



การศึกษาพฤติกรรมค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทาง
เก่า



ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การศึกษาพฤติกรรมค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทาง
เก่า



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การศึกษาพฤติกรรมค่าความต้านทานการสิ้นไถลของผิวทางที่มีส่วนผสมของวัสดุ
ผิวทางเก่า"

ของ ณิชัญวิชญ์ เศรษฐยูทธพงษ์

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริยาวัธ ประอ้าย)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ นุสสิทธิ์)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สสิกรณณ์ เหลืองวิชชเจริญ)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การศึกษาพฤติกรรมค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางที่มี ส่วนผสมของวัสดุผิวทางเก่า
ผู้วิจัย	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ นุสิทธิ์
กรรมการที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	ความต้านทานการลื่นไถล, วัสดุผิวทางเก่า, ความปลอดภัยของถนน

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน มีงานวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจในการนำวัสดุผิวทางเก่ามาใช้เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อลดการใช้ทรัพยากรใหม่ที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้ในการก่อสร้างผิวทาง งานวิจัยในอดีตมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาด้านความปลอดภัยของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมนั้นมียังจำกัด ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรม และวิเคราะห์ค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ส่งผลต่อค่าความปลอดภัยของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จึงเป็นสาเหตุให้เกิดงานวิจัยเรื่องนี้ขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาการพฤติกรรม และผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม ในงานวิจัยนี้มีการทดสอบการเสื่อมสภาพของผิวทางด้วยเครื่องเร่งการขัดสีเพื่อจำลองสภาพการใช้งานเนื่องจากปริมาณการจราจรจากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มวัสดุผิวทางเก่าในส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลลดลง แต่เมื่อนำวัสดุผิวทางเก่าร้อยละ 50 มาใช้ในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุรวมใหม่เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียว จากการวิเคราะห์ผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล ในช่วงเริ่มต้นพบว่ามีความสัมพันธ์มากกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ และคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ แต่มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้ายเพียงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้นลดลง และสำหรับพารามิเตอร์ λ และ K ซึ่งเป็นตัวแทนชุดข้อมูลขนาดคละของอัตราส่วนผสมนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้ายเพียงเล็กน้อย

Title	SKID RESISTANCE BEHAVIOR OF ASPHALT PAVEMENT PRODUCED FROM RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT
Author	NATHANYAWAT SEDTHAYUTTHAPHONG
Advisor	Assistant Professor Korakod Nusit, Ph.D.
Co-Advisor	Associate Professor Peerapoong Jitsangiam, Ph.D.
Academic Paper	M.Eng. Thesis in Civil Engineering, Naresuan University, 2021
Keywords	Skid Resistance, Reclaim Asphalt Pavement, Road Safety, Recycled Asphalt Concrete

ABSTRACT

Recently, the use of recycling asphalt concrete is subject to many researches and interests, as it reduces the use of new resources in pavement construction. The literature reviews indicate the recent research focused on the performances and strength of recycling asphalt concrete. Accordingly, this research aims to evaluate the skid resistance and behavior of recycling asphalt concrete with different amount of reclaim asphalt pavement in the mixtures. The degradation of recycled asphalt concrete was simulated using an accelerated polishing machine to mimic road surface abrasion. The study found that led to the reduction in increasing the amount of RAP in the asphalt concrete mixture skid resistance. The asphalt concrete with 50% RAP gave a skid resistance value close to that obtained from the asphalt concrete with no RAP. The initial skid resistance of recycled asphalt concrete decreased with the drops in the penetration, softening point and ductility of asphalt cement. However, the changes in the properties blended binder contributed only small variations in the final skid resistances of the recycled asphalt concrete. The gradations of recycled hot mix asphalt correlated only with the final skid resistances. The aggregate gradations controlled the characteristics of the final skid resistance since the coated binder was partially polished off from the road surface at this stage.

ประกาศขอบคุณ

งานวิจัยนี้ ส่วนหนึ่งได้รับเงินทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับนายณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์ (ทุนสนับสนุนการศึกษาสำหรับนิสิตระดับปริญญาโท ประจำปี การศึกษา 2562) นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ รศ.ดร. พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม จากคณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ บริษัท อินฟรา พลัส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ ทดสอบ Dynamic Friction tester (DFT) และเครื่องจำลองการขัดสี (Three-Wheel Polishing Device: TWPD) นอกจากนี้ ยังขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปณัฐพงศ์ บุญนวล ที่ถ่ายทอดความรู้ในการใช้ เครื่องกลั่นสารแบบสุญญากาศ (Rotary evaporator machine) สำหรับกลั่นแอสฟัลต์ซีเมนต์ และนาย บำรุง บัวชื่น ที่ถ่ายทอดประสบการณ์ สอนวิธีการทำงานรวมถึงช่วยดูแลความปลอดภัยตลอดการ ทำงาน

ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
ประกาศคุุณูปการ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.3.1 การคัดเลือกวัสดุ.....	2
1.3.2 การออกแบบสูตรส่วนผสม.....	2
1.3.3 การจำลองสภาพการใช้งาน และทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถล	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of Friction: μ)	5
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความเสียดทานของผิวทาง.....	6

2.3	ค่าแนะนำสำหรับค่าความเสียหายที่เหมาะสมสำหรับ.....	8
2.4	เครื่องมือการจำลองสภาพการใช้งาน และเครื่องมือทดสอบค่าความต้านทานการ ลื่นไถลของผิวทาง	10
2.5	วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า (Reclaim Asphalt Pavement: RAP).....	14
2.6	มาตรฐานการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต.....	18
2.6.1	วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน (Hot – Mix Asphalt).....	18
2.6.2	วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า (Asphalt Hot – Mix Recycling).....	22
2.7	เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
2.8	บทสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	36
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	36
3.2	การคัดเลือกวัสดุ.....	37
3.3	การทดสอบคุณสมบัติวัสดุมวลรวม	38
3.3.1	Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR).....	38
3.3.2	X-ray Diffraction (XRD).....	39
3.3.3	Scanning electron microscopy (SEM)	40
3.3.4	Aggregate Impact Test.....	41
3.3.5	Aggregate Crushing Test.....	45
3.3.6	Polished Stone Value.....	48
3.3.7	Los Angeles Abrasion (LA).....	56
3.4	การกลั่นแอสฟัลต์ซีเมนต์จากวัสดุผิวทางเก่า (RAP)	59
3.5	การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement).....	63

3.5.1 การทดสอบเพนเทรซึ้นของแอสฟัลต์ซีเมนต์	63
3.5.2 การทดสอบการยึดติงของแอสฟัลต์ซีเมนต์	69
3.5.3 การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุยางมะตอยโดยใช้เครื่องวงแหวนกับลูกปืน ..	73
3.6 การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตมาตรฐานการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต	78
3.6.1 การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ (Hot - Mix Asphalt)	80
3.6.2 การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Asphalt Hot - Mix Recycling).....	84
3.7 การจำลองสภาพการใช้งาน และทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทาง	85
3.7.1 การเตรียมแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต.....	85
3.7.2 การทดสอบการขัดสี และทดสอบหาค่าความต้านทานการลื่นไถล	88
บทที่ 4 ผลการวิจัย	90
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม	90
4.1.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม.....	90
4.1.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุมวลรวม	92
4.1.2.1 X-Ray Diffractometer (XRD).....	92
4.1.2.2 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)	94
4.1.2.3 Scanning electron microscope (SEM)	95
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement)	97
4.3 การออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต และการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน.....	97
4.3.1 การออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต	97
4.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต.....	100

4.3.2.1 การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength).....	100
4.3.2.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)	100
4.4 การจำลองสภาพการใช้งาน และทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลใน	
ห้องปฏิบัติการ.....	101
บทที่ 5 อภิปรายผลการทดสอบ.....	106
5.1 ผลกระทบของตัวแปรที่ส่งผลต่อความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์	
คอนกรีตที่มีส่วนผสมของผิวทางเก่า.....	106
5.1.1 ผลกระทบของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมต่อค่าความต้านทาน	
การ ลื่นไถล.....	106
5.1.2 ผลกระทบของขนาดคละมวลรวมต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล	108
5.1.3 ผลกระทบของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล.....	110
5.1.4 ผลกระทบของประสิทธิภาพการใช้งานที่มีต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล	
.....	114
5.2 บทสรุปผลกระทบของตัวแปรที่ส่งผลต่อความต้านทานการลื่นไถล.....	115
5.3 สมการสำหรับทำนาย (Prediction Model) ค่าความต้านทานการลื่นไถลของแผ่น	
ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ที่วัดได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	116
5.3.1 การศึกษา (Past Research)	116
5.3.2 การพัฒนาสมการทำนายค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์	
คอนกรีต (Skid Resistance Prediction Model Development)	117
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัย.....	138
บรรณานุกรม.....	143
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของวัสดุมวลรวม.....	148
ภาคผนวก ข การออกแบบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต.....	185

ภาคผนวก ค การทดสอบความต้านทานการสิ้นเปลือง.....205

ประวัติผู้วิจัย.....211



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	4
ตารางที่ 2-1 สัมประสิทธิ์ความเสียหายของผิวทางที่ระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุง แก้ไข ในงานวิจัยต่างประเทศ	9
ตารางที่ 2-2 สรุปค่าระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไขสำหรับประเทศไทย	10
ตารางที่ 2-3 สรุปค่าระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไขสำหรับประเทศไทยโดยใช้ค่า ดัชนีเสียหายสากลเป็นตัวชี้วัด	10
ตารางที่ 2-4 ขนาดคละของมวลรวม และปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้สำหรับแอสฟัลต์ คอนกรีต ผสมร้อน	21
ตารางที่ 2-5 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน	22
ตารางที่ 2-6 ขนาดคละของมวลรวมภายหลังการผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า	24
ตารางที่ 2-7 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า.....	25
ตารางที่ 2-8 สรุปเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติค่า Resilience % และ Hardness, IRH degree จำแนกตามอุณหภูมิ องศาเซลเซียส.....	50
ตารางที่ 3-2 จำนวน Abrasive Charge จำแนกตาม Grading ของตัวอย่าง	57
ตารางที่ 3-3 Grading สำหรับการจัดกลุ่มการทดสอบ และรอบการทดสอบ Los Angeles Abrasion.....	59
ตารางที่ 3-4 เงื่อนไขการทดสอบ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	68
ตารางที่ 4-1 ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin Aggregates).....	90
ตารางที่ 4-2 ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมผิวทางเก่า (RAP)	91

ตารางที่ 4-3 ผลทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรมของวัสดุมวลรวม	91
ตารางที่ 4-4 ผลทดสอบคุณสมบัติวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement)	97
ตารางที่ 4-5 สรุปผลการออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตกลุ่มที่ 1	98
ตารางที่ 4-6 สรุปผลการออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตกลุ่มที่ 2	98
ตารางที่ 4-7 จำนวนการขึ้นแผ่นตัวอย่างเพื่อทดสอบความต้านทานการลื่นไถลใน ห้องปฏิบัติการ	102
ตารางที่ 4-8 สรุปเกณฑ์ระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไข.....	103
ตารางที่ 4-9 เกณฑ์ค่าความต้านทานการลื่นไถล (BPN) ในช่วงเริ่มต้น และช่วงสุดท้าย .	103
ตารางที่ 4-10 สรุปเกณฑ์ระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไข	105
ตารางที่ 4-11 เกณฑ์ค่าความต้านทานการลื่นไถล (DFT) ในช่วงเริ่มต้น และช่วงสุดท้าย	105
ตารางที่ 5-1 ตารางสรุปคุณสมบัติวัสดุมวลรวม (Aggregate properties).....	107
ตารางที่ 5-2 ตารางสรุปพารามิเตอร์ λ , K และ $MTD_{Initial}$	109
ตารางที่ 5-3 ตารางสรุปปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ในส่วนผสม (Asphalt content)	112
ตารางที่ 5-4 ตารางสรุปคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement properties)..	114
ตารางที่ 5-5 ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยเพื่อหาค่า a, a + b และ c จากผลการทดสอบค่า ความต้านทานการลื่นไถล (BPN, DFT_{20}) ในห้องปฏิบัติการ	120
ตารางที่ 5-6 ผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ของความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า a, a + b และ c กับตัวแปรต่าง ๆ.....	121
ตารางที่ 5-7 เกณฑ์ความสัมพันธ์ในการกำหนด R^2	121
ตารางที่ 5-8 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติของตัวแปรต่าง ๆ ด้วยวิธี T-Test จาก ANOVA.....	123
ตารางที่ 5-9 ตารางสรุปตัวแปรในการทำนายค่า a, a + b และ c	125

ตารางที่ 5-10 ค่า Regression Parameter ชุด A (Series A) และ ชุด B (Series B) สำหรับ ทำนายค่า $a + b$	127
ตารางที่ 5-11 ค่า Regression Parameter สำหรับทำนายค่า a	127
ตารางที่ 5-12 ค่า Regression Parameter สำหรับทำนายค่า c	127
ตารางที่ 6-1 ตารางสรุปความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ $a, a + b, c$ กับตัวแปรต่าง ๆ	139
ตารางที่ 6-2 ตารางสรุปค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ทดสอบด้วย BPT.....	140
ตารางที่ 6-3 ตารางสรุปค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ทดสอบด้วย DFT.....	141



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 แรงต้านทานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวทางและล้อพาหนะ	5
รูปที่ 2-2 ความยาวคลื่นบนผิวถนน	7
รูปที่ 2-3 ลักษณะพื้นผิวต่าง ๆ บนผิวถนน	7
รูปที่ 2-4 เครื่องเร่งการขัดสี (Three-Wheel Polishing Device : TWPD).....	11
รูปที่ 2-5 แผ่นจานหมุนจะเชื่อมติดกับแท่งสี่เหลี่ยมยึดกับมอเตอร์ที่หมุนแบบอิสระ	11
รูปที่ 2-6 มอเตอร์ควบคุมเครื่องเร่งการขัดสี (TWPD).....	12
รูปที่ 2-7 ระบบสเปรย์น้ำเพื่อจำลองสภาพผิวถนนแบบเปียก (Wet Condition).....	12
รูปที่ 2-8 เครื่องมือทดสอบ British Pendulum Tester (BPT)	13
รูปที่ 2-9 เครื่องทดสอบ Dynamic Friction Tester (DFT).....	14
รูปที่ 2-10 การรื้อหรือตัดชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าโดยวิธี Ripping	15
รูปที่ 2-11 การรื้อหรือตัดชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าแบบเย็น (Cold Milling)	15
รูปที่ 2-12 การย่อยชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า แล้วนำไปทำ Stock Pile	16
รูปที่ 2-13 เครื่อง Pre-heater.....	17
รูปที่ 2-14 เครื่อง Re-mixer (จาก Wirtgen GmbH).....	17
รูปที่ 2-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละแอสฟัลต์ซีเมนต์กับคุณสมบัติต่าง ๆ	20
รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	36
รูปที่ 3-2 วัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin aggregates)	37
รูปที่ 3-3 วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP).....	37

รูปที่ 3-4 ลักษณะการทำงานของเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)	38
รูปที่ 3-5 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM	41
รูปที่ 3-6 ร่อนตัวอย่างผ่านตะแกรง 9.5 มิลลิเมตร ในการทดสอบ AIV	42
รูปที่ 3-7 อบตัวอย่างในตู้อบ	43
รูปที่ 3-8 เตรียมตัวอย่างใส่กระบอกตวง	43
รูปที่ 3-9 ติดตั้งตัวอย่างเข้ากับเครื่องมือ	44
รูปที่ 3-10 ร่อนตัวอย่างผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร ในการทดสอบ AIV	44
รูปที่ 3-11 เตรียมตัวอย่างลงในกระบอกเหล็ก	46
รูปที่ 3-12 เหมวล์วัสดุออกจากกระบอกตวงลงในแบบเหล็กทรงกระบอก	47
รูปที่ 3-13 นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ	47
รูปที่ 3-14 ร่อนตัวอย่างผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร ในการทดสอบ ACV	48
รูปที่ 3-15 เครื่องขัด (Accelerated Polishing Machine)	49
รูปที่ 3-16 เครื่องวัดความต้านทานการสิ้นไถล (British Portable Tester)	50
รูปที่ 3-17 ร่อนตัวอย่างผ่านตะแกรง	51
รูปที่ 3-18 ล้างตัวอย่างและผึ่งให้แห้ง	51
รูปที่ 3-19 เรียงตัวอย่างหินลงในแบบ	52
รูปที่ 3-20 วางเหล็กเสริมลงบนตัวอย่าง	52
รูปที่ 3-21 หล่อตัวอย่างด้วยปูนซีเมนต์กับทรายละเอียด	53
รูปที่ 3-22 ทิ้งตัวอย่างแข็งตัว	53
รูปที่ 3-23 ถอดตัวอย่างออกจากแบบ และตกแต่งผิวหน้าตัวอย่าง	53
รูปที่ 3-24 บ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 7-14 วัน	54

รูปที่ 3-25 นำตัวอย่างใส่วงล้อเหล็ก.....	54
รูปที่ 3-26 เดินเครื่องขัดแผ่นด้วยผงหยาบ	55
รูปที่ 3-27 หยุดเครื่องทดสอบและนำตัวอย่างออกจากเครื่องทดสอบ	55
รูปที่ 3-28 การทดสอบความสึกหรอของหินย่อย กรวดย่อย กรวด.....	56
รูปที่ 3-29 สารตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane).....	59
รูปที่ 3-30 เครื่องสกัดแอสฟัลต์แบบแรงเหวี่ยง (Centrifuge extraction).....	60
รูปที่ 3-31 เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (Centrifuge machine)	60
รูปที่ 3-32 เครื่องกลั่นสารแบบสุญญากาศ (Rotary evaporator machine)	61
รูปที่ 3-33 เข้วัดสุฉิวทางเดิมด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน.....	61
รูปที่ 3-34 นำตัวอย่างใส่เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน.....	62
รูปที่ 3-35 เข้วัดสุฉิวทางเดิมด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน.....	62
รูปที่ 3-36 เครื่องทดสอบ Penetration.....	63
รูปที่ 3-37 เข็มมาตรฐานสำหรับทดสอบเพเนทรชัน.....	64
รูปที่ 3-38 ภาชนะบรรจุตัวอย่าง	64
รูปที่ 3-39 อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ.....	65
รูปที่ 3-40 ภาชนะย้ายตัวอย่าง (Transfer dish).....	66
รูปที่ 3-41 เทอร์โมมิเตอร์	66
รูปที่ 3-42 นาฬิกาจับเวลา.....	67
รูปที่ 3-43 แบบ (Mold).....	70
รูปที่ 3-44 อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ.....	70
รูปที่ 3-45 เครื่องดึง	71
รูปที่ 3-46 แผ่นทองเหลืองสำหรับวางแบบหล่อตัวอย่าง	71

รูปที่ 3-47 ตะแกรงเบอร์ 50	71
รูปที่ 3-48 เครื่องวงแหวนกับลูกปืน.....	73
รูปที่ 3-49 วงแหวนทองเหลือง	74
รูปที่ 3-50 ลูกปืนเหล็กกล้า ตัวนำศูนย์ (ball-centering guide)	74
รูปที่ 3-51 แผ่นทองเหลือง	75
รูปที่ 3-52 เตรียมวัสดุมวลรวมเข้าเตาอบ	80
รูปที่ 3-53 ให้อุณหภูมิแอสฟัลต์ซีเมนต์	81
รูปที่ 3-54 นำมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมให้เข้ากัน	81
รูปที่ 3-55 ใส่ตัวอย่างลงในแบบ และแช่ตัวอย่างกันเข้าเครื่องทดสอบ	82
รูปที่ 3-56 นำตัวอย่างเข้าเครื่องบดอัด.....	82
รูปที่ 3-57 นำตัวอย่างออกจากแบบ และทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง	82
รูปที่ 3-58 แช่ตัวอย่างในน้ำก่อนการทดสอบเสถียรภาพ	83
รูปที่ 3-59 การทดสอบเสถียรภาพ และการไหล	84
รูปที่ 3-60 ให้ความร้อนกับวัสดุผิวทางเก่า (RAP)	85
รูปที่ 3-61 ผสมวัสดุผิวทางเก่ากับวัสดุซีเมนต์ใหม่	85
รูปที่ 3-62 ชั่งน้ำหนักวัสดุมวลรวม	86
รูปที่ 3-63 ผสมวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้เข้ากัน.....	86
รูปที่ 3-64 เตรียมส่วนผสมที่ผสมเรียบร้อยแล้ว	86
รูปที่ 3-65 เตรียมแบบหล่อสำหรับขึ้นแผ่นแอสฟัลต์คอนกรีต	87
รูปที่ 3-66 เทส่วนผสมลงในแบบหล่อ	87
รูปที่ 3-67 ทิ้งตัวอย่างไว้ให้เย็น และนำออกจากแบบ	87

รูปที่ 3-68 ติดตั้งแผ่นตัวอย่างเข้าเครื่องเร่งการขัดสี และเดินเครื่องทดสอบตามจำนวนรอบขีด	88
รูปที่ 3-69 ทดสอบความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ British Pendulum Tester.....	88
รูปที่ 3-70 ทดสอบความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ Dynamic Friction Tester.....	89
รูปที่ 4-1 ผลทดสอบ XRD ของวัสดุมวลรวมประเภทหินปูน (สีขาว)	92
รูปที่ 4-2 ผลทดสอบ X-Ray Diffractometer (XRD) ของวัสดุมวลรวมใหม่ และวัสดุมวลรวมผิวทางเก่า	93
รูปที่ 4-3 ผลทดสอบ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ของวัสดุมวลรวมใหม่ และผิวทางเก่า	94
รูปที่ 4-4 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ของวัสดุมวลรวมประเภทหินปูน.....	95
รูปที่ 4-5 Scanning electron microscope (SEM) ของวัสดุมวลรวมใหม่.....	96
รูปที่ 4-6 Scanning electron microscope (SEM) ของวัสดุมวลรวมผิวทางเก่า.....	96
รูปที่ 4-7 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ และการไหล	99
รูปที่ 4-8 ผลการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength).....	100
รูปที่ 4-9 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus).....	101
รูปที่ 4-10 ผลทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ BPT	102
รูปที่ 4-11 ผลทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ DFT	103
รูปที่ 5-1 ตัวอย่าง curve fitting จากสมการ Weibull distribution ของอัตราส่วนผสม V100	109
รูปที่ 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการลื่นไถลเริ่มต้นของ BPN และ DFT กับร้อยละปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า.....	112

รูปที่ 5-3 ความหมายของ Regression coefficients – (a) Terminal value, (a + b) Initial value และ (c) Rate of change.....	116
รูปที่ 5-4 ขั้นตอนการพัฒนาสมการทำนายค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต	118
รูปที่ 5-5 ตัวอย่าง Regression Analysis ด้วยโปรแกรมภาษา Python เพื่อหาค่า a, a + b และ c	119
รูปที่ 5-6 ผลทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ BPT	128
รูปที่ 5-7 ผลทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ BPT	128
รูปที่ 5-8 ผลทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ DFT	129
รูปที่ 5-9 ผลทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยไถลด้วยเครื่องมือ DFT.....	129
รูปที่ 5-10 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ BPT (G1 : V100).....	130
รูปที่ 5-11 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ DFT (G1 : V100)	130
รูปที่ 5-12 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ BPT (G1 : R50:V50).....	131
รูปที่ 5-13 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ DFT (G1 : R50:V50).....	131
รูปที่ 5-14 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ BPT (G1 : R100).....	132
รูปที่ 5-15 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ DFT (G1 : R100)	132
รูปที่ 5-16 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ BPT (G2 : CR50:FV50_1).....	133

