชนันต์ หอพิบูลสุข, 88 หน้า.

คำสำคัญ: การพัฒนาศักยภาพการใช้เถ้าหนัก/ผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต/ผิวทางแอสฟัลต์
คอนกรีต

การประยุกต์ใช้เถ้าหนักซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงไฟฟ้าถ่านหินในงานด้านโครงสร้าง
พื้นฐานยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น เนื่องจากองค์ความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางวิศวกรรมยังมี
อย่างจำกัด งานวิจัยนี้ ศึกษาการปรับปรุงสมรรถนะของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยเถ้าหนักเพื่อใช้
เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการแทนที่ในมวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต วัสดุมวลรวมที่ใช้
ศึกษา คือหินปูน โดยผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียด (ร้อยละ 0 5 10
15 20 และ 25 ของน้ำหนักรวมของมวลรวมละเอียด) ต่อสมบัติมาร์แชล กำลังดึงทางอ้อม และ
สมรรถนะพลวัตของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเถ้าหนักได้ถูกตรวจสอบ การทดสอบสมรรถนะ
พลวัต ประกอบด้วย การทดสอบภายใต้เงื่อนไขแรงดึงทางอ้อม (โมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึง
ทางอ้อม และการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม) และการทดสอบภายใต้เงื่อนไขแรงอัด (การยุบตัวถาวร
ความสึกกร่อน และความต้านทานการสึกกร่อน) พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต การแทนที่เถ้าหนักในมวล
รวมละเอียดสามารถปรับปรุงค่าการไหลแยกตัว สมบัติมาร์แชล กำลังดึงทางอ้อม และสมรรถนะ
พลวัตจนมีค่าที่ดีที่สุดที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 20
ที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดที่เหมาะสม พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็น
มวลรวมและใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 มีสมรรถนะใกล้เคียงกันกับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้
แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA ซึ่งจะสามารถลดต้นทุนการก่อสร้างผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตลงได้ถึง
ร้อยละ 24 เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการใช้งานเท่ากัน ผลลัพธ์ของงานวิจัยจะช่วยส่งเสริมการใช้เถ้า
หนักเพื่อเป็นวัสดุทางเลือกในงานถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทั้งวิศวกรรมและ
เศรษฐศาสตร์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา สุเทพ ดาษดาวัลย์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุชนันต์ หอพิบูลสุข

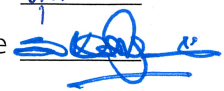
SUTEP DASDAWAN : PERFERFORMANCE IMPROVEMENT OF POROUS ASPHALT
CONCRETE USING BOTTOM ASH FOR THE PAVEMENT APPLICATION : THESIS
ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P.E., 88 PP.

Keyword: PERFERFORMANCE IMPROVEMENT OF POROUS ASPHALT CONCRETE/
BOTTOM ASH/PAVEMENT APPLICATION

Porous asphalt concrete (PAC) is an effective hot mixed asphalt alternative to conventional asphalt concrete (dense graded asphalt concrete). The PAC requires the high-quality polymer-modified asphalt (PMA) to prevent draindown problem. Bottom ash (BA), a byproduct of coal-fired power plants, can be used as the green material to mitigate the draindown problem and improve the mechanical properties of PAC. The effects of BA replacement ratios (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% by total weight of fine aggregate) on the draindown, particle loss, Marshall properties, and strength index of BA modified PAC using AC60/70 (BA-AC60/70-PAC) were measured and compared to PAC using PMA (PMA-PAC). The BA replacement can reduce draindown and particle loss values of BA-AC60/70-PAC. The Marshall properties, and strength index values of BA-AC60/70-PAC were found to increase with increasing BA replacement up to the best value at optimum BA replacement ratio of 20%. At the optimum BA replacement, the BA-AC60/70-PAC has an equivalent performance to PMA-PAC. At the same PAC thickness, therefore, the BA-AC60/70-PAC yield the 24% lower concertation cost than PMA-PAC. The outcome of this research will promote the use of BA as an alternative material in asphalt concrete pavement, which is useful in terms of engineering and economic perspectives.

School of Civil Engineering and Construction Management
Academic Year 2022

Student's Signature 

Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้ช่วยเหลือชี้แนะให้คำปรึกษา รวมทั้งให้การช่วยเหลือในการให้ความรู้ การแนะนำสิ่งที่จะต้องจนงานวิจัยนี้สามารถเริ่ม และลุ่่งไปได้ด้วยดีเสมอมา ก่อนอื่นผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้กำเนิดและอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ด้วยดีเสมอมา

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้โอกาสทางการศึกษา ถ่ายทอดวิชาความรู้ เป็นแบบอย่างในการดำเนินชีวิต และให้คำแนะนำปรึกษาเรื่องวิจัย ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้ง ช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วรภูมิ เบญจโฬาร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ Dr. Menglim Hoy รองศาสตราจารย์ พญ.จิตรวดี หอพิบูลสุข และ ดร.วิศิษฐ์ กุลอริยทรัพย์ ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ และประสบการณ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้แนวคิด ตลอดจน ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณ ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ ดร.ธีรศักดิ์ เยาวราช และ ดร.อภิรัตน์ บุริตรธรรม ที่กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะและช่วยเหลือจนกระทั่งการทำวิจัย ครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์

สุเทพ ดาษดาวัลย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	8
2.2 สมบัติที่สำคัญของเถ้าหนัก.....	9
2.3 มวลรวม (AGGREGATE).....	10
2.3.1 สมบัติของมวลรวม.....	10
2.4 การออกแบบและทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธี MARSHALL.....	10
2.4.1 สมบัติเชิงปริมาตรของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว.....	11
2.4.2 การทดสอบการไหลแยกตัว (DRAINDOWN).....	12
2.4.3 การทดสอบปริมาณสูญเสียจากการขัดสี (CANTABRO ABRASION LOSS).....	12
2.4.4 การทดสอบเสถียรภาพและการไหล (STABILITY & FLOW).....	13
2.4.5 การทดสอบหาค่าดัชนีความแข็งแรง (STRENGTH INDEX).....	13
2.5 การทดสอบสมรรถนะทางวิศวกรรม.....	14
2.6 แนวทางการออกแบบผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตตามวิธีของ ASPHALT INSTITUTE (1982).....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การสำรวจหรือทบทวนเอกสาร (LITERATURE REVIEW) ที่เกี่ยวข้อง กับประเด็นปัญหาที่ทำการวิจัย.....	27
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย (RESEARCH METHODOLOGY)/ ขั้นตอนการ ทำงานวิจัย (WORK FLOW DIAGRAM).....	30
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	32
3.2.1 มวลรวม.....	32
3.2.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์.....	33
3.3 การออกแบบและทดสอบส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล.....	35
3.3.1 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	35
3.3.2 การทดสอบส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	35
3.4 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม (ENGINEERING PERFORMANCE).....	37
3.4.1 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (INDIRECT TENSILE STRENGTH).....	37
3.4.2 การหาค่าโมดูลัสคืนตัว (RESILIENT MODULUS).....	37
3.4.3 การทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (INDIRECT TENSILE FATIGUE).....	37
3.4.4 การหาค่าการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต (PERMANENT DEFORMATION).....	38
3.4.5 การทดสอบการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีต (RUTTING RESISTANCE).....	38
4 ผลการวิจัย	40
4.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
4.2 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	42
4.3 การออกแบบและทดสอบส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	43
4.4 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม.....	53
4.5 การออกแบบผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเถ้าหนัก.....	71
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 การศึกษาพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	81
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก ก.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	88



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	พิกัดน้ำหนักบรรทุกทุกตามพระราชบัญญัติทางหลวง (2559).....	21
2.2	ค่าตัวคูณเทียบเท่า (Load equivalency factors) (กรมทางหลวง, 2559)	22
2.3	Total growth factor (AI, 1981).....	22
2.4	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของวัสดุงานทาง (AUSTROADS, 1992)	24
2.5	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณน้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้าง (Theyse et al., 2011)	26
2.6	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้หาปริมาณจราจรที่ยอมให้โดยพิจารณาจากความเครียดใต้ผิว.....	27
2.7	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้หาปริมาณจราจรที่ยอมให้โดยพิจารณาจากความเครียดอัดแนวตั้ง	27
3.1	ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย.....	30
3.2	สมบัติพื้นฐานของมวลรวมตามมาตรฐาน มทข.237-2563.....	32
3.3	ขนาดผลของมวลรวมตามมาตรฐาน มทข.237-2563.....	32
3.4	สมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เบนิตเรชันเกรด 60 ถึง 70	33
3.5	สมบัติพื้นฐานของ (Polymer modified asphalt cement, PMA).....	34
3.6	ข้อกำหนดในการออกแบบפורัสแอสฟัลต์คอนกรีต	36
3.7	สรุปการทดสอบและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	39
4.1	สมบัติพื้นฐานของมวลรวมของפורัสแอสฟัลต์คอนกรีต	42
4.2	สมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียดของפורัสแอสฟัลต์คอนกรีต	43
4.3	สมบัติของפורัสแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้กำหนดแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน ร้อยละ 0 ถึง 25	44
4.4	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณความเครียด	72
4.5	ผลการคำนวณความเครียดสำหรับผิวทางแอสฟัลต์ชนิด LPMA	73
4.6	ผลการคำนวณความเครียดสำหรับผิวทางแอสฟัลต์ชนิด LB20	74
4.7	ปริมาณจราจรที่ยอมให้ (Allowable ESALs) LPMA.....	75
4.8	ปริมาณจราจรที่ยอมให้ (Allowable ESALs) LB20.....	75
4.9	รายละเอียดของต้นทุนค่าวัสดุและค่าดำเนินการของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต.....	76
4.10	ต้นทุนวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase).....	77
4.11	ต้นทุนวัสดุชั้นพื้นทาง (Base).....	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12	ต้นทุนวัสดุชั้นรองผิวทาง..... 77
4.13	ปริมาณของมวลรวมสำหรับชั้นผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต..... 78
4.14	ปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต 78
4.15	ต้นทุนวัสดุชั้นผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต 79
4.16	ผลการคำนวณค่าดำเนินการของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต 79
4.17	ต้นทุนการก่อสร้างผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....80



สารบัญญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ชั้นผิวทางและชั้นโครงสร้างทาง	2
1.2	(a) ชั้นผิวทางคอนกรีต และ (b) ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต.....	2
1.3	ภาพจำลองการกระจายขนาดคละของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มี (a) การกระจายขนาดคละแบบแน่น (b) การกระจายขนาดคละแบบขาดช่วง (c) การกระจายขนาดคละแบบเปิด.....	3
1.4	โครงสร้างถนนที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้เฉพาะผิวทาง (Open graded friction course, OGFC)	4
2.1	การเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีมาร์แชล.....	12
2.2	การทดสอบหาค่าเสถียรภาพและค่าการไหล	13
2.3	การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม.....	14
2.4	การทดสอบโมดูลัสคืนตัว	16
2.5	การทดสอบกำลังต้านทานการล้า.....	17
2.6	การทดสอบการยุบตัวแบบถาวร	18
2.7	ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการเกิดร่องล้อ.....	19
2.8	เครื่องทดสอบการเกิดร่องล้อ	19
2.9	การทดสอบความต้านทานการลื่นไถล.....	20
2.10	องค์ประกอบความเค้นในเอลิเมนต์โครงสร้างชั้นทางที่มีชั้นวัสดุหลายชั้น สำหรับการคำนวณ โดยวิธียึดหยุ่นแบบสมมาตรแนวแกน	23
2.11	การเกิดความเครียดในโครงสร้างทางจากแรงกระทำบนผิวทาง.....	25
2.12	ตำแหน่งในการวิเคราะห์ความเครียดใต้พื้นที่รับน้ำหนักจากล้อบรรทุก	26
3.1	แผนผังการดำเนินงานวิจัย	30
4.1	ภาพภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าหนัก 1,000 เท่า.....	40
4.2	การกระจายขนาดคละของเถ้าหนัก.....	41
4.3	ลักษณะทางกายภาพของเถ้าหนักเมื่อผสมน้ำ	41
4.4	ขนาดคละของมวลรวมสำหรับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบไม่แช่น้ำและปริมาณถ้ำหนัก ที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดหินปูน	46
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบแช่น้ำและปริมาณถ้ำหนัก ที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดหินปูน	47
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการไหลแยกตัวและปริมาณถ้ำหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต	48
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพและปริมาณถ้ำหนัก ที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต	49
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลและปริมาณถ้ำหนักที่ใช้แทนที่ มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต	50
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความแข็งแรงและปริมาณถ้ำหนัก ที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต	52
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และปริมาณถ้ำหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต	54
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณถ้ำหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต	55
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และปริมาณถ้ำหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต	55
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และปริมาณถ้ำหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต	56
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสคืนตัวและปริมาณถ้ำหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต	57
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงทางอ้อมและโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ถูกปรับปรุงด้วยถ้ำหนัก	58
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวแนวตั้งและจำนวนรอบการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมเมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยถ้ำหนักปริมาณร้อยละ 20	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าภายใต้หน่วยแรง 150 กิโลพาสคาล และปริมาณเก้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	60
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าภายใต้หน่วยแรง 200 กิโลพาสคาล และปริมาณเก้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	61
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าภายใต้หน่วยแรง 250 กิโลพาสคาล และปริมาณเก้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	61
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าและโมดูลัสคืนตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	63
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าและค่าความเครียดเริ่มต้นตัวของ พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	63
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (a) ของค่าความเครียดเริ่มต้นตัวและ ปริมาณเก้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	64
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (b) ของค่าความเครียดเริ่มต้นตัวและปริมาณ เก้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	64
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวถาวรและจำนวนรอบการทดสอบ ของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เก้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน.....	65
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวถาวรและจำนวนรอบการทดสอบที่ 1,800 รอบ ของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่มวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเก้าหนัก.....	66
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวถาวรและโมดูลัสของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	67
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดร่องล้อและจำนวนรอบการทดสอบของ พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เก้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน.....	68
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการทดสอบและปริมาณเก้าหนักที่ใช้แทนที่ มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต.....	69
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า British pendulum number และจำนวนรอบ การทดสอบ ความต้านทานการเกิดร่องล้อ.....	70
4.31 รูปจำลองน้ำหนักรบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างชั้นทาง.....	72

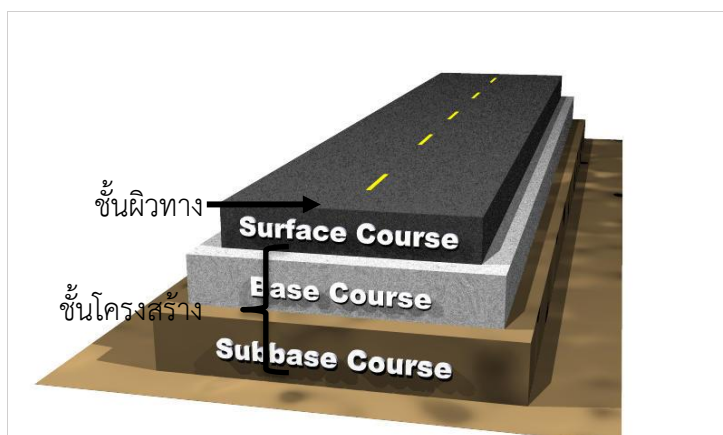
บทที่ 1

บทนำ

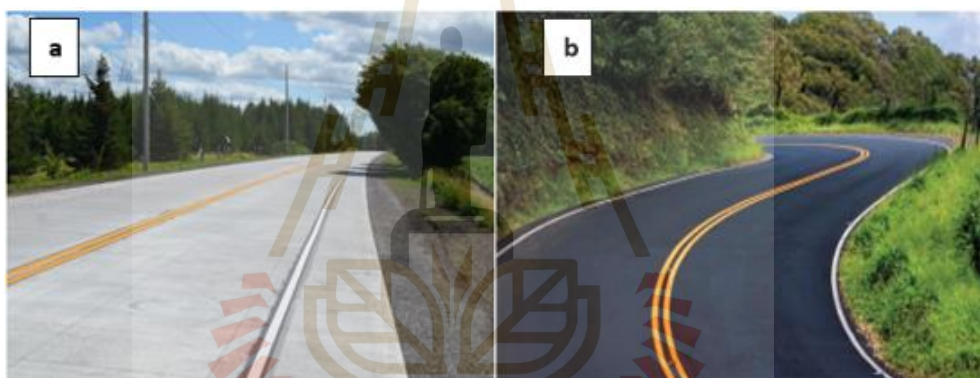
1.1 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของงานวิจัย

อุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ ก่อให้เกิดผลพลอยได้ ได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าหนัก (Bottom ash) และยิปซัมสังเคราะห์ (Synthetic gypsum) เถ้าลอยสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้อย่างมาก โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ขณะที่ เถ้าหนัก (Bottom Ash) ที่ได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้ามีปริมาณมากกว่า 1.7 ล้านตันต่อปี ยังไม่สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมได้เท่าที่ควร และเป็นภาระต่อการกำจัดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ค่าใช้จ่ายในการกำจัดแบบฝังกลบ (ไม่รวมค่าบุคลากรและค่าดำเนินการอื่น ๆ) มีมูลค่ามากถึงประมาณ 6 ล้านบาทต่อปี นอกจากนี้ การฝังกลบเถ้าหนักยังก่อให้เกิดผลเสียด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย (ไพฑูรย์ นาแซง และเรืองรุชดี ชีระโรจน์, 2553)

ถนนเป็นโครงสร้างพื้นฐานหลักในการคมนาคมขนส่งของประเทศ หน่วยงานหลักที่รับผิดชอบในการก่อสร้างและซ่อมบำรุงถนน ประกอบด้วย กรมทางหลวง ครอบคลุมโครงข่าย 66,940 กิโลเมตร กรมทางหลวงชนบท ครอบคลุมโครงข่าย 47,916 กิโลเมตร และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ครอบคลุมโครงข่าย 352,157 กิโลเมตร (กระทรวงคมนาคม, 2560) ถนนประกอบด้วยชั้นผิวทางและชั้นโครงสร้างทาง (ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ชั้นผิวทางแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ผิวทางแบบแข็ง (Rigid pavement) หรือผิวทางคอนกรีต และผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible pavement) หรือผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete) ซึ่งมักเรียกกันโดยทั่วไปว่า “ถนนลาดยาง” (รูปที่ 1.1) ชั้นโครงสร้างทาง ประกอบด้วยชั้นพื้นทาง (Base course) และชั้นรองพื้นทาง (Subbase course) ที่ใช้วัสดุจำพวกหินคลุกและดินลูกรัง ผิวทางถนนในประเทศไทยมากกว่าร้อยละ 80 เป็นประเภทแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งได้จากการผสมร้อนระหว่างมวลรวมจากธรรมชาติประมาณร้อยละ 95 และแอสฟัลต์ซีเมนต์ประมาณร้อยละ 5 (The Asphalt Paving Industry: A Global Perspective, 2011)



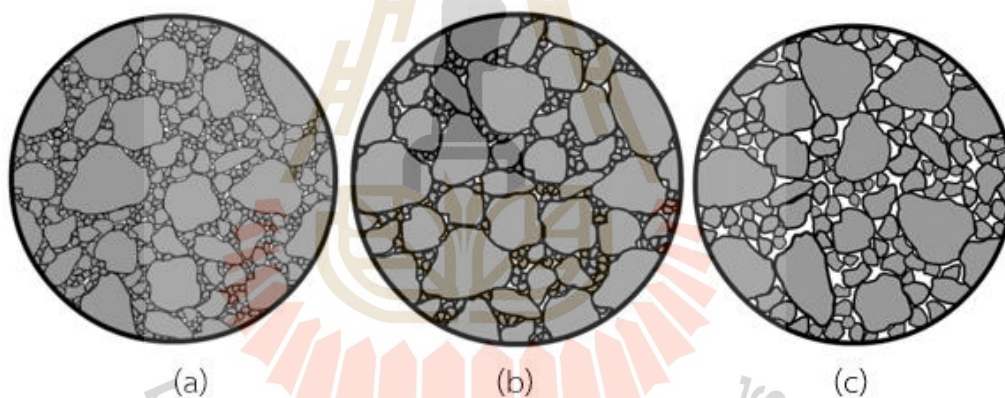
รูปที่ 1.1 ชั้นผิวทางและชั้นโครงสร้างทาง



รูปที่ 1.2 (a) ชั้นผิวทางคอนกรีต และ (b) ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถจำแนกตามการกระจายขนาดคละของมวลรวมได้เป็นสามประเภท (NAPA, 2001) ได้แก่ 1) แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดคละแบบแน่น (Dense graded asphalt concrete) ดังรูปที่ 1.3 (a) ที่มีลักษณะที่บ่งชี้ เนื่องจากมีการกระจายขนาดคละของมวลรวมเป็นแบบคละกันดีทำให้มีช่องว่างภายในส่วนผสมต่ำ โดยทั่วไป แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดคละแบบแน่นจะมีค่าช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม (Void in mineral aggregate, VMA) อยู่ระหว่างร้อยละ 11 ถึง 17 มีช่องว่างอากาศ (Air void) ประมาณร้อยละ 4 และปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้เป็นส่วนผสมประมาณร้อยละ 4.5 ถึง 6.0 2) แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดคละแบบขาดช่วง (Gap graded asphalt concrete) หรือ Stone mastic asphalt concrete ดังรูปที่ 1.3 (b) แอสฟัลต์คอนกรีตประเภทนี้มีค่าช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมสูงกว่าแอสฟัลต์

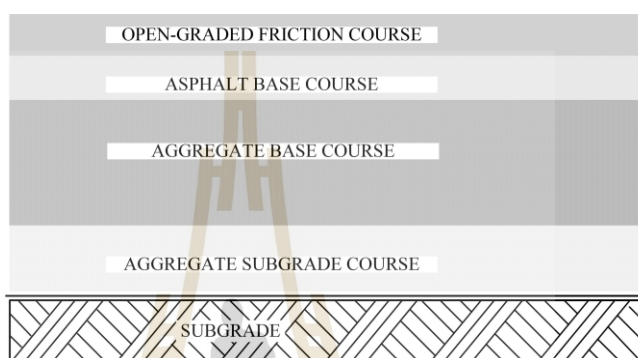
คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดละเอียดแบบแน่น (มากกว่าร้อยละ 17) แต่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ในส่วนผสมมากกว่าร้อยละ 6 ทำให้ช่องว่างอากาศยังคงมีประมาณร้อยละ 4 เช่นเดียวกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดละเอียดแบบแน่น แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดละเอียดแบบขาดช่วงมีความทนทานและต้านทานการเกิดร่องล้อได้ดี เนื่องจากถูกออกแบบให้มวลรวมมีการถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกถึงกันได้โดยตรง (Stone to stone) อย่างไรก็ตาม ต้นทุนของแอสฟัลต์คอนกรีตประเภทนี้ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดละเอียดแบบแน่น เนื่องจากต้องใช้มวลรวมที่มีความทนทานสูง ใช้ปริมาณแอสฟัลต์มาก และใช้ต้องแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพหรืออาจมีการเสริมเส้นใย และ 3) แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดละเอียดแบบเปิด (Open graded asphalt concrete) หรือพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต (Porous asphalt concrete) ดังรูปที่ 1.3 (c) แอสฟัลต์คอนกรีตประเภทนี้มีช่องว่างระหว่างวัสดุรวมประมาณร้อยละ 20 ถึง 25 ขณะที่ ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมอยู่ระหว่างร้อยละ 5 ถึง 8 จึงทำให้มีช่องว่างอากาศสูงถึงร้อยละ 15 ถึง 20 และสามารถระบายน้ำได้ดี



รูปที่ 1.3 ภาพจำลองการกระจายขนาดละเอียดของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มี (a) การกระจายขนาดละเอียดแบบแน่น (b) การกระจายขนาดละเอียดแบบขาดช่วง (c) การกระจายขนาดละเอียดแบบเปิด

พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถใช้งานได้ 3 ลักษณะ (NAPA, 1995) ได้แก่ 1) การใช้งานกับถนนที่ยอมให้น้ำระบายผ่านได้ทั้งโครงสร้าง (ชั้นผิวทางและชั้นโครงสร้างทาง) หรือ Permeable pavement ถนนประเภทนี้จะต้องติดตั้งระบบระบายน้ำไว้ในโครงสร้างของถนนเพื่อระบายน้ำออกด้วย 2) ใช้กับถนนที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้เฉพาะผิวทาง (Open graded friction course, OGFC) ดังรูปที่ 1.4 ชั้นพอร์สแอสฟัลต์จะวางอยู่เหนือชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดละเอียดแบบแน่น (ชั้นที่บดน้ำ) โดยน้ำจะซึมผ่านชั้นพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตและไหลอยู่เหนือชั้นที่บดน้ำ โดยไม่ไหลลงสู่ชั้นโครงสร้างทาง ถนนประเภทนี้นิยมใช้เพื่อลดการเกิดแผ่นฟิล์มน้ำที่ผิวถนน ลดละอองน้ำ และช่วยเพิ่ม

ความเสียหายระหว่างล้อยางและผิวถนนขณะฝนตก อีกทั้งยังช่วยลดเสียงสะท้อนระหว่างล้อยางและถนน (Chen et al., 2018 และ Chen et al., 2019) และ 3) ใช้กับถนนที่สามารถระบายน้ำได้เฉพาะชั้นใต้ชั้นผิวทาง (Asphalt treated permeable bases, ATPB) โดยก่อสร้างชั้นפורรัสแอสฟัลต์คอนกรีตใต้ชั้นที่บดน้ำ เช่น แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดคละแบบแน่น แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดคละแบบขาดช่วง หรือชั้นผิวทางคอนกรีต เพื่อวัตถุประสงค์ในการระบายน้ำ



รูปที่ 1.4 โครงสร้างถนนที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้เฉพาะผิวทาง (Open graded friction course, OGFC)

ถนนפורรัสแอสฟัลต์คอนกรีตที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้เฉพาะผิวทาง (Open Graded Friction Course) นิยมใช้ในหลายประเทศทั่วโลก เช่น สหรัฐอเมริกา เนเธอร์แลนด์ ฝรั่งเศส เยอรมนี ญี่ปุ่น จีน และเกาหลี เป็นต้น (Kuennen, 1996) สำหรับประเทศไทย กรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม ได้กำหนดมาตรฐานผิวทางפורรัสแอสฟัลต์คอนกรีตประเภทที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้เฉพาะผิวทางสำหรับก่อสร้างถนนเพื่อลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุขณะฝนตก และลดมลภาวะทางเสียงที่เกิดจากผิวทางและล้อยางยานพาหนะ (มทข. 237-2563 และ ทล.ม. 414/2542) ในปี พ.ศ. 2560 กรมทางหลวงชนบทได้ดำเนินการทดลองใช้פורรัสแอสฟัลต์คอนกรีตในการบูรณะถนนสายทางหลวงชนบทสาย นบ.3021 (ถนนราชพฤกษ์) จังหวัดนนทบุรี ระยะทาง 2.280 กิโลเมตร ความหนา 5 เซนติเมตร และได้มีการนำไปใช้ในงานเสริมผิวทางในหลายพื้นที่ เช่น ถนนรัชดาภิเษก (ด้านฝั่งทิศใต้) ช่วงพิพิธภัณฑสถานไทยถึงเชิงอุโมงค์รัชโยธิน กรุงเทพมหานคร ถนนชัยพฤกษ์ จังหวัดนนทบุรี และถนนกรมทางหลวงหมายเลข 1174 ตอนควบคุม 0102 จังหวัดเชียงราย เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แม้ผิวทางפורรัสแอสฟัลต์คอนกรีตจะได้รับการยืนยันจากหลายประเทศทั่วโลกว่า มีประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยที่สูงกว่าถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดคละแบบแน่นซึ่งเป็นถนนที่ใช้ทั่วไปในประเทศไทย แต่ถนนผิวทางפורรัสแอสฟัลต์คอนกรีตมีต้นทุนในการก่อสร้างสูงจึงทำให้ยังไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทย เนื่องจากפורรัสแอสฟัลต์คอนกรีตมีช่องว่างอากาศสูง (ร้อยละ 20 ตาม

มาตรฐานของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท) หากใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภท AC60/70 (นิยมใช้ในการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดคละแบบแน่น) ที่มีความหนืดต่ำ จะทำให้เกิดปัญหาการไหลแยกตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในระหว่างขั้นตอนการขนส่ง การปูราด และ บดทับถนน ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เคลือบผิวของมวลรวมมีไม่เพียงพอ ส่งผลให้ถนนมีความแข็งแรง ลดลง ด้วยเหตุนี้ กรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทจึงได้กำหนดให้ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุง คุณภาพด้วยพอลิเมอร์ (Polymer modified asphalt, PMA) ที่มีความหนืดสูงและมีคุณสมบัติที่ เหนือกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 สำหรับก่อสร้างถนนพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต (ทล.-ม. 414/2542 และ มทช.237-2563) เพื่อป้องกันการเกิดการไหลแยกตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์จาก มวลรวมและเพิ่มความแข็งแรงของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต แต่แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA มีราคาที่สูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 ถึงร้อยละ 38 (ข้อมูลจากบริษัท โซล่าแอสฟัลต์ จำกัด) อีกทั้ง พอร์สแอสฟัลต์ยังต้องใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ในปริมาณที่สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาด คละแบบแน่น จึงทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างถนนพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตสูงกว่าถนนแอสฟัลต์ คอนกรีตทั่วไป ดังนั้น การประยุกต์ใช้เถ้าหนักซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งในการสร้างผิวทางแอสฟัลต์ คอนกรีต จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในด้านการสร้างมูลค่าเพิ่ม และการกำจัดเถ้าหนัก และต่อประเทศชาติ ในด้านการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ การลดต้นทุนค่า ก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีต และการส่งเสริมให้เกิดการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งในการพัฒนา โครงสร้างพื้นฐานของประเทศ

แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีรูพรุนหรือพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต (PAC) เป็นแอสฟัลต์คอนกรีตผสม ร้อนที่มีประสิทธิภาพแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป (แอสฟัลต์คอนกรีตเกรดหนาแน่น) เพื่อเพิ่มขีด ความสามารถด้านความปลอดภัยและถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในรูปแบบการสึกของพื้นผิวสำหรับการ ใช้งานบนทางเท้า เช่น โครงข่ายมอเตอร์เวย์และทางเท้าบนสะพาน PAC เป็นแอสฟัลต์คอนกรีต เกรดเปิดที่มีช่องว่างอากาศประมาณ 20% เพื่อทำหน้าที่เป็นทางเท้าที่ซึมผ่านได้สำหรับการระบาย น้ำผ่านโครงสร้างที่มีรูพรุน (Ma 2016) นอกจากนี้ หลักสูตร PAC สามารถลดเสียงรบกวนจาก การจราจรได้ 2-3 เดซิเบล เมื่อเทียบกับพื้นผิวทั่วไป เนื่องจากมีความพรุนสูงและพื้นผิวขรุขระ PAC มีศักยภาพในการเพิ่มความต้านทานแรงเสียดทานของพื้นผิว และยังช่วยลดการเกิด hydroplaning ลดการกระเด็นและละอองน้ำ และปรับปรุงทัศนวิสัยในสภาพอากาศที่เปียกชื้น ดังนั้น จึงช่วย เพิ่มความสามารถในการขับขี่ (Slebi et al. 2020, Liu et al. 2010 , Liu et al. 2011, Liu et al. 2012, Luo et al. 2017, Alvarez et al. 2011)

งานวิจัยระดับนานาชาติ รายงานว่า เถ้าหนักสามารถใช้เป็นมวลรวมละเอียดในแอสฟัลต์ คอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีข้อดีที่ช่วยปรับปรุงเสถียรภาพ (Stability) ความยืดหยุ่น (Elasticity) และความต้านทานความล้า (Fatigue resistance) ของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ (Colonna

et al., 2012; Thanaya, 2009) การใช้เถ้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียดของส่วนผสมแอสฟัลต์จะทำให้เกิดฟิล์มแอสฟัลต์บนผิวของมวลรวมที่หนามากขึ้น (แอสฟัลต์ประสิทธิผล) ทำให้ส่วนผสมยึดเกาะกันได้ดีขึ้น แผ่นฟิล์มแอสฟัลต์ที่หนาขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากผิวที่หยาบและขรุขระของเถ้าหนักที่ประกอบไปด้วยโมเลกุลของสารประกอบที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีในน้ำมัน (Lipophilic) เมื่อผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์จะเกิดแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคของเถ้าหนักและแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มหนาเคลือบผิวของมวลรวม ส่งผลให้สมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตดีขึ้นคล้ายกับการเติมเส้นใยไฟเบอร์ในส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต (Luo et al., 2017)

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาศักยภาพการใช้เถ้าหนักเพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในผิวทางพอร์รัสแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ เสถียรภาพ (Stability) ดัชนีความแข็งแรง (Strength index) กำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength) โมดูลัสการคืนตัว (Resilient modulus) การเกิดการล้า (Indirect tensile fatigue) การยุบตัวถาวร (Permanent deformation) การเกิดร่องล้อ (Rutting resistance) และแรงเสียดทานที่ผิวทางพอร์รัสแอสฟัลต์คอนกรีต (Skid resistance) ในพจน์ของปริมาณเถ้าหนัก (อัตราส่วนเถ้าหนักต่อมวลรวมละเอียดหินปูน (L/B) ร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก) และชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 และโพลีเมอร์แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA) ผลการศึกษาจะนำมาซึ่งแนวทางการออกแบบส่วนผสมการใช้เถ้าหนักเพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในผิวทางพอร์รัสแอสฟัลต์ ซึ่งสามารถเพิ่มมูลค่าของเถ้าหนักในอุตสาหกรรมก่อสร้างให้มากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาสมบัติพื้นฐานของพอร์รัสแอสฟัลต์ที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักในมวลรวมละเอียดหินปูน

1.2.2 เปรียบเทียบอิทธิพลของการแทนที่มวลรวมละเอียดหินปูนด้วยเถ้าหนักต่อสมรรถนะ (กำลังดึงทางอ้อม ความล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม การคืบพลวัต การเกิดร่องล้อ และความต้านทานการลื่นไถล) ของผิวทางพอร์รัสแอสฟัลต์คอนกรีต

1.2.3 หาสัดส่วนของเถ้าหนักที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง ในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะศึกษาสมรรถนะของพอร์รัสแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เถ้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียดจากธรรมชาติบางส่วนทั้งแบบที่มีการกระจายขนาดละเอียดแบบเปิด (Open graded asphalt

concrete) หรือพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต (Porous asphalt concrete) เพื่อศึกษาความคุ้มค่าทางวิศวกรรม และเศรษฐศาสตร์ ของการใช้เก้าหนักในงานพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

ส่วนผสมของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้งานวิจัยนี้คือแอสฟัลต์ซีเมนต์เพนิเตอร์ชั้นเกรด AC 60/70 และ Polymer Modified Asphalt Cement (PMA) ใช้มวลรวมธรรมชาติหินปูน ในส่วนของมวลรวมนั้นใช้เก้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน ซึ่งปริมาณของเก้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนคิดเป็นปริมาณร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เมื่องานวิจัยแล้วเสร็จประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับเป็นดังนี้

1.4.1 ทราบสมบัติพื้นฐานของพอร์สแอสฟัลต์ที่ถูกแทนที่ด้วยเก้าหนักในมวลรวมละเอียดหินปูน

1.4.2 ทราบอิทธิพลของการแทนที่มวลรวมละเอียดหินปูนด้วยเก้าหนักต่อสมรรถนะ (กำลังดึงทางอ้อม ความล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ความคืบพลวัต และความต้านทานการลื่นไถล) ของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

1.4.3 ทราบปริมาณของเก้าหนักที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง ในเชิงวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผิวทางפורรัสแอสฟัลต์คอนกรีต

ผิวทางפורรัสแอสฟัลต์หรือที่รู้จักกันทั่วไป เรียกว่า “ผิวทางระบายน้ำ” แบบ Open Graded Friction Course (OGFC) ที่ภายหลังการบดอัดแล้วมีช่องว่างอากาศ (Air Voids, AV) ค่อนข้างมาก ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าประมาณร้อยละ 18-25 (Heystraeten and Moraux, 1990) ใช้ในการปูทับผิวทางที่มีขนาดคละแน่น เพื่อให้สามารถระบายน้ำออกหาผิวทางให้ได้เร็วกว่าปกติ

ในการออกแบบผิวทางระบายน้ำ นั้น ต้องคำนึงถึงการระบายน้ำบนผิวทางลงสู่ใต้ผิวทางให้เร็วขึ้นเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อช่วยเพิ่มการสัมผัสของล้อของยานพาหนะกับผิวทางให้ดีขึ้นในสภาพแฉะลื่นต่าง ๆ โดยเฉพาะในสภาพที่ผิวถนนเปียก ผิวทางระบายน้ำยังช่วยลดการกระเด็นของละอองน้ำด้านหลังยานพาหนะ เมื่อยานพาหนะแล่นผ่าน และสะท้อนจากผิวในเวลากลางวันและเวลากลางคืน ซึ่งจะทำให้ทัศนวิสัยในการขับขี่ นอกจากช่องว่างภายในผิวทางที่มีช่องว่างระหว่างวัสดุผสมช่วยในการดูดซับเสียง อีกทั้งผิวทางระบายน้ำเป็นผิวทางที่เรียบจึงช่วยลดแรงกระแทกระหว่างผิวสัมผัสของล้อและผิวทาง

ปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณาในการนำผิวทางระบายน้ำไปใช้งาน มีดังนี้

- ปริมาณและคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิสูงจะต้องมีความเหมาะสม เพื่อไม่ให้วัสดุเชื่อมประสานไหลเยิ้มไปเติมเต็มช่องว่างอากาศในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตของผิวทางระบายน้ำ
- ขนาดคละ (Gradation) ของวัสดุผสมที่นำมาใช้จะต้องเป็นแบบเปิด (Open Grade) เพื่อให้มีช่องว่างอากาศในส่วนผสมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมในการระบายน้ำได้ดี
- การบดอัด (Compaction) จะต้องเหมาะสม เพื่อให้ผิวทางระบายน้ำได้ดีและมีความสามารถในการรับปริมาณการจราจรได้ในระดับที่ต้องการ
- ปริมาณความชื้น (Moisture Content) มีผลในการยึดเกาะกับวัสดุผสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์

ข้อดี

- ช่วยลดการท่วมขังของน้ำบนถนน ทำให้การติดขัดของจราจรลดลง
- ช่วยลดการกระเด็นของละอองน้ำ ช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการใช้ถนน
- ช่วยในการดูดซับเสียงจากการจราจร
- ผิวทางมีความเสียดทานที่ดี
- มีการต้านทานการยุบตัวถาวรที่ดี
- ลดแสงสะท้อนทั้งในเวลากลางวันและในเวลาที่มีผิวทางเปียก
- ในสถานะที่มีการเย็นจัด รวมถึงมีการเกิดน้ำแข็งขึ้นบริเวณผิวทาง พบว่า ผิวทางระบายน้ำจะมีความเสียหายน้อยกว่าผิวทางโดยทั่วไป

ข้อเสีย

- การออกแบบจะต้องมีความหนาที่เหมาะสม หรือมากกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป จึงจะสามารถรับแรงได้เท่ากัน
- มีค่าก่อสร้างสูงกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป เนื่องจากระยะเวลาในการใช้งานของถนนที่ก่อสร้างด้วยผิวทางพอร์ซอสฟัลต์มีอายุการใช้งานที่น้อยกว่าและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่แพงกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป
- ช่องว่างอากาศมากทำให้ออกซิเจน และรังสีอัลตราไวโอเล็ต สัมผัสกับแอสฟัลต์ซีเมนต์มากขึ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานของผิวทางลดลง

2.2 สมบัติที่สำคัญของเถ้าหนัก

เถ้าหนักมีสมบัติคล้ายกับเถ้าลอย กล่าวคือ เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่คือ ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ส่งผลให้มีการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมคอนกรีต (Argiz et al., 2017) แต่การใช้งานเถ้าหนักในอุตสาหกรรมแอสฟัลต์คอนกรีตของประเทศไทย ยังมีน้อยมาก ความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งมีสมบัติในการเชื่อมประสานดีเป็นพิเศษ มีความแข็งแรง คงทนยึดเกาะ และกันน้ำได้ดี ดังนั้น แอสฟัลต์คอนกรีตจึงไม่ต้องการความเป็นปอซโซลานของเถ้าหนัก งานวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นที่จะใช้เถ้าหนักเป็นมวลรวมละเอียด และใช้ข้อดีด้านความพรุนที่สูงของอนุภาคเถ้าหนักในการปรับปรุงสมรรถนะในการรับน้ำหนักจราจรและในการกักโลหะหนักของแอสฟัลต์คอนกรีต

2.3 มวลรวม (Aggregate)

มวลรวมที่ใช้สำหรับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

- มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) หมายถึงมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร (ค้ำตะแกรงเบอร์ 4)
- มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) หมายถึงมวลรวมที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 4.75 ถึง 75 ไมโครเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้ำตะแกรงเบอร์ 200)
- ใถ้หนัก (Bottom ash) มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 4.75 ไมโครเมตร หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ร้อยละ 100 ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

2.3.1 สมบัติของมวลรวม

มวลรวมที่ใช้ในส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต ควรมีสมบัติต่อไปนี้

1. มีขนาดคละแบบเปิด (Open grade)
2. แข็งแรงสำหรับการต้านทานการสึกกร่อนและขัดสีจากการจราจร
3. ความคงทนสำหรับการต้านทานการแตกตัวจากการเพิ่มและลดอุณหภูมิ
4. ลักษณะของผิวควรขรุขระ เพื่อให้มีความเสียดทานมากขึ้นและมีผิวน้ำยึดเกาะกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ดีขึ้น
5. ลักษณะของรูปร่าง ไม่ควรแบนและยาวเนื่องจากมีโอกาสแตกหักได้ง่าย
6. ปราศจากสารที่เป็นอันตราย เนื่องจากอาจทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบผิวอนุภาคของมวลรวมที่มีคุณภาพต่ำหรืออาจทำให้อนุภาคของมวลรวมบางอนุภาคแตกได้

2.4 การออกแบบและทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธี Marshall

การเตรียมตัวอย่างพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต ดำเนินการตามมาตรฐาน “การทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล” ของกรมทางหลวง (ทล.-ท. 604/2517) โดยใช้มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท มทช.237-2563 แสดงดังรูปที่ 2.1 เริ่มดำเนินการโดยอุ่นแอสฟัลต์ซีเมนต์จนมีอุณหภูมิถึง 160 องศาเซลเซียส แล้วนำไปผสมกับมวลรวมที่อบไว้ด้วยอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ในปริมาณที่ออกแบบไว้ ผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเข้าด้วยกันโดยใช้เวลาไม่เกิน 60 วินาที จากนั้น ปล่อยให้อุณหภูมิของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตอยู่ที่ 150 องศาเซลเซียส จึงนำไปบดอัดด้วยค้อนมาร์แชลด้านละ 50 ครั้ง ทั้งสองด้าน ปล่อยให้เย็นตัวลงตามอุณหภูมิห้อง แล้วจึงดันตัวอย่างออกจากแบบหล่อ จากนั้นนำตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตไปทดสอบ ปริมาณสูญเสียจากการขัดสี (Cantabro abrasion loss) ค่าเสถียรภาพ (Stability) การไหล (Flow) และดัชนีความแข็งแรง (Strength index) เพื่อตรวจสอบว่ามีค่าผ่านตามาตรฐานที่กรมทางหลวงกำหนด

2.4.1 สมบัติเชิงปริมาตรของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว

ได้แก่ ช่องว่างอากาศ (Air voids), ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Void in mineral aggregate, VMA), ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Void filled by asphalt cement, VFA) และค่าร้อยละของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (Eff. AC) จะเป็นตัวบ่งบอกสมรรถภาพในการใช้งานของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อมวลรวมส่วนใหญ่มีรูพรุนและการดูดซึมแอสฟัลต์ซีเมนต์ต่างกัน การหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวมจึงมีอยู่ 3 วิธีที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน (Bulk) ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent) และความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพ ซึ่งสมบัติเชิงปริมาตรที่กล่าวมา มีนิยามดังนี้

1. ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน (Bulk specific gravity) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของวัสดุซึ่งมีสมบัติยอมให้ซึมผ่านได้ รวมทั้งช่องว่างที่ซึมผ่านได้และซึมผ่านไม่ได้ ต่อน้ำหนักในอากาศของน้ำที่ปราศจากก๊าซและมีปริมาตรเท่ากับวัสดุที่อุณหภูมิเดียวกัน
2. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของวัสดุซึ่งมีสมบัติไม่ยอมให้ซึมผ่าน ต่อน้ำหนักในอากาศของน้ำที่ปราศจากก๊าซและมีปริมาตรเท่ากับวัสดุที่อุณหภูมิเดียวกัน
3. ความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพ (Effective specific gravity) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักในอากาศของวัสดุ ซึ่งมีสมบัติยอมให้ซึมผ่านได้ แต่ไม่รวมช่องว่างที่ยอมให้แอสฟัลต์ซึมผ่านได้ ต่อน้ำหนักในอากาศของน้ำที่ปราศจากก๊าซและมีปริมาตรเท่ากับวัสดุที่อุณหภูมิเดียวกัน
4. แอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (Effective asphalt content) คือ ปริมาณแอสฟัลต์ซึ่งเคลือบอยู่บนผิวอนุภาคมวลรวม ทำหน้าที่ยึดประสานมวลรวมไว้ด้วยกัน
5. ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Voids in mineral aggregate, VMA) คือ ปริมาตรของช่องว่างที่อยู่ระหว่างอนุภาคมวลรวมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว ซึ่งเท่ากับ ปริมาตรช่องว่างอากาศรวมกับปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ
6. ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with asphalt, VFA) เป็นส่วนที่แอสฟัลต์ประสิทธิภาพบรรจุอยู่
7. ช่องว่างอากาศ (Air voids, AV) ปริมาณทั้งหมดของช่องอากาศที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์หลังจากแอสฟัลต์คอนกรีตถูกบดอัดแล้ว



รูปที่ 2.1 การเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีมาร์แชล

2.4.2 การทดสอบการไหลแยกตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Draindown)

การทดสอบการไหลแยกตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ การทดลองเพื่อหาการแยกสารยึดเกาะออกจากส่วนผสมของแอสฟัลต์เนื่องจากแรงโน้มถ่วง ตามมาตรฐาน EN 12697-18:2017 การทดสอบการไหลแยกตัวจะดำเนินการโดยการเตรียมส่วนผสมที่ไม่บีบอัดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสในบีกเกอร์ขนาด 800 มล. จากนั้นจึงเก็บไว้ในที่แห้งเกินไปที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ค่าการระบายออกสามารถกำหนดได้โดยการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (ควรน้อยกว่า 0.3% สำหรับสารผสมพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต)

2.4.3 การทดสอบปริมาณสูญเสียจากการขัดสี (Cantabro abrasion loss)

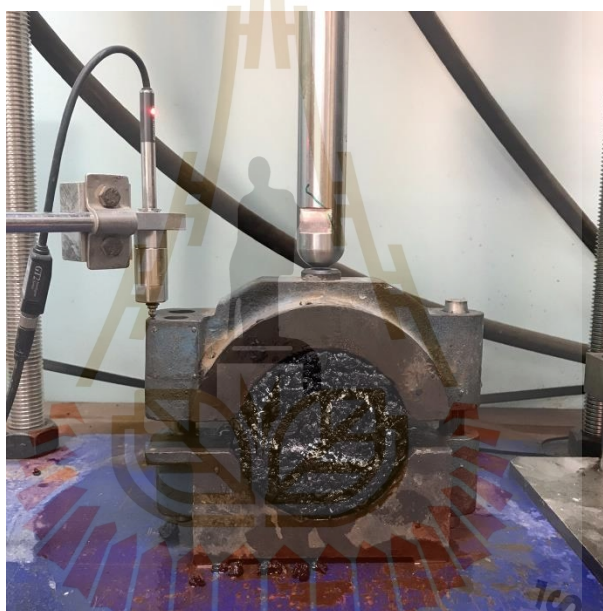
การทดสอบปริมาณสูญเสียจากการขัดสี ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D7064 เพื่อระบุความต้านทานการขัดสีของส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต ตัวอย่างถูกวางลงในเครื่องทดสอบการเสียดสี (Los Angeles abrasion testing โดยไม่มีลูกเหล็ก) จากนั้นทำการทดสอบด้วยการหมุนรอบ 300 รอบ การสูญเสียอนุภาคสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$Particle\ loss = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (2.1)$$

โดยที่ M_i คือ มวลเริ่มต้น (g) และ M_f คือ มวลสุดท้าย (g)

2.4.4 การทดสอบเสถียรภาพและการไหล (Stability & Flow)

การทดสอบเสถียรภาพและการไหล ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D 6927 (ASTM, 2015) เป็นการทดสอบเพื่อหาเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่บ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรง โดยที่แอสฟัลต์คอนกรีตไม่เกิดการวิบัติ และค่าการไหลคือความสามารถในการยุบตัวก่อนที่แอสฟัลต์คอนกรีตจะวิบัติ การทดสอบดำเนินการที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทดสอบหาค่าเสถียรภาพและค่าการไหล

2.4.5 การทดสอบหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength index)

การทดสอบดัชนีความแข็งแรง ดำเนินการตามมาตรฐาน ทล.-ท 413 (กรมทางหลวง, 2544) เป็นการทดลองหาค่ากำลังต้านทานต่อการหลุดลอกของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Hot-Mix Asphalt) โดยคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength index) เป็นร้อยละระหว่างค่าเสถียรภาพของก้อนตัวอย่างที่แช่ในสารละลายเกลือแกลก (Soaked sample) เปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้แช่ในสารละลายเกลือแกลก (Unsoaked sample)

2.5 การทดสอบสมรรถนะทางวิศวกรรม

การทดสอบสมรรถนะทางวิศวกรรมเป็นการจำลองสภาวะการใช้งานของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตโดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 การทดสอบ ดังนี้

1) การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength)

การทดสอบกำลังดึงทางอ้อมดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D6931 (ASTM, 2017) ด้วยอัตราการให้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 0.8333 มิลลิเมตรต่อวินาที หรือ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ให้แรงกระทำจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.3 งานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิทดสอบแตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังดึงทางอ้อม ค่ากำลังดึงทางอ้อมคำนวณจากสมการที่ (2.2)

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (2.2)$$

เมื่อ P คือ แรงกดสูงสุด D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง และ t คือ ความหนาของตัวอย่าง



รูปที่ 2.3 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม

2) การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus)

การทดสอบโมดูลัสคืนตัวดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D4123-82 (ASTM 1995) การทดสอบกระทำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ให้แรงกระทำแบบ Haversine ที่ความถี่ 1 รอบต่อวินาที โดยมีระยะเวลาในการให้แรงกระทำ 0.1 วินาที และมีระยะเวลาพัก 0.9 วินาที แรงกดเท่ากับร้อยละ 15 ของค่ากำลังดึงทางอ้อมสูงสุด ทำการทดสอบจำนวน 200 รอบ ค่าโมดูลัสคืนตัวเป็นค่าเฉลี่ย 5 ค่าสุดท้ายของการทดสอบ การจัดวางก้อนตัวอย่างในเครื่องทดสอบจะเป็นลักษณะเดียวกันกับการทดสอบหาค่ากำลังดึงทางอ้อม แต่จะมีการติดตั้ง Linear Variable Differential Transducers (LVDT) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้างแสดงดัง รูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัว ค่าโมดูลัสคืนตัวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.3)

$$M_R = \frac{P(0.27+v)}{\Delta H t} \quad (2.3)$$

เมื่อ P คือ แรงกดสูงสุด ΔH คือ ค่าการเสียรูปในแนวราบ t คือ ความหนาของตัวอย่างทดสอบ และ v คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

การทดสอบโมดูลัสคืนตัวมีความสัมพันธ์กับค่าความเครียดเริ่มต้น (Initial tensile strain) และอายุการล้า Kennedy (1978), Mohammed (1993) จากมาตรฐาน BS EN 12679-24:2004 ที่ค่าโมดูลัสคืนตัวและค่าความเครียดเริ่มต้น สามารถนำมาคำนวณอายุการล้าของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตได้จากสมการที่ (2.5) โดยที่สมการค่าความเครียดเริ่มต้นได้จากสมการที่ (2.4)

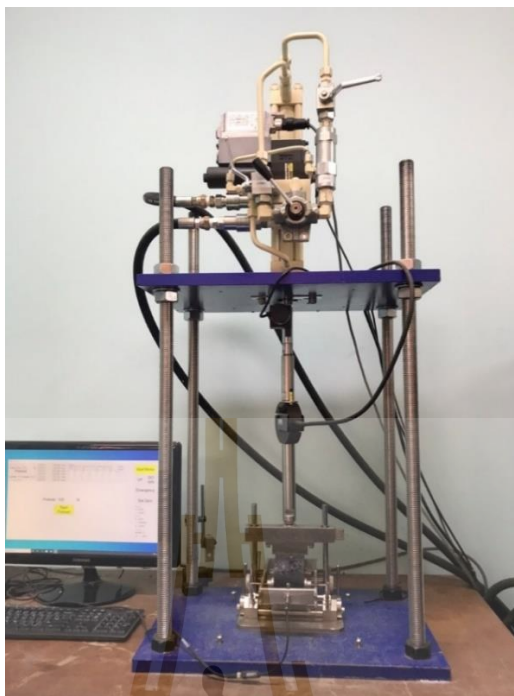
$$\varepsilon = \frac{\sigma(1+3\nu)}{M_r} \quad (2.4)$$

เมื่อ ε คือ ค่าความเครียดเริ่มต้น

$$N_f = a\varepsilon^b$$

$$\log(N_f) = a + b * \log(\varepsilon) \quad (2.5)$$

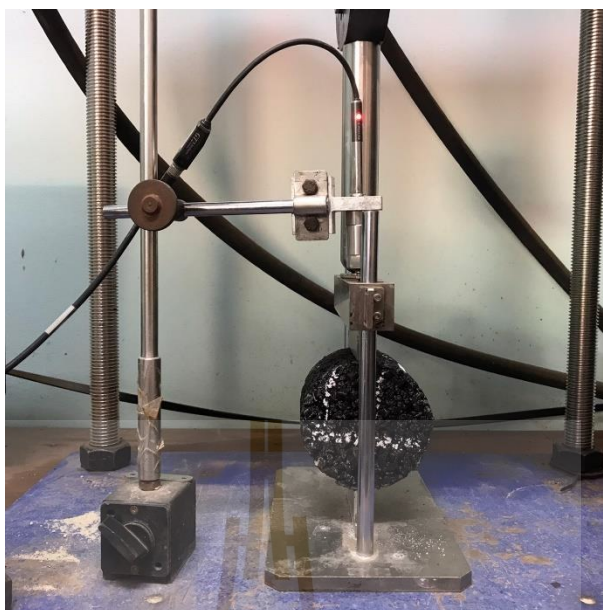
เมื่อ N_f คือ อายุการล้า, a และ b คือ ค่าคงที่