รูปที่ 5-17 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ DFT (G2 : CR50:FV50_1).....	133
รูปที่ 5-18 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ BPT (G2 : CV50:FR50_1).....	134
รูปที่ 5-19 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ DFT (G2 : CV50:FR50_1).....	134
รูปที่ 5-20 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ BPT (G2 : CV50:FR50_2).....	135
รูปที่ 5-21 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ DFT (G2 : CV50:FR50_2).....	135
รูปที่ 5-22 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ BPT (G2 : CR50:FR50_1).....	136
รูปที่ 5-23 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ DFT (G2 : CR50:FR50_1).....	136
รูปที่ 5-24 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ BPT (G2 : CR50:FR50_2).....	137
รูปที่ 5-25 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ DFT (G2 : CR50:FR50_2).....	137

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันโครงข่ายถนนทั่วประเทศมีปริมาณเพิ่มขึ้นเพื่อตอบสนองทางด้านระบบคมนาคม ซึ่งร้อยละ 90 เป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (ลักษณะ จันทรโชติ, 2016) ในขณะที่เดียวกันนั้นปริมาณการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้ผิวทางเสื่อมสภาพ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้งาน (Performance) ของผิวทางลดลง รวมไปถึงค่าความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance) ของผิวทางไม่เพียงพอ อาจเป็นสาเหตุก่อให้เกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน ในปัจจุบันงานวิจัยในประเทศไทยมีเกณฑ์ประเมินค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือทดสอบชนิดต่าง ๆ เช่น เครื่องมือ British Pendulum Tester (BPT) ซึ่งแสดงค่าการวัดเป็น British Pendulum Number (BPN) เครื่องมือทดสอบ Dynamic Friction Tester (DFT) แสดงการวัดค่าเป็น Friction (μ) เป็นต้น และจากการศึกษาพบว่ามีการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากผิวทางชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ผิวทางคอนกรีต และผิวทางที่ฉาบผิวหน้าด้วยวัสดุเพิ่มประสิทธิภาพค่าความเสียดทาน

เมื่อถนนเสื่อมสภาพหรือได้รับความเสียหายนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบ และปรับปรุงซ่อมแซมถนนให้มีสภาพพร้อมใช้งานอยู่เสมอ ซึ่งในการปรับปรุงซ่อมแซมหรือก่อสร้างผิวทางใหม่นั้น ส่งผลทำให้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดลดน้อยลง จากงานวิจัยต่างประเทศพบว่าวัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) เป็นวัสดุที่ถูกขุดหรือจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกเพื่อนำกลับมาปูผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา มุ่งเน้นศึกษาทางด้านประสิทธิภาพการใช้งาน (Performance) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของผิวทางเก่าด้วยกระบวนการ และองค์ความรู้ที่แตกต่างกัน แต่สำหรับการศึกษาทางด้านการออกแบบวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของผิวทางเก่าให้มีความปลอดภัย (Safety) นั้น มีการศึกษาอย่างจำกัด

โดยหลักเกณฑ์ที่สำคัญในการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นพิจารณาจากประสิทธิภาพการใช้งาน (Performance) และความปลอดภัย (Safety) ของวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างผิวทาง ซึ่งในประเทศนั้นยังไม่มีกรกล่าวถึงข้อกำหนดในการออกแบบวัสดุที่ใช้ทำผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเก่า นั้นให้มีความปลอดภัย และมีความเหมาะสมตั้งแต่กระบวนการออกแบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรม และวิเคราะห์ค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเก่า เพื่อเป็นแนวทางในการนำวัสดุผิวทางเก่ามาใช้ประโยชน์สูงสุดในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม (Asphalt hot-mix recycling) เปรียบเทียบกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสม (Hot-Mix Asphalt)

1.2.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรม และวิเคราะห์ค่าความต้านทานการลื่นไถลผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเก่า (Asphalt hot-mix recycling) จากการจำลองสภาพการใช้งานภายใต้สภาพการจราจรที่ระดับต่าง ๆ โดยใช้เครื่องเร่งการขัดสี เปรียบเทียบกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสม (Hot-mix Asphalt)

1.2.3 เพื่อออกแบบวิธีการหาอัตราส่วนผสมของผิวทางเก่า (Asphalt hot-mix recycling mixture) ที่ส่งผลให้ค่าความปลอดภัย (Safety) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีความเหมาะสมทั้งในเบื้องต้น และการใช้งานในระยะยาว เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการนำวัสดุผิวทางเก่ามาใช้ประโยชน์สูงสุดในอนาคต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การคัดเลือกวัสดุ

- (1) วัสดุมวลรวมใหม่ ประเภทหินปูน (Virgin Aggregate) จำนวน 1 แหล่ง
- (2) วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) จำนวน 1 แหล่ง
- (3) แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) เกรด AC 60-70

1.3.2 การออกแบบสูตรส่วนผสม

- (1) อัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน (Hot-mix Asphalt) จำนวนอย่างน้อย 1 สูตร
- (2) อัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่วัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม (Hot-mix Recycling) โดยไม่มีการใช้สารเติมแต่ง (Additive) และสารฟื้นฟูคุณภาพ (Rejuvenator) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติจำนวนอย่างน้อย 5 สูตร

1.3.3 การจำลองสภาพการใช้งาน และทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถล

- (1) จำลองสภาพการใช้งานตัวอย่างด้วยเครื่องเร่งการขัดสี (TWPD) จำนวนรอบการขัดอ้างอิงการศึกษาจากสถาบันวิจัยของ National Center for Asphalt Technology (NCAT)
- (2) ทดสอบวัดค่าความต้านทานการลื่นไถลของด้วยเครื่องมือทดสอบ British Pendulum Tester (BPT) และเครื่องมือทดสอบ Dynamic Friction Tester (DFT)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุผิวทางเก่า (RAP) กลับมาใช้ก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ให้มีความปลอดภัย และเหมาะสมตั้งแต่กระบวนการออกแบบเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการนำวัสดุผิวทางเก่ามาใช้ประโยชน์สูงสุดในอนาคต

1.4.2 ได้ทราบถึงการออกแบบวิธีการหาอัตราส่วนผสมของผิวทางเก่า (Asphalt hot-mix recycling mixture) ที่ส่งผลให้ค่าความปลอดภัยของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีความเหมาะสมทั้งในเบื้องต้น และการใช้งานในระยะยาวเพื่อเป็นแนวทางพัฒนามาตรฐานการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมในอนาคต

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษา และรวบรวมรวมเอกสารงานวิจัยทั้งใน และต่างประเทศ

1.5.2 คัดเลือกแหล่งวัสดุมวลรวม และทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

1.5.3 ออกแบบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม และผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมด้วยวิธีการออกแบบมาร์แชล

1.5.4 เตรียมแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมจากการออกแบบอัตราส่วนผสม

1.5.5 นำแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมมาจำลองสภาพการใช้งานด้วยเครื่องเร่งการขัดสี (TWPD) จำนวนรอบขัดอ้างอิงจากการศึกษาสถาบันวิจัยของ National Center for Asphalt Technology (NCAT)

1.5.6 ทดสอบวัดค่าความต้านทานการลื่นไถลของแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมด้วยเครื่องมือทดสอบ British Pendulum Tester (BPT) และเครื่องมือทดสอบ Dynamic Friction Tester (DFT)

1.5.7 ศึกษาพฤติกรรม และวิเคราะห์ค่าความต้านทานการลื่นไถลผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของวัสดุผิวทางเก่า

1.5.8 สรุปผลงานวิจัย

บทที่ 2

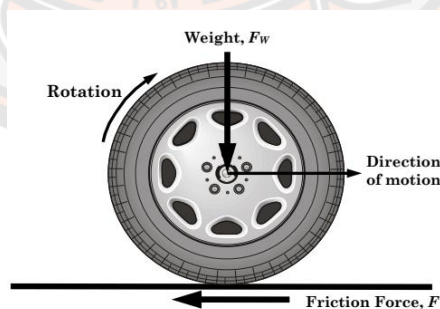
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่องนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรม และวิเคราะห์ค่าความต้านทานการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเก่าในบดนี้เป็นการทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีหัวข้อดังนี้

- 2.1 ทฤษฎีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of Friction: μ)
- 2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสภาพความเสียดทานของผิวทาง
- 2.3 ค่าแนะนำสำหรับค่าความเสียดทานที่เหมาะสม
- 2.4 เครื่องมือการจำลองสภาพการใช้งาน และหาค่าความเสียดทานของผิวทาง
- 2.5 วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP)
- 2.6 มาตรฐานการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตมาตรฐานการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์
- 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2.8 บทสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of Friction: μ)

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน คือ แรงต้านทานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวทางและล้อพาหนะซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1-1



รูปที่ 2-1 แรงต้านทานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวทางและล้อพาหนะ

(NCHRP, 2009)

$$\mu = \frac{F}{F_w} \quad (1-1)$$

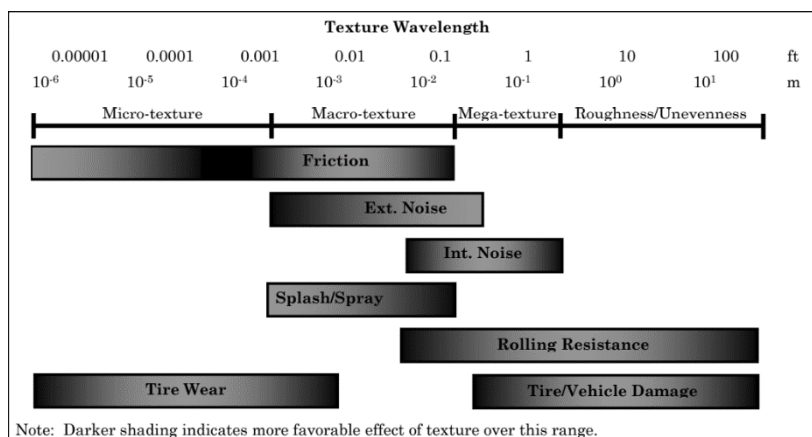
โดยที่ μ = ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
 F = แรงเสียดทานในแนวสัมผัส
 F_w = น้ำหนักรถยนต์ที่กระทำกับล้อในแนวตั้ง

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความเสียดทานของผิวทาง

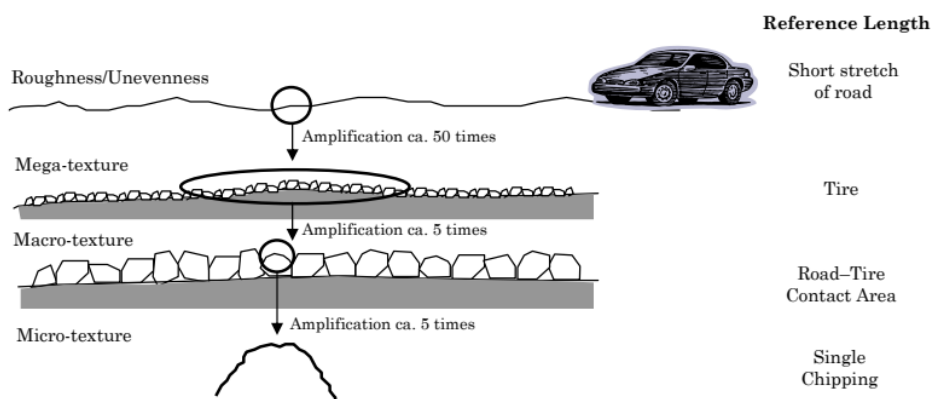
ปัจจัยที่ส่งผลต่อสภาพความเสียดทานของผิวทางแบ่งออกเป็น 4 ประเภทคือ พื้นผิวถนน คุณลักษณะของล้อยาง คุณลักษณะของการใช้รถ และสภาพแวดล้อมอื่น ๆ

2.2.1 พื้นผิวถนน (Pavement Surface Texture) ซึ่งถูกกำหนดโดยความยาวคลื่น (Wavelength, λ) และแอมพลิจูด (Peak-to-Peak Amplitude, A) วัดค่าความเปลี่ยนแปลงจากจุดสูงสุดของการเคลื่อนที่ทางด้านหนึ่งไปจนถึงจุดต่ำสุดการเคลื่อนที่ในอีกด้านหนึ่ง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระดับดังนี้

- (1) **Micro-Texture** ($\lambda < 0.5$ มิลลิเมตร และ $A = 1$ ถึง 500 ไมโครเมตร) คุณภาพความขรุขระของพื้นผิวอยู่ที่ระดับเล็กมาก (Microscopic Level) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของคุณสมบัติผิวทางของอนุภาคมวลรวมภายในวัสดุเนื้ออย่างมะตอยและคอนกรีต
- (2) **Macro-Texture** ($\lambda = 0.5$ ถึง 50 มิลลิเมตร และ $A = 0.1$ ถึง 20 มิลลิเมตร) คุณภาพความขรุขระของผิวทางกำหนดจากคุณสมบัติวัสดุผสม (ขนาด รูปร่าง และขนาดคละของมวลรวม) และวิธีการปูผิวทางในสนาม
- (3) **Mega-Texture** ($\lambda = 50$ ถึง 500 มิลลิเมตร และ $A = 0.1$ ถึง 50 มิลลิเมตร) พื้นผิวชนิดนี้มีขนาดความยาวคลื่นเท่ากับขนาดของพื้นผิวสัมผัสของยางและผิวถนน



รูปที่ 2-2 ความยาวคลื่นบนผิวถนน
(NCHRP, 2009)



รูปที่ 2-3 ลักษณะพื้นผิวต่าง ๆ บนผิวถนน
(NCHRP, 2009)

2.2.2 คุณลักษณะของล้อยาง (Tire Characteristics)

- (1) การออกแบบล้อยาง โดยทั่วไปการออกแบบล้อยางจะเลือกลักษณะการออกแบบอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างด้านความทนทานต่อการสึกหรอนหรือด้านความเสียดทาน ล้อยางที่มีเนื้อยางที่แข็งสามารถทนทานต่อการสึกหรอมากกว่าล้อยางที่มีเนื้อยางอ่อน แต่ล้อยางที่มีเนื้อยางอ่อนจะช่วยให้ล้อมีความเสียดทานได้ดีกว่า แต่ในสภาพพื้นผิวถนนเปียกและใช้ความเร็วสูงเนื้อยางแข็งจะให้ความเสียดทานได้ดีกว่า

(2) การออกแบบดอกยาง และการเติมลมยางล้อย่าง ดอกยางที่ถูกออกแบบมา ในสภาพที่ดีจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความเสียดทานได้และสามารถ ช่วยรีดน้ำบนผิวสัมผัสระหว่างล้อรถและผิวถนนเปียกได้ดี ลมยางที่มีปริมาณ มากหรือน้อยเกินไปส่งผลต่อค่าความเสียดทาน

2.2.3 คุณลักษณะของการใช้รถ (Vehicle Operational Characteristics) คุณลักษณะ ของการใช้รถ ได้แก่ ความเร็ว อากาศล้อเลื่อน น้ำหนักรถ และชนิดของรถ ความเร็วของยานพาหนะ เป็นปัจจัยสำคัญต่อความเสียดทาน ความเร็วที่เพิ่มขึ้นการรีดน้ำบนผิวถนนเปียกลดลง ส่งผลให้ ประสิทธิภาพในการเบรกลดลง สำหรับอาการล้อเลื่อนเกิดจากสภาวะอุปกรณ์ห้ามล้อได้ลื่นคล้อยให้หยุด นิ่งแล้วล้อรถเกิดการลื่นไถลไปบนผิวถนน ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นถูกแก้ไขด้วยระบบ ABS (Anti – lock Braking System) เพื่อช่วยรักษาสมดุลของความเร็วล้อและความเร็วรถ

2.2.4 สภาพแวดล้อมอื่น ๆ (Environmental Factors) บนสภาพพื้นผิวถนนเปียก หรือ มีสิ่งเปื้อน เช่น โคลน น้ำมัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพความเสียดทานลดลง รวมถึงฤดูกาล เมื่อฤดูกาลที่แห้งแล้งเป็นระยะเวลายาวนานส่งผลให้เกิดฝุ่นละอองปกคลุมผิวถนนส่งผลทำให้ค่า ความเสียดทานต่ำกว่าช่วงฤดูฝนเนื่องจากน้ำฝนได้ชำระล้างฝุ่นตะกอนออกไปจากผิวถนน

2.3 ค่าแนะนำสำหรับค่าความเสียดทานที่เหมาะสมสำหรับ

จากการศึกษาเกณฑ์ค่าระดับแนะนำสำหรับกรณีใช้ค่าความเสียดทานเป็นตัวชี้วัดเพื่อ เป็นเครื่องมือในการวางแผนซ่อมบำรุง ในระดับโครงข่ายได้ทำการศึกษาวางแผนซ่อมบำรุงผิวทาง ซึ่งปัจจุบันในประเทศไทยแบ่งเกณฑ์ออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่ เกณฑ์ระดับพึงระวัง (Investigatory Level) และระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level) ในรูปแบบของค่าความเสียดทาน (μ)

2.3.1 ค่าระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไขของต่างประเทศ

ค่าระดับพึงระวัง คือ ระดับค่าความเสียดทานเริ่มมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วอย่างมีนัยสำคัญ เป็นพื้นที่ควรระมัดระวัง อาจติดตั้งป้ายเตือนแก่ผู้ใช้ทาง เพิ่มความถี่ในการตรวจสอบสภาพผิวทาง

ค่าระดับปรับปรุงแก้ไข คือ ระดับที่ค่าความเสียดทานของสายทางบริเวณนั้นควรได้รับการ ปรับปรุงแก้ไขอย่างเร่งด่วน

เกณฑ์พิจารณาค่าความเสียดทานของผิวทางในประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศออสเตรเลีย และประเทศนิวซีแลนด์ ได้พิจารณาเกณฑ์ระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไขแสดงดังตารางที่ 2-1 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวทางที่ระดับพึงระวังของ ทางโค้ง ทางตรง และทางแยก และ ทางลาดชัน ของประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศออสเตรเลีย และประเทศนิวซีแลนด์โดยช่วงสำหรับ ค่าระดับพึงระวังในต่างประเทศนั้นจะถูกใช้พิจารณาว่าเป็นถนนเป็น Major Road หรือ Minor Road

ตารางที่ 2-1 สัมประสิทธิ์ความเสียหายของผิวทางที่ระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไข
ในงานวิจัยต่างประเทศ

เกณฑ์สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย (μ)	ออสเตรเลีย	นิวซีแลนด์	สหรัฐอเมริกา
ระดับพึงระวัง (Investigatory Level)	0.45 - 0.50	0.45 - 0.55	0.45 - 0.55
ระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level)	0.30 - 0.40	0.30 - 0.40	0.30 - 0.40

(กรมทางหลวง, 2018)

จากตารางที่ 2-1 พบว่าเกณฑ์แต่ละประเทศมีความคล้ายกันคือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของผิวทางอยู่ในช่วง 0.35 - 0.45 ซึ่งกำหนดช่วงจากประเภทถนนและปริมาณจราจรนั้น ๆ นำมาใช้พิจารณาว่าเป็นถนน Major Road หรือ Minor Road ซึ่งมีนิยาม ได้แก่ ปริมาณจราจรสะสม (AADT) > 2,500 คันต่อช่องจราจร ถ้าเป็น Major Road ให้ใช้ค่ามาก ซึ่งพบว่าถนนของกรมทางหลวงมีปริมาณจราจรมากกว่า 2,500 คันต่อช่องจราจร ควรพิจารณาเกณฑ์ที่มากในการกำหนดเกณฑ์ระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไขสำหรับโครงข่ายถนนของกรมทางหลวงเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของผิวทางที่ระดับพึงระวังของต่างประเทศ ลบออกด้วย 0.1 เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของผิวทางที่ระดับปรับปรุงแก้ไข พบว่าค่าที่ระดับปรับปรุงแก้ไขมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายวิกฤตอยู่ถึง ร้อยละ 20 - 50 โดยประมาณ ดังนั้นเกณฑ์มาตรฐานระดับปรับปรุงแก้ไขของต่างประเทศจึงได้เผื่อระดับเพื่อความปลอดภัยไว้มากระดับหนึ่งในด้านความเสียหายของถนน

2.3.2 ค่าระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไขสำหรับประเทศไทย

จากการศึกษางานวิจัยของ กรมทางหลวง (2018) พบว่ามีการแบ่งเกณฑ์เป็น ค่าระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไขเช่น โดยมีแนวคิดจากการกำหนดเกณฑ์ค่าระดับพึงระวังจากอัตราการลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของผิวทางตามอายุการใช้งานของถนน โดยใช้สมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของผิวทางที่เสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานของถนน การกำหนดเกณฑ์ระดับปรับปรุงแก้ไขจะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายวิกฤตของผิวทางเป็นค่าตั้งต้น ร่วมกับค่าการกระจายของข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของผิวทางจากภาคสนาม ณ บริเวณจุดเสี่ยงอันตราย

ตารางที่ 2-2 สรุปค่าระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไขสำหรับประเทศไทย

เกณฑ์ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย (μ) สำหรับประเทศไทย	
ระดับพึงระวัง (Investigatory Level)	ระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level)
0.40 - 0.50	0.30 - 0.45

(กรมทางหลวง, 2018)

นอกจากนี้จากการศึกษางานวิจัยของ กรมทางหลวง (2018) ได้กำหนดเกณฑ์ค่าระดับแนะนำสำหรับกรณีใช้ค่าดัชนีความเสียหายสากล (International Friction Index, IFI) ซึ่งพบว่ามี การกำหนดเกณฑ์ไว้ 2 ระดับ ได้แก่ เกณฑ์ระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงในรูปแบบของค่า IFI การกำหนดเกณฑ์ระดับพึงระวังของค่า IFI จึงคำนึงถึงการลดลงตามอายุการใช้งานของผิวทาง และพบว่าเมื่อตั้งบนสมมติฐานที่ว่าค่าดัชนีความเสียหายสากลของผิวทางที่ระดับปรับปรุงแก้ไข เกิดจากการลดลงจากค่าระดับพึงระวังในช่วงระยะเวลา 1 ปี การกำหนดเกณฑ์ระดับปรับปรุงแก้ไข จะพิจารณาค่าความเสียหายวิกฤตของผิวทางร่วมกับข้อมูลอุบัติเหตุอันคาดว่ามีสาเหตุมาจากค่า ดัชนีความเสียหายสากลของผิวทาง ซึ่งเป็นข้อมูลจากภาคสนาม ณ บริเวณจุดเสี่ยงอันตราย

ตารางที่ 2-3 สรุปค่าระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไขสำหรับประเทศไทยโดยใช้ค่าดัชนีเสียหายสากลเป็นตัวชี้วัด

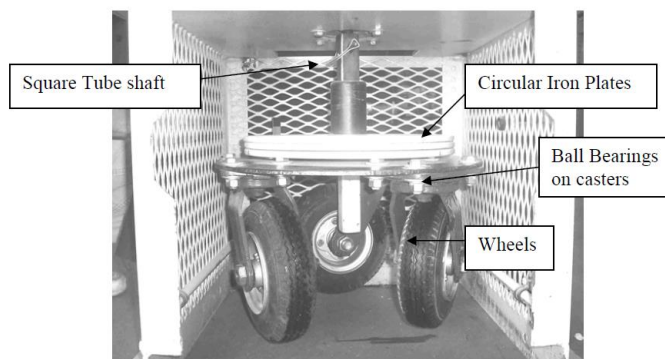
เกณฑ์ระดับ	ค่าดัชนีความเสียหายสากล (IFI)
ค่าระดับพึงระวัง (Investigatory Level)	0.32
ค่าระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level)	0.25

(กรมทางหลวง, 2018)

2.4 เครื่องมือการจำลองสภาพการใช้งาน และเครื่องมือทดสอบค่าความต้านทานการสึกหรบของผิวทาง

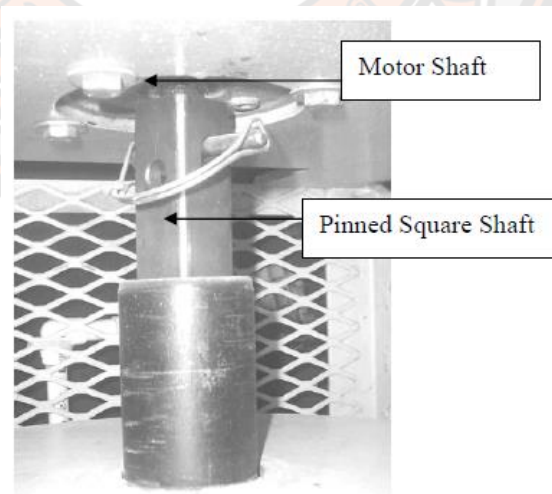
สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรม และวิเคราะห์ค่าความเสียหายของวัสดุแอสฟัลต์ คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเก่า โดยจำลองสภาพพื้นผิวทางที่ผ่านการใช้งานภายใต้ สภาพการจราจรที่ระดับต่าง ๆ โดยใช้เครื่องเร่งการขัดสี (Three-Wheel Polishing Device: TWPD) ซึ่งมีต้นแบบจากสถาบันวิจัยของ National Center for Asphalt Technology (NCAT, 2006) โดยเครื่องมือประกอบไปด้วยล้อขนาด 8 x 3 นิ้ว จำนวน 3 ล้อโดยล้อทั้ง 3 ยึดติดกับลูกปืน (Ball

Bearings) ซึ่งติดอยู่กับแผ่นจานหมุน (Circular Iron Plates) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11-3/16 นิ้ว แสดงดังรูปที่ 2-4

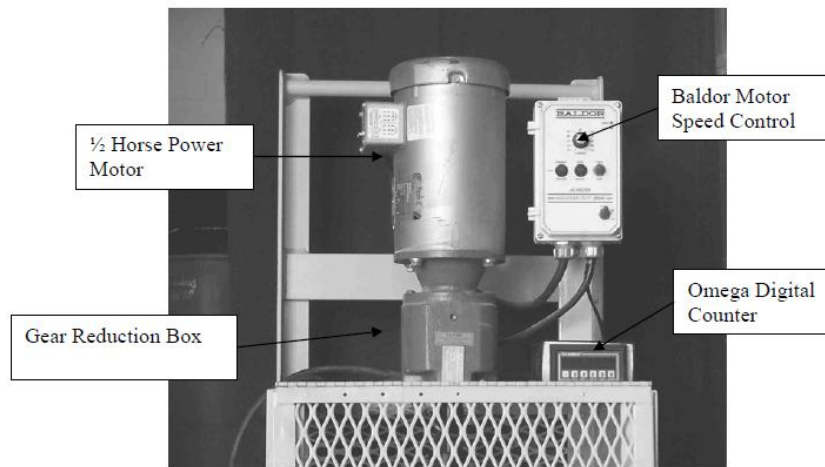


รูปที่ 2-4 เครื่องเร่งการขัดสี (Three-Wheel Polishing Device : TWPD)
(NCAT, 2006)

แผ่นจานหมุนจะเชื่อมติดกับแท่งสี่เหลี่ยมยึดกับมอเตอร์ที่หมุนแบบอิสระ แสดงดังรูปที่ 2-5 ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้มีขนาด 1/2 แรงม้า พวกับเกียร์ทดรอบ (Gear Reduction) เพื่อให้มีได้แรงบิดที่รอบต่ำดีขึ้น และมี Baldor Motor ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ส่วน Omega Digital Counter เป็นตัวนับจำนวนรอบสะสม แสดงดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-5 แผ่นจานหมุนจะเชื่อมติดกับแท่งสี่เหลี่ยมยึดกับมอเตอร์ที่หมุนแบบอิสระ
(NCAT, 2006)



รูปที่ 2-6 มอเตอร์ควบคุมเครื่องเร่งการขัดสี (TWPD)
(NCAT, 2006)

เครื่องมือเร่งการขัดสี (TWPD) จะทำการขัดผิวแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.2 นิ้ว และระหว่างการทดสอบจะจำลองสภาพผิวถนนแบบเปียก (Wet Condition) อยู่เสมอ โดยใช้ท่อ PVC ขนาด 1/4 นิ้วเจาะรู ระยะห่างเท่ากันติดด้านข้างกล่องทดสอบ 3 ด้าน (ยกเว้นด้านหน้า) เพื่อสเปรย์น้ำระหว่างการขัดสีอีกทั้งยังช่วยชำระเศษล้อยางและเศษแอสฟัลต์คอนกรีตที่หลุดร่อน แสดงดังรูปที่ 2-7



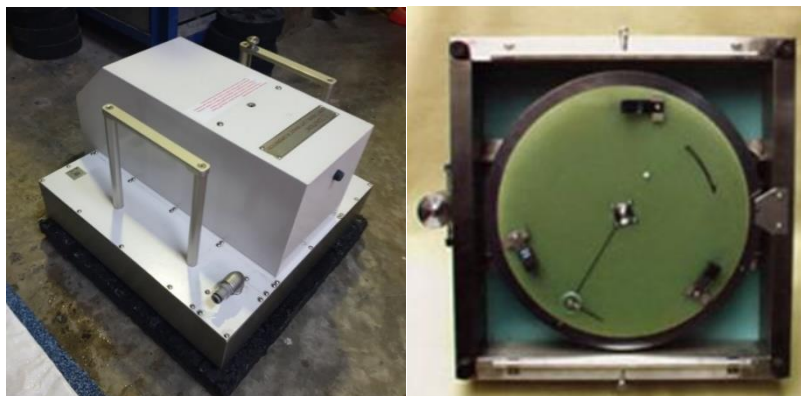
รูปที่ 2-7 ระบบสเปรย์น้ำเพื่อจำลองสภาพผิวถนนแบบเปียก (Wet Condition)
(NCAT, 2006)

อีกทั้งงานวิจัยนี้ได้ทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถล โดยมีการจำลองสภาพพื้นผิวทางที่ผ่านการใช้งานโดยเครื่องเร่งการขัดสี ซึ่งทดสอบจากเครื่องมือทดสอบ British Pendulum Tester (BPT) ตามมาตรฐาน ASTM E303-93 (ASTM, 2008) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดได้ทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการ เครื่องมือประกอบไปด้วยชุดแขนแกว่งโดยที่ปลายแขนแกว่งเป็นลูกตุ้มที่ติดแทนยางทดสอบมีคุณลักษณะเหมือนกับยางรถยนต์ หลักการทดสอบเมื่อปล่อยลูกตุ้มให้สัมผัสกับพื้นผิวทดสอบ ซึ่งความเร็วทดสอบสูงสุด 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 2-8 พลังงานจลน์ที่สูญเสียไปกับความเสียดทานสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นค่า (British pendulum number: BPN) บริเวณจุดทดสอบจะต้องอยู่ในสภาพแบบเปียก ซึ่งตามมาตรฐานกรมทางหลวงพื้นผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีตจะต้องมีค่า BPN ไม่น้อยกว่า 30 หน่วย (กรมทางหลวง, 2018)



รูปที่ 2-8 เครื่องมือทดสอบ British Pendulum Tester (BPT)

เครื่องมือทดสอบ Dynamic Friction Tester (DFT) ตามมาตรฐาน ASTM E1911 (ASTM, 2002) แสดงดังรูป 2-9 ประกอบด้วยฐานหมุนและจานหมุน (Fly wheel) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 350 มิลลิเมตร เชื่อมติดกับ Spring Balance เพื่อลดการแอ่นตัว มีแผ่นยาง (Rubber slider) 3 แผ่นติดอยู่บนจานหมุนระยะห่างเท่ากัน แต่ละแผ่นรับน้ำหนักจากเครื่องข้างละ 11.8 นิวตัน แสดงดังรูป 2-10 ระหว่างการทดสอบจะต้องปล่อยน้ำจากถังน้ำเลี้ยง (Water Supply) ที่อยู่สูงกว่าเครื่องทดสอบ 0.6 เมตร อัตราการไหลของน้ำอยู่ที่ 3.6 ลิตรต่อนาที ความหนาของชั้นฟิล์มน้ำอยู่ที่ 1 มิลลิเมตร แสดงดังรูป 2-11 เพื่อให้พื้นผิวตัวอย่างอยู่ในสภาพเปียก (Wet Condition) หลักการทดสอบคือความเร็วของจานหมุนในแนวราบจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อลื่นอย่างสัมผัสกับพื้นผิวทดสอบ ค่าที่ได้จะแสดงเป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ความเร็วสูงสุดที่ 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แสดงดังรูป 2-12



รูปที่ 2-9 เครื่องทดสอบ Dynamic Friction Tester (DFT)

2.5 วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า (Reclaim Asphalt Pavement: RAP)

วัสดุชั้นผิวทางเก่าหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการขุดหรือผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าโดยใช้หัวกัด (Milling Drum) ขนาดคละของวัสดุชั้นผิวทางเก่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเดินชุดเครื่องจักร และสภาพของหัวกัดโดยการขุดใส (Mill) ผิวทางเก่าออกการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเก่ามาใช้งานใหม่สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

2.5.1 ผสมใหม่ในโรงงาน (Central Plant Recycling) เป็นวิธีการรื้อหรือตัดชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าจากนั้นนำกลับไปผสมใหม่โดยใช้โรงงานผสมแล้วจึงนำกลับมาปูเป็นชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตอีกครั้งโดยมีขั้นตอนดังนี้

2.5.1.1 การรื้อหรือตัดชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า และนำไป Stock Pile ไว้ ซึ่งในการรื้อหรือตัดสามารถเลือกใช้ได้ 3 วิธี ตามลักษณะของเครื่องจักรที่ใช้ คือ

- (1) การตัดโดยวิธี Ripping ที่ขุดเอาชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า โดยไม่ให้มีวัสดุชั้นพื้นทางที่ไม่ใช่พื้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตติดขึ้นมาด้วยซึ่งวิธีนี้ก่อนนำไปทำ Stock Pile ต้องทำการย่อย (Crushing) กำจัดวัสดุไม่พึงประสงค์ และคัดขนาดให้ได้ตามที่ต้องการเสียก่อน



รูปที่ 2-10 การรื้อหรือตัดชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าโดยวิธี Ripping
(กรมทางหลวง, 2012)

- (2) การตัดผิวทางแบบเย็น (Cold Milling) วิธีนี้ต้องมีกระบวนการคัดส่วนที่ไม่เหมาะสมออกด้วยเนื่องจากเครื่องตัดผิวทางแบบเย็นนี้จะตัดผ่าเม็ดหินทำให้ Gradation ของชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามีการเปลี่ยนแปลง เช่นมีปริมาณฝุ่นสูงขึ้น



รูปที่ 2-11 การรื้อหรือตัดชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าแบบเย็น (Cold Milling)
(กรมทางหลวง, 2012)

- (3) การตัดผิวทางแบบร้อน (Hot Milling) โดยใช้เครื่องจักรตัดผิวทางแบบตัดร้อน (Heater Planer) ที่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนผิวทางเก่าและอุปกรณ์ตัดผิววิธีนี้จะมีข้อได้เปรียบคือ ไม่ทำให้ขนาดคละของชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการให้ความร้อน

จะทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า มีลักษณะร่วนแบบ Hot-Mix ปกติทั่วไป สามารถรื้อหรือตัดได้โดยง่าย

2.5.1.2 ก่อสร้างชั้นทางอื่น ๆ จนถึงชั้นพื้นทาง และ Prime Coat ให้เรียบร้อย

2.5.1.3 นำเอาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ทำ Stock Pile ไว้ไปทำ Recycled Asphalt Concrete โดยใช้ Central Plant ซึ่งเป็นโรงงานผสมที่ออกแบบหรือปรับปรุง สำหรับผสมวัสดุ Hot Mix Recycling โดยเฉพาะ จะแตกต่างกับโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยทั่วไป ซึ่งอาจเป็นแบบ Batch Plant แบบ Drum-Mix Plant หรือแบบ Continuous Plant ก็ได้



รูปที่ 2-12 การย่อยชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า แล้วนำไปทำ Stock Pile
(กรมทางหลวง, 2012)

2.5.1.4 ก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้เครื่องจักรและวิธีการ ตามมาตรฐานที่ ทล.-ม. 408 (กรมทางหลวง, 1989)

2.5.2 ผสมใหม่ในที่ (In-Place Recycling) เป็นวิธีการรื้อหรือตัดชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามาผสมใหม่ในที่โดยใช้เครื่องจักรพิเศษ แล้วปูลกลับเป็นชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.5.2.1 ให้ความร้อนแก่ผิวทางเก่า โดยใช้เครื่อง Pre-heater ให้ความร้อนแก่ผิวทางจนมีอุณหภูมิประมาณ 110 - 130 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2-13 เครื่อง Pre-heater
(กรมทางหลวง, 2012)

2.5.2.2 ตัดผิวทางเก่าแบบร้อนและผสม Recycled Asphalt Concrete โดยใช้เครื่อง Re-Mixer ให้ความร้อนผิวทางเก่าต่อเนื่องจากขั้นตอนในข้อ (1) จนผิวทางเก่ามีอุณหภูมิ 140 – 170 องศาเซลเซียสก่อนทำการรื้อหรือตัดซึ่งวิธีการตัดแบบร้อนนี้ จะไม่มีการตัดฝ่าเม็ดหิน และไม่ทำให้เม็ดหินแตก วัสดุที่ได้จะมีลักษณะร่วนแบบ Hot - Mix ปกติทั่วไปซึ่งในขั้นตอนนี้เครื่อง Re - mixer สามารถผสมแอสฟัลต์ คอนกรีตเก่ากับ Hot - Mix ใหม่ หรือ Asphalt Recycling Agent ตามที่ได้ ออกแบบส่วนผสมไว้



รูปที่ 2-14 เครื่อง Re-mixer (จาก Wirtgen GmbH)
(กรมทางหลวง, 2012)

2.5.2.3 การปูส่วนผสม Recycled Asphalt concrete ชุดเครื่อง Re-Mixer สามารถปูส่วนผสม Recycled Asphalt concrete ได้ 2 วิธี คือ

- **ปูแบบชั้นเดียว** เมื่อชุดวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าลำเลียงเข้าสู่ห้องผสม และเพิ่มส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ หรือ Asphalt Recycling Agent ตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้ แล้วปูลงในที่เก่าเป็นชั้นเดียว
- **ปูแบบสองชั้น** เมื่อได้ชุดวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าลำเลียงเข้าสู่ห้องผสม และเพิ่มส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ และ Asphalt Recycling Agent ตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้ แล้วให้ปูส่วนผสม Recycled Asphalt Concrete นี้กลับลงในที่เก่าเป็นชั้นแรกด้วยเตารีดชุดแรก พร้อมกันนั้นจะปูทับด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ทล.-ม.408 (กรมทางหลวง, 1989) ด้วยเตารีดชุดที่ 2

2.5.2.4 การเตรียมและการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่สำหรับผสมทำ Recycled Asphalt Concrete โดยโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น ให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ ทล.-ม. 408 (กรมทางหลวง, 1989) โดยอนุโลม

2.5.2.5 การบดทับชั้นทาง Recycled Asphalt Concrete ให้ดำเนินการบดทับตามมาตรฐานที่ ทล.-ม.408 (กรมทางหลวง, 1989) โดยอนุโลม

2.6 มาตรฐานการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

2.6.1 วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน (Hot - Mix Asphalt)

การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนโดยวิธีมาร์แชลล์ เป็นวิธีการหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อนำไปหาค่าร้อยละแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าร้อยละช่องว่าง (Air void) ประมาณร้อยละ 4 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

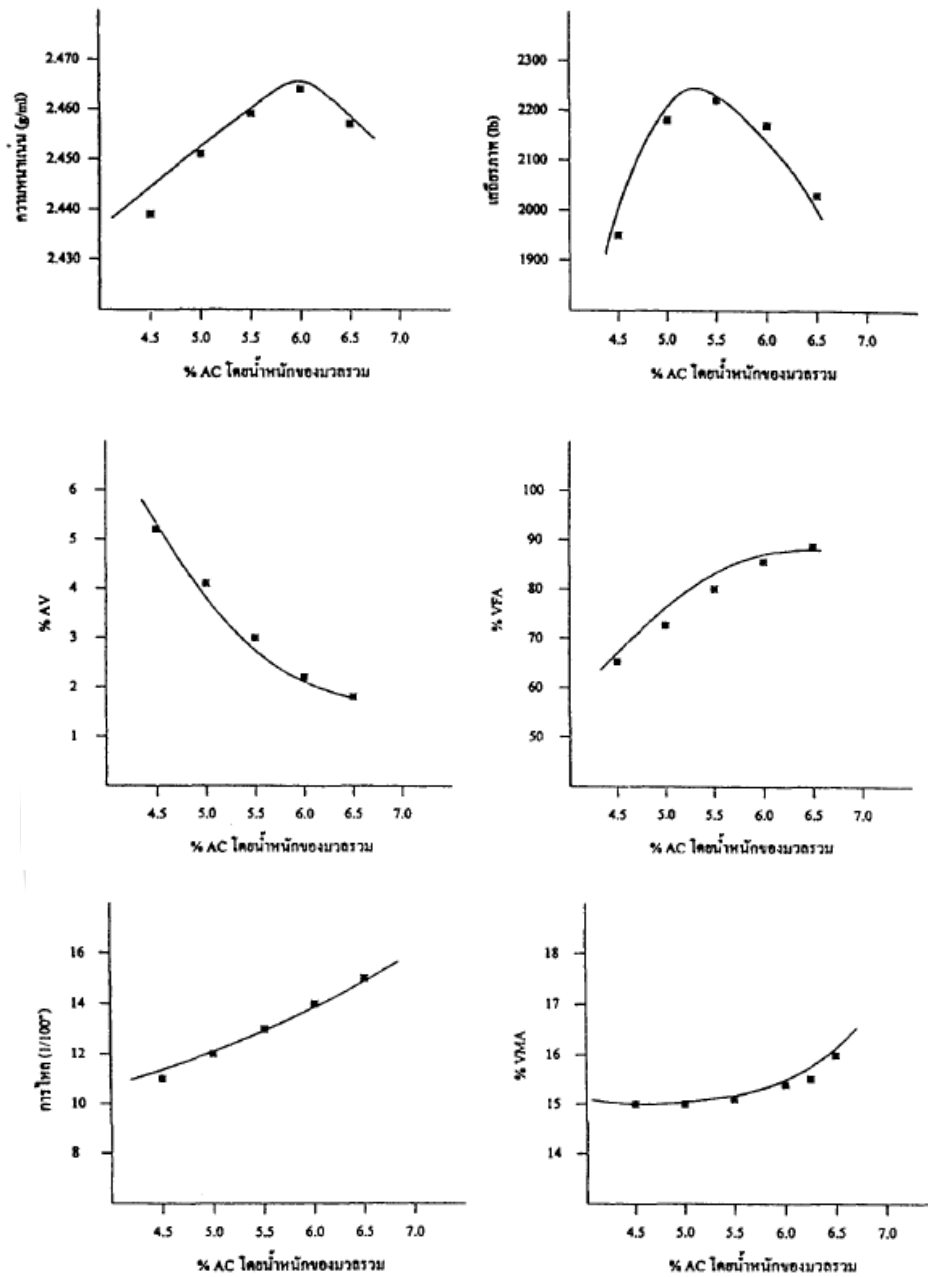
2.6.1.1 เตรียมวัสดุมวลรวม ซึ่งวัสดุมวลรวมจะต้องผ่านข้อกำหนดการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น นำมวลรวมผสมกันให้ได้ขนาด 1,200 กรัม อบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

2.6.1.2 นำแบบสำหรับใส่ตัวอย่างให้ความร้อนเพื่อป้องกันแอสฟัลต์ซีเมนต์ติดแบบ

2.6.1.3 ให้อุณหภูมิแอสฟัลต์ซีเมนต์ประมาณ 170 องศาเซลเซียส

2.6.1.4 เมื่อมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้อุณหภูมิตามต้องการแล้ว นำมาผสมกัน ซึ่งจะต้องผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ร้อยละ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 ของน้ำหนักมวลรวมในแต่ละร้อยละแอสฟัลต์ซีเมนต์ใช้ตัวอย่าง 3 ก้อน ผสมโดยใช้เกรียงกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

- 2.6.1.5 นำแบบมาประกอบเข้าประจำที่เครื่องบดอัด
- 2.6.1.6 ใส่ตัวอย่างลงในแบบ ใช้เกรียงแซะด้านนอก 10 ครั้ง และด้านใน 15 ครั้งในขณะที่อุณหภูมิส่วนผสมอยู่ที่ 150 - 160 องศาเซลเซียส
- 2.6.1.7 นำแบบเข้าในเครื่องบดอัดบดอัดด้วยจำนวน 75 ครั้งต่อด้าน
- 2.6.1.8 ทิ้งตัวอย่างไว้ในแบบให้เย็นแล้วดันออกจากแบบด้วยเครื่องดันตัวอย่างและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง
- 2.6.1.9 นำก้อนตัวอย่างไปทดสอบหาความหนาแน่น
- (1) ชั่งน้ำหนักในอากาศ
 - (2) ชั่งน้ำหนักในน้ำ
 - (3) ชั่งน้ำหนักอิมมิตัวผิวแห้ง ซึ่งแช่น้ำเป็นเวลา 5 นาที แล้วเช็ดให้มีลักษณะอิมมิตัวผิวแห้ง
- 2.6.1.10 นำก้อนตัวอย่างทดสอบค่าเสถียรภาพ และการไหล
- (1) นำตัวอย่างที่ทดสอบความหนาแน่นแล้ว ไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีในอ่างต้มน้ำ
 - (2) เช็ดผิวตัวอย่างให้แห้ง แล้วนำไปใส่แบบทดสอบเสถียรภาพ และนำเข้าเครื่องทดสอบ
 - (3) เดินเครื่องให้แบบเคลื่อนไปสัมผัสกับแท่นกด จนกระทั่งเกจวัด (Dial Gage) ที่ติดกับแหวนวัดแรง (Proving Ring) ชยับตัวให้หยุดเครื่อง ตั้งเกจวัดให้เข็มวัดอยู่ที่เลขศูนย์
 - (4) นำเครื่องวัดการไหลไปวางบนแกนสำหรับการทดสอบการไหล ตั้งเกจวัดให้เข็มอยู่ที่เลขศูนย์
 - (5) เดินเครื่องกดเพื่อทดสอบหาค่าเสถียรภาพ โดยอ่านค่าน้ำหนักสูงสุดที่เกิดจากวงแหวนวัดแรง และอ่านค่าการไหลที่น้ำหนักสูงสุดเช่นกัน
 - (6) ค่าเสถียรภาพที่วัดได้จะต้องปรับแก้ค่าความสูงของก้อนตัวอย่างให้เป็นความสูงมาตรฐาน (63.5 มิลลิเมตร) จากค่า Correlation ratio
 - (7) เมื่อทราบผลทดสอบ จะต้องนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์กับความหนาแน่น เสถียรภาพ การไหล ร้อยละช่องว่างอากาศ ร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม และร้อยละช่องว่างที่แทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ แสดงดังรูปที่ 2-18



รูปที่ 2-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละแอสฟัลต์ซีเมนต์กับคุณสมบัติต่าง ๆ (วัชรินทร์ วิทยกุล, 2001)

ตารางที่ 2-4 ขนาดคละของมวลรวม และปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน

ขนาดที่ใช้เรียก	มิลลิเมตร (นิ้ว)	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19.0 (3/4)	25.0 (1)
	สำหรับชั้นทาง	Wearing Course	Wearing Course	Binder Course	Base Course
ความหนา	มิลลิเมตร	25 - 35	40 - 70	40 - 80	70 - 100
	ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร (นิ้ว)	ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล			
37.5	(1 1/2)				100
25.0	(1)			100	90 - 100
19.0	(3/4)		100	90 - 100	-
12.5	(1/2)	100	80 - 100	-	56 - 80
9.5	(3/8)	90 - 100	-	56 - 80	-
4.75	(เบอร์ 4)	55 - 85	44 - 74	35 - 65	29 - 59
2.36	(เบอร์ 8)	32 - 67	28 - 58	23 - 49	19 - 45
1.18	(เบอร์ 16)	-	-	-	-
0.600	(เบอร์ 30)	-	-	-	-
0.300	(เบอร์ 50)	7 - 23	5 - 21	5 - 19	5 - 17
0.150	(เบอร์ 100)	-	-	-	-
0.075	(เบอร์ 200)	2 - 10	2 - 10	2 - 8	1 - 7
	ปริมาณแอสฟัลต์ร้อยละโดยมวล	4.0 - 8.0	3.0 -	3.0 - 6.5	3.0 - 6.0
	ของมวลรวม		7.0		