รูปที่ 2.4 การทดสอบโมดูลัสคืบตัว

3) การทดสอบการล้าจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile fatigue)

การทดสอบการล้าจากแรงดึงทางอ้อมดำเนินการตามมาตรฐาน BS EN12697-24 (ASTM 2012) เป็นการศึกษาสสมบัติความต้านทานต่อความล้า (Fatigue Properties) ที่เกิดขึ้นกับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต การจัดวางตัวอย่างและรูปแบบของหน่วยแรงเหมือนกับการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืบตัว แต่ใช้ค่าหน่วยแรงดึงทางอ้อมในการทดสอบแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 150 200 และ 250 กิโลพาสคาล ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ให้หน่วยแรงกระทำซ้ำจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ (การทรุดตัวแนวตั้งมากกว่า 12 มิลลิเมตร) อายุการล้า (Fatigue life, N_f) หาได้จากจุดตัดของส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดน้อยและส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดมากในความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวตั้งและรอบทดสอบ ลักษณะการทดสอบการล้าจากแรงดึงทางอ้อมแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การทดสอบกำลังต้านทานการล้า

4) การทดสอบการยุบตัวถาวร (Permanent deformation)

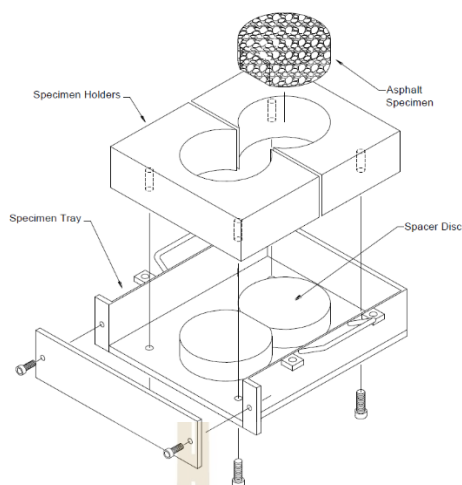
การทดสอบการยุบตัวถาวรดำเนินการตามมาตรฐานการทดสอบ AS 2891.12.1 (1995) เพื่อศึกษาความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร ด้วยการทดสอบความคืบพลวัต (Dynamic creep test) เมื่อเริ่มต้นการทดสอบต้องให้แรงกระทำตามแนวแกนกับตัวอย่างเท่ากับ 10 กิโลพาสคาล (Preload) เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้น จึงให้หน่วยแรงกระทำซ้ำในแต่ละรอบการทดสอบเท่ากับ 120 กิโลพาสคาล ในรูปแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) ที่ความถี่ 0.5 รอบต่อนาที โดยมีระยะเวลาในการให้แรงกระทำ 1 วินาที และมีระยะเวลาพัก 1 วินาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จำนวน 1,800 รอบ แสดงผลเป็นค่าการยุบตัวถาวรสะสมและจำนวนรอบทดสอบ ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.5



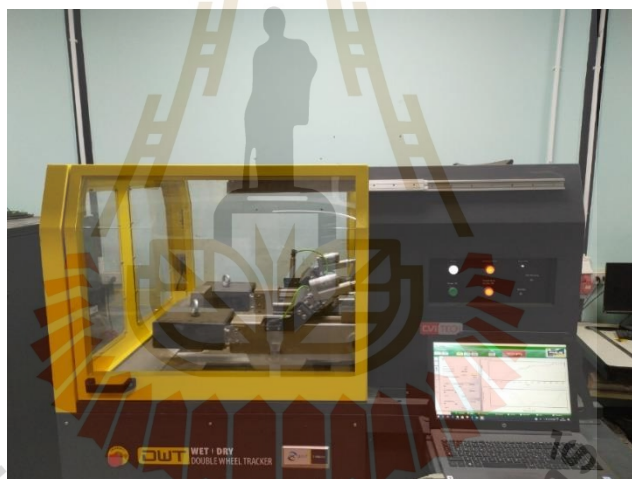
รูปที่ 2.6 การทดสอบการยุบตัวแบบถาวร

5) การทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อ (Rutting resistance)

การทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อดำเนินการตามมาตรฐาน AASHTO T 324 (2019) ด้วยเครื่อง Hamburg wheel track ตัวอย่างทดสอบเป็นแบบทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร หนา 60 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้นต่อกันดังรูปที่ 2.7 การทดสอบใช้ล้อเหล็ก จำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 มิลลิเมตร กว้าง 47 มิลลิเมตร กดทับลงกับแผ่นตัวอย่างผิวทาง ทดสอบแล้ววิ่งกลับไปกลับมาจำนวน 10,000 รอบ แรงกดทับมีค่าเท่ากับ 1,500 นิวตัน ซึ่งจะให้ความดันที่ผิวทางเทียบเท่ากับ 707 กิโลปาสคาล หรือเท่ากับแรงดันจากล้อรถบรรทุกขนาดมาตรฐาน ทำการทดสอบแบบแช่น้ำที่อุณหภูมิทดสอบ 50 องศาเซลเซียส ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.8 ในระหว่างที่ทดสอบจะคั่นด้วยการทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance) ทุก ๆ 1,000 รอบ การทดสอบ



รูปที่ 2.7 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการเกิดร่องล้อ



รูปที่ 2.8 เครื่องทดสอบการเกิดร่องล้อ

6) การทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance)

การทดสอบความต้านทานการลื่นไถลดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM E 303 (2018) ด้วยเครื่องทดสอบ British pendulum tester แสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่กรมทางหลวงใช้งานในปัจจุบัน โดยจะใช้หลักการวัดแรงเสียดทานด้วยการเหวี่ยงแท่งอย่างสัมผัสพื้นผิวทดสอบ และวัดค่าแรงเสียดทานในหน่วย BPN (British pendulum number)



รูปที่ 2.9 การทดสอบความต้านทานการลื่นไถล

2.6 แนวทางการออกแบบผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตตามวิธีของ Asphalt Institute (1982)

1. การคำนวณปริมาณจราจรที่ออกแบบ (Design ESALs)

ปริมาณจราจรเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้าง อยู่ในรูปของจำนวนสะสมของเพลามาตรฐาน (Equivalent single axle load, ESALs) ที่มีน้ำหนัก 18,000 ปอนด์ (80 กิโลนิวตัน) โดยปริมาณจราจรที่ออกแบบ (Design ESALs) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.4)

$$\text{ESALs} = \text{ปริมาณจราจรต่อวัน} \times \text{ร้อยละของรถบรรทุก} \times \text{Truck factor} \times 365 \times \text{Growth rate} \quad (2.4)$$

- ปริมาณจราจรต่อวัน (Average daily traffic, ADT)
ปริมาณจราจรต่อวันคือ ปริมาณยานพาหนะทุกชนิดที่ได้จากการสำรวจในพื้นที่ออกแบบ
- ร้อยละของรถบรรทุก (Percent of truck)
ร้อยละของรถบรรทุกคือปริมาณของรถบรรทุกแต่ละชนิดที่มีอยู่ในปริมาณจราจรต่อวัน
- ตัวคูณเทียบเท่าของรถบรรทุก (Truck factor)

รถบรรทุกแต่ละชนิดตามกฎหมาย จะถูกกำหนดให้มีน้ำหนักลงเพลลา และจำนวนเพลลาต่างกัน เมื่อนำน้ำหนักลงเพลลาของรถบรรทุกแต่ละชนิดมาคิดเป็นจำนวนเพลามาตรฐาน

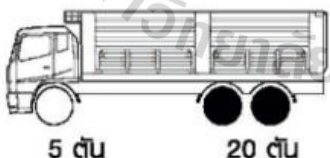
(80 กิโลนิวตัน) จะต้องใช้ตัวคูณเทียบเท่าของรถบรรทุกแต่ละชนิด (Truck factor) ในการหาน้ำหนักของเพลามาตรฐานสำหรับรถบรรทุกชนิดนั้น โดย Truck factor หาได้จากน้ำหนักที่ลงเพลาน้ำหนักกลางหรือเพลาลัง จากนั้น นำน้ำหนักที่ลงเพลามาหารค่าตัวคูณเทียบเท่า (Load equivalency factor) ของเพลานั้น ๆ ผลรวมของตัวคูณเทียบเท่าคือ Truck factor ของรถบรรทุกชนิดนั้น

ยกตัวอย่างเช่นตารางที่ 2.1 แสดงน้ำหนักที่ลงเพลารถบรรทุกชนิด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ตามพระราชบัญญัติทางหลวง (2559) จะเห็นว่า มีน้ำหนักลงเพลาน้ำหนักเท่ากับ 5 ตัน และน้ำหนักลงเพลาลัง 20 ตัน เมื่อนำน้ำหนักลงเพลามาหารค่าตัวคูณเทียบเท่า จะสามารถหาค่า Truck factor ของรถบรรทุกชนิด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น ได้ดังตารางที่ 2.2 จะเห็นว่า รถบรรทุกชนิด 3 เพลา 6 ล้อ ยาง 10 เส้น มีค่าตัวคูณเทียบเท่าของเพลาน้ำหนักเท่ากับ 0.138 และเพลาลัง 2.995 ตามลำดับ ผลรวมของตัวคูณเทียบเท่า (Truck factor) จึงมีค่าเท่ากับ 3.133

- อัตราการเติบโตของปริมาณจราจรในแต่ละปี (Growth rate)

Growth rate คืออัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณจราจรต่อปี โดยสามารถหาได้จากค่าที่ Asphalt institute (1981) แนะนำ ดังตารางที่ 2.1 ถึงตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 พิกัดน้ำหนักรถบรรทุกตามพระราชบัญญัติทางหลวง (2559)

ยานพาหนะชนิดรถเดี่ยว (Single unit)	น้ำหนัก เพลาน้ำหนัก (ตัน)	น้ำหนักเพลาท้าย (ตัน)				น้ำหนัก รวม (ตัน)
		เพลาดำเนิน		เพลาคู่		
		ยาง เดี่ยว	ยาง คู่	ยาง เดี่ยว	ยาง คู่	
 5 ตัน 20 ตัน	5	-	-	-	20	25

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวคูณเทียบเท่า (Load equivalency factors) (กรมทางหลวง, 2559)

น้ำหนักลงเพลา	Load equivalency factors	
	เพลาเดี่ยว	เพลาคู่
ตัน		
5	0.138	-
20	-	2.995

ตารางที่ 2.3 Total growth factor (AI, 1981)

Total growth rate	
Design period (Years)	Annual growth rate (%)
	4
1	1.0
2	2.04
3	3.12
4	4.25
5	5.42
6	6.63
7	7.90
8	9.21
9	10.58
10	12.01

2. การคำนวณความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นโครงสร้าง

Schiffman (1962) นำเสนอสมการทั่วไป ในการคำนวณความเค้น ความเครียด และการแอ่นตัว สำหรับโครงสร้างทางที่มีชั้นวัสดุหลายชั้น การวิเคราะห์มีสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

- วัสดุในแต่ละชั้นมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) และมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น ที่จำลองโดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus, E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio, ν)
- ความหนาของแต่ละชั้นมีค่าที่จำกัด ยกเว้นชั้นล่างสุด และความกว้างของโครงสร้างทางมีไม่จำกัด (Infinity)
- การให้น้ำหนักจะจำลองด้วยน้ำหนักกระทำเป็นจุด (Point load) ที่แปลงเป็นแรงดันกระจาย (Uniformly distributed load) ลักษณะวงกลม

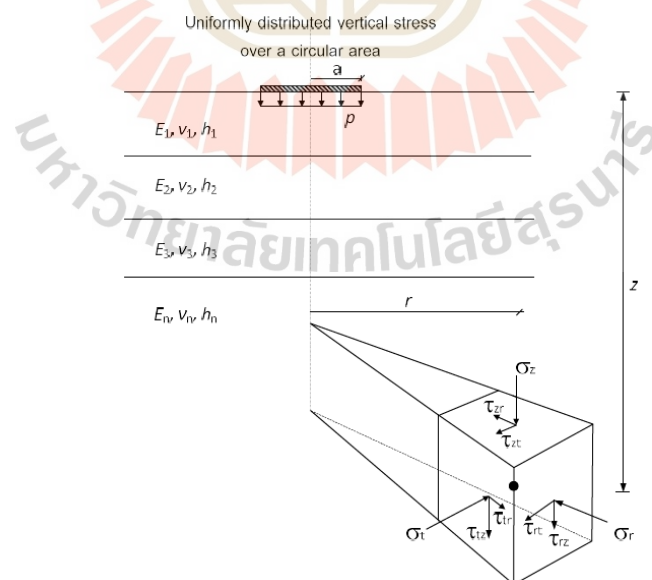
- ไม่คิดน้ำหนักของวัสดุ แรงเฉือนบนผิวทาง อิทธิพลที่เกิดจากอุณหภูมิ และผลกระทบทางพลศาสตร์
- ไม่มีความแตกต่างบนรอยต่อของแต่ละชั้น

รูปที่ 2.10 แสดงแรงกระจายแบบวงกลม ที่มีรัศมี a กระทำบนโครงสร้างชั้นทางที่มีหลายชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) อัตราส่วนปัวซอง (ν) และความหนา (h) ที่ต่างกัน และแสดงเอลิเมนต์เล็ก ๆ ที่มีจุดศูนย์กลางห่างจากแกนสมมาตรเป็นระยะ r มีความลึกเป็นระยะ z ค่าการตอบสนอง ณ ตำแหน่งของเอลิเมนต์นี้ สามารถคำนวณได้โดยใช้กฎของ Hook ซึ่งอยู่ในรูปสามมิติ ดังสมการที่ (2.5) ถึง (2.7) ตามลำดับ

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_t + \sigma_z)] \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบความเค้นในเอลิเมนต์โครงสร้างชั้นทางที่มีชั้นวัสดุหลายชั้นสำหรับการคำนวณโดยวิธียืดหยุ่นแบบสมมาตรแนวแกน

3. สมบัติของวัสดุที่ใช้คำนวณความเครียดในโครงสร้างชั้นทาง

สมบัติของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างทางโดยทั่วไปนิยมใช้ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus) ในการพิจารณาความแข็งแรง เนื่องจากค่าความเครียดทั้งหมด (Total strain) และค่าความเครียดคืนตัว (Recoverable strain) มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus, E) จึงสามารถใช้แทนค่าโมดูลัสคืนตัวในการวิเคราะห์โครงสร้างทางได้ และในทฤษฎีวัสดุโครงสร้างทางและดินเต็มสมมติให้มีสมบัติเป็นวัสดุยืดหยุ่น (Elastic material)

AUSTROADS (1992) ได้สรุปช่วงของค่าพารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในงานทางของประเทศออสเตรเลีย ประกอบไปด้วยโมดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซอง (ตารางที่ 2.4) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการวิเคราะห์หาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นทาง เพื่อออกแบบโครงสร้างทางของถนนในประเทศไทย

ตารางที่ 2.4 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของวัสดุงานทาง (AUSTROADS, 1992)

ชนิดของวัสดุ	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)			อัตราส่วนปัวซอง	
	ค่าต่ำสุด	ค่าทั่วไป	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
แอสฟัลต์คอนกรีต	500	3,500	14,000	0.25	0.40
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต	7,000	35,000	60,000	0.10	0.20
คอนกรีตหยาบ	7,000	14,000	20,000	0.15	0.25
พื้นทางปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์	700	3,500	10,000	0.25	0.40
พื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์	1,400	5,000	14,000	0.15	0.25
วัสดุเม็ดหยาบ	70	200	350	0.20	0.40
วัสดุเม็ดละเอียด	30	100	200	0.20	0.40
ดินซีเมนต์	70	350	1,400	0.15	0.30
ดินทั่วไป	20	50	170	0.30	0.45

Queensland Main Road (1982) เสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของดินซีเมนต์กับค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) ของวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ดังสมการที่ (2.8)

$$E(\text{MPa}) = 1814(\text{UCS})^{0.88} + 3500 \quad (2.8)$$

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของวัสดุคัดเลือกและดินเต็ม สามารถหาได้จากสมการที่เสนอโดย Lister and Powell (1987) และ AASHTO (1993) ดังสมการที่ (2.9) และ (2.10)

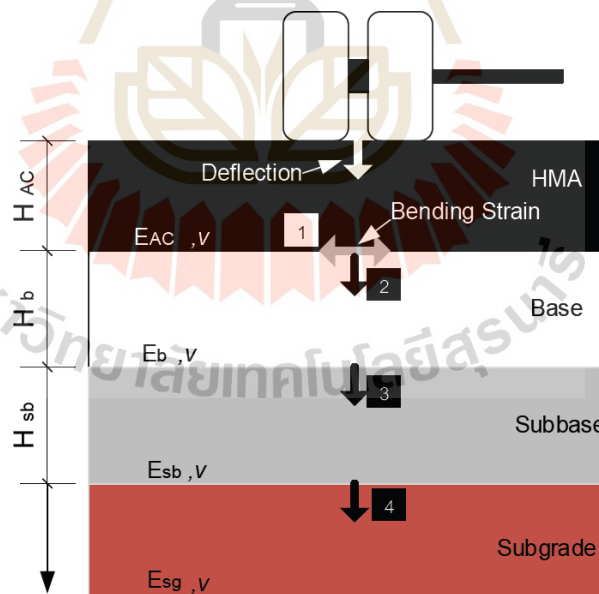
$$E(\text{MPa}) = 10.34(\text{CBR}) \quad \text{for CBR} \leq 5 \quad (2.9)$$

$$E(\text{MPa}) = 17.60(\text{CBR})^{0.64} \quad \text{for CBR} > 5 \quad (2.10)$$

4. การวิเคราะห์ความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นทาง

รูปที่ 2.11 เป็นโครงสร้างชั้นทางในการออกแบบด้วยวิธีเชิงกล (Mechanistic design) ซึ่งจะใช้ในการพิจารณาหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่กระทำบนผิวทาง ค่าขีดจำกัดของความเครียดในแต่ละตำแหน่งที่จะถูกนำมาใช้เพื่อทำนายปริมาณจรรยาจระยอมให้ได้แก่ 1) ความเครียดดึงแนวราบ (ϵ_r) ใต้ผิวทางแอสฟัลต์ สำหรับทำนายปริมาณจรรยาจระที่เกิดจากการล้า และ 2) ค่าความเครียดอัดแนวตั้ง (ϵ_c) ในชั้นพื้นทาง รองพื้นทาง ชั้นวัสดุคัดเลือก และชั้นดินเดิม

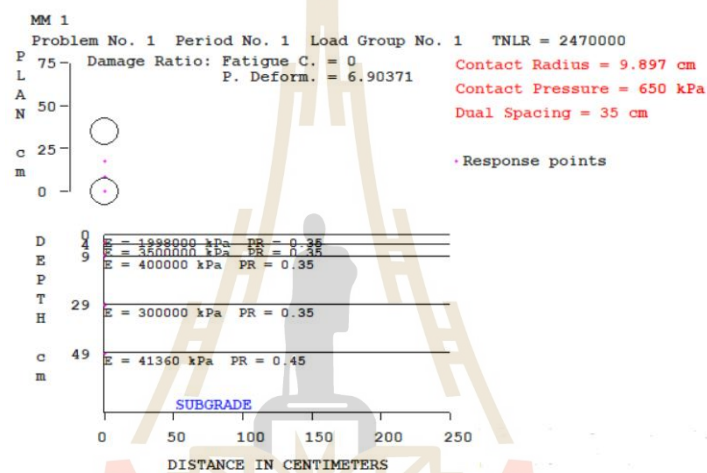
น้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้างชั้นทาง เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกที่ลงเพลาและกระจายไปสู่ล้อ โดยค่าพารามิเตอร์ของน้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้าง แสดงดังตารางที่ 2.5 และตำแหน่งในการวิเคราะห์ความเครียดใต้พื้นที่รับน้ำหนักจากล้อบรรทุกทุกสามารถระบุได้ในรูปของค่าพิกัด (X,Y) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 การเกิดความเครียดในโครงสร้างทางจากแรงกระทำบนผิวทาง

ตารางที่ 2.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณน้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้าง (Theyse et al., 2011)

ชนิดของเพลลา	รัศมีของพื้นที่ ล้อยกดทับ (เซนติเมตร)	แรงดันของล้อย (กิโลพาสคัล)	ระยะห่างของ จุดกึ่งกลางล้อย ในเพลลา เดียวกัน (เซนติเมตร)	ระยะห่างของ จุดกึ่งกลางล้อย ระหว่างเพลลา (เซนติเมตร)	จำนวน ตำแหน่งที่ วิเคราะห์ (จุด)
1 เพลลา 2 ล้อย	10.115	650	35	135	24



รูปที่ 2.12 ตำแหน่งในการวิเคราะห์ความเครียดใต้พื้นที่รับน้ำหนักจากล้อยบรรทุก

5. การคำนวณปริมาณจราจรที่ยอมให้ (Allowable ESALs)

การทำนายปริมาณจราจรที่พิจารณาจากความเสียหายเนื่องจากการล้าเป็นเกณฑ์ จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจราจรที่ยอมให้และค่าความเครียดดึง ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ดังสมการที่ (2.11)

$$N_f = k_1 (\varepsilon_r)^{-k_2} (E)^{-k_3} \quad (2.11)$$

โดยที่ N_f = ปริมาณจราจรที่ยอมให้ (ESALs x106)
 ε_r = ค่าความเครียดที่ใต้ผิว (microstrain)
 E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ (MPa)
 k_1 k_2 และ k_3 = สัมประสิทธิ์เพื่อทำนายปริมาณจราจรที่ยอมให้

Asphalt institute (1996) ได้แนะนำค่าสัมประสิทธิ์ k_1 k_2 และ k_3 แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้หาปริมาณจราจรที่ยอมให้โดยพิจารณาจากความเครียดใต้ผิว

อ้างอิงจาก	ตัวแปรสัมประสิทธิ์		
	k_1	k_2	k_3
Asphalt Institute	0.0796	3.291	0.854

การพิจารณาความเสียหายแบบร่องล้อ (Rutting) สามารถทำนายจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการจราจรที่ยอมให้ กับ ค่าความเครียดอัดแนวตั้ง (ϵ_c) บนชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง ชั้นวัสดุคัดเลือก และชั้นดินเดิม ดังสมการที่ (2.12)

$$N_r = k_4 (\epsilon_c)^{-k_5} \quad (2.12)$$

โดยที่ N_r = ปริมาณจราจรที่ยอมให้ (ESALs x10⁶)
 ϵ_c = ค่าความเครียดอัดตัวแนวตั้ง (microstrain)
 k_4 และ k_5 = สัมประสิทธิ์เพื่อทำนายปริมาณจราจรที่ยอมให้

Asphalt institute (1996) ได้แนะนำค่าสัมประสิทธิ์ k_4 และ k_5 แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้หาปริมาณจราจรที่ยอมให้โดยพิจารณาจากความเครียดอัดแนวตั้ง

อ้างอิงจาก	ตัวแปรสัมประสิทธิ์	
	k_4	k_5
Asphalt Institute	1.365×10^{-9}	4.477

2.7 การสำรวจหรือทบทวนเอกสาร (Literature Review) ที่เกี่ยวข้องกับประเด็นปัญหาที่ทำการวิจัย

Siriphun et al. (2016) ศึกษาองค์ประกอบของหินชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของประเทศไทย พบว่า แม้อีกองค์ประกอบของหินปูน หินแกรนิต และหินบะซอลต์จะมี SiO_2 เหมือนกัน แต่มีองค์ประกอบของ SiO_2 ต่างกัน โดยหินแกรนิตมี SiO_2 ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นแร่อามอร์ฟัสซิลิเกตและแร่ควอทซ์ผสมกัน ต่างจาก SiO_2 ของหินปูนและหินบะซอลต์ ที่มีแร่อามอร์ฟัสซิลิเกตเป็นองค์ประกอบทั้งหมด ซึ่ง SiO_2 ที่มีแร่อามอร์ฟัสซิลิเกตและแร่ควอทซ์เป็นองค์ประกอบ จะช่วยให้หินมีความทนทานต่อแรงกระแทกและแรงบดอัด แต่หินจะมีความทนทานต่อการกัดกร่อน

และการขัดสีน้อยกว่า SiO_2 ที่มีแร่แอมอร์ฟัสซิลิเกตเป็นองค์ประกอบทั้งหมด นอกจากนี้ หินปูนยังมี CaO เป็นองค์ประกอบคู่กับ SiO_2 อยู่ด้วย ซึ่งต่างจากหินแกรนิต และหินบะซอลต์ที่มี Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบคู่กับ SiO_2

Thanaya (2009) ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเหลือทิ้งที่มีในปัจจุบัน เช่น แก้วบด (Crushed glass) ตะกรันเหล็ก (Steel slag) เถ้าลอย (Fly ash) และเถ้าหนัก (Furnace bottom ash) มาเป็นวัสดุผสมรวมในแอสฟัลต์ผสมร้อน โดยใช้ตะกรันเหล็กและแก้วบดเป็นมวลรวมหยาบ และใช้เถ้าหนักและแก้วบดเป็นมวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 25 และ 75 ตามลำดับ ผลทดสอบชี้ให้เห็นว่า การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนัก ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็ง (Stiffness) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ แก้วบด ตะกรันเหล็ก เถ้าลอยและเถ้าหนัก สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมรวมเพื่อใช้ก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับถนนปริมาณการจราจรระดับปานกลางได้

Colonna et al. (2012) ศึกษาการประยุกต์ใช้เถ้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียดธรรมชาติ ในการก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่าเถ้าหนักไม่เหมาะที่จะใช้เป็นมวลรวมหยาบ เนื่องจากเถ้าหนักที่มีขนาดใหญ่มีรูพรุนสูงและมีค่าความต้านทานการขัดถูต่ำ เมื่อนำมาเป็นมวลรวมหยาบจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตเกิดการหลุดร่อนและอายุการใช้งานต่ำกว่าการใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ และรูพรุนที่สูงยังทำให้ดูดซึมแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้นด้วยเหตุนี้เอง เถ้าหนักที่มีขนาดใหญ่ส่วนมากจะถูกนำไปเป็นวัสดุก่อสร้างชั้นพื้นทางหรือรองพื้นทาง งานวิจัยนี้สรุปว่า การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักในอัตราส่วนร้อยละ 15 20 และ 25 ช่วยเพิ่มเสถียรภาพ ความแข็ง และความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำและอากาศของแอสฟัลต์คอนกรีต ได้มากถึงร้อยละ 20

Ksaibati and Stephen (1999) ศึกษาการใช้เถ้าหนักเป็นวัสดุการก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีเถ้าหนักเป็นส่วนผสมต้องการปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความพรุนที่สูงของเถ้าหนักดูดซึมแอสฟัลต์ซีเมนต์ ขณะที่ การก่อสร้างในภาคสนามแสดงให้เห็นว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีเถ้าหนักเป็นส่วนผสมต้องการพลังงานในการบดอัดน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ นอกจากนี้ เถ้าหนักยังช่วยลดการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ และต้านทานการเกิดร่องล้อที่อุณหภูมิสูง