ตารางที่ 2-5 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน

รายการ	ชั้นทาง				
	Wearing Course	Wearing Course	Binder Course	Base Course	Shoulder
Aggregate Size	9.5 mm.	12.5 mm.	19.0 mm.	25.0 mm.	25.0 mm.
Blows	75	75	75	75	75
Stability Min.					
N	8,006	8,006	8,006	7,117	7,117
lbs.	1,800	1,800	1,800	1,600	1,600
Flow 0.25 mm. (0.01 in)	8 - 16	8 - 16	8 - 16	8 - 16	8 - 16
Percent Air Voids	3 - 5	3 - 5	3 - 6	3 - 6	3 - 5
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) Min.	15	14	13	12	14
Stability / Flow Min.					
N/0.25 mm.	712	712	712	645	645
lbs./0.01 in.	160	160	160	145	145
Percent Strength Index Min.	75	75	75	75	75

2.6.2 วัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า (Asphalt Hot – Mix Recycling)

การออกแบบส่วนผสมวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า (Recycled Asphalt Concrete) มาตรฐาน ทล.-ม. 410 (กรมทางหลวง, 1999) ทดลองโดยใช้วิธีมาร์แชลล์ เหมือนกับการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน (Hot – Mix Asphalt)

2.6.2.1 แยกเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า (RAP) โดยการอุ่นให้มีความร้อนเท่ากับความร้อนบดอัดก้อนตัวอย่าง

2.6.2.2 ให้ความร้อนวัสดุใหม่ที่ใช้ผสม ได้แก่ แอสฟัลต์ซีเมนต์ หรือสารปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Recycling Agent) วัสดุมวลรวมใหม่

2.6.2.3 ผสมวัสดุใหม่กับแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า (RAP) ที่เตรียมไว้

2.6.2.4 บดอัดก้อนตัวอย่างด้วยเครื่องบดอัดมาร์แชลล์

ส่วนผสมของแอสฟัลต์ผิวทางเก่า (RAP) ที่ออกแบบจะต้องมีลักษณะดังต่อไปนี้

- (1) วัสดุผสมเพิ่มเติมต้องเป็นไปตามข้อกำหนด
 - มวลรวมผสมเพิ่ม ประกอบไปด้วยมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) และมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)
 - วัสดุผสมแทรก ใช้ผสมเพิ่มในกรณีเมื่อผสมมวลรวมหยาบกับมวลรวมละเอียดแล้วมีมวลรวมละเอียดไม่พอในการผสม
 - สารปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ (Hot Agent) ใช้ในกรณีต้องการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ของผิวทางเก่าที่เสื่อมคุณภาพให้กลับมามีคุณภาพตามข้อกำหนดที่ต้องการ ASTM D 4552-86
 - แอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ ที่นำมาใช้จะต้องถูกต้องตามที่ได้ออกแบบไว้
- (2) ขนาดคละของวัสดุมวลรวมทั้งหมดหลังจากการผสมแอสฟัลต์ผิวทางเก่า (RAP) กับมวลรวมใหม่ หรือแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่จะต้องเป็นไปตามตารางที่ 2-6
- (3) เมื่อออกแบบสูตรส่วนผสมแล้วจะต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 2-7
- (4) ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า ขึ้นอยู่กับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ในแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า และปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับประเภทชั้นทางของแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่าที่จะก่อสร้าง
- (5) ปริมาณสารปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ ที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่าที่มีความแข็งแรงเปราะ ให้มีสภาพอ่อนตัวที่เหมาะสม จะได้จากผลทดสอบในการออกแบบส่วนผสม

หมายเหตุ Asphalt Institute แนะนำว่าแอสฟัลต์ผิวทางเก่า (RAP) สามารถใช้ได้ ในปริมาณร้อยละ 20 ถึง ร้อยละ 70

ตารางที่ 2-6 ขนาดคละของมวลรวมภายหลังการผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า

ขนาดที่ใช้เรียก	มิลลิเมตร (นิ้ว)	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19.0 (3/4)	25.0 (1)
สำหรับชั้นทาง		Wearing Course	Wearing Course	Binder Course	Base Course
ความหนา	มิลลิเมตร	25 - 35	40 - 70	40 - 80	70 - 100
ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร (นิ้ว)		ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล			
37.5	(1 1/2)				100
25.0	(1)			100	90 - 100
19.0	(3/4)		100	90 - 100	-
12.5	(1/2)	100	80 - 100	-	56 - 80
9.5	(3/8)	90 - 100	-	56 - 80	-
4.75	(เบอร์ 4)	55 - 85	44 - 74	35 - 65	29 - 59
2.36	(เบอร์ 8)	32 - 67	28 - 58	23 - 49	19 - 45
1.18	(เบอร์ 16)	-	-	-	-
0.600	(เบอร์ 30)	-	-	-	-
0.300	(เบอร์ 50)	7 - 23	5 - 21	5 - 19	5 - 17
0.150	(เบอร์ 100)	-	-	-	-
0.075	(เบอร์ 200)	2 - 10	2 - 10	2 - 8	1 - 7

ตารางที่ 2-7 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า

รายการ	ชั้นทาง				
	Wearing Course	Wearing Course	Binder Course	Base Course	Shoulder
Aggregate Size	9.5 mm.	12.5 mm.	19.0 mm.	25.0 mm.	25.0 mm.
Blows	75	75	75	75	75
Stability Min.					
N	6,672	6,672	6,672	6,672	6,672
lbs.	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
Flow 0.25 mm. (0.01 in)	8 - 16	8 - 16	8 - 16	8 - 16	8 - 16
Percent Air Voids	3 - 6	3 - 6	3 - 6	3 - 6	3 - 5
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) Min.	15	14	13	12	14
Stability / Flow Min.					
N/0.25 mm.	556	556	556	556	556
lbs./0.01 in.	125	125	125	125	125
Percent Strength Index Min.	75	75	75	75	75

2.7 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2-8 สรุปเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง (บทความ/ รายงาน/หนังสือ)	ชื่อวารสาร	สรุปผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับ งานวิจัย
ชลัท ทิพากร เกียรติ (2019)	คุณสมบัติของวัสดุ ผิวทางเก่าที่นำ กลับมาใช้ใหม่ใน การออกแบบ พาราเลลเลอร์ซีล	วารสาร วิศวกรรมเกษม บัณฑิต	ศึกษาการนำวัสดุผิวทางเก่า (RAP) มาใช้ในงานพาราเลลเลอร์ซีล พบว่า RAP เหมาะสำหรับนำมาออกแบบพาราเลลเลอร์ซีลชนิดที่ 3 โดยออกแบบอัตราส่วนผสมระหว่าง RAP กับหินฝุ่น สัดส่วน 0:100, 10:90, 20:80, 30:70, และ 40:60 นำมาทดสอบคุณสมบัติ

			พบว่า
			<ul style="list-style-type: none"> • สัดส่วนของปริมาณ RAP เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลลดลง ซึ่งทดสอบด้วยเครื่องมือ BPT เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า (Aged binder) มีความแข็ง • การนำ RAP กลับมาใช้ในงานฉาบผิวสามารถใช้ได้สูงสุดเพียงร้อยละ 20 ซึ่งมีคุณสมบัติผ่านมาตรฐาน
Izaks et al. (2015)	Hot mix asphalt with high RAP content	Procedia Engineering	<p>ศึกษาการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์ผสมร้อนจาก RAP โดยใช้ RAP ที่ไม่ผ่านการคัดกรองวัสดุ (A7) ออกแบบส่วนผสมร้อยละ 30 และ 50 กับ RAP ที่มีการคัดกรองวัสดุ และแยกขนาด (A6) ออกแบบส่วนผสมร้อยละ 30 โดยออกแบบให้มีความใกล้เคียงกับแอสฟัลต์คอนกรีตจากวัสดุมวลรวมใหม่ และนำมาทดสอบคุณสมบัติมาร์แชลล์ รวมทั้งทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของแอสฟัลต์คอนกรีตได้แก่ Wheel tracking test, Fatigue test, และ Stiffness test จากผลการทดสอบพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> • แอสฟัลต์คอนกรีตจากวัสดุ RAP เมื่อทดสอบคุณสมบัติมาร์แชลล์นั้นไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกล และปริมาตรเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตจากวัสดุมวลรวมใหม่ • แอสฟัลต์คอนกรีตจากวัสดุ RAP มีความต้านทานการเกิดร่องล้อสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตจากวัสดุมวลรวมใหม่

			<p>รวมใหม่ แต่ผ่านตามมาตรฐานของประเทศลัตเวีย</p> <ul style="list-style-type: none"> • แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณ RAP เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยลดความต้านทานความล้า เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ของ RAP มีความแข็งแรงความยืดหยุ่น • การเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตของวัสดุ RAP จะช่วยเพิ่มความทนทาน และความต้านทานต่อความล้าของแอสฟัลต์คอนกรีต
Putra et al. (2019)	Skid resistance performance against temperature change of hot-mix recycled asphalt pavement with added crumb rubber	AIP Publishing	<p>ศึกษาค่าความต้านทานการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผสมรวมใหม่ วัสดุผิวทางเก่า (RAP) และยางรถยนต์เก่า (Crumb Rubber) เป็นส่วนผสม จากผลการทดสอบพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> • ค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ทดสอบด้วยเครื่องมือ BPT ของอัตราส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม แต่จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 45 องศาเซลเซียส • ค่าความต้านทานการลื่นไถล สอดคล้องกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของผิวทาง เนื่องจากปริมาณแอสฟัลต์มีผลต่อค่า BPN เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แอสฟัลต์ซีเมนต์จะถึงจุดอ่อนตัว ทำให้เกิดการเยิ้มของผิวทาง
Hu et al. (2012)	Pavement Performance of Asphalt Surface Cause	Journal of Testing and Evaluation	<p>วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อนำ RAP ที่ได้จากถนนลาดยางเข้ามาศึกษา และปรับปรุงคุณสมบัติ โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้งานเมื่อก่อสร้าง</p>

<p>Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)</p>	<p>ผิวทางใหม่ซึ่งได้ทำการออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุ RAP เป็นส่วนผสม ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 และปรับปรุงคุณสมบัติของ Binder ในวัสดุ RAP ด้วยสารผสมเพิ่ม Rejuvenating จากผลการทดสอบพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> • เมื่อปริมาณ RAP เพิ่มขึ้นความต้านทานต่อความชื้นจะลดลง • การทดสอบความต้านทานการเกิดร่องล้อที่อัตราส่วนผสม RAP ร้อยละ 30 มีความต้านทานการเกิดร่องล้อได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนปกติ • อัตราส่วนผสม RAP ที่ร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยนำมาปูผิวทางและทดสอบค่าความต้านทานการสิ้นเปลือง รวมทั้งประสิทธิภาพการซึมผ่าน จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนของ RAP ที่มีปริมาณเล็กน้อยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้งานของพื้นผิว แต่อัตรา RAP ที่สูงกว่าร้อยละ 20 มีคุณสมบัติไม่เหมาะสมในการใช้งานปูผิวทาง 	
<p>Pawar et al. (2017) Recycling of bituminous pavement by RAP Method</p>	<p>Mangalore Institute of Technology & Engineering</p>	<p>ศึกษาคุณสมบัติมาร์แชลล์ของแอสฟัลต์คอนกรีตจากวัสดุ RAP โดยใช้ปริมาณ RAP ร้อยละ 0, 30 และ 40 ทดสอบคุณสมบัติมาร์แชลล์ของแอสฟัลต์คอนกรีต รวมถึงทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมรวมใหม่และวัสดุผสมรวม RAP จากผลการทดสอบพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> • คุณสมบัติของวัสดุผสมรวม RAP จะให้ค่าสูงกว่าวัสดุผสมรวมใหม่

			<ul style="list-style-type: none"> • คุณสมบัติของมาร์แชลล์ค่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสม RAP ร้อยละ 30 จะให้ค่าสูงกว่าร้อยละ 40 และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนปกติแต่ RAP ที่ร้อยละ 40 ให้ค่าการไหลสูงที่สุด
Vidal et al. (2011)	Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)	Construction and Building Materials	ทำการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มี RAP เป็นส่วนผสม โดยใช้ปริมาณร้อยละ 40 และ 60 นำมาทดสอบ Stiffness modulus Test, Indirect tensile strength Test และ Fatigue Test จากผลการทดสอบพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณ RAP สูงเมื่อผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่แล้วจะให้ค่าที่เหมาะสมที่สุด
Han et al. (2019)	Laboratory Performance of Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and Fine Reclaimed Asphalt Pavement (FRAP) Content	MDPI Academic Open Access Publishing since 1996	<p>ศึกษาประสิทธิภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนของวัสดุ RAP ปริมาณสูง โดยใช้มวลรวมละเอียดของ RAP (FRAP) รวมถึงมีการปรับปรุงแอสฟัลต์ซีเมนต์ใน RAP ด้วย Rejuvenator และยางใหม่ ซึ่งใช้ปริมาณ RAP ร้อยละ 0, 30, 40 และ 50 กับ ปริมาณ FRAP ร้อยละ 10, 15 และ 20 นำมาทดสอบคุณสมบัติมาร์แชลล์และทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของแอสฟัลต์คอนกรีต จากผลการทดสอบพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> • ปริมาณ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาตร FRAP เพิ่มขึ้น • ความต้านทานความล้าจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาตร RAP และ FRAP และไม่ควรใช้ FRAP เกินร้อยละ 15

			<ul style="list-style-type: none"> • ส่วนผสมของแอสฟัลต์ของกรีตที่มี RAP เป็นส่วนผสมจะต้องไม่เกินร้อยละ 40
Johnson et al. (2013)	Recycled Asphalt Pavement: Study of High-RAP Asphalt Mixtures on Minnesota County Roads	Minnesota Department of Transportation Research Services	<p>วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุผสม RAP โดยทดสอบในภาคสนามและห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด Performance Grade ระหว่าง PG 58-28 และ PG 58-34 ออกแบบโดยใช้อัตราส่วนผสมของวัสดุผสม Pit Sand : Crush Rock : Man Sand : RAP โดยออกแบบอัตราส่วนผสมใช้วัสดุ RAP ร้อยละ 0, 25, 40 และ 55 จากผลการทดสอบพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> • การเพิ่มปริมาณ RAP จะทำให้แรงดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้น การแตกร้าวในแอสฟัลต์ซีเมนต์ลดน้อยลง และทนต่ออุณหภูมิสูง
McDaniel (2012)	Evaluation of reclaimed asphalt pavement for surface mixture	Joint Transportation Research Program	<p>ศึกษาผลกระทบของวัสดุ RAP ที่มีคุณภาพ ในสนามและห้องปฏิบัติการ เพื่อหาขีดจำกัดสูงสุดในการใช้ปริมาณ RAP ที่ทำให้มีค่าความต้านทานการเลื่อนไถลเพียงพอ และผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแตกร้าว เนื่องจากอุณหภูมิ โดยออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่าง RAP กับ Stone matrix asphalt และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมระหว่าง RAP กับ Dent graded asphalt โดยใช้ RAP ร้อยละ 0 – 40 จากผลทดสอบพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> • ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าการเพิ่มปริมาณ RAP ที่มี

คุณภาพต่ำส่งผลต่อค่าความเสียหาย และประสิทธิภาพการแตกร้างเนื่องจากอุณหภูมิ แต่เมื่อใช้ปริมาณ RAP ต่ำจะส่งผลเล็กน้อย และปริมาณ RAP ร้อยละ 25 เป็นขีดสูงสุดที่สามารถยอมรับได้

- การทดสอบความเสียหายในสนาม ซึ่งเป็นผิวทางที่มีวัสดุ RAP ที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพการทำงานที่ยอมรับได้หลัง 3-5 ปี ปริมาณการใช้ RAP อยู่ที่ร้อยละ 15-25 หลังจาก 10 ปี ควรใช้ร้อยละ 15
- การทดสอบประสิทธิภาพการแตกร้าง เนื่องจากอุณหภูมิ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เนื่องจากการแตกร้างที่จุดวิกฤติจะน้อยที่สุดที่ปริมาณ RAP ร้อยละ 25 แต่ปริมาณ RAP ร้อยละ 40 ที่มีการปรับปรุงเกรดยาง จะมีอุณหภูมิเนื่องจากการแตกร้างที่จุดวิกฤติมากกว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่มี RAP ซึ่งสรุปได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณ RAP มากกว่าร้อยละ 25 จะต้องมีการปรับปรุงเกรดยางด้วยยางเกรดอ่อน

นิรชร นกแก้ว (2016)	สมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาแชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียน	วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	ศึกษาลักษณะทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสม RAP โดยออกแบบด้วยวิธีมาร์แชลล์ ใช้ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาด ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 จากผลการทดสอบคุณสมบัติ
------------------------	---	---	---

	เพื่อใช้งานใหม่ ต่างกัน		ของมาร์แชลล์พบว่า <ul style="list-style-type: none"> ● RAP มีค่าคุณสมบัติ Density อยู่ระหว่าง 2.397 ถึง 2.402 กรัมต่อมิลลิเมตร ● Air Void อยู่ระหว่างร้อยละ 3.9 ถึง 4.0 ● VMA อยู่ระหว่างร้อยละ 14.6 ถึง 14.7 ● VFB อยู่ระหว่างร้อยละ 73.3 ถึง 72.8 ● ค่าเสถียรภาพอยู่ระหว่าง 2,310 ถึง 2,260 ปอนด์ ● ค่าการไหลอยู่ระหว่าง 12 ถึง 15
Zhao et al. (2013)	Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement	Construction and Building Materials	ทำการเปรียบเทียบระหว่างความต้านทานการเกิดร่องล้อ ความต้านทานความล้า และความไวต่อความชื้น โดยใช้ RAP มาออกแบบอัตราส่วนผสมร้อยละ 0 - 40 และใช้วิธีการผสมแบบอุ่น โดยเติมสารผสมเพิ่มชนิดโฟม และสารผสมเพิ่มชนิดสารเคมี จากการทดสอบพบว่า <ul style="list-style-type: none"> ● แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวิธีอุ่นที่มีวัสดุผิวทางเก่าในปริมาณสูง มีความต้านทานการเกิดร่องล้อ และเกิดความต้านทานความชื้นน้อยกว่าตัวอย่างที่ได้จากการผสมร้อน แต่มีคุณสมบัติดังกล่าวดีกว่าเมื่อมีวัสดุผิวทางเก่าในปริมาณน้อย
Miró et al. (2011)	Evaluation of high modulus mixture behavior with	Construction and Building Materials	งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาค่าโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีตจากวัสดุ RAP ในปริมาณสูงที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 0, 15, 30 และ 50 โดยใช้แอสฟัลต์

	high reclaimed asphalt pavement (RAP) percentages for sustainable road construction		ซีเมนต์เกรดอ่อน ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่การทดสอบ Stiffness modulus, Toughness, Moisture sensitivity, Resistance to rutting and Fatigue resistance จากผลการทดสอบพบว่า <ul style="list-style-type: none"> • แอสฟัลต์คอนกรีตจากวัสดุ RAP ปริมาณมากมีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดี และมีการแนะนำว่าให้ใช้ RAP ที่ร้อยละ 30
Dinis-Almeida et al. (2016)	Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP	Construction and Building Materials	การศึกษานี้ นำ RAP ร้อยละ 100 มาออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้วิธีผสมอุ่น และออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลล์ รวมถึงทำการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานด้วยวิธีการทดสอบ Immersion compression, Moisture sensitivity, Stiffness modulus, Fatigue resistance, Resistance to rutting จากผลการทดสอบพบว่าวิธีดังกล่าวให้ผลเทียบเคียงกับวิธีการผสมร้อน
Su et al. (2009)	Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement	Resources, Conservation and Recycling	ได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ RAP โดยออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์ที่มี RAP ปริมาณร้อยละ 0, 40 และ 70 จากผลการทดสอบพบว่า <ul style="list-style-type: none"> • RAP ปริมาณร้อยละ 40 ใช้ออกแบบเป็นชั้นผิวทางในท้องปฏิบัติการ และในสนามของสนามบินจากการทดลองมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปราศจาก RAP ส่วน RAP ปริมาณร้อยละ 70 จะให้ค่าต้านทานความล้าได้น้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ผสม RAP

Xiao et al. (2009)	Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures	Construction and Building Materials	<p>ได้ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของขนาดของเศษยาง (Crump Rubber Size) และอิทธิพลของอัตราส่วนผสมของ RAP ประเภทต่าง ๆ การออกแบบและการทดลองประกอบด้วย การใช้ขนาดของเศษยางจำนวน 3 ขนาด และประเภทของยาง 2 ชนิดคือ Ambient หรือ Cryogenic ในส่วนผสมที่มี RAP เท่ากับร้อยละ 25 ผลการศึกษาพบว่า</p> <ul style="list-style-type: none"> • การเพิ่มของเศษยางทำให้ค่าช่องว่างระหว่างวัสดุรวมและมีความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อเพิ่มขึ้น
--------------------	---	-------------------------------------	---

2.8 บทสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมทั้งในประเทศ และต่างประเทศในการนำวัสดุผิวทางเก่า (RAP) กลับมาใช้ในงานปูผิวทางใหม่ด้วยกระบวนการ และองค์ความรู้ที่แตกต่างกัน

Hu et al. (2012) ได้นำวัสดุผิวทางเก่า (RAP) มาเป็นส่วนผสมในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต และทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานพบว่าเมื่อใช้ปริมาณผิวทางเก่าเพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มค่าความต้านทานการเกิดร่องล้อ แต่ความต้านทานการเสียหายเนื่องจากความชื้น และประสิทธิภาพการทำงานที่อุณหภูมิต่ำจะลดลง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับวิจัยของ Izaks et al. (2015) ปริมาณผิวทางเก่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานการเกิดร่องล้อสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตปกติ แต่ความต้านทานความล้าลดลง และเมื่อเติมแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่าจะช่วยเพิ่มความทนทาน และต้านทานความล้าได้ดี จากงานวิจัยที่ผ่านมามุ่งเน้นศึกษาทางด้านประสิทธิภาพการใช้งาน (Performance) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเก่าเพื่อประเมินกำลังรับความแข็งแรง ซึ่งให้ผลการศึกษาที่ต่างกันทั้งนี้เนื่องจากวัสดุผิวทางเก่าที่ใช้ศึกษาแต่ละพื้นที่นั้นมีคุณสมบัติ และกระบวนการออกแบบอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน แต่สำหรับการศึกษาทางด้านการออกแบบวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของผิวทางเก่าให้มีความปลอดภัย (Safety) นั้นมีการศึกษาอย่างจำกัด จึงเป็นแนวทางในการศึกษางานวิจัยเรื่องนี้

Kandhal and Foo (1997) พบว่าการนำวัสดุผิวทางเก่า (RAP) กลับมาใช้ในงานปูผิวทางใหม่โดยใช้ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 25 นั้นนอกจากต้องทราบถึงคุณสมบัติวัสดุรวมรวมในผิวทาง