Hassan (2005) ได้ทำการศึกษาการใช้เถ้าหนักจากการเผาขยะเพื่อทดแทนมวลรวมละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน โดยใช้เถ้าหนักในส่วนผสมสูงถึงร้อยละ 40 ของน้ำหนักรวมทั้งหมด ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้เถ้าหนักในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยแนะนำไว้ว่า การแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดไม่เกินร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุทั้งหมด สำหรับชั้นผิวทาง ในขณะที่ สำหรับชั้นพื้นทาง ไม่ควรเกินร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดุทั้งหมด

Luo et al. (2017) ได้ทำการศึกษาการใช้เถ้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียดของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดคละของมวลรวมแบบเปิด (Open graded) พบว่า การใช้เถ้าหนัก

แทนที่มวลรวมละเอียดของส่วนผสมแอสฟัลต์จะทำให้เกิดฟิล์มแอสฟัลต์บนผิวของมวลรวมที่หนามากขึ้น (แอสฟัลต์ประสิทธิผล) ทำให้ส่วนผสมยึดเกาะกันได้ดีขึ้น แผ่นฟิล์มแอสฟัลต์ที่หนามากขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากผิวที่หยาบและขรุขระของเถ้าหนักที่ประกอบไปด้วยโมเลกุลของสารประกอบที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีในน้ำมัน (Lipophilic) เมื่อผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์จะเกิดแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคของเถ้าหนักและแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มหนาเคลือบผิวของมวลรวม ส่งผลให้สมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตดีขึ้น คล้ายกับการเติมเส้นใยไฟเบอร์ในส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต แต่เมื่อแอสฟัลต์ประสิทธิผลมีมากเกินไป (แผ่นฟิล์มแอสฟัลต์หนาเกินไป) จะทำให้น้ำหนักจากแรงกระทำภายนอกกระจายไปที่มวลรวมลดลง ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีสมรรถนะลดลง

Jayaranjan et al. (2014) ได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเถ้าหนัก พบว่า อนุภาคของเถ้าหนักโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม มีรูพรุนมาก ผิวหยาบ และมีลักษณะประสานกันของอนุภาค สามารถแตกได้โดยการบิด้วยนิ้วมือ



บทที่ 3

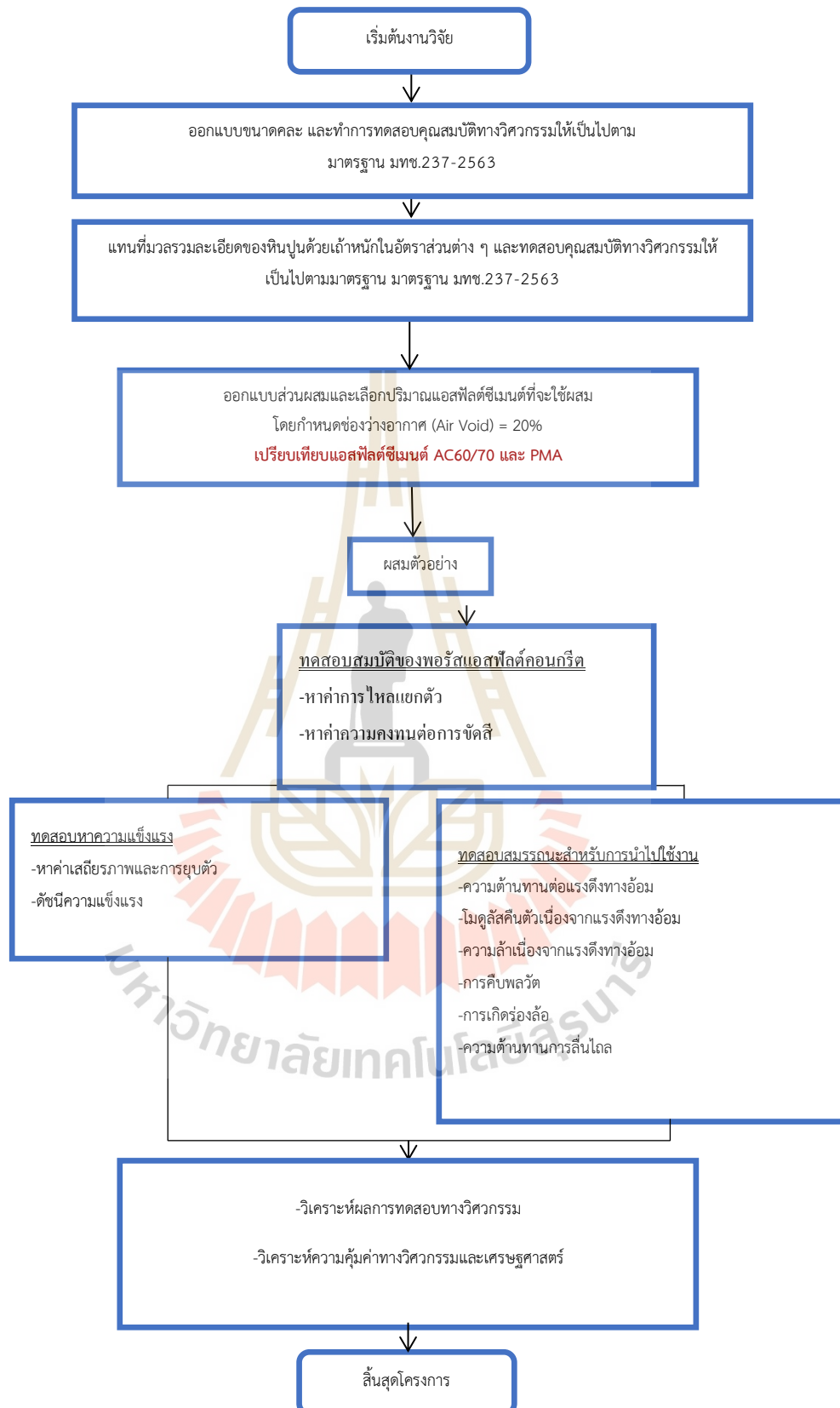
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย (Research Methodology)/ ขั้นตอนการทำงานวิจัย (Work Flow Diagram)

ผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้กำหนดให้เป็นผิวทางแอสฟัลต์ที่มีขนาดมวลรวมใหญ่สุด 12.5 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) ใช้สำหรับชั้นผิวทางหนา 40 ถึง 70 มิลลิเมตร วัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิด ได้แก่ ใ้้าหนักได้เหมือนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง หินปูนได้จากโรงโม่หินบริษัท ศิลาภูพระลานจำกัด ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี และใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนิเตอร์ชั้นเกรด 60 ถึง 70 กับโพลีเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ซีเมนต์ (PMA) จากบริษัททีปโก้ แอสฟัลต์จังหวัดนครราชสีมาเป็นวัสดุเชื่อมประสานและการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ โดยมีแผนผังการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 และระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม/ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	เดือนที่						
	เม.ช.	พ.ค.	มิ.ค.	ก.ค.	สิ.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1. ทบทวนและศึกษาวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง	X						
2. จัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	X						
3. ออกแบบขนาดคละและทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมชนิดต่าง ๆ		X					
4. ออกแบบส่วนผสม		X	X				
5. ทดสอบสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดจากธรรมชาติด้วยเถ้าหนัก			X	X			
6. สรุปลักษณะและวิเคราะห์ผลการทดสอบ			X	X	X		
7. วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์					X		
8. จัดทำวิทยานิพนธ์					X	X	
9. สอบวิทยานิพนธ์							X
ปริมาณงานที่วางแผนไว้ (%)	10	30	20	20	20	-	-
ปริมาณงานที่ทำได้จริง (%)	20	30	20	22	5	5	8
งานสะสมที่วางแผนไว้ (%)	10	40	60	80	100	100	100
งานสะสมที่ทำได้จริง (%)	20	40	60	82	87	92	100



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 มวลรวม

วัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ใ้้าหนัก และหินปูน มาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท มทข.237-2563 แสดงดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 สมบัติพื้นฐานของมวลรวมตามมาตรฐาน มทข.237-2563

คุณลักษณะ	หน่วย	เกณฑ์ที่กำหนด		มาตรฐานทดสอบ
		มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด	
Sand equivalent	ร้อยละ	-	> 60	มทข.(ท) 501.13
Soundness	ร้อยละ	< 5	< 5	มทข.(ท) 501.12
Los Angeles abrasion	ร้อยละ	< 30	-	มทข.(ท) 501.9
Coating and stripping	ร้อยละ	> 100	-	AASHTO T 182
Flakiness index	ร้อยละ	< 25	-	ทล.-ท. 210
Elongation index	ร้อยละ	< 25	-	ทล.-ท. 211
Aggregate Crushing Value, ACV	ร้อยละ	< 25	-	มทข.(ท) 501.15

ตารางที่ 3.3 ขนาดละเอียดของมวลรวมตามมาตรฐาน มทข.237-2563

ชั้นทาง		Wearing course
ขนาดที่ใช้เรียก	มิลลิเมตร	12.5
	นิ้ว	1/2
ความหนา (มิลลิเมตร)		40-70
มิลลิเมตร	นิ้ว	ปริมาณผ่านตะแกรงร้อยละโดยน้ำหนัก
25.0	1	-
19.0	3/4	100
12.5	1/2	85-100
9.5	3/8	50-80
4.75	เบอร์ 4	11-35
2.36	เบอร์ 8	10-20
1.18	เบอร์ 16	-
0.600	เบอร์ 30	-
0.300	เบอร์ 50	-
0.150	เบอร์ 100	-
0.075	เบอร์ 200	3-7
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ (ร้อยละโดยน้ำหนักของมวลรวม)		4.0-6.0

3.2.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์

1. แอสฟัลต์ซีเมนต์เพนิเตอร์ชั้นเกรด 60 ถึง 70 (AC 60/70) ที่ได้จากบริษัททีปโก้ แอสฟัลต์ มีสมบัติที่ผ่านการทดสอบจากโรงงาน แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพนิเตอร์ชั้นเกรด 60 ถึง 70

Properties	Standard test	Units	Specifications	AC60/70
Penetration	ASTM D 5	-	60-70	67
Flash point	ASTM D 92	°C	>232	332
Softening point	ASTM D 36	°C	45-55	47.8
Ductility	ASTM D 113	cm	>100	150
Solubility in trichloroethylene	ASTM D 2042	% weight	>99	99.97
Specific gravity	ASTM D 70	-	-	1.031
Thin film heating for 5 hrs at 163 °C				
Weight loss	ASTM D 1754	% weight	<0.8	-0.12
Penetration	ASTM D 5	-	>54	71.1
Ductility	ASTM D 113	cm	>50	150

2. แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Polymer modified asphalt cement, PMA)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Polymer modified asphalt cement, PMA) ที่ใช้ในงานวิจัยเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทที่ มทข.237-2563 ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 สมบัติพื้นฐานของ (Polymer modified asphalt cement, PMA)

Item No.	Properties	Unit	Minimum	Maximum	Test Method	Result
1	Penetration at 25 °C, 100 gm., 5 sec.	mm.	60	70	DH-T 403	63
2	Softening Point, Ring and Ball	°C	60	-	ASTM D36	79.2
3	Penetration Index	cm.	+1.5	-	NLT-181 *	+2.5
4	Ductility at 13 °C, 5 cm/min	%	20	-	DH-T 405	92
5	Torsional Recovery at 25 °C	sec.	30	-	NLT-329 *	93
6	Float Test at 60 °C	Kg.cm	200	-	ASTM D139	354
7	Toughness/Tenacity Test, 25 °C Toughness Tenacity	Kg.cm Kg.cm	200 100	- -	ESM NE-31 **	304 229
8	Brookfield Viscosity, Shear Rate 18.6 s-1, Spindle 21 At 135 °C At 165 °C	cP cP	700 200	- -	ASTM D4402	1,430 400
9	Storage Stability at 163 °C, 24 hrs. Difference in Softening Point	°C	2	-	ASTM D5892	1.0
10	Density at 25 °C	gm/cc	1.00	1.05	ASTM D70	1.00
11	Flash Point, Cleveland Open Cup	°C	220	-	ASTM D92	332
12	Solubility in Trichloroethylene	% wt.	99.0	-	DH-T 409	99.8
Test on Residue from Thin Film Oven Test						
13	Weight Loss	% wt.	-	0.5	ASTM D1754	0.1
14	Retained Penetration at 25 °C	%	65	-	DH-T 403	75.9
15	Variation in Softening Point	°C	-4	+6	ASTM D36	-1.4
16	Ductility at 13 °C, 5 cm/min	cm	10	-	DH-T 405	76
17	Torsional Recovery at 25 °C	%	60	-	ASTM D6084	90

3.3 การออกแบบและทดสอบส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล

3.3.1 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

เป็นขั้นตอนออกแบบส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการออกแบบและการเตรียมตัวอย่างเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงชนบท มทข.237-2563 “วิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล” ก่อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมไว้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร ความหนาตามมาตรฐานเท่ากับ 63.5 มิลลิเมตร โดยจะเริ่มจากการกำหนดปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ไว้ที่ร้อยละ 4 ถึง 6 (มทข.237-2563) นำมาผสมกับมวลรวม และนำไปบดอัดด้วยค้อนมาร์แชลด้านละ 50 ครั้ง หลังจากที่ได้ก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตแล้ว นำไปทดสอบเพื่อหาสมบัติพื้นฐานของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐาน มทข.237-2563 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น (Density) ร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (VMA) ร้อยละช่องว่างอากาศ (Air void) และร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ (VFB)

3.3.2 การทดสอบส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

การทดสอบส่วนผสมจะประกอบไปด้วย การไหลแยกตัว (Draindown) ปริมาณสูญเสียจากการขัดสี (Cantabro abrasion loss) การทดสอบเสถียรภาพ (Stability) การไหล (Flow) และดัชนีความแข็งแรง (Strength index) โดยมีรายละเอียดการทดสอบ ดังนี้

1. การทดสอบการไหลแยกตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Draindown) การทดลองเพื่อหาการแยกสารยึดเกาะออกจากส่วนผสมของแอสฟัลต์เนื่องจากแรงโน้มถ่วง ตามมาตรฐาน EN 12697-18:2017 การทดสอบการไหลแยกตัวจะดำเนินการโดยการเตรียมส่วนผสมที่ไม่บิ้อัดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสในบีกเกอร์ขนาด 800 มล. จากนั้น จึงเก็บไว้ในที่แห้งเกินไปที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ค่าการระบายออกสามารถกำหนดได้โดยการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (ควรมีน้อยกว่า 0.3% สำหรับสารผสมพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต)

2. การทดสอบปริมาณสูญเสียจากการขัดสี (Cantabro abrasion loss) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D7064 เพื่อระบุความต้านทานการขัดสีของส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต ตัวอย่างถูกวางลงในเครื่องทดสอบการเสียดสี (Los Angeles abrasion testing โดยไม่มีลูกเหล็ก) จากนั้นทำการทดสอบด้วยการหมุนรอบ 300 รอบ การสูญเสียอนุภาคสามารถกำหนดได้ดังนี้

3. การทดสอบเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล (Stability and flow) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 1559 เป็นการทดสอบตัวอย่างที่ด้านความสูงของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต โดยตัวอย่างจะถูกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงนำมาทดสอบทันที เสถียรภาพ คือกำลังของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่รับแรงกดได้ ก่อนที่ด้านที่ถูกบดอัดด้วยค้อนมาร์แชล เกิดการวิบัติ ส่วนการไหล คือ ระยะเวลาการยุบตัว

สูงสุดก่อนที่ตัวอย่างจะวิบัติ ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะต้องออกแบบให้มีกำลังมากพอในการรับน้ำหนักการจราจรได้ แต่ควรคำนึงไว้ว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีเสถียรภาพมากเกินไป อาจทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแข็ง และขาดความยืดหยุ่น ซึ่งอาจทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตเสียหายได้ง่าย (กอบชัย เกิดจันทร์ตรง, 2557)

4. การทดสอบหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength index) อ้างอิงตามวิธีทดสอบของกรมทางหลวง ทล.-ท. 413/2554 เป็นการทดสอบเพื่อหาลำดับด้านทานการหลุดลอกของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างที่แช่ในสารละลายเกลือแกง และไม่แช่ในสารละลายเกลือแกง จากนั้น นำตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มไปทดสอบเสถียรภาพ และนำค่าเสถียรภาพของตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มมาเปรียบเทียบกัน

นอกจากนี้ มาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท มทช.237-2563 ได้กำหนดขอบเขตสมบัติพื้นฐานของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตไว้แสดงดังตารางที่ 3.6 เมื่อพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบไว้ไม่เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท มทช.237-2563 ให้ทำการเปลี่ยนสัดส่วนของมวลรวมและทำการทดสอบใหม่ทั้งหมด

ตารางที่ 3.6 ข้อกำหนดในการออกแบบพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

คุณลักษณะ	Wearing Course ขนาด 12.5 mm.
Blows	50
Cantabro Abrasion Test	
Dry Sample Abrasion Loss (%)	<20
Wet Sample Abrasion Loss (%)	<40
Asphalt Draindown test (% by weight of mixture)	<0.3
Stability	
(N)	>3,558.58
(lb)	>800
Flown 0.01 in	8-16
Percent Air Voids (%)	20±2
Percent Strength Index (%)	>80

หลังจากทราบสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์คอนกรีตแล้ว พิจารณาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากับร้อยละ 20 เพื่อนำปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์นี้ไปใช้เตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อใช้ทดสอบสมรรถนะทางวิศวกรรม

3.4 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering performance)

3.4.1 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength)

- มาตรฐาน ASTM D 6931
- อุณหภูมิทดสอบคือ 25, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส
- กัดตัวอย่างด้วยอัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที
- ทดสอบแบบสถิต
- บันทึกหน่วยแรงสูงสุด
- ทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 อุณหภูมิ, 1 ชนิดและปริมาณเนื้อยางของตัวอย่างทดสอบ

3.4.2 การหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus)

- มาตรฐาน ASTM D 4123-82 และ AASHTO TP31-94
- อุณหภูมิทดสอบ 25 องศาเซลเซียส
- ให้หน่วยแรงกระทำเท่ากับร้อยละ 15 ของหน่วยแรงดึงทางอ้อมสูงสุดที่ 25 องศาเซลเซียส
- ทดสอบแบบพลวัตที่ความถี่ 1 เฮิรต จำนวน 200 รอบ
- วัดการยุบตัวในแนวตั้งและแนวนอน
- ทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิดและปริมาณเนื้อยางของตัวอย่างทดสอบ

3.4.3 การทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile fatigue)

- มาตรฐาน BS EN12697-24
- อุณหภูมิทดสอบ 25 องศาเซลเซียส
- ทดสอบแบบพลวัตที่ความถี่ 1 เฮิรต
- หน่วยแรงกระทำ 250, 300 และ 350 กิโลพาสคาล
- วัดการยุบตัวในแนวตั้ง
- ทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 หน่วยแรงกระทำ, 1 ชนิดและปริมาณเนื้อยางของตัวอย่างทดสอบ

3.4.4 การหาค่าการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต (Permanent deformation)

- มาตรฐาน AS 2891.12.1
- อุณหภูมิการทดสอบ 50 องศาเซลเซียส
- ทดสอบแบบพลวัตที่ความถี่ 0.5 เฮิรต
- หน่วยแรงเท่ากับ 200 กิโลพาสคาล
- วัดการยุบตัวในแนวตั้ง
- ทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิดและปริมาณเนื้อยางของตัวอย่างทดสอบ

3.4.5 การทดสอบการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีต (Rutting resistance)

- มาตรฐาน AASHTO T 324
- ทดสอบในน้ำที่อุณหภูมิทดสอบ 50 องศาเซลเซียส
- ทดสอบแบบพลวัตที่ความเร็วล้อเท่ากับ 26 เมตรต่อวินาที
- ทดสอบทุก ๆ 1,000 เพื่อบันทึกค่าการยุบตัวและทดสอบแรงเสียดทานของผิวตัวอย่าง
- ทดสอบจำนวน 2 ตัวอย่างต่อ 1 ชนิดและปริมาณเนื้อยางของตัวอย่างทดสอบ
- การทดสอบหาค่าแรงเสียดทานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Skid resistance by British pendulum)
- มาตรฐาน ASTM E303

จากการสรุปตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแต่ละการทดสอบ สามารถสรุปจำนวนตัวอย่างการทดสอบทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 สรุปการทดสอบและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบ	แอสฟัลต์ซีเมนต์	มวลรวม	ปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียด (%ของน้ำหนัก)	อุณหภูมิ (°C)	ระดับหน่วยแรงกระทำ (กิโลปาสคาล)	จำนวนตัวอย่างทดสอบต่อหนึ่งอัตราส่วนผสม (ตัวอย่าง)	รวมจำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด (ตัวอย่าง)
1. การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์	AC60/70, PMA	-	-	-	-	1	2
2. การทดสอบความทนทานแอสฟัลต์ซีเมนต์	AC60/70, PMA	-	-	-	-	1	2
3. ค่าเสถียรภาพและการยุบตัว	AC60/70, PMA	หินปูน	0, 5, 10, 15, 20, 25	-	-	3	21
4. ดัชนีความแข็งแรง	AC60/70, PMA	หินปูน	0, 5, 10, 15, 20, 25	-	-	3	21
5. ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม	AC60/70, PMA	หินปูน	0, 5, 10, 15, 20, 25	25, 40, 50, 60	-	3	84
6. โมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม	AC60/70, PMA	หินปูน	0, 5, 10, 15, 20, 25	25	-	3	21
7. ความล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม	AC60/70, PMA	หินปูน	0, 5, 10, 15, 20, 25	25	150, 200, 250	3	63
8. การคืบพลวัต	AC60/70, PMA	หินปูน	0, 5, 10, 15, 20, 25	40	-	3	21
9. การเกิดร่องล้อและความต้านทานการลื่นไถล	AC60/70, PMA	หินปูน	0, 5, 10, 15, 20, 25	50	-	1	7

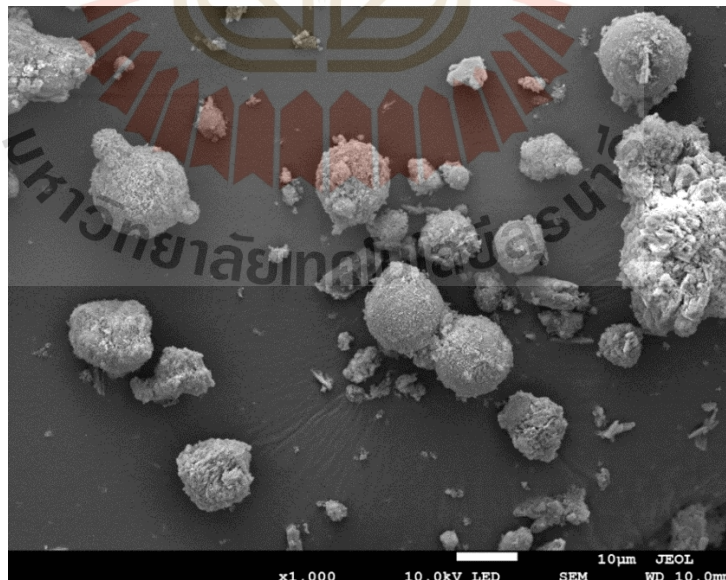
บทที่ 4

ผลการวิจัย

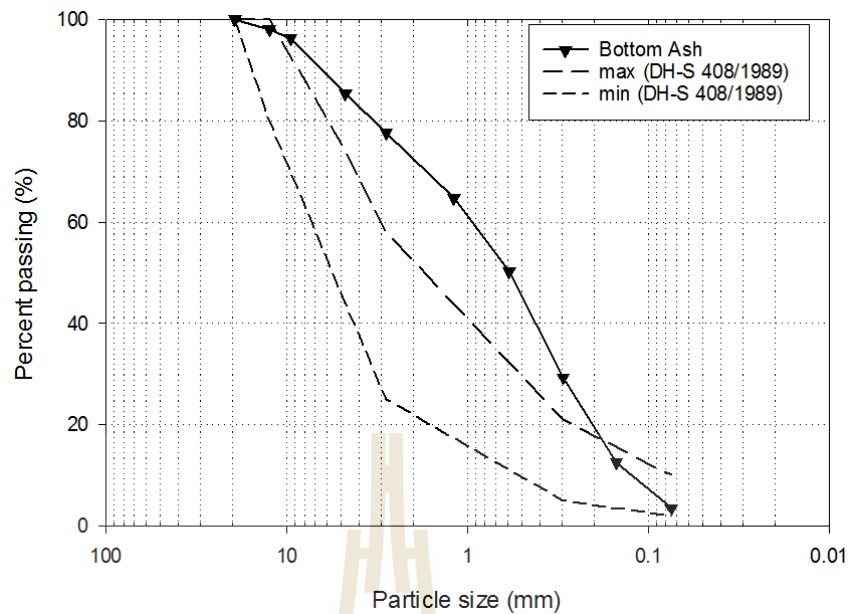
4.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. ถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ภาพถ่ายกำลังขยาย 1,000 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของถ่านหินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) แสดงดังตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของถ่านหินที่มีความขรุขระและมีรูพรุนสูง กราฟการกระจายขนาดคละของถ่านหินแสดงดัง ตารางที่ 4.2 ซึ่งให้เห็นว่า ถ่านหินมีปริมาณส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) มากกว่าร้อยละ 50 และมีการกระจายขนาดคละอยู่นอกขอบเขตของมาตรฐานมวลรวมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต (ทล.-ม. 408/2532) จึงไม่สามารถนำถ่านหินมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดในพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตได้โดยตรง นอกจากนี้ เมื่อผสมถ่านหินกับน้ำจะเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) (Luo et al., 2017) ที่สามารถยึดเกาะกับวัสดุที่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบได้ดี



รูปที่ 4.1 ภาพภาพขยายอนุภาคของถ่านหิน 1,000 เท่า



รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดคละของเถ้าหนัก



รูปที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าหนักเมื่อผสมน้ำ

2. มวลรวม

วัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัยคือ หินปูน ได้จากโรงโม่หินบริษัทศิลาภูพระลานจำกัด ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสระบุรี ดังรูปที่ 4.4 แสดงการจัดขนาดคละของมวลรวมให้อยู่ภายในขอบเขตบนและล่างตามมาตรฐานที่ มทข.237-2563 มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท สำหรับชั้นผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต (Wearing course)

3. แอสฟัลต์ซีเมนต์

แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมสำหรับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตคือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นรุ่นเพเนตรชันเกรด 60 ถึง 70 (AC60/70) จากบริษัททีปโก้แอสฟัลต์จำกัด จังหวัดนครราชสีมา มีสมบัติพื้นฐานตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบท (มทช.237-2563) ดังตารางที่ 3.4 และแอสฟัลต์ซีเมนต์ โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Polymer modified asphalt cement, PMA) ตามข้อกำหนดมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช.237-2563 และสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงชนบท มอก.2156 “Specification for polymer modified asphalt cement for porous asphalt concrete” ดังตารางที่ 3.5

4.2 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. สมบัติของมวลรวมหยาบ

สมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบที่ใช้ในงานวิจัยเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช.237-2563 ดังตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า มวลรวมหยาบมีสมบัติพื้นฐานผ่านตามมาตรฐานที่กรมทางหลวงระบุไว้ทั้งหมด