เก่า (Aged aggregates) แล้วต้องทราบถึงคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่า (Aged binder) ด้วย Izaks et al. (2015) นำแอสฟัลต์ซีเมนต์ในวัสดุผิวทางเก่ามาทดสอบคุณสมบัติ ได้แก่ การทดสอบเพเนทรชัน (Penetration Test) การทดสอบอุณหภูมิต่ำสุดในการยึดเกาะ (Fraass Breaking Point Test) และการทดสอบจุดอ่อนตัว (Softening Point Test) พบว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่าให้คุณสมบัติต่ำกว่ามาตรฐานจึงต้องปรับปรุงคุณสมบัติด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ เนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณผิวทางเก่าในส่วนผสมมากกว่าร้อยละ 50 จะส่งผลให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ในส่วนผสมแข็งส่งผลให้ความต้านทานความล้าลดลง โดยการศึกษาที่มีลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ McDaniel (2012) เมื่อใช้ปริมาณผิวทางเก่ามากกว่าร้อยละ 40 ควรปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่าด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ชนิดเกรดอ่อน

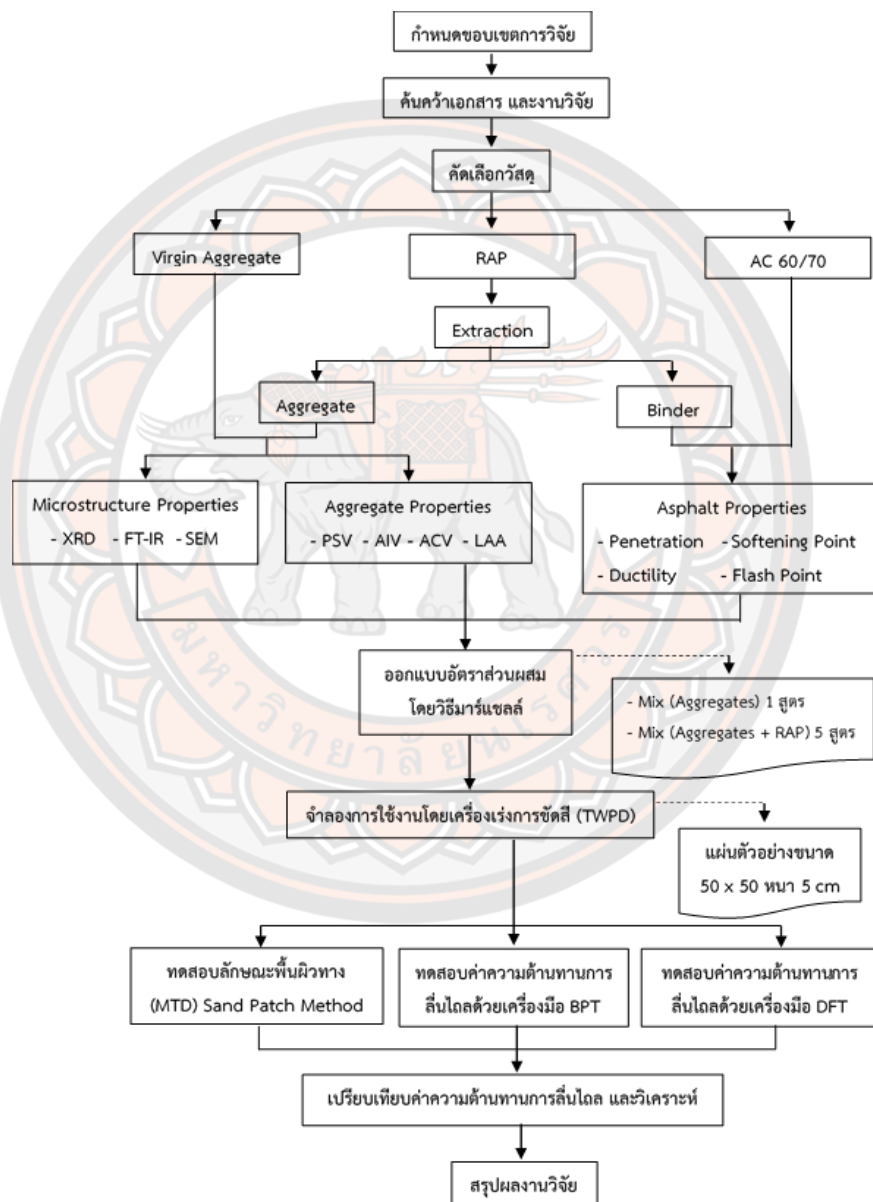
Pawar et al. (2017) พบว่าค่าดัชนีการทดสอบคุณสมบัติวัสดุรวมรวม ได้แก่ Aggregates Impact Value (AIV), Aggregates Crushing Value (ACV), Specific Gravity, Water absorption และ Abrasion Value (AV) ของวัสดุรวมรวมในผิวทางเก่ามีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุรวมรวมใหม่

เนื่องจากงานวิจัยส่วนมากพิจารณาเพียงคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ และวัสดุรวมรวมของผิวทางเก่าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งาน (Performance) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มี RAP เป็นส่วนผสม แต่ยังไม่พบงานวิจัยที่พิจารณาในส่วนของค่าความปลอดภัย (Safety) ของวัสดุที่ใช้ทำผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มี RAP เป็นส่วนผสม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ จากการทดสอบเพเนทรชัน (Penetration Test) การทดสอบการยืดดึง (Ductility Test) การทดสอบจุดอ่อนตัว (Softening Point) และการทดสอบจุดวาบไฟ (Flash Point Test) รวมไปถึงทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุรวมรวมในผิวทางเก่าเปรียบเทียบกับวัสดุรวมรวมใหม่เพื่อประเมินค่าความต้านทานการล้าของผิวทาง

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

รูปที่ 3-1 แสดงถึงวิธีการดำเนินงานสำหรับงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดในการดำเนินงาน แสดงในหัวข้อ 3.2 – 3.7



รูปที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 การคัดเลือกวัสดุ

ผู้วิจัยได้คัดเลือกวัสดุมวลรวม และแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในแอสฟัลต์คอนกรีต สำหรับในการศึกษางานวิจัยเรื่องนี้ทั้งหมด 3 ประเภทประกอบด้วย

3.2.1 วัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin aggregates) จำนวน 1 แหล่ง

3.2.2 วัสดุผิวทางเก่า (RAP) จำนวน 1 แหล่ง

3.2.3 แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC 60/70



รูปที่ 3-2 วัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin aggregates)



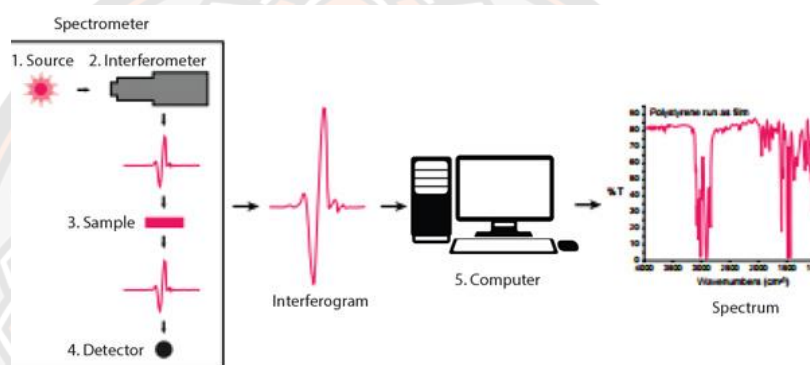
รูปที่ 3-3 วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP)

3.3 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุผสม

งานวิจัยนี้ได้มีการคัดเลือกการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสม เพื่อใช้ในการประเมินร่วมกับค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งวัสดุผสมที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย วัสดุผสมใหม่ (Virgin aggregates) และวัสดุผสมในผิวทางเก่า (RAP) มีการทดสอบดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.1 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันในสาร



รูปที่ 3-4 ลักษณะการทำงานของเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)
(ที่มา : <http://mic.eng.ku.ac.th>)

3.3.1.1 วิธีการทดลอง

ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR จะอยู่ในสถานะของแข็งของเหลว หรือก๊าซก็ได้ โดยส่วนใหญ่จะในรูปของแข็ง มีวิธีการเตรียมดังนี้

- (1) บดตัวอย่างให้มีความละเอียด
- (2) ผสมตัวอย่างเข้ากับ KBr ในโถรงบดสาร โดยให้ตัวอย่างมีความเข้มข้นประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์ และบดสารให้ละเอียดโดยให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
- (3) ใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ให้มีความดันประมาณ 15000 ingsไว้ 1-2 นาที

- (4) ถอดตัวประกอบแม่พิมพ์ออกตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นวงกลมใสและตัวอย่างจะกระจายอยู่บน KBr แล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่อง FT-IR
- (5) ประมวลผลที่ได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เฉพาะทาง

3.3.2 X-ray Diffraction (XRD)

X-ray Diffraction (XRD) เป็นกระบวนการนำรังสีเอกซ์มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง XRD ใช้หลักการของการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ กัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้น ของสารประกอบในสารตัวอย่าง จากหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถนำมาประยุกต์หาชนิดแร่ต่าง ๆ

3.3.2.1 วิธีการทดลอง

- (1) การวิเคราะห์ชนิดแร่องค์ประกอบในหินก่อสร้างด้วยวิธี XRD

การศึกษาชนิดแร่องค์ประกอบในหินด้วยวิธี XRD เป็นวิธีที่ตรวจสอบชนิดของแร่ในหินที่ดีที่สุดอีกวิธีหนึ่งขั้นตอนการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

- นำหินตัวอย่างมาบดให้ละเอียดประมาณ 30 กรัม
- สุ่มตักตัวอย่างประมาณ 10 กรัม มาบรรจุลงในภาชนะที่ใช้กับเครื่อง XRD
- นำตัวอย่างที่เตรียมเรียบร้อยแล้วเข้าเครื่องวิเคราะห์ XRD
- ประมวลผลที่ได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เฉพาะทางกับฐานข้อมูลแร่

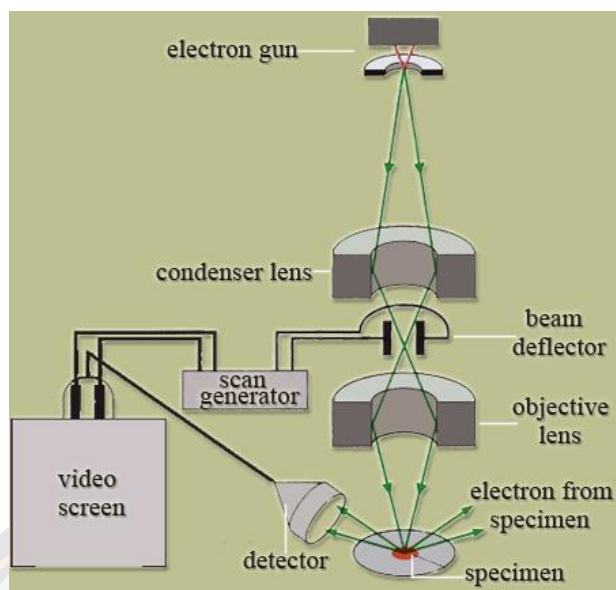
3.3.3 Scanning electron microscopy (SEM)

Scanning electron microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร เป็นการสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

หลักการทำงานจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตว์ทัศน์ได้เลย

3.4.3.1 วิธีการทดลอง

- (1) ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ หากเป็นแบบผง (Powder) ใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น
- (2) หากเป็นของแข็ง ควรเตรียมมาโดยมีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตรแล้วแต่ภาชนะที่รองรับ
- (3) ถ้าชิ้นงานตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าอาจต้องมีการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองหรือคาร์บอนขนาดเล็กแต่ที่ฝังตัวอย่างนำไปแตะพร้อมกับการกลึงบนสตั๊ป (Stub)
- (4) ตัวอย่างที่เป็นของแข็งควรวางให้มันคง อาจเพิ่มการนำไฟฟ้าโดยติดเทปโลหะหรือคาร์บอนบนตัวอย่างแล้ว ลากลงมาที่ตัวสตั๊ป (Stub) การติดเทปทับด้านบนให้แน่นหนาจะทำให้ภาพถ่ายที่กำลังขยายสูงมีความชัดเจนมากขึ้น
- (5) นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ



รูปที่ 3-5 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM
(ที่มา : <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>)

3.3.4 Aggregate Impact Test

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาปริมาณการแตกหักของวัสดุรวม เมื่อถูกแรงตกกระทก (Aggregate Impact Value, AIV) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน B.S. 812-112 (B.S., 1990)

3.3.4.1 เครื่องมือทดลอง

- (1) ฐานโลหะเรียบวงกลม (Circular Base) เส้นผ่านศูนย์กลางของฐาน 300 มิลลิเมตร มีมวล 22-30 กิโลกรัม วางยึดติดอยู่บนแท่งคอนกรีตหรือแผ่นหินที่มีความหนาไม่น้อยกว่า 450 มิลลิเมตร
- (2) ถ้วยเหล็กทรงกระบอก (Cylindrical Steel Cup) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 102 ± 0.5 มิลลิเมตร ความลึกภายใน 50 ± 0.25 มิลลิเมตร ผนังของถ้วยมีความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร
- (3) ต้ยมโลหะ (Metal Hammer) มีมวล 13.5 – 14.0 กิโลกรัม ปลายด้านล่างเป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 ± 0.5 มิลลิเมตร ยาว 50 ± 0.25 มิลลิเมตร ลบมุมที่ขอบปลายล่างขนาด 1.5 มิลลิเมตร ต้ยมโลหะต้องสามารถเลื่อนขึ้นเลื่อนลงได้อย่างอิสระในแกนตั้งซึ่งเป็นแนวที่ทำให้ลูกต้ยมโลหะอยู่กึ่งกลางด้านบนของถ้วยเหล็กทรง

ทรงกระบอก ระยะการตกของลูกตุ้มโลหะวัดจากผิวล่างของตุ้มโลหะ ถึงผิวบนของตัวอย่างทดลองเท่ากับ 380 ± 5 มิลลิเมตร

- (4) ตะแกรงช่องผ่านสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 12.5 มิลลิเมตร 9.5 มิลลิเมตร และ 2.36 มิลลิเมตร
- (5) กระบอกตวงโลหะรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 75 ± 1 มิลลิเมตร ความลึกภายใน 50 ± 1 มิลลิเมตร
- (6) แท่งเหล็กกระทง เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 ± 1 มิลลิเมตร ยาว 600 ± 5 มิลลิเมตร ปลายมนทั้งสองด้าน
- (7) เครื่องชั่ง สามารถชั่งได้ไม่น้อยกว่า 500 กรัม และชั่งละเอียดถึง 0.1 กรัม
- (8) เตอบ สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 105 ± 5 องศาเซลเซียส
- (9) ค้อนยาง
- (10) ภาดโลหะ
- (11) แปรงปิด

3.3.4.2 การเตรียมตัวอย่าง

- (1) นำตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 12.5 มิลลิเมตร และค้ำตะแกรง 9.5 มิลลิเมตร แบ่งออกเป็นสามส่วน แสดงดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 ร่อนตัวอย่างผ่านตะแกรง 9.5 มิลลิเมตร ในการทดสอบ AIV

- (2) อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส ไม่เกิน 4 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3-7



รูปที่ 3-7 อบตัวอย่างในตู้อบ

- (3) นำตัวอย่างใส่กระบอกดวงโลหะรูปทรงกรมกระบอกลให้เต็ม กระทั่งตัวอย่าง 25 ครั้งให้แน่นด้วยแท่งเหล็กกระทุ้งปลายมน โดยแต่ละครั้งต้องปล่อยอย่างอิสระเหนือผิวบนของตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิเมตร กลิ้งแท่งเหล็กกระทุ้งในแนวขวางด้านบนของกระบอกดวงโลหะรูปทรงกรมกระบอกลให้วัสดุมวลรวมส่วนที่เกินออกไป และเติมส่วนที่ขาดให้เรียบ บันทึกมวลสุทธิของตัวอย่างทดลอง แสดงดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 เตรียมตัวอย่างใส่กระบอกดวง

3.3.4.3 การทดลอง

- (1) นำถ้วยเหล็กรูปทรงกระบอกลที่มีตัวอย่าง ติดตั้งเข้ากับเครื่องมือทดลอง ยกตุ้มโลหะให้ผิวล่างของตุ้มโลหะอยู่สูงกว่าผิวบนของตัวอย่าง ปล่อยตุ้มโลหะตกอย่างอิสระบนตัวอย่างจำนวน 15 ครั้งอย่างต่อเนื่อง แต่ละครั้งใช้เวลาไม่น้อยกว่า 1 วินาที แสดงดังรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 ติดตั้งตัวอย่างเข้ากับเครื่องมือ

- (2) นำตัวอย่างเทลลิตโลหะ ใช้แปรงปัดเศษที่ติดอยู่ปลายด้านข้างของ ลูกตุ้มและด้านในของถ้วยเหล็ก นำไปชั่ง บันทึกมวลของตัวอย่างเริ่มต้น (M_1)
- (3) ร่อนตัวอย่างผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร จนกระทั่งไม่มีส่วน ละเอียดผ่านอีกในช่วงเวลา 1 นาที ชั่งและบันทึกมวลของตัวอย่างที่ผ่าน ตะแกรง 2.36 มิลลิเมตร (M_2) และที่ค้างบนตะแกรง (M_3) เมื่อนำมา รวมกัน ($M_2 + M_3$) ต้องแตกต่างจากมวลรวมของตัวอย่างเริ่มต้น (M_1) ไม่เกิน 1 กรัม หากเกินกว่า 1 กรัม ไม่นำมาพิจารณา แสดงดังรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 ร่อนตัวอย่างผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร ในการทดสอบ AIV

3.3.4.4 การคำนวณ

$$\text{AIV (\%)} = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (3-1)$$

เมื่อ	AIV	=	ปริมาณร้อยละของวัสดุรวมที่แตกหัก
	M_1	=	มวลของวัสดุรวมเริ่มต้น
	M_2	=	มวลของวัสดุรวมที่ผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร

3.3.5 Aggregate Crushing Test

การทดลองหาค่าการแตกหักของมวลวัสดุเมื่อถูกแรงบดขยี้ (Crushing) เป็นการทดลองหาค่า Aggregate Crushing Value (ACV) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐานตามมาตรฐาน B.S.812 (B.S., 1967)

3.3.5.1 เครื่องมือทดสอบ

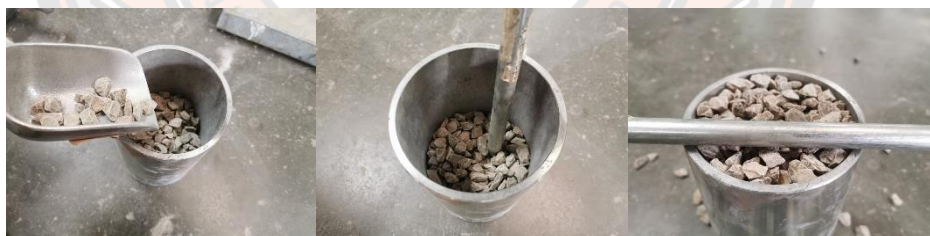
- (1) แบบเหล็กทรงกระบอก (Steel Cylinder) ฐานเหล็กสี่เหลี่ยม (Square Base Plate) และตัวกด (Plunger) มีลักษณะดังนี้
 - แบบเหล็กทรงกระบอก ปลายเปิดทั้งสองด้าน เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15.2 เซนติเมตร
 - ฐานเหล็กสี่เหลี่ยม
 - ตัวกด เป็นเหล็กตัน มีเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนที่สัมผัสกับมวลวัสดุ 15 เซนติเมตร แกนของตัวกดมีรูสำหรับสอดเหล็กเส้นเพื่อยกหรือวางตัวกดในแบบเหล็กทรงกระบอก
- (2) กระบอกตวง (Measuring Cylinder) เป็นรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 11.5 เซนติเมตร สูง 18 เซนติเมตร
- (3) เหล็กกระทบ (Temping Rod) เป็นเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร ยาว 45–60 เซนติเมตร ปลายด้านหนึ่งมน
- (4) ตะแกรง (Sieve)
 - ขนาด 14 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร และ 2.36 มิลลิเมตร สำหรับการทดลองตัวอย่างที่มีขนาดมาตรฐาน

- ขนาด 6.30 มิลลิเมตร (1/4 นิ้ว) 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) และ 1.18 มิลลิเมตร (เบอร์ 15) สำหรับการทดลอง ตัวอย่างที่มีขนาดไม่มาตรฐาน

- (5) เครื่องชั่ง (Balance) สามารถชั่งได้ 20 กิโลกรัม และชั่งได้ละเอียดถึง 1 กรัม
- (6) เตาอบ (Oven) สามารถตั้งอุณหภูมิคงที่ได้ 100 องศาเซลเซียส ถึง 110 องศาเซลเซียส
- (7) เครื่องกดน้ำหนัก (Compression Testing Machine) สามารถกดน้ำหนักได้ถึง 40 ตัน และควบคุมอัตราการเพิ่มน้ำหนัก 4 ตัน ต่อนาทีได้

3.3.5.2 วิธีการทดลอง

- (1) ชั่งน้ำหนักของกระบอกตวง (W_1)
- (2) ใส่ตัวอย่างที่เตรียมไว้ลงในกระบอกตวงที่ละประมาณ 1/3 ของกระบอกตวง กระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งจำนวน 25 ครั้ง ทำเช่นนี้จนกระทั่งเต็มกระบอก ปาดมวลวัสดุส่วนที่เกินออกให้ผิวเสมอ กระบอกตวงด้วยเหล็กกระทุ้ง แสดงดังรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-11 เตรียมตัวอย่างลงในกระบอกเหล็ก

- (3) ชั่งน้ำหนักของกระบอกตวงและมวลวัสดุ (W_2)
- (4) เทมวลวัสดุออกจากกระบอกตวงลงในแบบเหล็กทรงกระบอกที่ตั้งอยู่บนแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยม ประมาณ 1/3 ของกระบอกตวง กระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้ง 25 ครั้ง ทำเช่นนี้ไปที่ละชั้น จนกระทั่งหมดกระบอกตวง (ความสูงของมวลวัสดุในแบบเหล็กทรงกระบอกจะสูงประมาณ 10 เซนติเมตร) แสดงดังรูปที่ 3-12



รูปที่ 3-12 เหมวลวัสดุออกจากกระบอกตวงลงในแบบเหล็กทรงกระบอก

- (5) ปรับผิวของมวลวัสดุในแบบเหล็กทรงกระบอกให้เรียบ วางตัวกด (Plunger) ลงบนมวลวัสดุ
- (6) ยกแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยม พร้อมแบบเหล็กทรงกระบอกที่มีมวลวัสดุ อยู่และกดตัวกดซึ่งตั้งอยู่บนแผ่นเหล็กไปตั้งบนเครื่องกดน้ำหนัก ให้น้ำหนักจากเครื่องกดลงที่ตัวกดในอัตราการเพิ่มน้ำหนัก 4 ตัน ต่อนาที จนกระทั่งน้ำหนักที่กดเท่ากับ 40 ตัน จึงหยุดการเพิ่ม น้ำหนัก

แสดงดังรูปที่ 3-13



รูปที่ 3-13 นำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบ

- (7) นำมวลวัสดุที่ถูกอัดมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-14 ร่อนตัวอย่างผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร ในการทดสอบ ACV

(8) ชั่งน้ำหนักมวลวัสดุที่ผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร (W_3)

3.3.5.3 การคำนวณ

$$ACV (\%) = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (3-2)$$

เมื่อ ACV = ปริมาณร้อยละของวัสดุมวลรวมที่ถูกแรงบดขยี้
 M_1 = มวลของวัสดุมวลรวมเริ่มต้น
 M_2 = มวลของวัสดุมวลรวมที่ผ่านตะแกรงขนาด 2.36 มิลลิเมตร

3.3.6 Polished Stone Value

การหาค่าคุณสมบัติด้านความปลอดภัยจากการสั่นไถลของวัสดุที่จะใช้ก่อสร้างผิวทาง เรียกว่า Polished Stone Value (PSV) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3319 – 11 (ASTM, 2017)

3.3.6.1 เครื่องมือ

- (1) ชุดเครื่องขัด (Accelerated Polishing Machine) แสดงดังรูปที่ 3-15 ประกอบด้วยวงล้อเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร ยาว 9.0 เซนติเมตร ได้ 14 แผ่น วงล้อหมุนด้วยความเร็ว 320 ± 5 รอบต่อนาที วงล้อนี้อยู่ในกรอบเหล็กเพื่อป้องกันการกระเด็นของผงขัดและน้ำ วงล้อหมุนด้วยกำลังจากมอเตอร์บนวงล้อเหล็กนี้ มีล้อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 203.2 มิลลิเมตร กว้าง 50.8 มิลลิเมตร เป็นล้อแบบสูบลมผิวหน้าเรียบค่าความแข็งของยาง 55 ± 5 IRH degree ความ

ตันลม 3.16 ± 0.14 KSC. (45 ± 2 PSI) กดทับอยู่กับแผ่นตัวอย่าง ด้วยตุ้มน้ำหนัก 391.44 ± 4.45 นิวตัน ถ่ายน้ำหนักโดยคานซึ่งแขวนตุ้มน้ำหนักตอนบนของล้อ ซึ่งเป็นที่ป้อนผงขัดมีลักษณะเป็นกรวยทองเหลืองรูปสี่เหลี่ยม ตอนล่างเป็นรางปล่อยผงขัดให้ตกที่หน้าล้ออย่าง ที่ป้อนผงขัดนี้ติดกับแกนซึ่งปรับเอียงได้ทุกทิศทาง มีเครื่องส่งกรวยเพื่อให้ผงขัดไหลอย่างสม่ำเสมอติดอยู่ตอนล่างของกรวย เครื่องส่งนี้สามารถปรับขนาดความสั้นให้มากน้อยได้



รูปที่ 3-15 เครื่องขัด (Accelerated Polishing Machine)

- (2) เครื่องวัดความต้านทานการลื่นไถล (British Portable Tester) ดังรูปที่ 3-16 ตัวเครื่องประกอบด้วยฐานรับเครื่องรูปตัว T แต่ละปลายขาเป็นสกรูปรับให้สูงต่ำได้มีระดับน้ำติดที่โคนขาข้างหนึ่งเพื่อปรับให้เสาเครื่องอยู่ในแนวตั้ง เสาเครื่องเป็นเสากลมกลวงตั้งอยู่บนฐานรูปตัว T และเป็นรางให้แผ่นดัชนีและแขนแกว่งเลื่อนขึ้นลงได้ แขนแกว่งประกอบด้วยก้านอลูมิเนียมและลูกตุ้มที่ปลายแขน ภายในลูกตุ้มเป็นแผ่นยางยกขึ้นพื้นตัวอย่างเมื่อแกว่งกลับ แขนแกว่งจับติดกับตัวยึดเมื่อปล่อยตัวยึดจะตกลงมาและแผ่นยางจะปาดหน้าหินตัวอย่าง ขณะเดียวกันจะพาเข็มชี้ไปชี้ที่ขีดแบ่งบนแผ่นดัชนีอลูมิเนียม แขนแกว่งและแผ่นดัชนีปรับให้เลื่อนขึ้นลงได้พร้อมกัน เพื่อให้แผ่นยางปาดหน้าตัวอย่างเป็นระยะ 7.6 ± 0.1 เซนติเมตร ความยาวจากจุดหมุนของแขนแกว่งถึงแผ่นยางยาว 50 เซนติเมตร น้ำหนักแขนแกว่ง

รวมลูกตุ้มและแผ่นยางหนัก 1.50 ± 0.03 กิโลกรัม จุดศูนย์กลางวางอยู่ห่างจากจุดหมุน 40.5 ± 0.5 เซนติเมตร แผ่นยางเป็นยางสีดำรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง 3.1 เซนติเมตร หนา 0.6 เซนติเมตร ยึดติดกับแผ่นอลูมิเนียมมีรูเสียบติดกับก้านสปริง น้ำหนักยางรวมแผ่นโลหะหนัก 22 ± 5 กรัม ทำมุม 20 องศา กับแนวราบ เมื่อแขนแกว่งอยู่ตำแหน่งต่ำสุดในการทดลอง แผ่นยางต้องมีอายุน้อย 6 เดือน และมีคุณสมบัติ ดังนี้

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติค่า Resilience % และ Hardness, IRH degree จำแนกตามอุณหภูมิ

คุณสมบัติ	องศาเซลเซียส				
	0	10	20	30	40
Resilience %	42 – 47	55 – 62	61 – 68	64 – 71	66 – 73
Hardness, IRH degree	55 \pm 5				

ลักษณะของเครื่องมือทดสอบความต้านทานการสิ้นไถล (British Portable Tester) ดังรูปที่ 3-16 โดยมีแผ่นดัชนีเป็นแผ่นอลูมิเนียมเคลือบรูปสี่เหลี่ยมวงกลม มีขีดแบ่งจาก 0 (บน) ถึง 150 ล่าง สำหรับอ่านค่า PSV



รูปที่ 3-16 เครื่องวัดความต้านทานการสิ้นไถล (British Portable Tester)

- (3) แบบเหล็กหล่อตัวอย่าง มีขนาดกว้าง 4.5 เซนติเมตร ยาว 9.0 เซนติเมตร
- (4) ตะแกรงมาตรฐานขนาด 3/8" (9.5 มิลลิเมตร), 5/16" (8 มิลลิเมตร) เบอร์ 50 (0.300 มิลลิเมตร), เบอร์ 100 (0.150 มิลลิเมตร)

3.3.6.2 วัสดุ

- (1) ผงซัดเป็นผงซิลิกอนคาร์ไบด์
- (2) ทรายละเอียด ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างเบอร์ 100
- (3) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ Type I
- (4) ลวดเสริมขนาด 1.2 มิลลิเมตร

3.3.6.3 วิธีการทดลอง

- (1) การเตรียมตัวอย่าง
 - ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D3319-11 คือ ผ่านตะแกรงขนาด 12.5 มิลลิเมตร. ค้างบนตะแกรง 9.5 มิลลิเมตร ตัวอย่างหินมีหน้าเรียบ ไม่แบน ไม่ยาวเกินไป แสดงดังรูปที่ 3-17



รูปที่ 3-17 ร่อนตัวอย่างผ่านตะแกรง

- นำตัวอย่างหิน ประมาณ 2 กิโลกรัม มาล้างให้สะอาดและผึ่งให้แห้งแสดงดังรูปที่ 3-18



รูปที่ 3-18 ล้างตัวอย่างและผึ่งให้แห้ง

- ทาน้ำมันเฉพาะที่ด้านข้างแบบหล่อ (Mold) มาตรฐานเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างที่หล่อไว้ติดแน่นกับแบบหล่อมาตรฐาน
- เรียงเม็ดหินตัวอย่างลงในแบบหล่อมาตรฐาน จำนวนตัวอย่างละ 4 แบบหล่อ



รูปที่ 3-19 เรียงตัวอย่างหินลงในแบบ

- โรยทรายละเอียดตามร่องระหว่างเม็ดหิน โดยให้สูงระหว่าง $1/4$ – $1/2$ ของความหนาของเม็ดหิน
- ฉีดน้ำให้ทรายเปียก
- วางลวดเสริม ขนาด 1.2 มิลลิเมตร จำนวน 3 เส้น ตามความยาวของแบบหล่อเพื่อป้องกันการแตกร้าวของตัวอย่างในขณะทำการตัดตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3-20



รูปที่ 3-20 วางเหล็กเสริมลงบนตัวอย่าง

- หล่อด้วยปูนทราย ซึ่งมีส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับทรายละเอียดด้วยอัตราส่วน 1 : 1 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 3-21



รูปที่ 3-21 หล่อตัวอย่างด้วยปูนซีเมนต์กับทรายละเอียด

- เมื่อปูนทรายเริ่มแข็งตัว ปาดผิวให้เรียบด้วยยางแข็ง แสดงดังรูปที่ 3-22



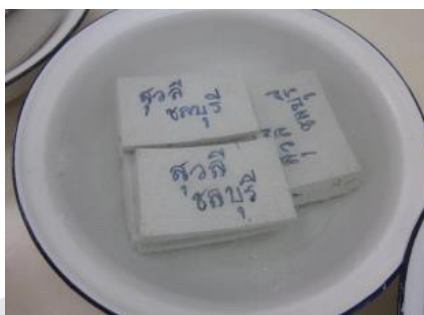
รูปที่ 3-22 ทิ้งตัวอย่างแข็งตัว

- บ่มตัวอย่างที่หล่อไว้ในแบบหล่อเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง โดยคลุมไว้ด้วยผ้าเปียก
- ถอดแผ่นตัวอย่างออกจากแบบหล่อด้วยความระมัดระวัง และใช้แปรงปัดเม็ดทรายออกจากผิวเม็ดให้หมด แสดงดังรูปที่ 3-23



รูปที่ 3-23 ถอดตัวอย่างออกจากแบบ และตกแต่งผิวหน้าตัวอย่าง

- นำแผ่นตัวอย่างทั้ง 4 แผ่น ไปแช่น้ำประมาณ 7-14 วัน โดยคว่ำหน้าด้านเม็ดหินลง แสดงดังรูปที่ 3-24



รูปที่ 3-24 บ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 7-14 วัน

(2) ขัดแผ่นตัวอย่างด้วยเครื่องขัด (Accelerated Polishing Machine)

- นำแผ่นตัวอย่างมาจัดเรียงในวงล้อเหล็ก ซึ่งบรรจุแผ่นตัวอย่างได้ทั้งหมด จำนวน 14 แผ่น แสดงดังรูปที่ 3-25



รูปที่ 3-25 นำตัวอย่างใส่วงล้อเหล็ก

- เดินเครื่องดำเนินขัดแผ่นตัวอย่างเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ขัดด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์ป่นด้วยอัตรา 6 ± 2 กรัมต่อนาที และปล่อยน้ำจากขวดแก้วที่ตั้งอยู่บนเสาของเครื่องมือด้วย 50 – 75 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 3-26



รูปที่ 3-26 เดินเครื่องชั่งแผ่นด้วยผงหยาบ

- หยุดเครื่องเมื่อครบกำหนดเวลาฉีดน้ำทำความสะอาดแผ่นตัวอย่างและเก็บกวาดวัสดุผงหยาบออกจากเครื่องชั่งให้สะอาดถอดแผ่นตัวอย่างออกทำความสะอาดให้เรียบร้อย แสดงดังรูปที่ 3-27



รูปที่ 3-27 หยุดเครื่องทดสอบและนำตัวอย่างออกจากเครื่องทดสอบ

(3) การทดลองหาค่าเฉลี่ย PSV โดยใช้เครื่อง British Portable Tester

- แชนแผ่นตัวอย่างคว่ำหน้าลงในอุณหภูมิ 18-22 องศาเซลเซียส ประมาณ 1/2 – 2 เซนติเมตร ก่อนการทดลองแกว่งตัวอย่าง
- ปรับเครื่องมือโดยปรับระดับน้ำที่ฐานเครื่องให้เสาอยู่ในแนวตั้ง
- ทดลองแกว่งเปล่าๆ โดยไม่สัมผัสกับตัวอย่าง เข็มต้องชี้ที่เลข 0
- เมื่อปรับเรียบร้อยแล้วจึงนำตัวอย่างเข้าที่จับ (C - clamp)
- เลื่อนแขนแกว่งให้สัมผัสตัวอย่างเป็นระยะ 7.6 ± 0.1 เซนติเมตร

- รดน้ำแผ่นตัวอย่างแล้วกดปั๊มปล่อยแขนแกว่งให้แขนแกว่งสัมผัสตัวอย่างอ่านค่า PSV จากแผ่นดัชนี
- อ่านค่าที่ได้จากการทดลอง 5 ครั้ง บันทึกค่าที่อ่านไว้ ค่า PSV เฉลี่ยของตัวอย่างหินแต่ละแผ่นจะสามารถคำนวณได้จากค่าที่อ่านได้ 3 ครั้งหลังและค่า PSV เฉลี่ยทั้งหมดจะได้รับการเฉลี่ยจากตัวอย่างทั้ง 4 แผ่นอีกครั้งหนึ่ง

การหาค่า PSV จะกระทำ 2 ครั้ง คือ ทดลองก่อนขัดตัวอย่างด้วยเครื่องขัดเรียกว่า ค่า PSV ก่อนขัดหรือ PSV (BEF) และทดลองหลังจากขัดด้วยเครื่องขัดเรียกว่า ค่า PSV หลังขัดหรือ PSV (AFT) ค่า PSV ที่นำไปใช้เปรียบเทียบคุณลักษณะของหินต่าง ๆ คือค่า PSV หลังขัดหรือ PSV (AFT) ค่า PSA (BEF) จะมากกว่าค่า PSV (AFT) เสมอไป

3.3.7 Los Angeles Abrasion (LA)

การทดลองนี้เพื่อหาค่าความสึกหรอของหินย่อย กรวดย่อย กรวดและ Coarse Aggregates อื่น ๆ ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C131 / C131M (ASTM, 2006)



รูปที่ 3-28 การทดสอบความสึกหรอของหินย่อย กรวดย่อย กรวด

Los Angeles machine, LA machine

3.3.7.1 เครื่องมือ

- (1) เครื่อง Los Angeles Abrasion มีลักษณะและขนาดตามรูปที่ 3-28 ประกอบด้วยเหล็กทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 711 ± 5 มิลลิเมตร (28 ± 0.2 นิ้ว) ความยาวภายใน 508 ± 5 มิลลิเมตร (20 ± 0.2 นิ้ว) เหล็กทรงกระบอกนี้ติดอยู่กับเพลลาและหมุนรอบแกนได้ในแนวนอน

มีช่องสำหรับใส่วัสดุฝาเหล็กปิด เมื่อปิดแล้วต้องมีลักษณะผิวด้านใน เหมือนกับผิวทรงกระบอกและเสมอกัน ไม่ทำให้ลูกเหล็กทรงกลม ซึ่งเป็น Abrasive Charge สะดุดเวลาผ่านรอยต่อ มีเหล็กขวางสูง 89 ± 2 มิลลิเมตร (3.5 ± 0.1 นิ้ว) ยาว 508 ± 2 มิลลิเมตร (20 ± 0.2 นิ้ว) ติดแน่น ด้านในเหล็กทรงกระบอกความสูงของเหล็กทรงกระบอกหมุนจาก เหล็กขวางถึงช่องสำหรับใส่วัสดุไม่น้อยกว่า 1,270 มิลลิเมตร (50 นิ้ว) ทั้งนี้ เหล็กขวางควรมีรูปตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าติดอยู่กับผนังของ เหล็กทรงกระบอกหรืออาจใช้เหล็กฉากแทนโดยติดที่ริมฝาเหล็กปิด ช่องใส่วัสดุ ให้ด้านนอกของเหล็กฉากหันไปตามทิศทางที่หมุน

- (2) ตะแกรงสำหรับหาขนาดของ Coarse Aggregate ใช้ตะแกรงมีช่อง ผ่านเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 75.0 มิลลิเมตร (3 นิ้ว), 63.0 มิลลิเมตร (2 1/2 นิ้ว), 50.0 มิลลิเมตร (2 นิ้ว), 37.5 มิลลิเมตร (1 1/2 นิ้ว), 25.0 มิลลิเมตร (1 นิ้ว), 19.0 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว), 12.5 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว), 9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว), 6.3 มิลลิเมตร (1/4 นิ้ว), # 4 (4.75 มิลลิเมตร) # 8 (2.36 มิลลิเมตร) # 12 (1.70 มิลลิเมตร)
- (3) Abrasive Charge เป็นลูกเหล็กทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 46.8 มิลลิเมตร (1 27/32 นิ้ว) แต่ละลูกมีมวลระหว่าง 390 - 445 กรัม จำนวน Abrasive Charge ขึ้นอยู่กับ Grading ของตัวอย่างซึ่ง กำหนดไว้ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 จำนวน Abrasive Charge จำแนกตาม Grading ของตัวอย่าง

จำนวน Abrasive Charge ที่ใช้ในการทดลองแต่ละ Grading		
Grading	Abrasive Charge (ลูก)	มวลรวม (กรัม)
A	12	5,000±25
B	11	4,584±25
C	8	3,330±20
D	6	2,500±15
E	12	5,000±25
F	12	5,000±25
G	12	5,000±25

3.3.7.2 การทดลอง

- (1) การเตรียมตัวอย่างถ้าตัวอย่างไม่มีดินเหนียวปน เช่น กรวดทราย หินไม่ให้ตากตัวอย่างจนแห้งหรืออบจนแห้งที่อุณหภูมิ 105–110 องศาเซลเซียส แล้วดำเนินการต่อถ้าตัวอย่างมีดินเหนียวปนหรือมีส่วนละเอียดติดเป็นก้อนใหญ่แน่น ให้นำตัวอย่างไปล้างน้ำเอาส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ออกทิ้ง แล้วนำส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 8 มาอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 105–110 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างไปแยกขนาดตาม Grading ถ้าเข้าได้หลาย Grading ให้เลือกใช้ตัวที่ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการใช้งานมากที่สุด
- (2) นำตัวอย่างที่เตรียมไว้จาก Abrasive Charge ตามจำนวนลูก ใส่เข้าไปในเครื่อง Los Angeles หมุนเครื่องด้วยความเร็วที่ 30–33 รอบต่อนาที ให้ได้จำนวนรอบตามตารางที่ 3-9 เมื่อหมุนได้ครบตามกำหนดแล้ว ให้นำตัวอย่างออกจากเครื่อง ล้างส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 12 ออกทิ้ง นำส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 12 มาอบที่อุณหภูมิ 105–110 องศาเซลเซียส จนได้มวลคงที่ จึงชั่งหามวลตัวอย่างที่เหลือ

3.3.7.3 การคำนวณ

$$\text{ความสึกหรอโดยใช้เครื่อง Los Angeles} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3-3)$$

เมื่อ M_1 = มวลตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดลอง

M_2 = มวลที่ค้างบนตะแกรง

ตารางที่ 3-3 Grading สำหรับการจัดกลุ่มการทดสอบ และรอบการทดสอบ Los Angeles

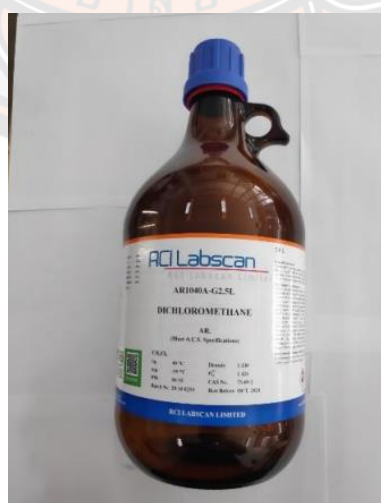
Abrasion

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)		มวล (กรัม) และ Grading ของตัวอย่าง						
ผ่าน	ค้าง	A	B	C	D	E	F	G
75.0	63.0	-	-	-	-	2500+50	-	-
63.0	50.0	-	-	-	-	2500+50	-	-
50.0	37.5	-	-	-	-	5000+50	5000+10	-
37.5	25.0	1250+25	-	-	-	-	5000+25	5000+10
25.0	19.0	1250+25	-	-	-	-	-	-
19.0	12.5	1250+10	2500+50	-	-	-	-	-
12.5	9.5	1250+10	2500+50	-	-	-	-	-
9.5	6.3	-	-	2500+50	-	-	-	-
6.3	4(4.75)	-	-	2500+50	-	-	-	-
4(4.75)	8(2.36)	-	-	-	5000+10	-	-	-
มวลตัวอย่างรวม		5000+10	5000+10	5000+10	5000+10	10000+100	-	-
จำนวนรอบ		500			1000			

3.4 การกลั่นแอสฟัลต์ซีเมนต์จากวัสดุผิวทางเก่า (RAP)

3.4.1 เครื่องมือ

- (1) สารตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)



รูปที่ 3-29 สารตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)

- (2) เครื่องสกัดแอสฟัลต์แบบแรงเหวี่ยง (Centrifuge extraction centrifuge machine)



รูปที่ 3-30 เครื่องสกัดแอสฟัลต์แบบแรงเหวี่ยง (Centrifuge extraction)

- (3) เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (Centrifuge machine)



รูปที่ 3-31 เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (Centrifuge machine)

(4) เครื่องกลั่นสารแบบสุญญากาศ (Rotary evaporator machine)



รูปที่ 3-32 เครื่องกลั่นสารแบบสุญญากาศ (Rotary evaporator machine)

3.4.2 การเตรียมตัวอย่าง

- (1) นำวัสดุผิวทางเก่าแช่ในสารตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนในอัตราส่วน 2:1
ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3-33 แช่วัสดุผิวทางเดิมด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน

- (2) นำวัสดุผิวทางเก่าที่ผสมสารตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน มาสกัดแยกแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า (Aged binder) และ วัสดุมวลรวมเก่า (Aged aggregates) ด้วยเครื่องสกัดแอสฟัลต์แบบแรงเหวี่ยง ขั้นตอนการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 2172 (ASTM, 2011)

- (3) นำแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีตัวสารทำละลาย มาใส่ในเครื่องปั่นเหวี่ยง ตกตะกอนเพื่อทำให้ฝุ่นที่ผสมอยู่นั้นตกตะกอน โดยใช้แรงเหวี่ยง 15 นาที (1500 รอบต่อนาที) และนำฝุ่นที่ตกตะกอนทิ้ง



รูปที่ 3-34 นำตัวอย่างใส่เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน

- (4) นำแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีตัวทำละลายจากขั้นตอนที่ (3) มาทำการกลั่นแยก สารตัวทำละลายออกจากแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า การทดสอบอ้างอิงตาม มาตรฐาน ASTM D5404 – 03 (ASTM, 2003)



รูปที่ 3-35 แช่วัสดุผิวทางเดิมด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน

3.5 การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement)

3.5.1 การทดสอบเพเนทรชันของแอสฟัลต์ซีเมนต์

3.5.1.1 เครื่องมือ

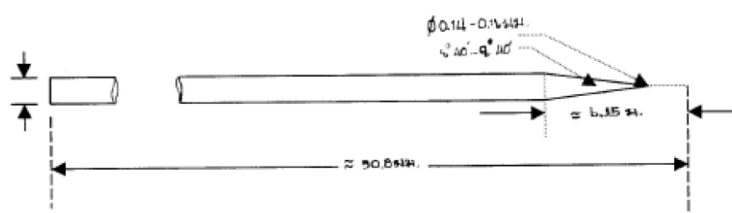
- (1) เครื่องทดสอบ Penetration ประกอบด้วยแกนที่เคลื่อนขึ้นลงได้ตามแนวตั้งโดยมีความเสียดทานน้อยที่สุด และอ่านได้ละเอียดถึง 1 Penetration เซ็ทมาตรฐาน จะประกอบติดกับแกนโดยมีปากจับ น้ำหนักของแกนเท่ากับ 47.50 ± 0.05 กรัม เมื่อรวมน้ำหนักของเซ็ทมาตรฐานแล้วต้องหนัก 50.00 ± 0.10 กรัม เครื่องทดลอง จะต้องมี น้ำหนักถ่วง 50.00 ± 0.05 กรัม และ 100.00 ± 0.05 กรัม เพื่อให้ได้ น้ำหนักกด 100 กรัม และ 200 กรัม



รูปที่ 3-36 เครื่องทดสอบ Penetration

- (2) เซ็ทมาตรฐานดังแสดงไว้ตามรูปที่ 3-30 ทำด้วยเหล็ก Stainless steel ชุบแข็งมีค่า Rockwell Hardness จาก C 57 ถึง 60 ยาวประมาณ 50.8 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00-1.02 มิลลิเมตร ปลายข้างหนึ่งเลี่ยมแหลมเป็นรูปกรวย มีมุมแหลม $8.67^\circ - 9.67^\circ$ ปลายกรวยแหลมนี้ตัดในแนวตั้งฉากกับแกนของเซ็ท โดยคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 องศา ให้ปลายตัดนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.14 - 0.16 มิลลิเมตร มุมที่ปลายตัดต้องคมและปราศจากรอยบิ่น ผิวของปลายตัดต้องมีความเรียบถึง 8 ไมโคร นิ้ว ปลายอีกข้างหนึ่งของเซ็ทมาตรฐาน อาจจะฝังยึดกับ แท่งโลหะทรงกระบอกที่โตกว่าแท่งทรงกระบอกนี้จะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.18 มิลลิเมตร ยาว 38.1 มิลลิเมตร โดยประมาณ ทำ