ตารางที่ 4.1 สมบัติพื้นฐานของมวลรวมหยาบ

Properties		Limestone	มทช.237-2563
Los Angeles abrasion value, LA (%)		28.7	30% max
Soundness (%)		1.96	5% max
Coating and stripping		100	100%
Flakiness index (%)	Bin 2	19.9	25% max
	Bin 3	22.4	
	Bin 4	23.6	
Elongation index (%)	Bin 2	20.5	25% max
	Bin 3	22.0	
	Bin 4	24.9	
Specific gravity	Bin 2	2.690	-
	Bin 3	2.703	
	Bin 4	2.709	
Asphalt absorption (%)		0.24	2% max

2. สมบัติของมวลรวมละเอียด

สมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัยเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทที่ มทช.237-2563 ดังตารางที่ 4.2 พบว่า สมบัติพื้นฐานของหินปูน มีค่าผ่านตามมาตรฐานดังกล่าว ขณะที่ สมบัติความคงทน (Soundness) ของเถ้าหนัก (ร้อยละ 24.3) ไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่ระบุไว้ (ห้ามเกินกว่าร้อยละ 5) แต่สามารถนำเถ้าหนักมาใช้ได้ เนื่องจากเถ้าใช้แทนที่ในมวลรวมละเอียดธรรมชาติที่มีค่าผ่านมาตรฐานกำหนด

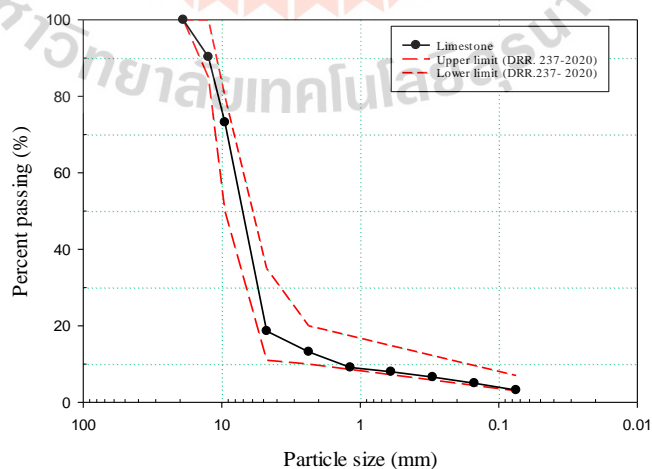
ตารางที่ 4.2 สมบัติพื้นฐานของมวลรวมละเอียด

Properties	Limestone	Bottom ash	มทช.237-2563
Soundness (%)	4.65	24.3	5% max
Sand equivalent (%)	73.6	53.1	60% min
Specific gravity	2.64	2.53	-

4.3 การออกแบบและทดสอบส่วนผสมออร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

1. การออกแบบขนาดผลของออร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

การการออกแบบขนาดผลของออร์สแอสฟัลต์คอนกรีต ดำเนินการตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท มทช.237-2563 โดยผลการออกแบบขนาดผลของมวลรวมที่ใช้เป็นส่วนผสมของออร์สแอสฟัลต์คอนกรีต แสดงดังรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า ขนาดผลของมวลรวมเป็นไปตามที่มาตรฐาน มทช.237-2563 ระบุไว้



รูปที่ 4.4 ขนาดผลของมวลรวมสำหรับออร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต ต้องคำนึงถึงสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงกลของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต โดยสมบัติทางกายภาพประกอบด้วย ความหนาแน่น (Density) ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม (Void in mineral aggregate, VMA) ช่องว่างอากาศ (Air void) และช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Void filled with bitumen, VFB) ซึ่งคำนวณได้จากการนำก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตไปชั่งน้ำหนักในอากาศ (Weight in air) น้ำหนักในน้ำ (Weight in water) และน้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) โดยค่าช่องว่างอากาศของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้ ถูกกำหนดไว้ที่ร้อยละ 20 ช่องว่างอากาศของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาณที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์ทั่วไป จึงจำเป็นต้องทดสอบสมบัติทางกายภาพเกี่ยวกับการไหลแยกตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ การทดสอบสมบัติเชิงกลของตัวอย่างประกอบด้วย ปริมาณสูญเสียจากการขัดสี (Cantabro abrasion loss) ค่าเสถียรภาพ (Stability) ค่าการไหล (Flow) และค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength index) ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตใช้เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนร้อยละ 0 ถึง 25 แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมบัติของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนร้อยละ 0 ถึง 25

Properties	Bottom ash replacement (%)						
	AC60/70						PMA
	0	5	10	15	20	25	0
Asphalt cement (%)	4.4	4.6	4.8	4.9	5.0	5.2	4.5
Air voids (%)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Density (g/ml)	2.017	2.020	2.024	2.031	2.031	2.030	2.041
VMA (%)	26.5	26.7	27.0	27.1	27.3	27.4	27.0
VFB (%)	25.6	25.9	26.3	26.7	27.1	26.8	28.5

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์และปริมาณเถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน แสดงดังตารางที่ 4.3 เมื่อปริมาณเถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนเพิ่มขึ้น ส่วนผสมจะต้องใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ความถ่วงจำเพาะมวลรวมละเอียดของหินปูน (2.64) ที่มากกว่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าหนัก (2.53) จึงต้องแทนที่ด้วยเถ้าหนักในปริมาตรที่มากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวของมวลรวมละเอียดเพิ่มมากขึ้น จึงต้องใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้น (Luo et al., 2017) และเมื่อพิจารณามาตรฐานของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 414/2542) และกรมทางหลวง

ชนบท (มทช.237-2563) ที่ระบุว่า ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 4 ถึง 6 จะเห็นว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน มีปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น (Density) และปริมาณเถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดของแอสฟัลต์คอนกรีต แสดงดังตารางที่ 4.3 เมื่อใช้เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจาก พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาณช่องว่างที่สูง เมื่อใช้เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียด เถ้าหนักสามารถดูดซับแอสฟัลต์ซีเมนต์ปริมาณที่สูงและเพิ่มการยึดเกาะระหว่างมวลรวมทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ (VFB) และปริมาณเถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ แสดงดังตารางที่ 4.3 เมื่อใช้เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ปริมาณช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

1. ปริมาณสูญเสียจากการขัดสี (Cantabro abrasion loss)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณสูญเสียจากการขัดสีและปริมาณเถ้าหนักที่แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตแบบไม่แช่น้ำ และแบบแช่น้ำ แสดงดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ พิจารณาผลการทดสอบแบบไม่แช่น้ำของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 พบว่า เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดหินปูนด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบไม่แช่น้ำเท่ากับร้อยละ 8.63 8.02 7.63 6.88 6.40 และ 7.54 ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA โดยใช้หินเป็นมวลรวม พบว่า มีปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบไม่แช่น้ำเท่ากับร้อยละ 6.01

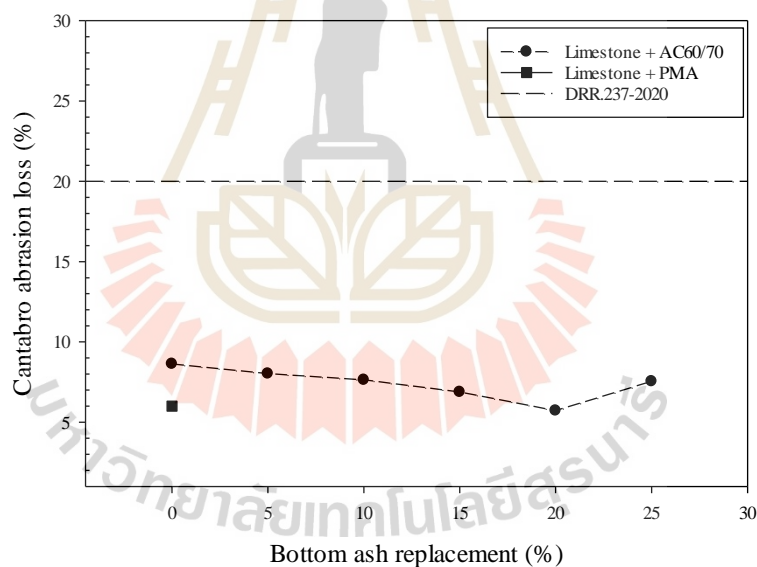
พิจารณาผลการทดสอบแบบแช่น้ำของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 พบว่า เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดหินปูนด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบแช่น้ำเท่ากับร้อยละ 22.50 19.80 17.50 16.30 14.60 และ 15.90 ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA โดยใช้หินเป็นมวลรวม พบว่า มีปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบแช่น้ำเท่ากับร้อยละ 12.30

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำกับปริมาณเถ้าหนัก ที่แทนที่มวลรวมละเอียด พบว่า ปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำที่มีค่าลดลงที่การแทนที่ด้วยเถ้าหนักร้อยละ 20 แต่เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักปริมาณมากกว่าร้อยละ 20 มีปริมาณสูญเสียจากการขัดสีเพิ่มขึ้น

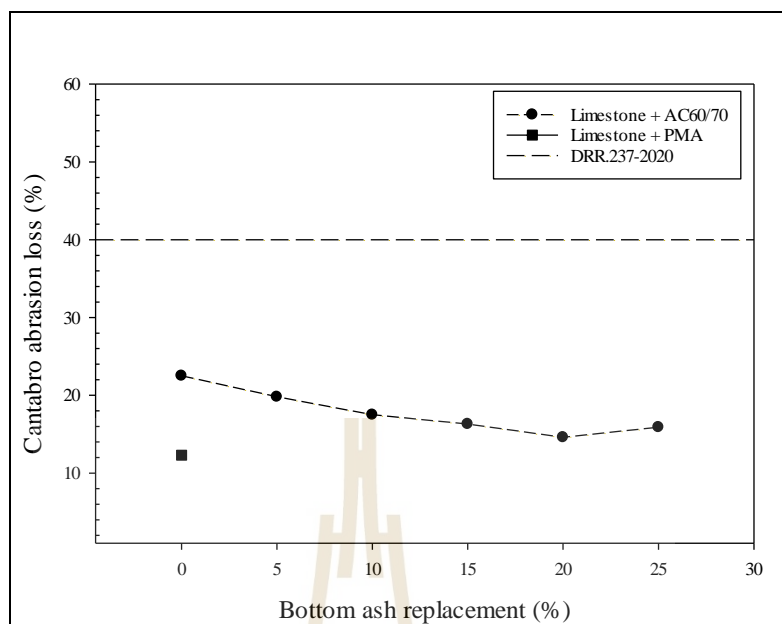
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำระหว่างพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน กับพอร์สแอสฟัลต์

คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูน เป็นมวลรวม พบว่า ปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน 20 มีปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำต่ำสุดนั้นมีปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำสูงกว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบไม่แช่น้ำและแบบแช่น้ำของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนและพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูน เป็นมวลรวม กับมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทที่ มทข.237-2563 ที่ระบุไว้ว่า ปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบไม่แช่น้ำของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตควรมีค่าไม่เกินร้อยละ 20 และปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบแช่น้ำของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตควรมีค่าไม่เกินร้อยละ 40 พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดสามารถลดปริมาณสูญเสียจากการขัดสีของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมได้ โดยมีค่าที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 20



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบไม่แช่น้ำและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดหินปูน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณสูญเสียจากการขัดสีแบบแช่น้ำและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดหินปูน

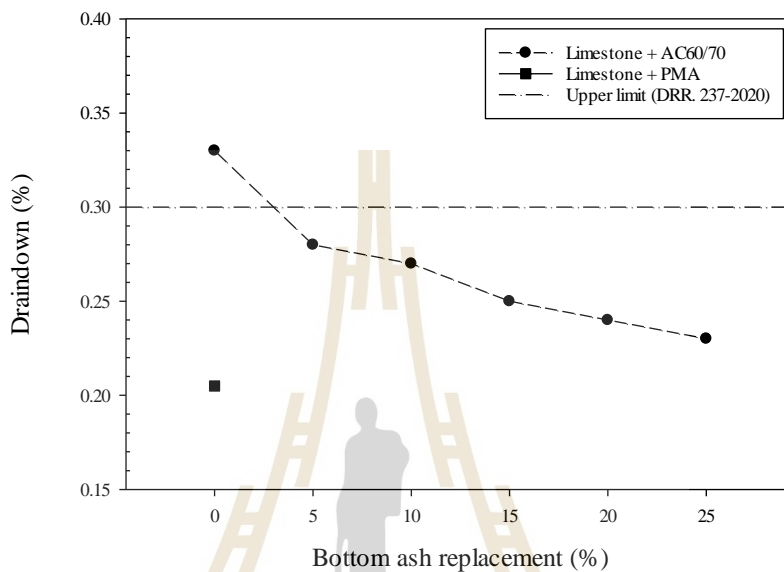
2. การไหลแยกตัว (Draindown)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลแยกตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์และปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต แสดงดังรูปที่ 4.7 พอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้ AC60/70 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีค่าการไหลแยกตัวเท่ากับร้อยละ 0.33 0.28 0.27 0.25 0.24 และ 0.23 ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA พบว่า ส่วนผสมใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีค่าการไหลแยกตัวเท่ากับร้อยละ 0.210

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการไหลแยกตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียด พบว่า การไหลแยกตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีค่าลดลงต่ำสุดที่การแทนที่ด้วยเถ้าหนักร้อยละ 25 ซึ่งมีค่าการไหลแยกตัวต่ำสุดนั้นมีค่าการไหลที่สูงกว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวมร้อยละ 8.69

เมื่อเปรียบเทียบการไหลแยกตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน และพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวม กับมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทที่ มทข.237-2563 ที่ระบุไว้ว่า การไหลแยกตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตควรมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.3 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 เมื่อมวลรวมละเอียดหินปูนถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักปริมาณร้อยละ 0 (ไม่มีการแทนที่ในมวลรวมละเอียด)

นี้ไม่ผ่านค่ามาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท ขณะที่ พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 เมื่อมวลรวมละเอียดหินปูนถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักปริมาณร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 และพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวมมีค่าการไหลแยกตัวเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการไหลแยกตัวและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

3. การทดสอบเสถียรภาพ (Stability)

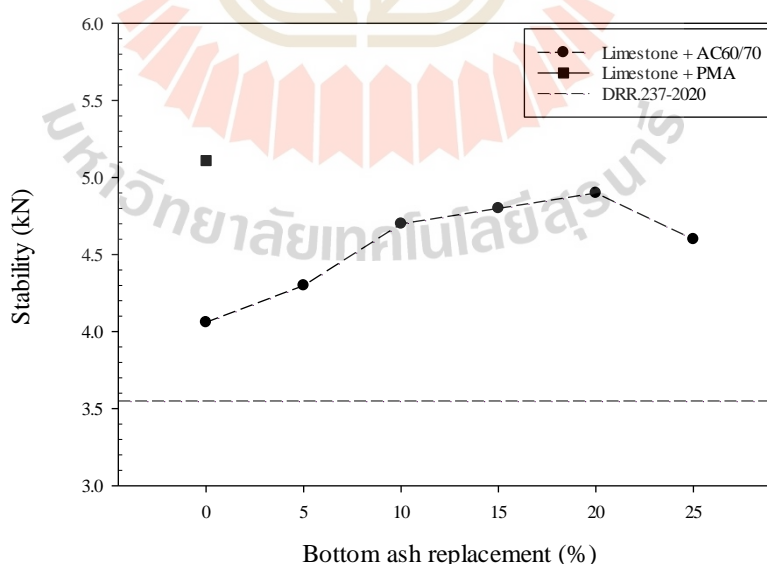
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต แสดงดังรูปที่ 4.8 พอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 พบว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีค่าเสถียรภาพเท่ากับ 4.06 4.30 4.70 4.80 4.90 และ 4.60 กิโลนิวตันตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม มีค่าเสถียรภาพเท่ากับ 5.11 กิโลนิวตัน

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียด พบว่า ค่าเสถียรภาพของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีค่าสูงสุดที่การแทนที่ด้วยเถ้าหนักร้อยละ 20 แต่เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักปริมาณมากกว่าร้อยละ 20 ค่าเสถียรภาพจะมีค่าลดลง การเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าเสถียรภาพเมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักมากขึ้น เนื่องจาก ผิวที่หยาบและขรุขระของ

ถ้าหนักที่ประกอบด้วยโมเลกุลของสารประกอบที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีในน้ำมัน (Lipophilic) เมื่อผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์จะเกิดแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคของถ้าหนักและแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มหนาเคลือบผิวของมวลรวม (แอสฟัลต์ประสิทธิผล) ส่งผลให้ ส่วนผสมยึดเกาะกันดีและมีค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยถ้าหนักในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้เกิดแผ่นฟิล์มแอสฟัลต์ที่หนามากเกินไป ทำให้น้ำหนักจากแรงกระทำภายนอกกระจายไปที่มวลรวมลดลง ทำให้พอร์สแอสฟัลต์มีค่าเสถียรภาพลดลงเช่นเดียวกับแอสฟัลต์คอนกรีต

เมื่อเปรียบเทียบค่าเสถียรภาพของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่ถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนและค่าเสถียรภาพของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวม พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่ถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนร้อยละ 20 ซึ่งมีค่าเสถียรภาพสูงที่สุดนั้น มีค่าเสถียรต่ำกว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวมร้อยละ 4.10

เมื่อเปรียบเทียบค่าเสถียรภาพของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่ถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนและค่าเสถียรภาพพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวม กับมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทที่ มทข.237-2563 ที่ระบุไว้ว่า ค่าเสถียรภาพของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตควรมีค่าน้อยกว่า 3.55 กิโลนิวตัน พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าเสถียรภาพเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท



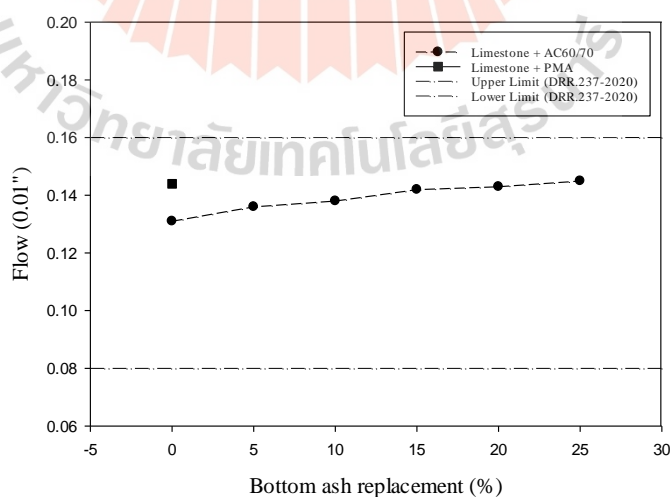
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพและปริมาณถ้าหนัก ที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

4. การทดสอบการไหล (Flow)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต แสดงดังรูปที่ 4.9 พอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้ AC60/70 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีค่าการไหลเท่ากับ 13.1 13.6 13.8 14.2 14.3 และ 14.5 (0.01 นิ้ว) ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีค่าการไหลเท่ากับ 14.4 (0.01 นิ้ว)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียด พบว่า การไหลของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีค่าสูงสุดที่การแทนที่ด้วยเถ้าหนักร้อยละ 25 และเมื่อเปรียบเทียบค่าการไหลของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนและค่าการไหลของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวม พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนร้อยละ 25 ซึ่งมีค่าเสถียรภาพสูงสุดนั้น มีการไหลมากกว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวมร้อยละ 0.69

เมื่อเปรียบเทียบค่าการไหลของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนและค่าเสถียรภาพพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวม กับมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบทที่ มทข.237-2563 ที่ระบุไว้ว่า ค่าการไหลของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต ควรมีค่าอยู่ในช่วง 8 ถึง 16 (0.01 นิ้ว) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตทุกส่วนผสมมีค่าการไหลเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท



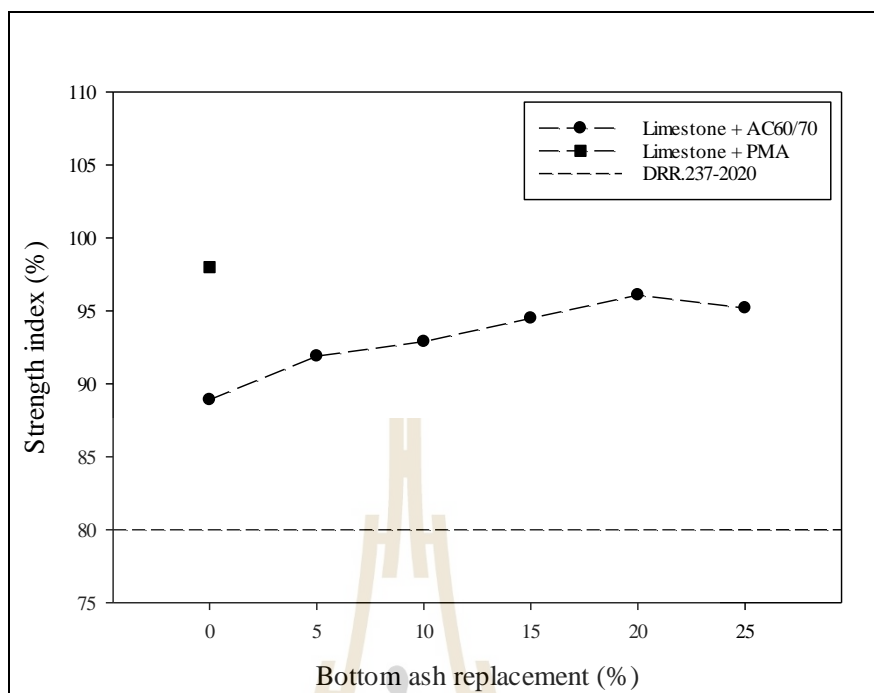
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

5. การทดสอบดัชนีความแข็งแรง (Strength index)

ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความแข็งแรงและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต แสดงดังรูปที่ 4.10 พอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีค่าดัชนีความแข็งแรงเท่ากับร้อยละ 88.9 91.9 92.9 94.5 96.1 และ 95.2 ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม มีค่าดัชนีความแข็งแรงเท่ากับร้อยละ 97.5

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความแข็งแรงของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียด พบว่า ดัชนีความแข็งแรงของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่การแทนที่ด้วยเถ้าหนักร้อยละ 20 แต่เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักปริมาณมากกว่าร้อยละ 20 ดัชนีความแข็งแรงจะมีค่าลดลง เนื่องจาก เถ้าหนักที่เข้าไปแทนที่ในมวลรวมละเอียดที่ปริมาณที่เหมาะสมนั้น จะช่วยดูดซับแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้พอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้ AC60/70 มีสมบัติและความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงที่สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบดัชนีความแข็งแรงของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนและดัชนีความแข็งแรงของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวม พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนร้อยละ 20 ซึ่งมีดัชนีกำลังสูงสุด นั้น มีดัชนีความแข็งแรงน้อยกว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวมร้อยละ 1.93

เมื่อเปรียบเทียบดัชนีความแข็งแรงของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนและดัชนีความแข็งแรงของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวม กับมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท มทข.237-2563 ที่ระบุไว้ว่า ดัชนีความแข็งแรงของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตควรมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 พบว่า ทุกส่วนผสมมีค่าดัชนีความแข็งแรงเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความแข็งแรงและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

จากผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต และผลการทดสอบเสถียรภาพและผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรงของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต จะเห็นว่า การใช้เถ้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงเสถียรภาพและความแข็งแรงของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดในพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ต้องใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น การใช้เถ้าหนักในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เสถียรภาพและความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าลดลง นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติและสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่แทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดหีนปูนร้อยละ 20 จะเห็นว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหีนปูน จะมีสมบัติของส่วนผสมที่ต่ำกว่ากับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA เนื่องจาก สมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA สูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 จากตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 อย่างไรก็ตาม พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหีนปูน ซึ่งมีปริมาณที่เหมาะสมนั้นมีสมบัติของส่วนผสมใกล้เคียงกับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA และมีค่าผ่านค่ามาตรฐานที่กำหนด

4.4 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม

4.4.1 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength)

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงทางอ้อมและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต ภายใต้อุณหภูมิการทดสอบ 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.14 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิทดสอบ 25 องศาเซลเซียส สำหรับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีกำลังดึงทางอ้อมเท่ากับ 190 205 213 218 220 และ 211 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูน มีกำลังดึงทางอ้อมเท่ากับ 229 กิโลปาสกาล

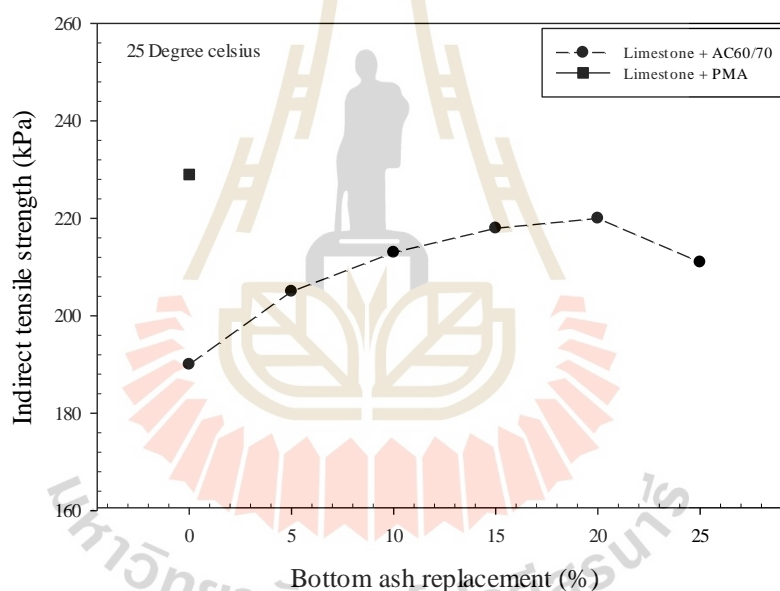
เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิทดสอบ 40 องศาเซลเซียส สำหรับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีค่ากำลังดึงทางอ้อมเท่ากับ 61 79 89 92 100 และ 89 กิโลปาสกาล ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูน มีค่ากำลังดึงทางอ้อมเท่ากับ 114 กิโลปาสกาล

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิทดสอบ 50 องศาเซลเซียส สำหรับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีค่ากำลังดึงทางอ้อมเท่ากับ 59 69 69 73 75 75 และ 72 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูน มีค่ากำลังดึงทางอ้อมเท่ากับ 95 กิโลปาสกาล