ด้วยทองเหลือง หรือ Stainless steel เชื่อมกับแท่งทรงกระบอกจะต้องฝังยึดติดกันแน่น และอยู่ใน แกนเดียวกัน โดยเชื่อมโผล่ออกจากแท่งทรงกระบอก ยาวประมาณ 41.26 มิลลิเมตร น้ำหนักรวมของเชื่อมและแท่งกระบอก เท่ากับ 2.5 ± 0.05 กรัม (ในการควบคุมน้ำหนักให้ได้ตามระบุ อาจเจาะรูที่ปลายแท่งทรงกระบอกได้)



รูปที่ 3-37 เชื่อมมาตรฐานสำหรับทดสอบเพเนเทรชัน

- (3) ภาชนะบรรจุตัวอย่าง ทำด้วยโลหะหรือแก้ว ลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกกันแบนถ้าใช้บรรจุวัสดุแอสฟัลต์ที่มีค่า Penetration ไม่มากกว่า 200 จะต้องมีความจุ 3 ออนซ์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 55 มิลลิเมตร ลึก 35 มิลลิเมตร วัสดุแอสฟัลต์ที่มีค่า Penetration มากกว่า 200 จ้อต้องมีความจุ 6 ออนซ์ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 70 มิลลิเมตร ลึก 45 มิลลิเมตร



รูปที่ 3-38 ภาชนะบรรจุตัวอย่าง

- (4) อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ เป็นอ่างน้ำที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ โดยมีค่าอุณหภูมิของน้ำคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.1°C . มีความจุไม่น้อยกว่า 10 ลิตร มี ชั้นโปร่งสูง 50 มิลลิเมตร สำหรับวางตัวอย่าง และต้องให้น้ำท่วมตัวอย่างได้ไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร น้ำที่ใช้จะต้องไม่มีน้ำมันหรือสิ่งสกปรกปะปน อาจใช้ น้ำเกลือแทนน้ำได้ในกรณีที่ต้องการทดลองที่อุณหภูมิต่ำถ้าต้องการทดลองโดย ไม่ย้ายตัวอย่างออกจากอ่างน้ำ ต้องจัดหาที่สำหรับวางเครื่องทดลอง Penetration ที่มั่นคงแข็งแรงพอ



รูปที่ 3-39 อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ

- (5) ภาชนะย้ายตัวอย่าง (Transfer dish) ควรเป็นภาชนะทรงกระบอกก้นแบนทำด้วยแก้วโลหะหรือพลาสติก เส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่น้อยกว่า 90 มิลลิเมตร และลึกไม่น้อยกว่า 55 มิลลิเมตร ภาชนะนี้ต้องมีที่กั้นกั้นภาชนะบรรจุตัวอย่าง เคลื่อนไปมาในเวลาทดลอง

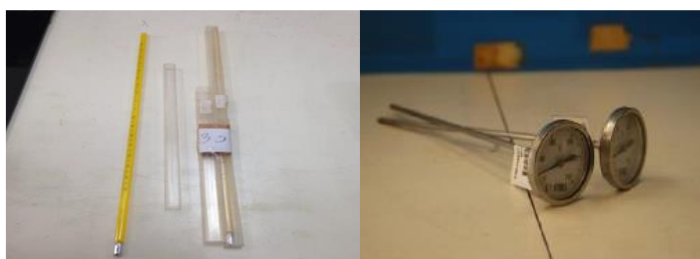


รูปที่ 3-40 ภาพขณะย้ายตัวอย่าง (Transfer dish)

(6) เทอร์โมมิเตอร์ ขนาดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ในกรณีที่ทดลองที่อุณหภูมิ 25°ซ. ให้ใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1°ซ. ในช่วง 19°ซ. ถึง 27°ซ. และตัวเทอร์โมมิเตอร์ต้องจุ่มลงในน้ำ 150 ± 15 มิลลิเมตร
- ในกรณีที่ทดลองที่อุณหภูมิ 0°ซ. ให้ใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1° ซ. ในช่วง -8°ซ. ถึง 32°ซ. และตัวเทอร์โมมิเตอร์ต้องจุ่มลงในน้ำ 150 ± 15 มิลลิเมตร
- ในกรณีที่ทดลองที่อุณหภูมิ 46.1°ซ. ให้ใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1°ซ. ในช่วง 25°ซ. ถึง 55°ซ. และตัวเทอร์โมมิเตอร์ต้องจุ่มลงในน้ำ 150 ± 15 มิลลิเมตร

เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อค่า Penetration อย่างมาก ดังนั้นเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ จะต้องเป็นชนิดที่ได้ Calibrate ไว้อย่างถูกต้องแล้ว



รูปที่ 3-41 เทอร์โมมิเตอร์

- (7) นาฬิกาจับเวลา ชนิดอ่านได้ละเอียดถึง 0.1 วินาที อาจใช้นาฬิกาจับเวลาให้เสียงสัญญาณ ใช้กับเครื่องทดลอง Penetration แบบใช้มือควบคุม (Hand operated) หรือเครื่องจับเวลาอัตโนมัติประกอบเพื่อควบคุมเครื่องทดลองเลยก็ได้



รูปที่ 3-42 นาฬิกาจับเวลา

3.5.1.2 การเตรียมตัวอย่าง

- (1) ทำตัวอย่างให้เหลวโดยใช้ความร้อน การให้ความร้อนต้องคนตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอ เพื่อไม่ให้จุดหนึ่งจุดใดร้อนมากเกินไปจนตัวอย่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดอ่อนตัว (Softening point) 80-90°ซ. สำหรับตัวอย่างวัสดุแอสฟัลต์และไม่สูงกว่า 56°ซ. สำหรับตัวอย่าง Tar-pitch ต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ เติตัวอย่างลงในภาชนะบรรจุตัวอย่างให้มีปริมาณมากพอที่เมื่อตัวอย่างเย็นลงจนถึงอุณหภูมิที่จะทดสอบแล้ว ความลึกของตัวอย่างในภาชนะจะต้องมากกว่าความลึก ที่คาดว่าเข็มมาตรฐานจะแทรกลงไปอย่างน้อย 10 มิลลิเมตร สังเกตดูถ้ามี ฟองอากาศปะปนอยู่ ให้ความร้อนอีกเล็กน้อย แล้วคนไล่ฟองอากาศให้หมด
- (2) ปิดภาชนะบรรจุตัวอย่างเพื่อป้องกันฝุ่น แล้วปล่อยให้เย็นลงในบรรยากาศที่อุณหภูมิระหว่าง 20-30°ซ. สำหรับตัวอย่างที่บรรจุในภาชนะขนาด 6 ออนซ์ ปล่อยให้เย็นลงในเวลาระหว่าง 1-1 ½-2 ชั่วโมง ส่วนตัวอย่างที่บรรจุในภาชนะ ขนาด 3 ออนซ์ ใช้เวลาระหว่าง 1-1 ½ ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างและ ภาชนะย้ายตัวอย่างไปแช่ในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ ซึ่งมีอุณหภูมิที่ตามข้อกำหนด ของการทดลอง ในวรรคต่อไป สำหรับตัวอย่างที่

บรรจุในภาชนะขนาด 6 ออนซ์ ใช้เวลาแช่ระหว่าง 1-1 ½-2 ชั่วโมง ส่วน
ตัวอย่างที่บรรจุในภาชนะขนาด 3 ออนซ์ ใช้เวลาระหว่าง 1-1 ½ ชั่วโมง

ในการทดลองปกติ ซึ่งไม่ได้กำหนดเงื่อนไขใด ๆ ไว้ ให้ใช้อุณหภูมิ
ทดลองที่ 25°C. น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที เงื่อนไขที่กำหนดเป็น
อย่างอื่นสำหรับการ ทดลองพิเศษอาจเป็นได้ดังนี้

ตารางที่ 3-4 เงื่อนไขการทดสอบ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°ซ.)	น้ำหนักกด (กรัม)	เวลา (วินาที)
0	200	60
4	200	60
46.1	50	5

3.5.1.3 การทดลอง

(1) ถ้าไม่ได้กำหนดเงื่อนไขของการทดลองไว้ ให้ใช้น้ำหนักถ่วง 50 กรัม ถ่วงบน
แกน เพื่อให้ได้น้ำหนักกดรวม 100 กรัม การทดลองทำได้ 2 วิธี คือ

- ไม่ย้ายภาชนะบรรจุตัวอย่างออกจากอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ ทำได้
โดยตั้งเครื่องทดสอบ Penetration ไว้นอกอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ
แล้ววางภาชนะบรรจุ ตัวอย่างลงบนชั้นซึ่งเตรียมไว้ในอ่างแล้ว
และต้องอยู่ในตำแหน่งซึ่งจะทำการทดสอบได้ทั้งสองกรณีดังกล่าว
นี้ต้องให้ภาชนะบรรจุตัวอย่างจมอยู่ในน้ำตลอดเวลา
- ย้ายภาชนะบรรจุตัวอย่างออกจากอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ โดยใช้
ภาชนะย้าย ตัวอย่างตั้งเครื่องทดลอง Penetration ไว้ภายนอก
อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ นำภาชนะย้ายตัวอย่างบนที่ตั้งของเครื่องมือ
แล้วทำการทดลองทันที

ในแต่ละวิธีดังกล่าวต้องปรับเครื่องมือให้เพิ่มมาตรฐานที่มี
น้ำหนักกดตามระบุสัมพันธ์กับผิวของตัวอย่างพอดี ซึ่งอาจทำได้โดย
การปรับปลายเข็มให้สัมพันธ์กับเงาของตัวเข็มซึ่งเกิดจากการ
สะท้อนมาจากผิวหน้าของตัวอย่าง โดยการตั้งเครื่องมือให้ได้รับ
แสงสว่างที่พอเหมาะตั้งหน้าปิดให้อ่านค่าทดลองที่ศูนย์

แล้ว ปล่อยเข็มให้แทรกลงบนตัวอย่างตามระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นปรับหน้าปัดให้ อ่านค่าระยะทางที่เข็มแทรกลงไป ในตัวอย่าง ในระหว่างที่ปล่อยเข็มแทรกผ่าน ตัวอย่าง ถ้าภาชนะบรรจุตัวอย่างเกิดการเคลื่อนที่ให้ถือว่า การทดลองนั้นใช้ไม่ได้

- (2) แต่ละตัวอย่างทำการทดลองอย่างน้อย 3 ครั้ง โดยให้ตำแหน่งที่จะแทรกเข็มบน หน้าของตัวอย่างอยู่ห่างจากริมภาชนะไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร และ จุดทดสอบแต่ละจุดอยู่ห่างกันอย่างน้อย 10 มิลลิเมตร ถ้าใช้ภาชนะย้าย ตัวอย่างในการ ทดลองให้เปลี่ยนน้ำในภาชนะย้ายตัวอย่างหลังการทดลองแล้ว ทุกครั้ง เพื่อควบคุมอุณหภูมิก่อนการทดลองทุกครั้งให้ทำความสะอาดเข็ม มาตรฐานโดยใช้ ผ้าสะอาดชุบคาร์บอนเตตระคลอไรด์ เช็ดวัสดุแอสฟัลต์ที่ติด อยู่ออกให้หมด แล้วใช้ผ้าแห้งสะอาดเช็ดอีกครั้งหนึ่ง การทดลองวัสดุที่มีค่า Penetration มากกว่า 225 ให้ใช้เข็มอย่างน้อย 3 อัน โดยทิ้งเข็มไว้ในตัวอย่าง หลังการทดลอง แต่ละจุด แล้วเริ่มทดลองด้วยเข็มอันใหม่จนกว่าจะทดลองเสร็จ ทุกจุด

3.5.2 การทดสอบการยึดติงของแอสฟัลต์ซีเมนต์

3.5.2.1 เครื่องมือ

- (1) แบบ (Mold) ทำด้วยทองเหลือง ส่วนปลาย 1B และ B' เรียกว่า ตัวยึด (Clips) A และ A' เรียกว่าส่วนข้างของแบบ แบบนี้จะต้องมีขนาดที่จะ ทำให้ตัวอย่าง แอสฟัลต์ที่หล่อออกมาจากแบบแล้ว มีขนาดดังต่อไปนี้

ความยาวทั้งหมด	75±0.5 มิลลิเมตร
ระยะห่างระหว่างตัวยึด	30±0.3 มิลลิเมตร
ความกว้างที่ปากตัวยึด	20±0.2 มิลลิเมตร
ความกว้างของส่วนที่แคบที่สุด (ที่ครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างตัวยึด)	10±0.1 มิลลิเมตร
ความหนา	10±0.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3-43 แบบ (Mold)

- (2) อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ เป็นอ่างน้ำที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้โดย ให้อุณหภูมิของน้ำคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.1°C มีความจุไม่น้อยกว่า 10 ลิตร มีชั้นโปร่งสูง 50 มิลลิเมตรสำหรับวางตัวอย่าง และต้องให้น้ำท่วมตัวอย่างได้ไม่น้อย กว่า 100 มิลลิเมตร น้ำที่ใช้จะต้องไม่มีน้ำมันหรือสิ่งสกปรกปะปน ในกรณีที่ต้องการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำอาจใช้น้ำเกลือแทนน้ำได้



รูปที่ 3-44 อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ

- (3) เครื่องดึง สำหรับดึงตัวอย่างที่หล่อแล้ว อาจจะใช้เครื่องมือใดก็ได้ที่จะสามารถดึง ให้ตัวยึดสองข้างแยกออกจากกันด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอตามที่กำหนดโดยไม่มี การ สั่นสะเทือน และในขณะที่ทดลองตัวอย่างจะต้องจมอยู่ในน้ำตลอดเวลา



รูปที่ 3-45 เครื่องดิ่ง

- (4) แผ่นทองเหลืองสำหรับวางแบบหล่อตัวอย่าง ต้องเป็นแผ่นแบนและเรียบสนิท เพื่อให้ด้านล่างของแบบเมื่อวางลงบนแผ่นทองเหลืองนี้แล้วสัมผัสกับแผ่นทองเหลืองได้แนบสนิท



รูปที่ 3-46 แผ่นทองเหลืองสำหรับวางแบบหล่อตัวอย่าง

- (5) ตะแกรงเบอร์ 50



รูปที่ 3-47 ตะแกรงเบอร์ 50

3.5.2.2 การเตรียมตัวอย่าง

- (1) ฉาบปรอทหรือทาสบูบนแผ่นทองเหลือง และส่วนข้างของแบบทางด้านใน (A และ A' ในรูปที่ 3-36) และจึงประกอบแบบทั้งหมดลงบนแผ่นทองเหลือง (ก่อนฉาบ ปรอทหรือทาสบูถ้าสังเกตเห็นแผ่นทองเหลืองและแบบสกปรกมากให้ใช้กรดเกลือ เจือจางเช็ดให้สะอาดเสียก่อน)
- (2) ทาดตัวอย่างให้เหลว โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำสุด การให้ความร้อนต้องคนตัวอย่างโดยสม่ำเสมอ เพื่อให้ตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกัน และเพื่อไม่ให้จุดหนึ่งจุดใด ร้อนมากเกินไปนำตัวอย่างไปเทผ่านตะแกรงเบอร์ 50 คนตัวอย่างให้ทั่วอีกครั้งหนึ่ง แล้วเทตัวอย่างลงในแบบที่เตรียมไว้ การเทตัวอย่างให้เทลงเป็นสายเล็ก ๆ โดยเทจากข้างหนึ่งไปถึงปลายอีกข้างหนึ่งของแบบไปมาจนตัวอย่างเต็มล้นออก จากแบบเล็กน้อย ระหว่างลงในแบบ จะต้องระวังไม่ให้แต่ละชั้นส่วนของแบบเกิด การเคลื่อนที่
- (3) ปลอຍให้ตัวอย่างเย็นลงที่อุณหภูมิห้องทดลอง เป็นเวลาระหว่าง 30 – 40 นาทีแล้ว นำไปแช่ในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ ซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ตามข้อกำหนดของการทดลอง เป็นเวลาประมาณ 30 นาที นำส่วนทั้งหมดขึ้นจากน้ำ ใช้ Spatula เฝ้าไฟให้ร้อนพอประมาณ ตัดปากตัวอย่างส่วนที่เกินออกจากแบบโดยให้ผิวหน้าของตัวอย่าง ในแบบมีระดับเรียบ
- (4) นำตัวอย่างที่เตรียมได้มาจากข้อ (3) ไปแช่ในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิอีกเป็นเวลา 90 ± 5 นาที ยกขึ้นจากน้ำเอาแผ่นทองเหลืองและส่วนข้างทั้งสองของแบบออก แล้วนำไปทำการทดลองทันที

หมายเหตุ : โดยทั่วไปการทดลองจะหาที่อุณหภูมิ 25 ± 0.5 °ซ. อัตราเร็วในการ ดึงตัวอย่าง เท่ากับ 5 เซนติเมตร ต่อนาที $\pm 5\%$ ถ้าต้องการ หาค่า Ductility ที่ อุณหภูมิต่ำให้ทดลองที่อุณหภูมิ 4 ± 0.5 °ซ.และ อัตราเร็วในการดึงตัวอย่าง เท่ากับ 1 เซนติเมตร ต่อนาที

3.5.2.3 การทดลอง

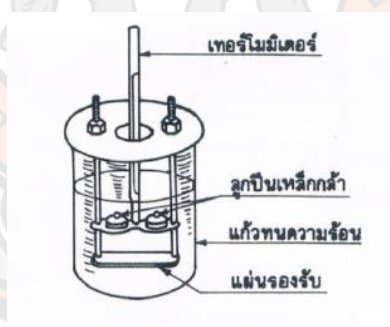
- (1) การทดลองที่ถูกต้อง ตัวอย่างที่อยู่ระหว่างตัวยึดจะต้องถูกดึงออกจากรันเป็นเส้นซึ่ง เล็กมากจนพื้นที่หน้าตัดวัดไม่ได้ แล้วเส้นนั้นจะขาดจากกันให้ทำการทดลอง 3 ครั้ง แล้วรายงานค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง 3 ครั้งนั้น

- (2) ถ้าในระหว่างการทดลอง เส้นของตัวอย่างถูกดึงออกนั้นลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าหรือ สัมผัสกับพื้นล่างอ่างจะต้องทำการปรับความถ่วงจำเพาะของน้ำในอ่าง ถ้าเส้นตัวอย่างลอยขึ้นมาที่ผิวน้ำ ให้เติมเมทิลแอลกอฮอล์ลงไปให้น้ำ เพื่อทำให้น้ำมีความถ่วงจำเพาะน้อยลง แต่ถ้าเส้นตัวอย่างสัมผัสกับพื้นล่างของอ่างให้เติมเกลือลงไปให้น้ำ เพื่อทำให้น้ำ มีความถ่วงจำเพาะมากขึ้น ข้อสำคัญต้องให้เส้นตัวอย่างอยู่ในน้ำตลอดเวลาของการทดลอง
- (3) ถ้าทำการทดลอง 3 ครั้ง แล้วไม่เป็นไปตามข้อกำหนดดังกล่าว เช่น ตัวอย่างที่ถูกดึงออกไม่เป็นเส้นเล็กมากในขณะขาดจากกัน หรือไม่ สามารถทำตัวให้ตัวอย่างอยู่ในน้ำได้ตลอดเวลา ให้รายงานว่าทดลองไม่ได้พร้อมกับสภาวะในการทดลองด้วย

3.5.3 การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุขยำมะตอยโดยใช้เครื่องวงแหวนกับลูกปืน

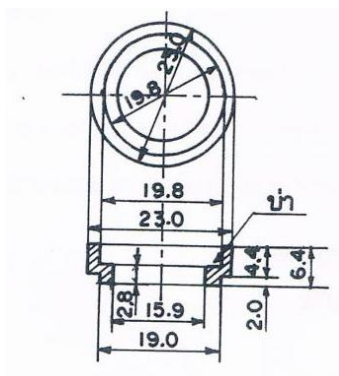
3.5.3.1 เครื่องมือ

- (1) เครื่องวงแหวนกับลูกปืน



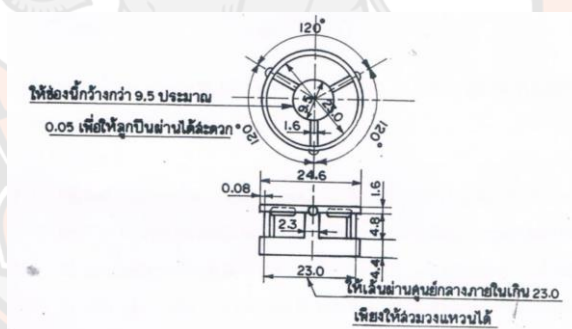
รูปที่ 3-48 เครื่องวงแหวนกับลูกปืน

- วงแหวนทองเหลือง มีป่าในตั้งฉาก รูปร่างและมิติดังรูป จำนวน 2 วง



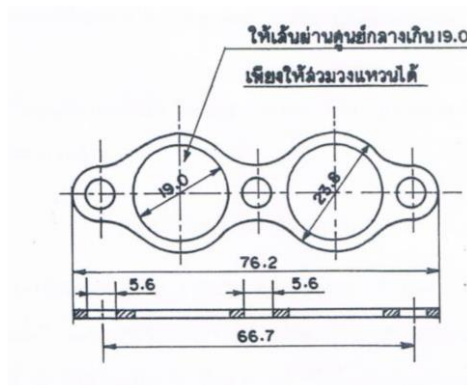
รูปที่ 3-49 วงแหวนทองเหลือง

- ลูกปืนเหล็กกล้า เส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร และหนัก 3.5 ± 0.05 กรัม จำนวน 2 ลูก
- ตัวนำศูนย์ (ball-centering guide) บังคับลูกปืนให้อยู่กลางวงแหวนทำด้วยทองเหลือง มีรูปร่างและมิติดังรูป จำนวน 2 อัน



รูปที่ 3-50 ลูกปืนเหล็กกล้า ตัวนำศูนย์ (ball-centering guide)

- แผ่นทองเหลือง ราบและเรียบขนาดประมาณ 50×75 มิลลิเมตร สำหรับรองวงแหวนขณะเตรียมตัวอย่างทดสอบ
- ชุดวางวงแหวน (ring holder and assembly) ทำด้วยทองเหลือง เพื่อจัดวางแหวนให้อยู่ในแนวราบ ผิวล่างของแหวนสูงจากผิวบนของแผ่นรองรับ (bottom plate) 25 มิลลิเมตร และผิวล่างของแผ่นรองรับนี้ที่อยู่สูงจากแก้วทนความร้อน 16 ± 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 3-51 แผ่นทองเหลือง

- แก้วทนความร้อน จุประมาณ 800 ลูกบาศก์เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 85 มิลลิเมตร และลึกไม่น้อยกว่า 120 มิลลิเมตร
- เทอร์โมมิเตอร์
 - ใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง -2 ถึง 80 องศาเซลเซียส ที่เป็นไปตาม ASTM E1 ชนิด 15 C หรือเทอร์โมมิเตอร์อื่นใดที่เทียบเท่า สำหรับยางมะตอยจุดอ่อนตัวต่ำ
 - ใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง 30 ถึง 200 องศาเซลเซียส ที่เป็นไปตาม ASTM E1 ชนิด 16 C หรือเทอร์โมมิเตอร์อื่นใดที่เทียบเท่า สำหรับยางมะตอยจุดอ่อนตัวสูง
 - ใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง -1 ถึง 175 องศาเซลเซียส ที่เป็นไปตาม ASTM E1 ชนิด 113 C หรือเทอร์โมมิเตอร์อื่นใดที่เทียบเท่า สำหรับจุดอ่อนตัวของยางมะตอยทั่วไป
 - จัดเทอร์โมมิเตอร์ ให้ปลายกระเปาะเทอร์โมมิเตอร์อยู่ในระดับเดียวกับผิวล่างของวงแหวน และอยู่ห่างจากวงแหวนทั้งสองไม่เกิน 13 มิลลิเมตร แต่ไม่แตะชุดวงแหวน