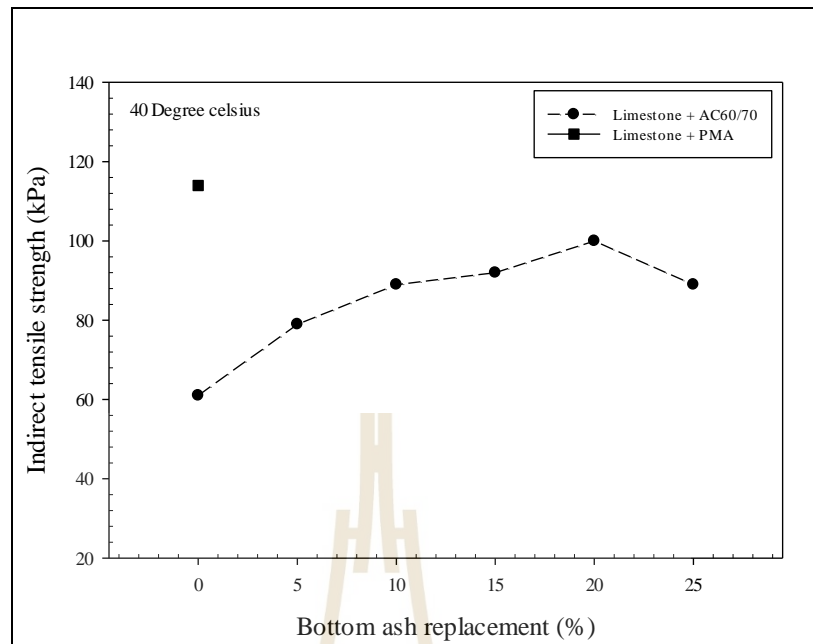
เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิทดสอบ 60 องศาเซลเซียส สำหรับพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้ AC60/70 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีค่ากำลังดึงทางอ้อมเท่ากับ 40 45 51 52 53 และ 48 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูน มีค่ากำลังดึงทางอ้อมเท่ากับ 61 กิโลปาสกาล ในทุกส่วนผสมเมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มขึ้นแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีกำลังดึงทางอ้อมที่ลดลง เนื่องจาก แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตมีความอ่อนตัวมากขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูงทำให้สามารถรับแรงดึงได้ลดลง

ในทุกอุณหภูมิทดสอบ กำลังดึงทางอ้อมของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่การแทนที่ด้วยเถ้าหนักในมวลรวมละเอียดร้อยละ 20 แต่เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักมากกว่าค่าดังกล่าว กำลังดึงทางอ้อมมีค่าลดลง

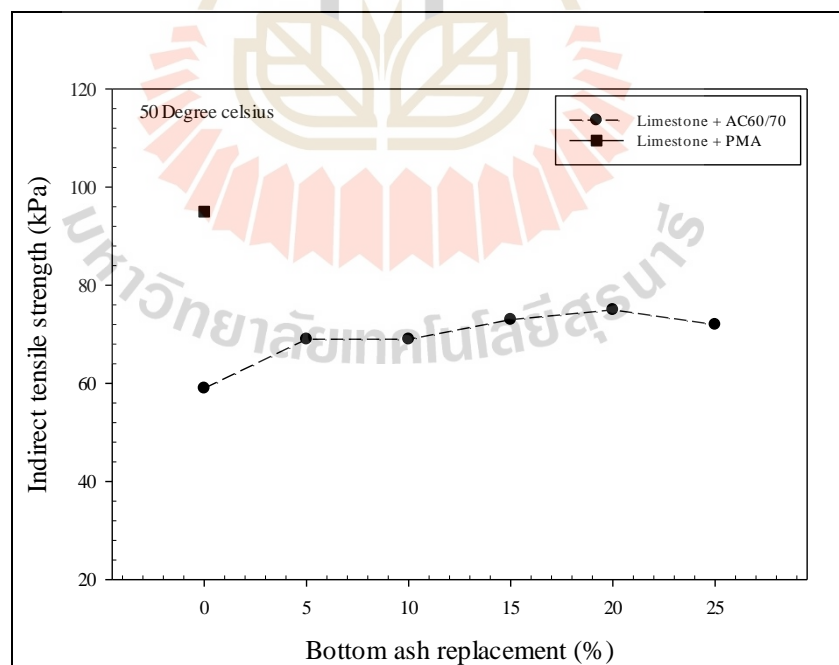
เมื่อเปรียบเทียบกำลังดึงทางอ้อมของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน กับกำลังดึงทางอ้อมของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูน เป็นมวลรวม พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 โดยมีหินปูนเป็นมวลรวม เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเ้าหนักร้อยละ 20 ซึ่งมีกำลังดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้นสูงสุด มีกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ร้อยละ 3.93 12.28 21.05 และ 18.46 ตามลำดับ จะเห็นว่า ในทุกอุณหภูมิการทดสอบของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนมีกำลังดึงทางอ้อมสูงสุดนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังดึงทางอ้อมของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA เนื่องจากมวลรวมละเอียดที่ถูกแทนที่ด้วยเ้าหนักนั้นสามารถดูดซับแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นให้มีปริมาณที่เหมาะสม ทำให้พอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้ AC 60/70 มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและกำลังดึงทางอ้อมที่สูงขึ้น



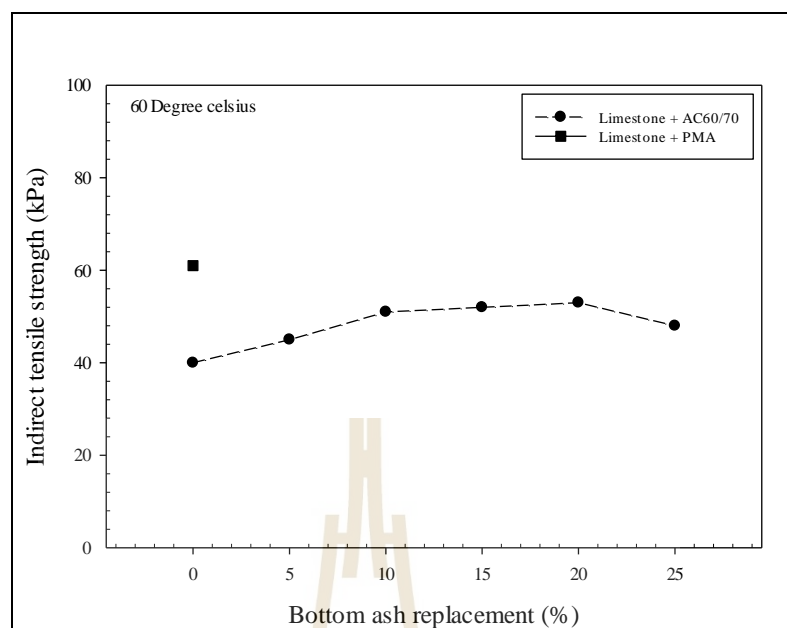
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และปริมาณเ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต



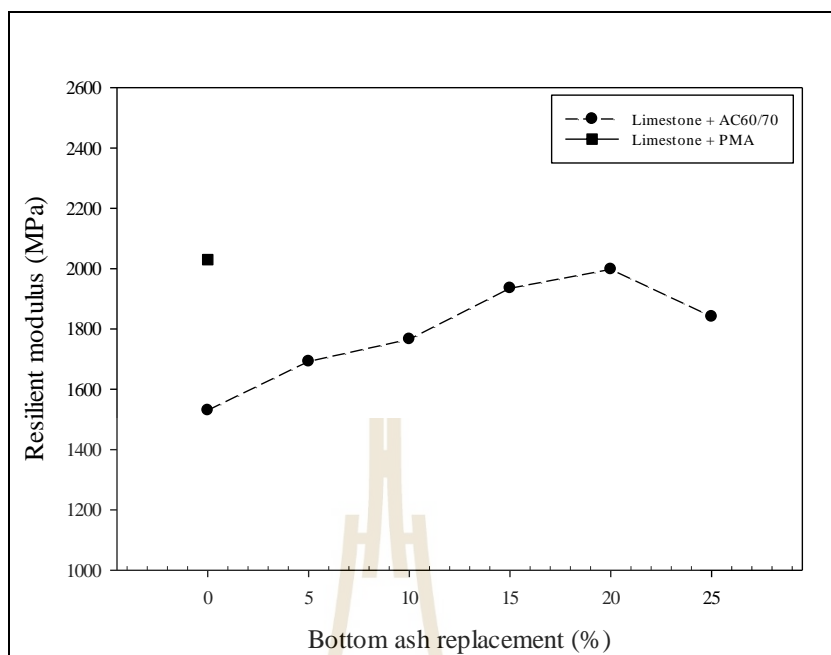
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.2 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus)

ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสคืนตัวและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต แสดงดังรูปที่ 4.15 เมื่อพิจารณาพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้ AC60/70 พบว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนัก 0 5 10 15 20 และ 25 มีค่าโมดูลัสคืนตัวเท่ากับ 1,530.1 1,693.0 1,776.6 1,935.7 1,998.0 และ 1,841.4 เมกะพาสคาล ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูน มีค่าโมดูลัสคืนตัวเท่ากับ 2030.0 เมกะพาสคาล

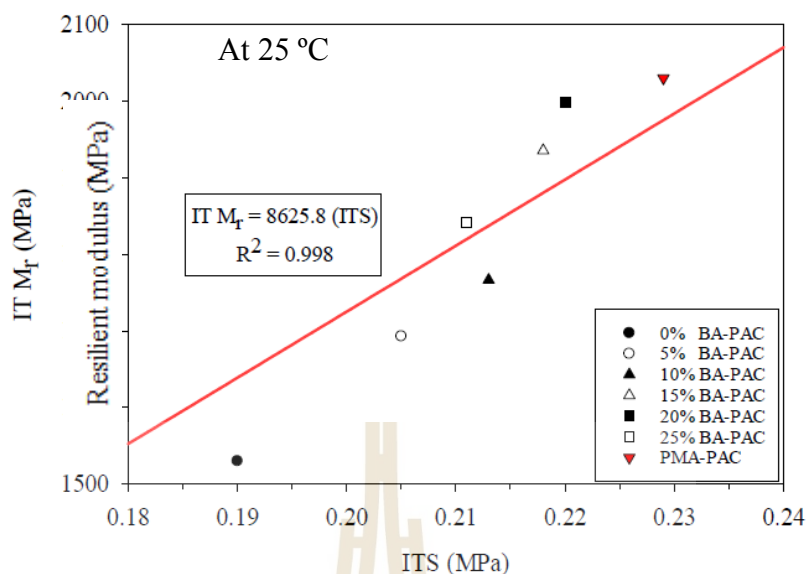
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสคืนตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียด พบว่า ค่าโมดูลัสคืนตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูน มีค่าสูงสุดที่การแทนที่ด้วยเถ้าหนักร้อยละ 20 และเมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักปริมาณมากกว่าร้อยละ 20 โมดูลัสคืนตัวจะลดลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคืนตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน กับค่าโมดูลัสคืนตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูน เป็นมวลรวม พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนร้อยละ 20 ซึ่งมีค่าโมดูลัสคืนตัวที่สูงที่สุด มีค่าโมดูลัสคืนตัวต่ำกว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวมเพียงร้อยละ 2.01



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสคืนตัวของโพรัสแอสฟัลต์คอนกรีตและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของโพรัสแอสฟัลต์คอนกรีต

จากผลการทดสอบกำลังดึงทางอ้อมและโมดูลัสคืนตัวของโพรัสแอสฟัลต์คอนกรีต จะเห็นว่าการใช้เถ้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงกำลังดึงทางอ้อมและโมดูลัสคืนตัวของโพรัสแอสฟัลต์คอนกรีตให้สูงขึ้น โดยกำลังดึงทางอ้อมที่เพิ่มขึ้นมีค่าแปรผันตรงกับค่าโมดูลัสคืนตัวที่เพิ่มขึ้นหรือมีความสัมพันธ์เชิงเส้นเป็นเส้นตรงแสดงดังรูปที่ 4.16 จุดข้อมูลกำลังดึงทางอ้อมและโมดูลัสคืนตัวของโพรัสแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA สามารถนำมารวมไว้ในความสัมพันธ์ได้ กำลังดึงทางอ้อมที่ถูกปรับปรุงด้วยเถ้าหนักนั้นสัมพันธ์กับความต้านทานการเสียรูปช่วงพลาสติก ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ ($R^2 = 0.99$) ส่วนค่าโมดูลัสคืนตัวนั้นสามารถประมาณได้จากค่ากำลังดึงทางอ้อมที่สอดคล้องกัน



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงทางอ้อมและโมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกปรับปรุงด้วยเถ้าหนัก

4.4.3 การทดสอบความล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile fatigue)

ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวแนวตั้งและจำนวนรอบการทดสอบของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมเมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักร้อยละ 20 ภายใต้หน่วยแรงพลวัตเท่ากับ 150 200 และ 250 กิโลพาสคาล แสดงดังรูปที่ 4.17 ค่าการยุบตัวเริ่มต้น (ช่วง a ในรูปที่ 2.5) ของทั้ง 3 หน่วยแรงกระทำมีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ ช่วง service life มีค่าลดลงเมื่อหน่วยแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าอายุการล้าของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตลดลง เมื่อหน่วยแรงกระทำมีค่าเพิ่มมากขึ้น

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมภายใต้หน่วยแรงพลวัต 150 กิโลพาสคาล เมื่อพิจารณาพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนัก 0 5 10 15 20 และ 25 มีอายุการล้าเท่ากับ 100 120 140 150 170 และ 130 รอบการทดสอบ ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูน มีอายุการล้าเท่ากับ 180 รอบการทดสอบ

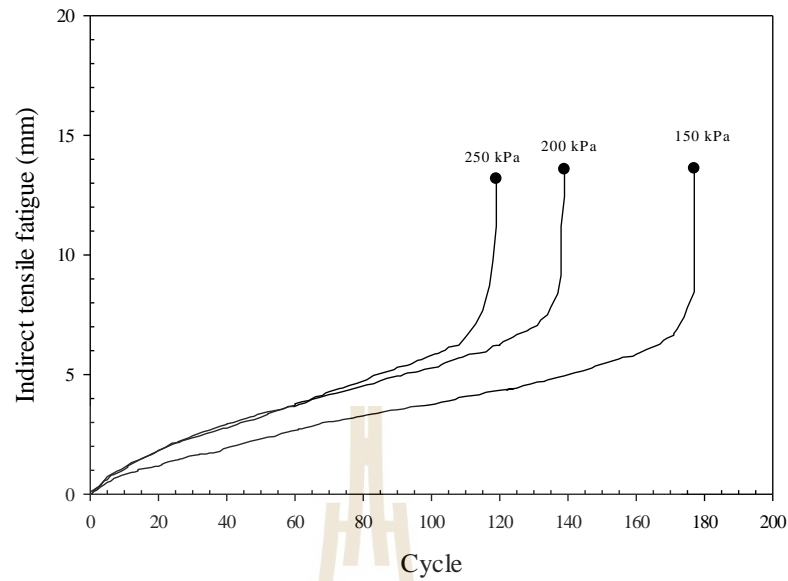
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูน เป็นมวลรวมภายใต้หน่วยแรงพลวัต 200 กิโลพาสคาล เมื่อพิจารณาพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 พบว่า พอร์ส

แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักปริมาณร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 อายุการล้ามีค่าเท่ากับ 95 100 120 140 150 170 และ 130 รอบการทดสอบ ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูน เป็นมวลรวม มีอายุการล้าเท่ากับ 130 รอบการทดสอบ

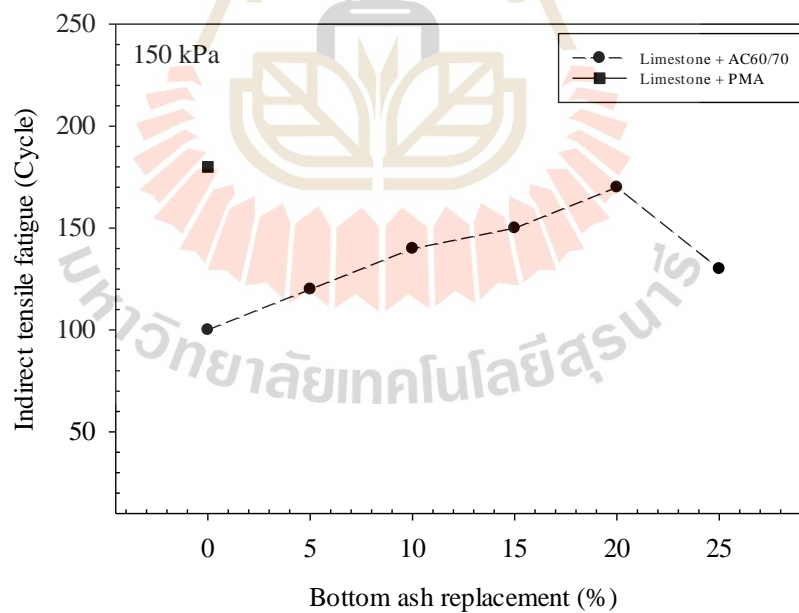
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูน เป็นมวลรวมภายใต้หน่วยแรงพลวัต 250 กิโลพาสคาล เมื่อพิจารณาพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักปริมาณร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 อายุการล้ามีค่าเท่ากับ 78 85 89 95 105 และ 97 รอบการทดสอบ ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูน เป็นมวลรวมมีอายุการล้าเท่ากับ 111 รอบการทดสอบ

ที่การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักค่าเดียวกันและหน่วยแรงทดสอบเดียวกัน อายุการล้าของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่การแทนที่ด้วยเถ้าหนักในมวลรวมละเอียดร้อยละ 20 แต่เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักมากกว่าค่าดังกล่าว อายุการล้ามีค่าลดลง

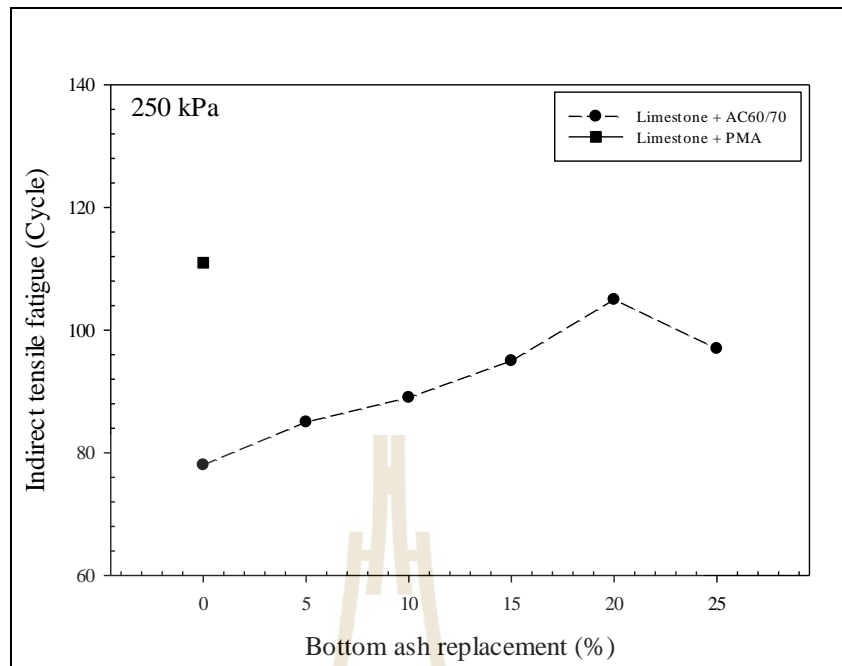
เมื่อเปรียบเทียบอายุการล้าของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนกับอายุการล้าของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวม พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 โดยมีหินปูนเป็นมวลรวม เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักร้อยละ 20 ซึ่งมีกำลังดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้นสูงสุด มีอายุการล้าที่หน่วยแรงทดสอบ 150 200 และ 250 กิโลพาสคาล ต่ำกว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ร้อยละ 5.56 7.69 และ 5.41 ตามลำดับ ในทุกหน่วยแรงทดสอบที่มีอายุการล้าสูงสุดนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA เนื่องจากมวลรวมละเอียดที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักนั้นสามารถดูดซับแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นและมีปริมาณที่เหมาะสม ทำให้พอร์สแอสฟัลต์มีความสามารถในการต้านทานต่อหน่วยแรงดึงที่ดี ทำให้มีอายุการล้าที่เพิ่มขึ้น



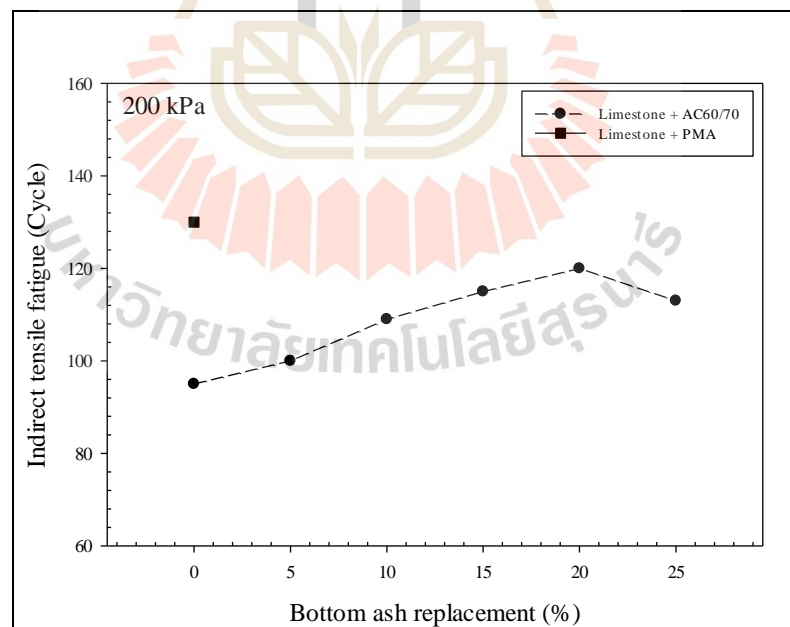
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวแนวดิ่งและจำนวนรอบการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมเมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักปริมาณร้อยละ 20



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าภายใต้หน่วยแรง 150 กิโลพาสคาล และปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต



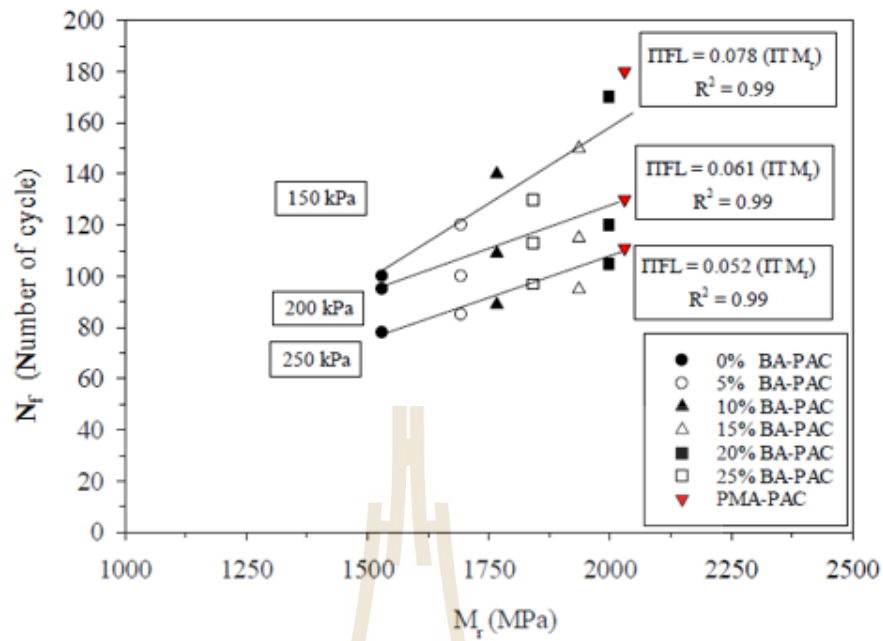
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าภายใต้หน่วยแรง 200 กิโลพาสคาล และปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต



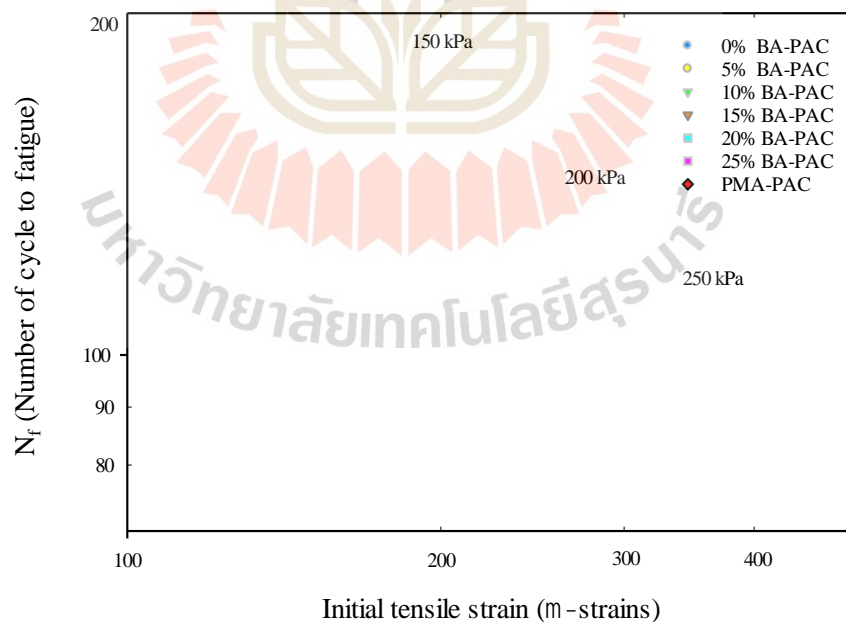
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าภายใต้หน่วยแรง 250 กิโลพาสคาล และปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

จากผลการทดสอบอายุการล้าและโมดูลัสคืบตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต จะเห็นว่า การใช้เถ้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงอายุการล้าและโมดูลัสคืบตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตให้สูงขึ้น โดยอายุการล้าที่เพิ่มขึ้นมีค่าแปรผันตรงกับค่าโมดูลัสคืบตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตให้สูงขึ้นหรือมีความสัมพันธ์เชิงเส้นเป็นเส้นตรงแสดงดังรูปที่ 4.21 ที่ความเค้นเท่ากับอายุการล้าที่ถูกปรับปรุงด้วยเถ้าหนักมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสคืบตัวที่ถูกปรับปรุงด้วยเถ้าหนักมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน การปรับปรุงที่ดีที่สุดที่การแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 20 อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดที่สูงกว่าค่าดังกล่าวจะทำให้การทดสอบอายุการล้าและโมดูลัสคืบตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ ที่เพิ่มขึ้น จุดข้อมูลอายุการล้าและโมดูลัสคืบตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA สามารถนำมารวมไว้ในความสัมพันธ์ได้

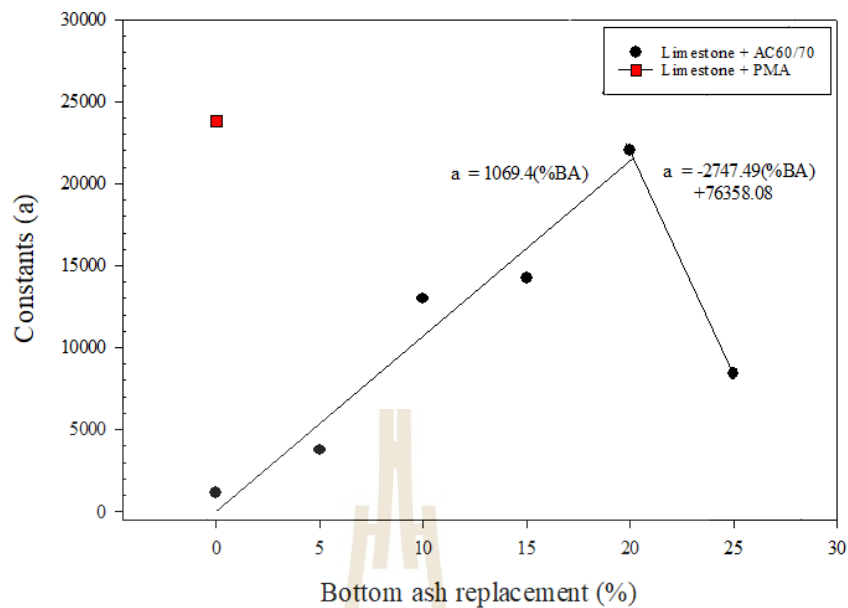
จากความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าและโมดูลัสคืบตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต จะเห็นว่า มีค่าความเครียดเริ่มต้นที่สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ Kennedy (1978) และ Mohammed (1993) ได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้ากับค่าโมดูลัสคืบตัวและค่าความเครียดเริ่มต้นของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC6070 และพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA แสดงดังรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้ากับค่าโมดูลัสคืบตัวและค่าความเครียดเริ่มต้น เมื่อได้ค่าความเครียดและค่าโมดูลัสคืบตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตจากผลการทดสอบจะสามารถหาอายุการล้าของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตได้ ดังสมการที่ (2.5) โดยค่าคง a และ b ในสมการนั้น แสดงดังรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 ตามลำดับ จากสมการความเครียดเริ่มต้น ที่ความเค้นเท่ากับอายุการล้าจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียด การปรับปรุงที่ดีที่สุดที่การแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมเท่ากับ ร้อยละ 20 อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดที่สูงกว่าค่าดังกล่าวจะทำให้การทดสอบอายุการล้าของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ และทุก ๆ ความเค้น อายุการล้าของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกปรับปรุงด้วยเถ้าหนักนั้นมีค่าที่ต่ำกว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA



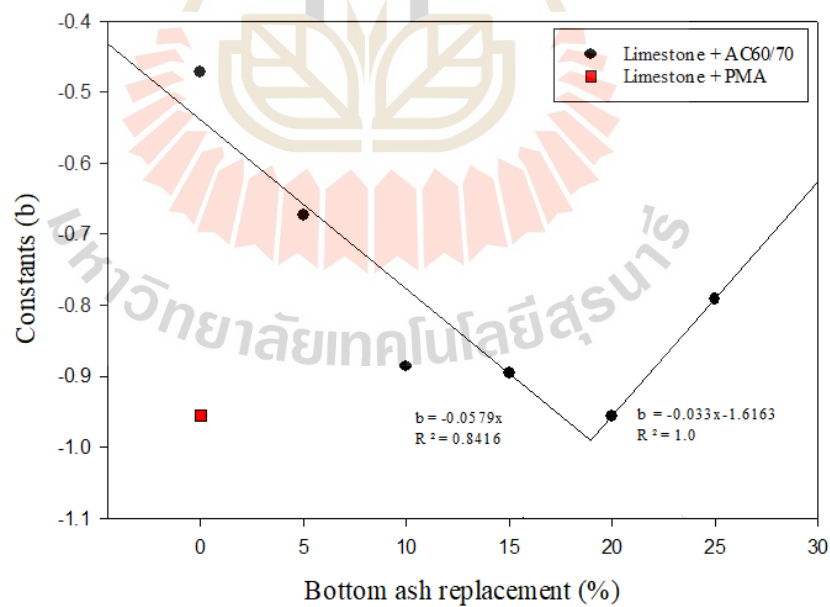
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าและโมดูลัสคั้นตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกปรับปรุงด้วยเถ้าหนัก



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการล้าและค่าความเครียดเริ่มต้นตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกปรับปรุงด้วยเถ้าหนัก



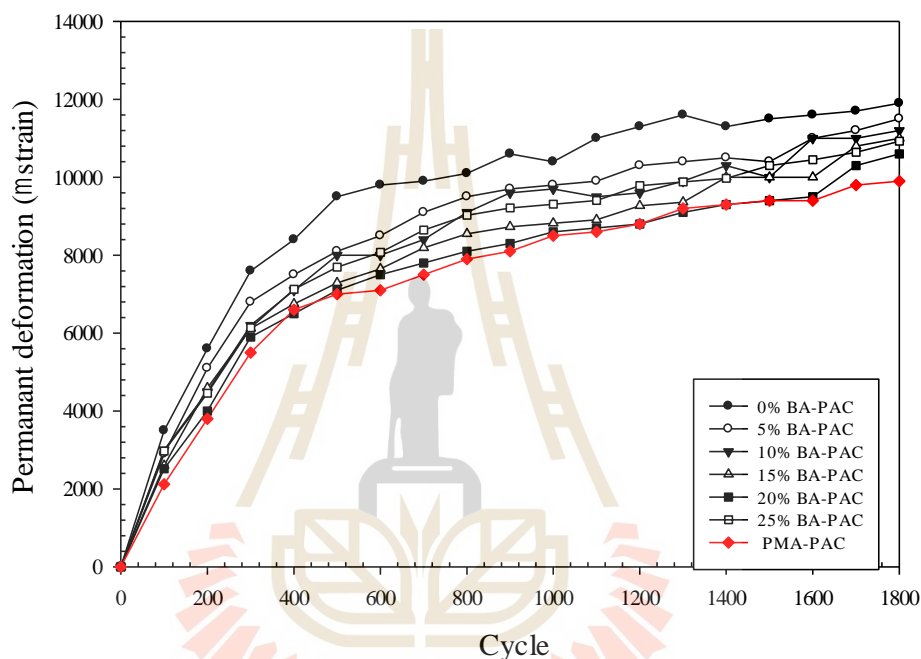
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (a) และปริมาณเถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (b) ของค่าความเครียดเริ่มต้นตัวและปริมาณเถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.4 การทดสอบการยุบตัวถาวร (Permanent deformation)

พฤติกรรมการเกิดการยุบตัวถาวรพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวถาวรและจำนวนรอบการทดสอบของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม แสดงรูปที่ 4.25 จะเห็นว่า การยุบตัวเกิดขึ้นอย่างมากในช่วงต้นของการทดสอบ (จำนวนรอบของการทดสอบต่ำกว่า 500 รอบ) เนื่องจากการลดลงของช่องว่างระหว่างมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีต จากนั้น การยุบตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยด้วยอัตราที่คงที่จนถึงสิ้นสุดการทดสอบที่ 1,800 รอบ



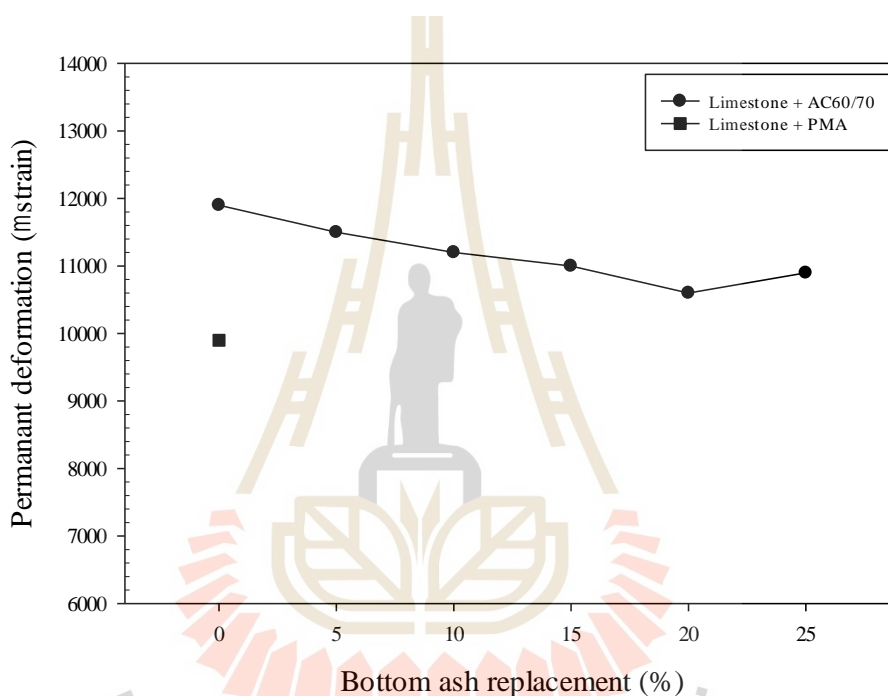
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวถาวรและจำนวนรอบการทดสอบของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน

ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวถาวรและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต แสดงรูปที่ 4.26 เมื่อพิจารณาพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีค่าการยุบตัวถาวรเท่ากับ 11,900 11,501 11,220 11,061 10,600 และ 10,921 ไมโครสเตรน ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม มีค่าการยุบตัวถาวรเท่ากับ 9,900 ไมโครสเตรน

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวถาวรของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียด พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC 60/70 โดยมีหินปูนเป็น

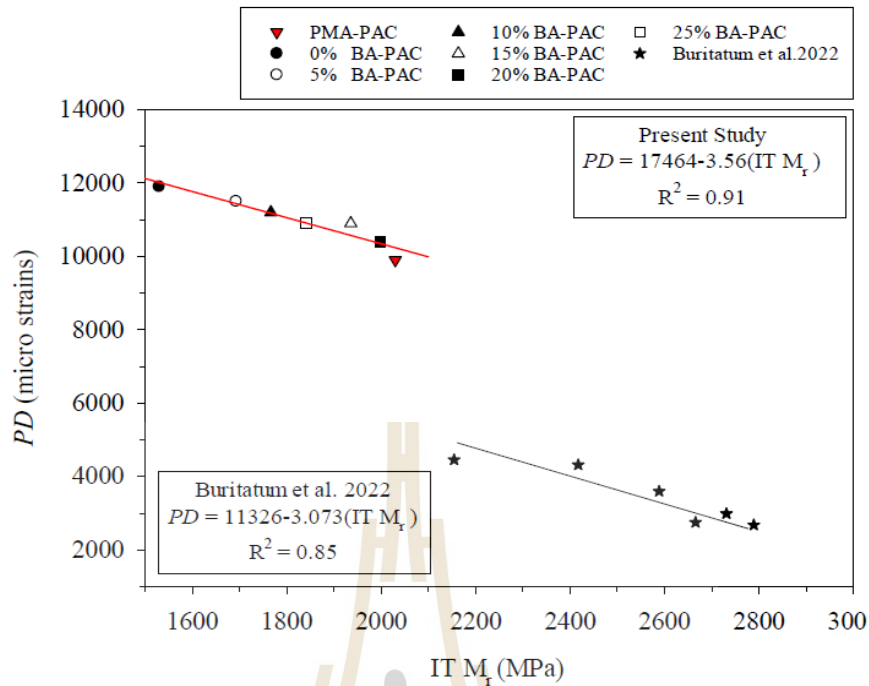
มวลรวม มีค่าการยุบตัวถาวรลดลงต่ำสุดที่การแทนที่ด้วยเถ้าหนักในมวลรวมละเอียดร้อยละ 20 แต่เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักมากกว่าค่าดังกล่าว ค่าการยุบตัวถาวรจะมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าการยุบตัวถาวรของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหีนปูนกับค่าการยุบตัวถาวรของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวม พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 โดยมีหินปูนเป็นมวลรวม เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักปริมาณร้อยละ 20 ซึ่งมีค่าการยุบตัวถาวรต่ำสุด มีค่าการยุบตัวถาวรสูงกว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ร้อยละ 6.60



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวถาวรและจำนวนรอบการทดสอบที่ 1,800 รอบ ของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนัก

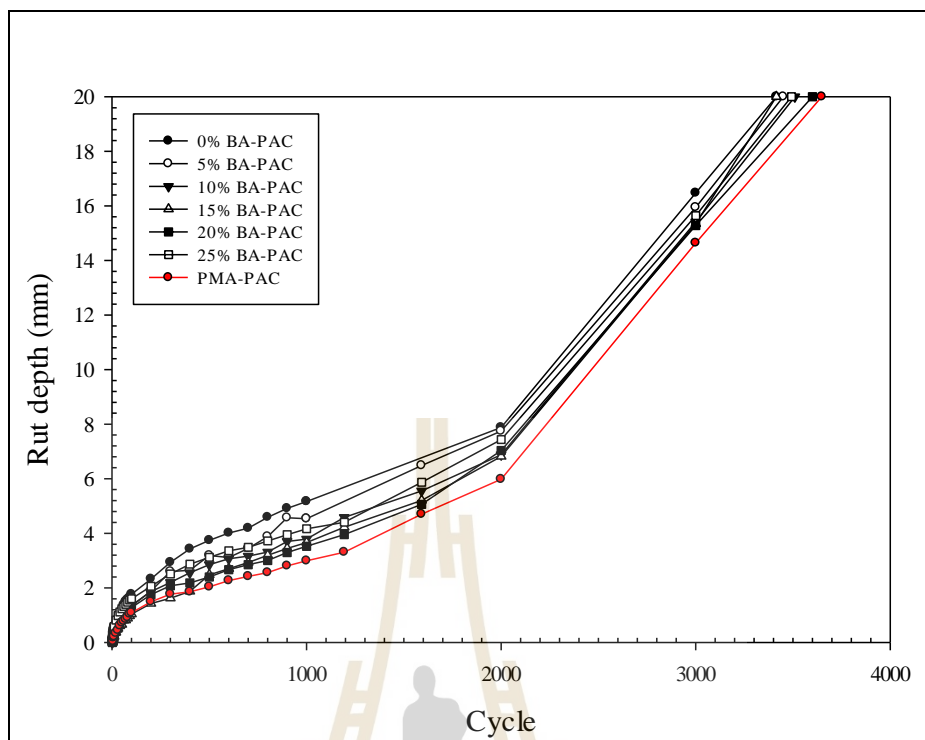
จากผลการทดสอบการยุบตัวถาวรและโมดูลัสคืนตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต จะเห็นว่าการใช้เถ้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงการยุบตัวถาวรและโมดูลัสคืนตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตให้ดีขึ้น (Buritatum et al., 2022) เมื่อค่าโมดูลัสคืนตัวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การยุบตัวถาวรมีค่าลดลงแสดงดังรูปที่ 4.27 จากความสัมพันธ์การทดสอบการยุบตัวถาวรและโมดูลัสคืนตัวของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นเป็นเส้นตรงที่มีค่าการยุบตัวแปรผกผันกับค่าโมดูลัสคืนตัว และที่พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตถูกปรับปรุงด้วยเถ้าหนักที่มีปริมาณเหมาะสมร้อยละ 20 มีค่าใกล้เคียงกับพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้ PMA



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวถาวรและโมดูลัสของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกปรับปรุงด้วยเถ้าหนัก

4.4.5 ผลการทดสอบการเกิดร่องล้อ (Wheel track)

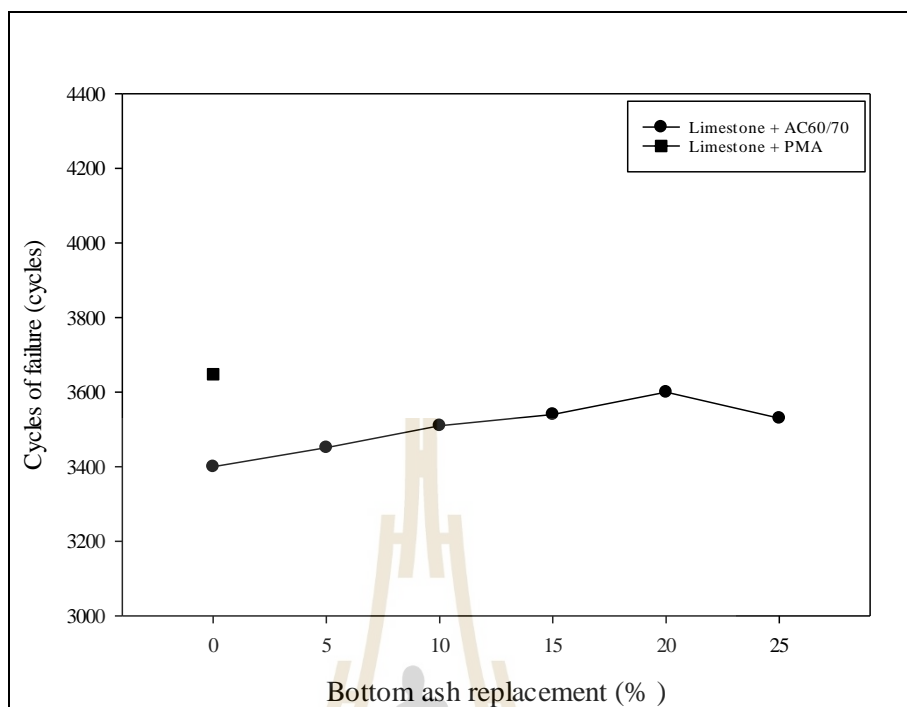
ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกร่องล้อและจำนวนรอบการทดสอบของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม ที่มวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักค่าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.28 ขณะที่ ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการทดสอบที่การยุบตัว 20 มิลลิเมตร กับปริมาณการแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตแสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดร่องล้อและจำนวนรอบการทดสอบของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน

เมื่อพิจารณาที่พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีจำนวนรอบการทดสอบที่การยุบตัว 20 มิลลิเมตร เท่ากับ 3,400 3,451 3,510 3,540 3,600 และ 3,530 รอบการทดสอบ ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA พบว่า ส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม มีจำนวนรอบการทดสอบที่การยุบตัว 20 มิลลิเมตร เท่ากับ 3,648 รอบการทดสอบ

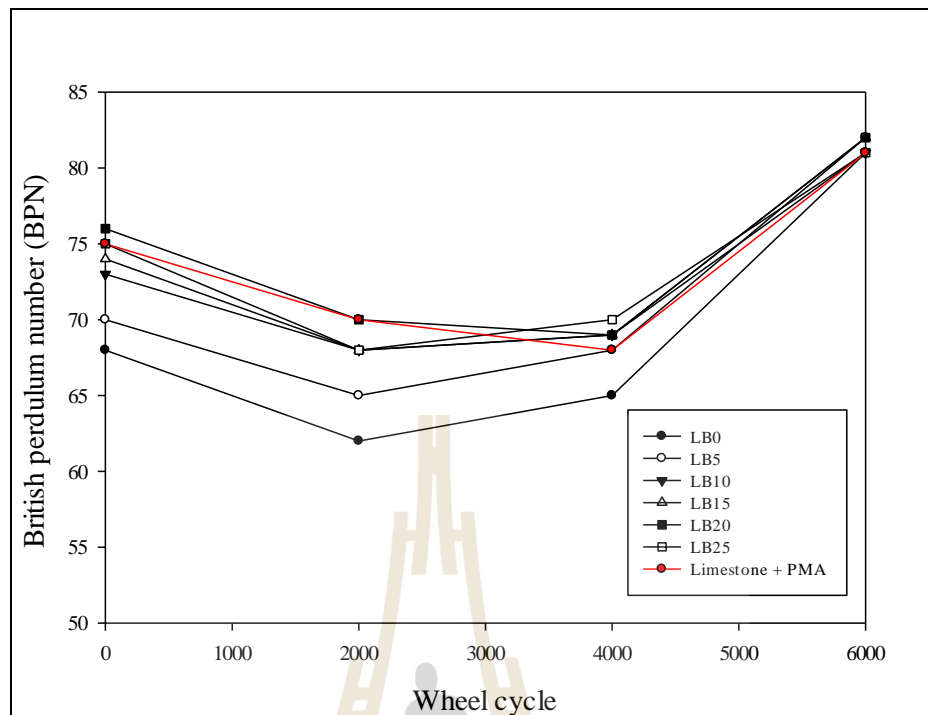
พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC 60/70 ที่ใช้เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน มีจำนวนรอบการทดสอบที่การยุบตัว 20 มิลลิเมตร สูงสุดที่การแทนที่ด้วยเถ้าหนักในมวลรวมละเอียดร้อยละ 20 แต่เมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักมากกว่าค่าดังกล่าว จำนวนรอบการทดสอบจะลดลง และเมื่อเปรียบเทียบจำนวนรอบการทดสอบที่การยุบตัวที่ 20 มิลลิเมตร ของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนกับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ที่มีหินปูนเป็นมวลรวม พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 โดยมีหินปูนเป็นมวลรวมเมื่อมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยเถ้าหนักปริมาณร้อยละ 20 มีจำนวนรอบการทดสอบต่ำกว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ร้อยละ 1.32



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการทดสอบและปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.6 ผลการทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistant)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า British pendulum number (BPN) และปริมาณเถ้าหนักที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียดของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูน แสดงดังรูปที่ 4.30 เมื่อพิจารณาพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 พบว่า พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าหนักร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 มีค่า BPN ที่ 0 รอบการทดสอบการเกิดร่องล้อเท่ากับ 68 70 73 74 76 และ 75 ตามลำดับ ในส่วนของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA ที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม การทดสอบการเกิดร่องล้อที่จำนวนรอบ 0, 2,000 4,000 และ 6,000 รอบ มีค่า BPN เท่ากับ 75 70 68 และ 81 ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อรอบการทดสอบการเกิดร่องล้อเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการขัดสีของล้อทดสอบกับผิวของแอสฟัลต์คอนกรีตทำให้ผิวสัมผัสลื่น ค่า BPN จึงลดลง จากนั้น เมื่อรอบการทดสอบร่องล้อเพิ่มขึ้นจะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกิดการหลุดลอกออกจากแอสฟัลต์คอนกรีตเหลือเฉพาะส่วนของมวลรวมหยาบที่มีความขรุขระ ทำให้ค่า BPN มีค่าเพิ่มขึ้น คล้ายกันกับผลทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการกระจายขนาดละเอียดแบบแน่นอน



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า British pendulum number และจำนวนรอบการทดสอบ ความต้านทานการเกิดร่องล้อ

จากผลทดสอบสมรรถนะของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ปรับปรุงด้วยเถ้าหนัก โดยการแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน เปรียบเทียบกับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 ที่ไม่ปรับปรุงด้วยเถ้าหนัก พบว่า ปริมาณเถ้าหนักที่เหมาะสมสำหรับแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูน ร้อยละ 20 ซึ่งสามารถลดการยุบตัวถาวร และการเกิดร่องล้อ และเพิ่มค่า กำลังดึงทางอ้อม ความล้า เนื่องจากแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัว และความต้านทานการลื่นไถลของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA จะเห็นว่า สมรรถนะมีค่าใกล้เคียงกัน

4.5 การออกแบบผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเถ้าหนัก

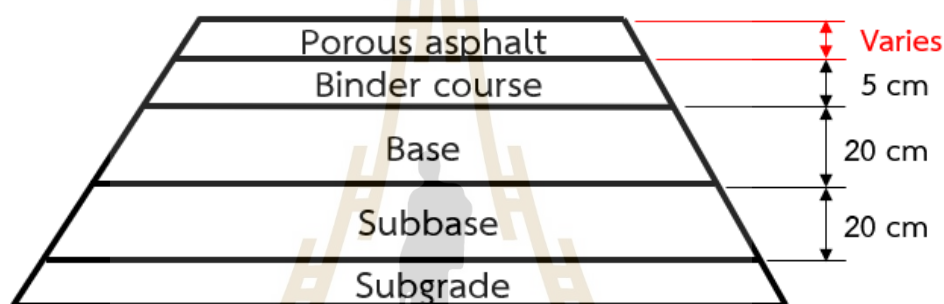
4.5.1 มาตรฐานการวิเคราะห์และออกแบบ

ประเภทของโครงสร้าง	: โครงสร้างถนนพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงด้วยเถ้าหนัก
วิธีการออกแบบ	: การออกแบบโครงสร้างถนนด้วยวิธีเชิงกล
มาตรฐานการวิเคราะห์	: Asphalt institute (AI, 1982) Austroads (1992)
วัสดุโครงสร้างหลัก	: วัสดุผิวทางกำหนดให้เป็นพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 โดยใช้เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดหินปูนร้อยละ 20 เปรียบเทียบกับผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA โดยมีมวลรวมหินปูน
	: วัสดุรองผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC60/70 ที่มีขนาดคละแบบแน่น
	: วัสดุชั้นพื้นทางหินคลุกมีค่า CBR > 80% (Modified compaction)
	: วัสดุชั้นรองพื้นทางมีค่า CBR > 25% (Modified compaction)
	: วัสดุชั้นดินเดิม/ดินถมคันทาง CBR \geq 4%
เงื่อนไขการออกแบบ	: ปริมาณจราจรต่อวัน (Average daily traffic) 500 1,000 2,000 และ 3,000 คันต่อวัน
	: ปริมาณรถบรรทุก (% Truck) ร้อยละ 10 และชนิดรถบรรทุก (Truck type) 3 เพลา 6 ล้อ 10 ยาง (25 ตัน)
	: แรงดันของล้อ 650 กิโลปาสคาล
	: ปีที่ออกแบบ (Period design) 7 ปี
	: จำนวนเลนใน 1 ช่องทางการออกแบบ (Lane design) 2 เลน
	: อัตราการเติบโตของปริมาณจราจรต่อปี (Growth rate) ร้อยละ 4

4.5.2 ผลการออกแบบ (Design ESALs)

ในการจำลองน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างชั้นทาง (รูปที่ 4.31) ค่าความเครียดดึง (Tension strain) และค่าความเครียดอัด (Compression strain) ที่เกิดขึ้น สามารถคำนวณได้จากโปรแกรม KENPAVE โดยการระบุความหนาของชั้นโครงสร้างทางต่าง ๆ จากนั้นนำความเครียดที่ได้ไปคำนวณปริมาณจราจรที่ยอมให้ (Allowable ESALs) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ

จราจรที่ออกแบบ (Design ESALs) กับปริมาณจราจรที่ยอมให้ ถ้าปริมาณจราจรที่ยอมให้ที่น้อยสุดในโครงสร้างชั้นทางมีค่าน้อยกว่าปริมาณจราจรที่ออกแบบ ให้เพิ่มความหนาของชั้นโครงสร้างที่อยู่ด้านบนของชั้นโครงสร้างที่มีปริมาณจราจรที่ยอมให้น้อยที่สุด จนกว่าปริมาณจราจรที่ยอมให้ที่น้อยที่สุดจะมีค่ามากกว่าปริมาณจราจรที่ออกแบบ โดยความหนาผิวทางที่ออกแบบจะขึ้นอยู่กับปริมาณจราจรที่ออกแบบจากปริมาณจราจรเฉลี่ย 500 1,000 2,000 และ 3,000 คันต่อวัน พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง ประกอบด้วยค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซอง โดยวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างทางมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และอัตราส่วนปัวซองสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณความเครียด



รูปที่ 4.31 รูปจำลองน้ำหนักรบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้างชั้นทาง

ตารางที่ 4.4 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณความเครียด

Layers	Symbol	Material types	Elastic modulus (MPa)	Poisson ratio	Reference
Porous asphalt	PA	LPMA (Open-graded)*	2,039	0.35	Laboratory
Porous asphalt	PA	LB20 (Open-graded)*	1,998	0.35	Laboratory
Binder course	BC	Asphalt concrete (Dense-graded)	3,500	0.35	AUSTROAD (1992)
Base	B	Crushed rock	400	0.35	AUSTROAD (1992)
Subbase	SB	Gravel	300	0.35	AUSTROAD (1992)
Subgrade	SG	Natural soil CBR 4%	41.36	0.45	AUSTROAD (1992)

* LPMA = Limestone + Polymer Modified Asphalt, LB20 = Limestone + AC60/70 + Bottom ash 20%

เมื่อนำค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองมาคำนวณหาค่าความเครียดด้วยโปรแกรม KENPAVE จะได้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทาง ประกอบด้วย ชั้นผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต (Wearing course, WC) ชั้นรองผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Binder course, BC) บนชั้นพื้นทาง (Base layer, B) บนชั้นรองพื้นทาง (Subbase layer, SB) และบนชั้นดินเดิม (Subgrade, SG) ผลการคำนวณความเครียดของโครงสร้างทางสำหรับผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA และผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 แทนที่เข้าหนักในมวลรวมละเอียดร้อยละ 20 แสดงดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 ตารางที่ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณความเครียดสำหรับผิวทางแอสฟัลต์ชนิด LPMA

ADT	No. of layer	Layer type	Material type	E (MPa)	Thickness (cm)	Strain
500	1	PA	LPMA (Open-graded)	1998	4	0
	2	BC	AC (Dense grade)	3500	5	1.91×10^{-4}
	3	B	Crushed rock	400	20	5.92×10^{-4}
	4	SB	Fine aggregate	300	20	2.61×10^{-4}
	5	SG	Soil CBR 4%	41.36	-	4.32×10^{-4}
1,000	1	PA	LPMA (Open-graded)	1998	6	0
	2	BC	AC (Dense grade)	3500	5	1.72×10^{-4}
	3	B	Crushed rock	400	20	4.91×10^{-4}
	4	SB	Fine aggregate	300	20	2.34×10^{-4}
	5	SG	Soil CBR 4%	41.36	-	3.96×10^{-4}
2,000	1	PA	LPMA (Open-graded)	1998	10	2.77×10^{-5}
	2	BC	AC (Dense grade)	3500	5	1.37×10^{-4}
	3	B	Crushed rock	400	20	3.50×10^{-4}
	4	SB	Fine aggregate	300	20	1.90×10^{-4}
	5	SG	Soil CBR 4%	41.36	-	3.31×10^{-4}
3,000	1	PA	LPMA (Open-graded)	1998	12	3.55×10^{-5}
	2	BC	AC (Dense grade)	3500	5	1.23×10^{-4}
	3	B	Crushed rock	400	20	3.00×10^{-4}
	4	SB	Fine aggregate	300	20	1.73×10^{-4}
	5	SG	Soil CBR 4%	41.36	-	3.03×10^{-4}

* LPMA = Limestone + Polymer Modified Asphalt

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณความเครียดสำหรับผิวทางแอสฟัลต์ชนิด LB20

ADT	No. of layer	Layer type	Material type	E (MPa)	Thickness (cm)	Strain
500	1	PA	LB20 (Open-graded)	1998	4	0
	2	BC	AC (Dense grade)	3500	5	1.91×10^{-4}
	3	B	Crushed rock	400	20	5.93×10^{-4}
	4	SB	Fine aggregate	300	20	2.62×10^{-4}
	5	SG	Soil CBR 4%	41.36	-	4.33×10^{-4}
1,000	1	PA	LB20 (Open-graded)	1998	6	0
	2	BC	AC (Dense grade)	3500	5	1.72×10^{-4}
	3	B	Crushed rock	400	20	4.93×10^{-4}
	4	SB	Fine aggregate	300	20	2.35×10^{-4}
	5	SG	Soil CBR 4%	41.36	-	3.97×10^{-4}
2,000	1	PA	LB20 (Open-graded)	1998	10	2.67×10^{-5}
	2	BC	AC (Dense grade)	3500	5	1.38×10^{-4}
	3	B	Crushed rock	400	20	3.52×10^{-4}
	4	SB	Fine aggregate	300	20	1.91×10^{-4}
	5	SG	Soil CBR 4%	41.36	-	3.32×10^{-4}
3,000	1	PA	LB20 (Open-graded)	1998	12	3.47×10^{-5}
	2	BC	AC (Dense grade)	3500	5	1.23×10^{-4}
	3	B	Crushed rock	400	20	3.01×10^{-4}
	4	SB	Fine aggregate	300	20	1.74×10^{-4}
	5	SG	Soil CBR 4%	41.36	-	3.04×10^{-4}

* LB20 = Limestone + AC60/70 + Bottom ash 20%

เมื่อได้ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นทางแล้ว สามารถคำนวณปริมาณจราจรที่ยอมให้ (Allowable ESALs) ของแต่ละชั้นโครงสร้างทางได้ ผลการคำนวณปริมาณจราจรที่ยอมให้ของแต่ละชั้นโครงสร้างทางเปรียบเทียบกับปริมาณจราจรที่ออกแบบของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA และผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 แสดงดังตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ปริมาณจราจรที่ยอมให้ (Allowable ESALs) LPMA

ADT (each/day)	Layer thickness (cm)				Allowable ESALs	Design ESALs
	Porous	Binder	Base	Subbase		
500	4	5*	20	20	3.58×10^5	2.26×10^5
1000	6	5*	20	20	5.04×10^5	4.52×10^5
2000	10	5*	20	20	1.05×10^6	9.03×10^5
3000	12	5*	20	20	1.52×10^6	1.36×10^6

* Layer of failure

ตารางที่ 4.8 ปริมาณจราจรที่ยอมให้ (Allowable ESALs) LB20

ADT (each/day)	Layer thickness (cm)				Allowable ESALs	Design ESALs
	Porous	Binder	Base	Subbase		
500	4	5*	20	20	3.58×10^5	2.26×10^5
1000	6	5*	20	20	5.03×10^5	4.52×10^5
2000	10	5*	20	20	1.05×10^6	9.03×10^5
3000	12	5*	20	20	1.51×10^6	1.36×10^6

* Layer of failure

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA และผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 แทนที่ถ้าหนักในมวลรวมละเอียดร้อยละ 20 เมื่อออกแบบความหนาของผิวทางเท่ากับ 4 6 10 และ 12 เซนติเมตร จะมีปริมาณจราจรที่ยอมให้ (Allowable ESALs) มากกว่าปริมาณจราจรที่ออกแบบ (Design ESALs) สำหรับปริมาณจราจร 500 1,000 2,000 และ 3,000 คันต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำความหนาที่ออกแบบไว้ไปใช้ก่อสร้างได้ตามปริมาณจราจรเฉลี่ยที่อายุการใช้งานที่กำหนด

4.5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์

ถนนที่ใช้คำนวณต้นทุนการก่อสร้างมีความกว้าง 14 เมตร และยาว 1,000 เมตร คิดเป็นพื้นที่ถนน 14,000 ตารางเมตร ต้นทุนการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต AC60/70 ที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมและมวลรวมละเอียดถูกแทนที่ด้วยถ้ำหนักร้อยละ 20 จะถูกเปรียบเทียบกับต้นทุนการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต PMA ที่ใช้หินปูนมวลรวม ต้นทุนการก่อสร้างคำนวณจากค่าวัสดุ และค่าดำเนินการ โดยค่าวัสดุคิดจากราคาของมวลรวมชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในโครงสร้างทาง และราคาของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ส่วนค่าดำเนินการคิดจากราคาการติดตั้งเครื่องผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ราคาของการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และราคาของการปูผิวและบดอัดผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต รายละเอียดของต้นทุนแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 รายละเอียดของต้นทุนค่าวัสดุและค่าดำเนินการของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต

ลำดับ ที่	รายการ	หน่วย	ราคาต่อ หน่วย (บาท/ หน่วย)	ค่า เสื่อม ราคา (บาท/ หน่วย)	อ้างอิง
1	แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA	ตัน	41,000	-	บ. โซล่าแอสฟัลต์ จำกัด (2565)
2	แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70	ตัน	25,600	-	บ. โซล่าแอสฟัลต์ จำกัด (2565)
3	หินเบอร์ 3/4	ลบ.ม.	290	-	โรงโม่หินลำปางบุญชัย (2565)
4	หินเบอร์ 1/2	ลบ.ม.	362	-	
5	หินเบอร์ 3/8	ลบ.ม.	180	-	
6	หินฝุ่น	ลบ.ม.	176	-	
8	เถ้าหนัก	ลบ.ม.	10	-	กฟผ. ลำปาง (2564)
9	หินคลุก	ลบ.ม.	420	-	กรมบัญชีกลาง (2565)
10	วัสดุเม็ดละเอียด	ลบ.ม.	350	-	กรมบัญชีกลาง (2565)
11	การติดตั้งเครื่องผสมแอสฟัลต์ คอนกรีต	ครั้ง	250,000	-	กรมบัญชีกลาง (2565)
12	การผสมแอสฟัลต์คอนกรีต	ตัน	204.69	16.77	กรมบัญชีกลาง (2565)
13	การปูและบดอัดผิวทางแอสฟัลต์ คอนกรีต	ลบ.ม.	194.4	56.4	กรมบัญชีกลาง (2565)

เมื่อทราบราคาต่อหน่วยของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทางแต่ละชั้นและขนาดของพื้นที่ก่อสร้างถนนแล้ว (14,000 ตารางเมตร) สามารถคำนวณต้นทุนของวัสดุในหน่วยของตารางเมตรได้ โดยตารางที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 เป็นผลการคำนวณต้นทุนของวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) และวัสดุชั้นพื้นทาง (Base) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ต้นทุนวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase)

วัสดุ	ราคา (บาท/ ลบ.ม.)	ปริมาณสำหรับ ถนน 1 กิโลเมตร (ลบ.ม.)	ราคาวัสดุสำหรับ ถนน 1 กิโลเมตร (บาท)	ราคาต่อพื้นที่สำหรับ ความหนา 20 เซนติเมตร (บาท/ตร.ม.)
วัสดุเม็ด ละเอียด	350	2,800	980,000	70

ตารางที่ 4.11 ต้นทุนวัสดุชั้นพื้นทาง (Base)

วัสดุ	ราคา (บาท/ ลบ.ม.)	ปริมาณสำหรับ ถนน 1 กิโลเมตร (ลบ.ม.)	ราคาวัสดุสำหรับ ถนน 1 กิโลเมตร (บาท)	ราคาต่อพื้นที่สำหรับ ความหนา 20 เซนติเมตร (บาท/ตร.ม.)
หินคลุก	420	2,800	1,176,000	84

สำหรับต้นทุนของชั้นรองผิวทาง (Binder course) เป็นวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต AC60/70 ชนิดเกรดแน่น ต้องคำนวณราคาของมวลรวม และราคาของแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยต้นทุนของชั้นรองผิวทางสำหรับความหนา 5 เซนติเมตร แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ต้นทุนวัสดุชั้นรองผิวทาง

วัสดุ	ราคามวลรวม (บาท)	ราคาแอสฟัลต์ ซีเมนต์ (บาท)	ราคาวัสดุสำหรับ ถนน 1 กิโลเมตร (บาท)	ราคาต่อพื้นที่ สำหรับความหนา 5 เซนติเมตร (บาท/ตร.ม.)
แอสฟัลต์คอนกรีต AC60/70 หนา 5 เซนติเมตร	161,811.77	2,000,078.23	2,161,890.00	154.5

สำหรับต้นทุนของวัสดุชั้นผิวทาง ต้นทุนจะแตกต่างกันตามความหนาที่ออกแบบไว้ รวมถึงปริมาณของมวลและปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์ก็จะแตกต่างกันตามความหนาที่ออกแบบไว้ด้วย โดยผลการคำนวณปริมาณของมวลรวม และปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ตามความหนาที่ออกแบบไว้ของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต แสดงดังตารางที่ 4.13 และตารางที่ 4.16 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ปริมาณของมวลรวมสำหรับชั้นผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

ชนิดผิวทาง	ปริมาณ เถ้า หนัก (%)	สัดส่วนหินใน ห้องปฏิบัติการ (%)				ความ หนา (ม.)	ปริมาตรหินแต่ละขนาด (ลบ.ม.)				
		หิน 3/4	หิน 1/2	หิน 3/8	หินฝุ่น		หิน 3/4	หิน 1/2	หิน 3/8	หินฝุ่น	เถ้า หนัก
LPMA	-	5	15	65	15	0.04	26.62	79.85	346.01	79.85	-
						0.06	39.92	119.77	519.01	119.77	-
						0.10	66.54	199.62	865.02	199.62	-
						0.12	79.85	239.54	1,038.02	239.54	-
LB20	20	5	15	65	15	0.04	26.79	80.38	348.33	64.31	16.08
						0.06	40.19	120.57	522.49	96.46	24.11
						0.10	66.99	200.96	870.81	160.77	40.19
						0.12	80.38	241.15	1,044.98	192.92	48.23

* LPMA = Limestone + Polymer Modified Asphalt, LB20 = Limestone + AC60/70 + Bottom ash 20%

ตารางที่ 4.14 ปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ชนิดผิวทาง	ความหนา (ม.)	ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ตัน)
LPMA	0.04	48.95
	0.06	73.43
	0.10	122.38
	0.12	146.86
LB20	0.04	54.05
	0.06	81.08
	0.10	135.13
	0.12	162.16

* LPMA = Limestone + Polymer Modified Asphalt, LB20 = Limestone + AC60/70 + Bottom ash 20%

เมื่อทราบปริมาณมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตตามสัดส่วนที่ออกแบบไว้แล้ว จะสามารถคำนวณต้นทุนวัสดุได้ดัง

ตารางที่ 4.15 ต้นทุนวัสดุชั้นผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

ชนิดผิวทาง	ปริมาณ เถ้าหนัก (%)	ความ หนา (ม.)	ราคามวลรวม (บาท)	ราคา AC (บาท)	ราคาวัสดุ (บาท)
LPMA	-	0.04	113,672.29	2,006,950.00	2,120,622.29
		0.06	170,572.25	3,010,630.00	3,181,202.25
		0.10	284,287.08	5,017,580.00	5,301,867.08
		0.12	341,144.50	6,021,260.00	6,362,404.50
LB20	20	0.04	110,120.87	1,383,680.00	1,493,800.87
		0.06	165,776.00	2,075,648.00	2,241,424.00
		0.10	276,293.33	3,459,328.00	3,735,621.33
		0.12	331,552.00	4,151,296.00	4,482,848.00

* LPMA = Limestone + Polymer Modified Asphalt, LB20 = Limestone + AC60/70 + Bottom ash 20%

ในส่วน of ต้นทุนค่าดำเนินการจะเป็นส่วน of ชั้นโครงสร้างที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้แก่ ชั้นผิวทาง และชั้นรองผิวทาง โดยต้นทุนค่าดำเนินการ of วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตสรุปได้ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ผลการคำนวณค่าดำเนินการ of วัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

ชนิดแอสฟัลต์ คอนกรีต	ปริมาณ เถ้า หนัก (%)	ความ หนา (ม.)	ค่าผสม แอสฟัลต์ คอนกรีต ทั้งหมด (บาท)	ค่าติดตั้งเครื่อง ผสม (บาท)	ค่าปูและบด ทับ (บาท)	ต้นทุนค่า ดำเนินการ (บาท)
LPMA	-	0.04	251,755.73	28,462.00	140,448.00	420,665.73
		0.06	377,633.59	42,693.00	210,672.00	630,998.59
		0.10	629,389.32	71,155.00	351,120.00	1,051,664.32
		0.12	755,267.18	85,386.00	421,344.00	1,261,997.18
LB20	20	0.04	251,383.68	28,420.00	140,448.00	420,251.68
		0.06	377,075.51	42,630.00	210,672.00	630,377.51
		0.10	628,459.19	71,050.00	351,120.00	1,050,629.19
		0.12	754,151.03	85,260.00	421,344.00	1,260,755.03
รองผิวทาง AC60/70		0.05	368,952.36	250,000.00	175,560.00	795,908.10

* LPMA = Limestone + Polymer Modified Asphalt, LB20 = Limestone + AC60/70 + Bottom ash 20%

เมื่อทราบต้นทุนวัสดุและต้นทุนค่าดำเนินการแล้ว สามารถคำนวณหาต้นทุนการก่อสร้างได้ โดยผลการคำนวณต้นทุนการก่อสร้างผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตแสดงดัง ตารางที่ 4.17 พบว่า ผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 มีต้นทุนการก่อสร้างต่ำกว่าผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA ร้อยละ 24.71 24.78 24.85 และ 24.86 สำหรับความหนา 4 6 10 และ 12 เซนติเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าหนักแทนที่มวลรวมละเอียดหินปูนร้อยละ 20 ในส่วนผสมของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 มีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจาก มีต้นทุนแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ต่ำกว่า PMA ค่อนข้างสูง การประยุกต์ใช้เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดธรรมชาติ สำหรับงานถนนพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 จะช่วยประหยัดต้นทุนได้มากกว่าการใช้ PMA

ตารางที่ 4.17 ต้นทุนการก่อสร้างผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

ชนิดผิวทาง	ปริมาณ เถ้า หนัก (%)	ความ หนา (ม.)	ราคาวัสดุ (บาท)	ค่าดำเนินการ (บาท)	ต้นทุนทั้งหมด (บาท)	ราคาต่อ พื้นที่ (บาท/ตร. ม.)	ร้อยละ ผลต่าง ของ ต้นทุนเมื่อ เทียบกับ PMA
LPMA	-	0.04	2,120,622.29	417,203.73	2,541,288.01	181.27	-
		0.06	3,181,202.25	613,305.59	3,812,200.84	271.04	-
		0.10	5,301,867.08	1,005,509.32	6,353,531.40	450.53	-
		0.12	6,362,404.50	1,201,611.18	7,624,401.68	540.29	-
LB20	20	0.04	1,493,800.87	416,831.68	1,914,052.55	136.47	24.71
		0.06	2,241,424.00	612,747.51	2,871,801.51	203.87	24.78
		0.10	3,735,621.33	1,004,579.19	4,786,250.52	338.59	24.85
		0.12	4,482,848.00	1,200,495.03	5,743,603.03	405.95	24.86
รองผิวทาง AC60/70		0.05	2,161,890.00	795,908.10	2,957,798.00	212.0	-

* LPMA = Limestone + Polymer Modified Asphalt, LB20 = Limestone + AC60/70 + Bottom ash 20%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 การศึกษาพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

5.1.1 ผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต ที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดหินปูน (ร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 ของน้ำหนักรวมของมวลรวมละเอียด) พบว่า เมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักแทนที่ในมวลรวมละเอียดเพิ่มขึ้น ส่วนผสมจะต้องใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากเถ้าหนักสามารถดูดซับแอสฟัลต์ซีเมนต์ ส่งผลกระทบต่อสมบัติพื้นฐาน (ความหนาแน่นและปริมาณช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์) ของพอร์สแอสฟัลต์ถูกปรับปรุงตามปริมาณการแทนที่ในมวลรวมละเอียดที่เพิ่มขึ้นและมีค่าการปรับปรุงที่ดีที่สุดที่การแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมเท่ากับ ร้อยละ 20 อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดที่สูงกว่าค่าดังกล่าวจะทำให้สมบัติพื้นฐานของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ ที่เพิ่มขึ้น

5.1.2 ผลการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดหินปูน (ร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 ของน้ำหนักรวมของมวลรวมละเอียด) พบว่า สมบัติทางวิศวกรรมและสมรรถนะของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต (การไหลแยกตัว เสถียรภาพ ดัชนีความแข็งแรง กำลังดึงทางอ้อม โมดูลัสคั้นตัว อายุการล่า ความต้านทานการยุบตัวถาวร และความต้านทานการเกิดร่องล้อ) ถูกปรับปรุงตามปริมาณการแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดที่เพิ่มขึ้น และมีค่าการปรับปรุงที่ดีที่สุดที่การแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมเท่ากับ ร้อยละ 20 อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดที่สูงกว่าค่าดังกล่าวจะทำให้สมบัติทางวิศวกรรมและสมรรถนะของ พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ ที่เพิ่มขึ้น

5.1.3 อัตราส่วนการแทนที่เถ้าหนักในมวลรวมละเอียดที่เหมาะสม พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมและใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 มีสมรรถนะใกล้เคียงกันกับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA (ไม่ได้ใช้เถ้าหนักในส่วนผสม) แต่มีต้นทุนการก่อสร้างผิวทางพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ต่ำกว่าพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ PMA ประมาณ ร้อยละ 24 เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการใช้งานเท่ากัน

รายการอ้างอิง

- กรมทางหลวง. 2515. วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของ Coarse aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles abrasion. ทล.-ม. 202/2515. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2515. วิธีการทดสอบหาค่า Sand equivalent. ทล.-ท. 203/2515. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2516. วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม้ล้าง. ทล.-ท. 204/2516. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2517. วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง. ทล.-ท. 205/2517. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2517. วิธีการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ. ทล.-ท. 207/2517. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2517. วิธีการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวิธี Marshall. ทล.-ท. 604/2517. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2518. วิธีการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุ Aggregate ชนิดเม็ดละเอียด. ทล.-ท. 209/2518. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2518. วิธีการทดสอบหาค่าดัชนีความแบน (Flakiness index). ทล.-ท. 210/2518. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2518. วิธีการทดสอบหาค่าดัชนีความยาว (Elongation index). ทล.-ท. 211/2518. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2531. วิธีการทดสอบหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวมโดยการใช้โซเดียมซัลเฟตหรือ แมกนีเซียมซัลเฟต. ทล.-ท. 213/2531. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2544. วิธีการทดสอบหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength index) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต. ทล.-ท. 413/2544. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2547. วิธีการทดสอบหาปริมาณการแตกหักของวัสดุมวลรวมเมื่อถูกแรงตกกระแทก. ทล.-ท. 208/2547. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2547. วิธีการทดสอบหาการดูดซึมน้ำของมวลรวม. ทล.-ท. 414/2547. กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.

- กรมทางหลวง. 2556. ข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ. ทล.-ก.
409/2556 กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง. 2556. มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ. ทล.-ม.
416/2556 กรุงเทพมหานคร : กรมทางหลวง.
- กรมทางหลวง (2561). “รายงานประจำปีกรมทางหลวง 2561”, กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.
- กรมทางหลวงชนบท (2559). “รายงานประจำปี 2559 สำนักบำรุงทาง”, กรมทางหลวงชนบท
กระทรวงคมนาคม.
- กรมส่งเสริมการปกครองส่วนท้องถิ่น (2562). “การจัดสรรงบประมาณรายจ่ายประจำปีงบประมาณ
พ.ศ. 2562 โครงการเงินอุดหนุนเฉพาะกิจเงินอุดหนุนสำหรับก่อสร้าง/ปรับปรุงซ่อมแซมถนน
ทางหลวงท้องถิ่น”, กรมการปกครองส่วนท้องถิ่น กระทรวงมหาดไทย.
- กระทรวงคมนาคม (2554). แผนปฏิบัติการ พ.ศ. 2555 – 2558 ของกระทรวงคมนาคม,
สำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคม กรุงเทพฯ
- ชยธันว พรมศร (2541). “การวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยวิธี
INDIRECT
- วัชรินทร์ วิทยกุล (2545). แอสฟัลต์ระบบซูเปอร์เพฟ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรม
ศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิทวัส ครุดำ, วิศวินทร์ อัครปัญญาธรและรักติพงษ์ สหมิตรมงคล (2016). EFFECT OF HIGH
VOLUME REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE WITH BOTTOM ASH ON FLOW,
SETTING TIME, COMPRESSIVE STRENGTH AND SHRINKAGE OF MORTAR. Journal
of Thailand Concrete Association, 4(2), 1-13.
- ไพฑูรย์ นาแซง และเรืองรุชดี ชีระโรจน์ (2009). ค่าตัวคูณประสิทธิผลและปริมาณการใช้ที่เหมาะสม
ของเถ้าหนักบด ละเอียดในงานคอนกรีต. Engineering Journal of Research and
Development, 20(3), 1-8. ยุทธนา ปัญจธนศักดิ์ (2556). การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายตลอด
อายุการใช้งานระหว่างถนนแอสฟัลต์และถนนคอนกรีต (Doctoral dissertation,
จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย).
- Abdulshafi, A. (1988). “Rutting-review of existing models and some application to
Saudi Arabia.” Proceedings of 3rd IRF middle east regional meeting, Vol. 6,
244-56.
- Argiz, C., Sanjuán, M. Á., & Menéndez, E. (2017). Coal bottom ash for Portland cement
production. Advances in Materials Science and Engineering, 2017.

- Barth, E.J. (1984). "Asphalt Science and Technology." Gordon and Breach Science Publishers, 3rd Edition.
- Chen, J. S., Chu, P. Y., Chang, J. E., Lu, H. C., Wu, Z. H., & Lin, K. Y. (2008). Engineering and environmental characterization of municipal solid waste bottom ash as an aggregate substitute utilized for asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(6), 432-439.
- Churchill, E. V. and Amirkhanian, S. N. (1999). Coal ash utilization in asphalt concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(4), 295-301.
- Colonna, P., Berloco, N., Ranieri, V., & Shuler, S. T. (2012). Application of bottom ash for pavement binder course. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 961-971.
- Garrick, N. W., & Chan, K. L. (1993). Evaluation of domestic incinerator ash for use as aggregate in asphalt concrete. *Transportation research record*, (1418).
- Goh, S. W., & You, Z. (2008). A preliminary study of the mechanical properties of asphalt mixture containing bottom ash. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(10), 1114-1119.
- Hassan, H. F. (2005). Recycling of municipal solid waste incinerator ash in hot-mix asphalt concrete. *Construction and building materials*, 19(2), 91-98.
- Huang, C. M., Chiu, C. T., Li, K. C., and Yang, W. F. (2006). Physical and environmental properties of asphalt mixtures containing incinerator bottom ash. *Journal of hazardous materials*, 137(3), 1742-1749.
- Kaufman, H.S. and J.J. Falchetta (1977). "Introduction to Polymer Science and Technology." John Wiley & Sons, Inc.
- Kandhal, P.S., Parker, F. and Mallick, R.B. (1997). "Aggregate tests for hot-mix asphalt: state of the practice." *Transportation Research Board, National Research Council*.
- Ksaibati, K., & Stephen, J. (1999). Utilization of bottom ash in asphalt mixes (No. MPC-99-104A). *Mountain Plains Consortium*.
- Majidzadeh, K. and F.N. Brovold, (1968). State of the Art : "Effect of water on Bitumen-Aggregate Mixtures." *HRB., Special Report 98*.

- Takaikaew, T., Tepsriha, P., Horpibulsuk, S., Hoy, M., Kaloush, K. E., & Arulrajah, A. (2018). Performance of fiber-reinforced asphalt concretes with various asphalt binders in Thailand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018193.
- Thanaya, I. N. A. (2009). Hot Asphalt Pavement Mixtures Incorporating All Waste Materials. *Media*





ภาคผนวก ก

การเข้าร่วมประชุมวิชาการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



CERTIFICATE

OF PARTICIPATION



International Conference on Engineering & Technology

(ICET2022)

3rd September 2022, Virtual Conference

This is to certify that
 of.....**Sutep Dasdawan**.....
 the research paper titled.....**"Performance Improvement Of Porous Asphalt Using Bottom Ash For The Pavement Application"**.....
 has done his/her excellency in presenting

on 3rd September 2022 at Virtual

Dr. Albert Munroe
President


Sondali Gupta
Program Manager

ประวัติผู้เขียน

นายสุเทพ ดาษดาวัลย์ เกิดเมื่อวันที่ 25 สิงหาคม พ.ศ.2540 เริ่มศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนแม่สะเรียง “บริพัตรศึกษา” แม่ฮ่องสอน และสำเร็จระดับปริญญาตรี สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2562 โดยหลังจากที่สำเร็จการศึกษาแล้วมีความสนใจทางด้านปฐพีกลศาสตร์และการ บริหารงานก่อสร้าง จึงเข้าศึกษาต่อ ในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารงาน ก่อสร้าง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