3.5.3.2 สารเคมี

- (1) น้ำกลั่น ควรใช้น้ำกลั่นต้มใหม่เพื่อไม่ให้ฟองอากาศเกาะบนผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบ

- (2) กลีเซอริน ชั้นคุณภาพยูเอสพี
- (3) เอทิลีนไกลคอล ที่มีจุดเดือดอยู่ในช่วง 195 ถึง 197 องศาเซลเซียส **หมายเหตุ** เอทิลีนไกลคอลเป็นพิษ ระวังการสูดดมและสัมผัส และต้องทดสอบใน ตู้ควัน
- (4) สารกันติด ไซซ์ซิลิโคน กลีเซอรินผสมกับเดกซ์ทริน ทัลคัมหรือดินขาว ใช้ฉาบ แผ่นทองเหลือง เพื่อกันตัวอย่างทดสอบติดแผ่นทองเหลือง

3.5.3.3 การเตรียมตัวอย่าง

- (1) ให้ความร้อนกับตัวอย่างเป็นเวลาไม่เกิน 2 ชั่วโมง จนเหลวพอเทได้ ขณะให้ความร้อนคน ตัวอย่างบ่อย ๆ เพื่อไม่ให้ส่วนใดส่วนหนึ่งร้อนมากเกินไป ระวังอย่าให้มีฟองอากาศ และ อุณหภูมิของตัวอย่างต้องไม่สูงกว่าจุดอ่อนตัวที่คาดไว้เกิน 110 องศาเซลเซียส หาก จำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างทดสอบเพิ่มเติมหลังจากที่ตัวอย่างนี้เย็นลงแล้ว ให้ใช้ตัวอย่าง ใหม่ ห้ามนำตัวอย่างนี้ไปหลอมแล้วใช้ซ้ำอีก
- (2) ให้ความร้อนกับวงแหวน จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิขิงตัวอย่าง แล้ววางบนแผ่น ทองเหลืองที่เคลือบสารกันติดไว้แล้ว เทตัวอย่างลงในวงแหวนทั้งสองจนปริ่มวงแหวน
- (3) ปลดตัวอย่างทดสอบไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที สำหรับ ตัวอย่างที่อ่อนตัวที่อุณหภูมิห้อง ทำให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดอ่อนตัวที่คาดไว้อย่างน้อย 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 30 นาที และต้องทดสอบให้เสร็จภายในเวลา 4 ชั่วโมง นับตั้งแต่เริ่มเทตัวอย่างลงในวงแหวน
- (4) หลังจากตัวอย่างทดสอบเย็นแล้ว ใช้มีดหรือพายที่ทำให้ร้อนเล็กน้อย ปาดส่วนเกินที่ปากวงแหวน

3.4.3.4 การเตรียมตัวอย่าง

- (1) เลือกของเหลวที่จะใช้เป็นตัวกลางแช่ตัวอย่างทดสอบและเทอร์โมมิเตอร์ ให้เหมาะสมกับ จุดอ่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ ดังนี้
 - ถ้าจุดอ่อนตัวอยู่ในช่วง 30 ถึง 80 องศาเซลเซียส ให้ใช้น้ำกลั่นอุณหภูมิเริ่มต้น 5 ± 1 องศาเซลเซียส และ

เทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง -2 ถึง 80 องศาเซลเซียส

- ถ้าจุดอ่อนตัวมากกว่า 80 ขึ้นไปถึง 157 องศาเซลเซียส ให้ใช้กลีเซอริน อุณหภูมิ เริ่มต้น 30 ± 1 องศาเซลเซียส และเทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง 30 ถึง 200 องศาเซลเซียส
- ถ้าจุดอ่อนตัว อยู่ในช่วง 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส ให้ใช้เอทิลีนไกลคอล อุณหภูมิเริ่มต้น 5 ± 1 องศาเซลเซียส และเทอร์โมมิเตอร์ที่วัดอุณหภูมิได้ในช่วง -1 ถึง 175 องศาเซลเซียส

(2) จัดวางแหวนทั้งสอง เทอร์โมมิเตอร์ และตัวนำศูนย์เข้าตำแหน่งเดิมของเหลวที่ได้ปรับอุณหภูมิเริ่มต้นตามที่กำหนดแล้วลงในแก้วทนความร้อน ให้มีระดับสูงประมาณ 105 ± 3 มิลลิเมตร หย่อนลูกป็น 2 ลูกลงไปที่ก้นแก้วทนความร้อน แช่แก้วทนความร้อนในอ่างซึ่งควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ของเหลวในแก้วทนความร้อนมีอุณหภูมิคงที่ที่อุณหภูมิเริ่มต้น เป็นเวลา 15 นาที ยกเครื่องทดสอบออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ ใช้ปากคีบคีบลูกป็นที่ แช่วัณนี้วางลงในช่องตัวนำศูนย์

(3) เพิ่มอุณหภูมิของของเหลวในแก้วทนความร้อนให้สูงขึ้นด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

(4) หลังจาก 3 นาทีแรก เหนือความคลาดเคลื่อนของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิทุกนาที ต้องไม่เกิน ± 0.5 องศาเซลเซียส ถ้าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิไม่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ให้ถือว่าการทดสอบนั้นใช้ไม่ได้

(5) อ่านอุณหภูมิทันทีที่ตัวอย่างทดสอบพร้อมลูกป็นแต่ละวงแหวนลงมาสัมผัสกับแผ่น รองรับถ้าอุณหภูมิที่อ่านได้สำหรับ 2 ตัวอย่างทดสอบต่างกันเกิน 1 องศาเซลเซียส ให้ ยกเลิกการทดสอบที่ทำมาแล้วทั้งหมดและเริ่มต้นการทดสอบใหม่ โดยใช้ตัวอย่างทดสอบที่เตรียมขึ้นใหม่จากตัวอย่างใหม่ซึ่งไม่ได้หลอมมาก่อน

3.6 การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตมาตรฐานการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

วัสดุแอสฟัลต์ผิวทางเก่า (RAP) สามารถนำกลับมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาวิจัยในอดีตนั้นให้ความสนใจเกี่ยวกับการใช้สารปรับปรุงคุณภาพ (Rejuvenators) เพื่อปรับปรุงแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ในประเทศเยอรมนี มีการใช้วัสดุผิวทางเก่ามานานกว่า 20 ปี และสามารถนำวัสดุผิวทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่ได้ถึง 2 วัฏจักร ในประเทศญี่ปุ่นใช้วัสดุผิวทางเก่ามานานกว่า 40 ปี ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ได้ถึงร้อยละ 80 และนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ถึง 3 วัฏจักร (Porot & Gomes, 2020)

Porot and Gomes (2020) ศึกษาการนำแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม ร้อยละ 50 โดยใช้สารปรับปรุงคุณภาพในส่วนผสม รวมถึงมีการจำลองการเสื่อมสภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตในระยะสั้น (Short-Term) และในระยะยาว (Long-Term) ก่อนที่จะนำแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า (Aged binder) มาทดสอบคุณสมบัติ พบว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่าที่มีสารปรับปรุงคุณภาพมีคุณสมบัติ ให้ใกล้เคียงกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ (Virgin binder) ถึงแม้ว่าจะเป็น การนำกลับมาใช้งานในวัฏจักรที่ 2

Huang et al. (2005) ได้ศึกษาการนำวัสดุมวลรวมละเอียดของผิวทางเก่าร้อยละ 10, 20 และ 30 กับวัสดุมวลรวมหยาบของวัสดุมวลรวมใหม่ โดยปราศจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่มาออกแบบ อัตราส่วนผสม และนำแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่าที่ได้จากการกลั่นมาทดสอบคุณสมบัติ เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ พบว่าความหนืด (Viscosity) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่า มากกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่

Lin and Wang (2018) มีการตรวจสอบความเป็นเหลี่ยมมนของมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate Angularity: FAA) ที่มีผลต่อความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยจำลองสภาพการใช้งานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมละเอียดที่มีค่าความเป็นเหลี่ยมมน (FAA) แตกต่างกัน ด้วยเครื่อง The Model Mobile Load Simulator (MMLS3) และทดสอบ Sand Patch Method สำหรับตรวจสอบลักษณะพื้นผิวแอสฟัลต์คอนกรีต รวมถึงทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากเครื่องมือ British Pendulum Tester (BPT) ผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าความเป็นเหลี่ยมมนของมวลรวมละเอียด (FAA) มีผลกระทบต่อ ค่าความต้านทานการลื่นไถลในพื้นที่ระดับมาโครเท็กเจอร์ (Macro-Texture) แต่มีผลกระทบต่อ พื้นผิวระดับไมโครเท็กเจอร์ (Micro-Texture) เพียงเล็กน้อย

การออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ ของการศึกษาพฤติกรรม และวิเคราะห์ค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มี ส่วนผสมของวัสดุผิวทางเก่า และเพื่อหาอัตราส่วนผสมของผิวทางเก่าที่ส่งผลให้ค่าความปลอดภัย (Safety) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีความเหมาะสมทั้งในเบื้องต้น และการใช้งานในระยะยาวนั้น

ผู้วิจัยจึงออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ซึ่งมีพารามิเตอร์แตกต่างกัน สำหรับการออกแบบในกลุ่มที่ 1 ใช้วัสดุผิวทางเก่าในการออกแบบอัตราส่วนผสมทุกขนาด (Total size aggregates) และมีปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า (Aged binder) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ (Virgin binder) แตกต่าง ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตใช้วิธีของมาร์แชลล์ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 604(ASTM, 1998) “วิธีการทดลองแอสฟัลต์ติกคอนกรีต โดยวิธี Marshall” โดยอ้างอิงข้อกำหนดมาตรฐานผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐาน ทล.-ม. 408 (DOH, 1989) “แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete or Hot – Mix Asphalt)” และมาตรฐาน ทล.-ม. 410 (DOH, 1999) “Asphalt Hot-Mix Recycling”

และงานวิจัยที่กล่าวไปข้างต้นพบว่าวัสดุมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) นั้นส่งผลต่อพฤติกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต และค่าความต้านทานการลื่นไถล จึงเป็นแนวทางในการออกแบบอัตราส่วนผสมในกลุ่มที่ 2 โดยใช้วัสดุมวลรวมละเอียดของผิวทางเก่า (RAP fine aggregate) และวัสดุมวลรวมหยาบของผิวทางเก่า (RAP coarse aggregate) มาออกแบบอัตราส่วนผสม โดยใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า (Aged binder) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ (Virgin binder) เท่ากันทุกอัตราส่วนผสม โดยจะแบ่งอัตราส่วนผสมเป็น 2 กลุ่ม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กลุ่มที่ 1 – ใช้วัสดุมวลรวมผิวทางเก่าทุกขนาดในการออกแบบอัตราส่วนผสม

- (1) **Hot-Mix Asphalt concrete (V100)** – อัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมเป็น 50:20:15:15 ประกอบไปด้วย Bin ที่มีขนาด Nominal Aggregate Maximum Size ร้อยละของหิน Bin 1 (หินฝุ่น): Bin 2 (ขนาด 3/8 นิ้ว): Bin 3 (ขนาด 1/2 นิ้ว): Bin 4 (ขนาด 3/4 นิ้ว) ตามลำดับ
- (2) **Asphalt Hot-Mix Recycling (R50:V50)** – อัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมเป็น 50:35:5:5:5 ประกอบไปด้วยผิวทางเก่า (RAP) ร้อยละ 50 และ Bin ที่มีขนาด Nominal Aggregate Maximum Size ร้อยละของหิน Bin 1 (หินฝุ่น): Bin 2 (ขนาด 3/8 นิ้ว) : Bin 3 (ขนาด 1/2 นิ้ว) : Bin 4 (ขนาด 3/4 นิ้ว) ตามลำดับ
- (3) **Asphalt Hot-Mix Recycling (R100)** - โดยกำหนดอัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมเป็นวัสดุผิวทางเก่า (RAP) ร้อยละ 100

กลุ่มที่ 2 – ใช้วัสดุมวลรวมละเอียด (FRAP) และมวลรวมหยาบของผิวทางเก่า (CRAP) ในการออกแบบอัตราส่วนผสม โดยอ้างอิงขนาดผลของอัตราส่วนผสม Hot-Mix Asphalt concrete

- (1) มวลรวมหยาบของวัสดุผิวทางเก่ากับมวลรวมละเอียดของวัสดุมวลรวมใหม่ (CR50:FV50) - อัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมเป็น 50:20:15:15 ประกอบ

ไปด้วยมวลรวมละเอียดของวัสดุมวลรวมใหม่ (FVG) ร้อยละ 50 ของหิน Bin 1 (หินฝุ่น) และมวลรวมหยาบของวัสดุผิวทางเก่า (CRAP) ที่มีขนาด Nominal Aggregate Maximum Size ร้อยละของหิน Bin 2 (ขนาด 3/8 นิ้ว) : Bin 3 (ขนาด 1/2 นิ้ว) : Bin 4 (ขนาด 3/4 นิ้ว) ตามลำดับ

(2) มวลรวมหยาบของวัสดุมวลรวมใหม่กับมวลรวมละเอียดของผิวทางเก่า (CV50:FR50) - อัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมเป็น 50:20:15:15 ประกอบไปด้วยมวลรวมละเอียดของวัสดุผิวทางเก่า (FRAP) ร้อยละ 50 ของหิน Bin 1 (หินฝุ่น) และมวลรวมหยาบของวัสดุมวลรวมใหม่ (CVG) ที่มีขนาด Nominal Aggregate Maximum Size ร้อยละของหิน Bin 2 (ขนาด 3/8 นิ้ว) : Bin 3 (ขนาด 1/2 นิ้ว) : Bin 4 (ขนาด 3/4 นิ้ว) ตามลำดับ

(3) มวลรวมหยาบของวัสดุผิวทางเก่ากับมวลรวมละเอียดของผิวทางเก่า (CR50:FR50) - อัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมเป็น 50:20:15:15 ประกอบไปด้วยมวลรวมละเอียดของวัสดุผิวทางเก่า (FRAP) ร้อยละ 50 ของหิน Bin 1 (หินฝุ่น) และมวลรวมหยาบของวัสดุผิวทางเก่า (CRAP) ที่มีขนาด Nominal Aggregate Maximum Size ร้อยละของหิน Bin 2 (ขนาด 3/8 นิ้ว) : Bin 3 (ขนาด 1/2 นิ้ว) : Bin 4 (ขนาด 3/4 นิ้ว) ตามลำดับ

3.6.1 การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ (Hot - Mix Asphalt)

3.6.1.1 เตรียมวัสดุมวลรวม ซึ่งวัสดุมวลรวมจะต้องผ่านข้อกำหนดการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น นำมวลรวมผสมกันให้ได้ขนาด 1,200 กรัม อบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 3-52



รูปที่ 3-52 เตรียมวัสดุมวลรวมเข้าเตาอบ

3.6.1.2 นำแบบสำหรับใส่ตัวอย่างให้ความร้อนเพื่อป้องกันแอสฟัลต์ซีเมนต์ติดแบบ

3.6.1.3 ให้อุณหภูมิแอสฟัลต์ซีเมนต์ประมาณ 170 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 3-53



รูปที่ 3-53 ให้อุณหภูมิแอสฟัลต์ซีเมนต์

3.6.1.4 เมื่อมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์มีอุณหภูมิตามต้องการแล้ว นำมาผสมเข้าด้วยกัน ซึ่งจะต้องผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ร้อยละ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 ของน้ำหนักมวลรวมในแต่ละร้อยละแอสฟัลต์ซีเมนต์ใช้ตัวอย่าง 3 ก้อนผสมโดยใช้เกรียงกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 3-54



รูปที่ 3-54 นำมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมให้เข้ากัน

3.6.1.5 นำแบบมาประกอบเข้าประจำที่เครื่องบดอัด

3.6.1.6 ใส่ตัวอย่างลงในแบบ ใช้เกรียงแซะด้านนอก 10 ครั้ง และด้านใน 15 ครั้ง ในขณะที่อุณหภูมิส่วนผสมอยู่ที่ 170 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 3-55



รูปที่ 3-55 ใส่ตัวอย่างลงในแบบ และแซะตัวอย่างก่อนเข้าเครื่องทดสอบ

3.6.1.7 นำแบบเข้าในเครื่องบดอัดบดด้วยจำนวน 75 ครั้งต่อต้านแสดงดังรูปที่ 3-56



รูปที่ 3-56 นำตัวอย่างเข้าเครื่องบดอัด

3.6.1.8 ทิ้งตัวอย่างไว้ในแบบให้เย็นแล้วดันออกจากแบบด้วยเครื่องดันตัวอย่างและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3-57



รูปที่ 3-57 นำตัวอย่างออกจากแบบ และทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง

3.6.1.9 นำก้อนตัวอย่างไปทดสอบหาความหนาแน่น

- (1) ชั่งน้ำหนักในอากาศ
- (2) ชั่งน้ำหนักในน้ำ
- (3) ชั่งน้ำหนักอิมตัวผิวแห้ง ซึ่งแช่น้ำเป็นเวลา 5 นาที แล้วเช็ดให้มีลักษณะอิมตัวผิวแห้ง

3.6.1.10 นำก้อนตัวอย่างทดสอบค่าเสถียรภาพ และการไหล

- (1) นำตัวอย่างที่ทดสอบความหนาแน่นแล้ว ไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีในอ่างต้มน้ำแสดงดังรูปที่ 3-58



รูปที่ 3-58 แช่ตัวอย่างในน้ำก่อนการทดสอบเสถียรภาพ

- (2) เช็ดผิวตัวอย่างให้แห้ง แล้วนำไปใส่แบบทดสอบเสถียรภาพ และนำเข้าเครื่องทดสอบ
- (3) เดินเครื่องให้แบบเคลื่อนไปสัมผัสกับแท่นกด จนกระทั่งเกจวัด (Dial Gage) ที่ติดกับแหวนวัดแรง (Proving Ring) ขยับตัวให้หยุดเครื่อง ตั้งเกจวัดให้เข็มวัดอยู่ที่เลขศูนย์
- (4) นำเครื่องวัดการไหลไปวางบนแกนสำหรับการทดสอบการไหล ตั้งเกจวัดให้เข็มอยู่ที่เลขศูนย์
- (5) เดินเครื่องกดเพื่อทดสอบหาค่าเสถียรภาพ โดยอ่านค่าน้ำหนักสูงสุดที่กดจากวงแหวนวัดแรง และอ่านค่าการไหลที่น้ำหนักสูงสุดเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 3-59



รูปที่ 3-59 การทดสอบเสถียรภาพ และการไหล

- (6) ค่าเสถียรภาพที่วัดได้จะต้องปรับแก้ค่าความสูงของก้อนตัวอย่างให้เป็นความสูงมาตรฐาน (63.5 มิลลิเมตร) จากค่า Correlation ratio

3.6.1.11 เมื่อทราบผลทดสอบ จะต้องนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์กับความหนาแน่น เสถียรภาพ การไหล ร้อยละช่องว่างอากาศ ร้อยละช่องว่างระหว่างอนุภาครวม และร้อยละช่องว่างที่แทนที่ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์

3.6.2 การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า (Asphalt Hot – Mix Recycling)

การออกแบบส่วนผสมวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า (Recycled Asphalt Concrete) มาตรฐาน ทล.-ม. 410/2542 (DOH, 1999) ทดลองโดยใช้วิธีมาร์แชลล์เหมือนกับการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน (Hot – Mix Asphalt) แต่มีข้อแตกต่างในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างซึ่งมีวิธีดังนี้

3.6.2.1 แยกเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า (RAP) โดยการอุ่นให้มีความร้อนเท่ากับ 150 องศาเซลเซียสก่อนบดอัดก้อนตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3-60



รูปที่ 3-60 ให้ความร้อนกับวัสดุผิวทางเก่า (RAP)

3.6.2.2 ให้ความร้อนวัสดุใหม่ที่ใช้ผสม ได้แก่ แอสฟัลต์ซีเมนต์ หรือสารปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Recycling Agent) วัสดุมวลรวมใหม่

3.6.2.3 ผสมวัสดุใหม่กับแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเก่า (RAP) ที่เตรียมไว้แสดงดังรูปที่ 3-61 บดอัดก้อนตัวอย่างด้วยเครื่องบดอัดมาร์แชลล์



รูปที่ 3-61 ผสมวัสดุผิวทางเก่ากับวัสดุซีเมนต์ใหม่

3.7 การจำลองสภาพการใช้งาน และทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทาง

3.7.1 การเตรียมแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

3.7.1.1 ชั่งน้ำหนักวัสดุมวลรวมตามอัตราส่วนผสมโดยใช้วัสดุมวลรวม 5 กิโลกรัมต่อ 1 แผ่นตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3-62



รูปที่ 3-62 ชั่งน้ำหนักวัสดุรวม

3.7.1.2 ให้ความร้อนกับวัสดุรวมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

3.7.1.3 ผสมวัสดุรวม กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามอัตราส่วนผสมให้เข้ากันแสดงดังรูปที่ 3-63



รูปที่ 3-63 ผสมวัสดุรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้เข้ากัน

3.7.1.4 เมื่อผสมเสร็จเรียบร้อยให้นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3-64



รูปที่ 3-64 เตรียมส่วนผสมที่ผสมเรียบร้อย

3.7.1.5 เตรียมแบบหล่อสำหรับขึ้นแผ่นแอสฟัลต์คอนกรีตแสดงดังรูปที่ 3-65



รูปที่ 3-65 เตรียมแบบหล่อสำหรับขึ้นแผ่นแอสฟัลต์คอนกรีต

3.7.1.6 เทส่วนผสมลงในแบบหล่อ และทำการบดอัดโดยแต่ละตัวอย่างนั้นจะควบคุมเวลาในการบดอัดให้เท่ากันแสดงดังรูปที่ 3-66



รูปที่ 3-66 เทส่วนผสมลงในแบบหล่อ

3.7.1.7 ทิ้งตัวอย่างให้เย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และแกะออกจากแบบหล่อแสดงดังรูปที่ 3-67



รูปที่ 3-67 ทิ้งตัวอย่างไว้ให้เย็น และนำออกจากแบบ

3.7.2 การทดสอบการขัดสี และทดสอบหาค่าความต้านทานการลื่นไถล

3.7.2.1 ติดตั้งแผ่นทดสอบเข้าในเครื่องเร่งการขัดสี เปิดระบบควบคุมการไหลเวียนของน้ำขณะทำการขัดสี ความเร็วในการปล่อยน้ำอยู่ที่ 5.59×10^{-6} ลูกบาศก์เมตร ต่อนาที และตั้งจำนวนรอบขัดตามที่กำหนดจำนวน 0, 5,000, 10,000, 15,000, 25,000, 50,000, 100,000 รอบแสดงดังรูปที่ 3-68



รูปที่ 3-68 ติดตั้งแผ่นตัวอย่างเข้าเครื่องเร่งการขัดสี และเดินเครื่องทดสอบตามจำนวนรอบขัด

3.7.2.2 เมื่อถึงระยะรอบการขัดที่ตั้งไว้เครื่องจะหยุดอัตโนมัติ

3.7.2.3 หลังจากนั้นจะทำการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถล โดยใช้เครื่องมือ British Pendulum Tester แสดงดังรูปที่ 3-69 และ Dynamic Friction Test (DFT) ตามมาตรฐาน ASTM E1911 แสดงดังรูปที่ 3-70 ที่ระยะรอบต่าง ๆ



รูปที่ 3-69 ทดสอบความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ British Pendulum Tester



รูปที่ 3-70 ทดสอบความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ Dynamic Friction Tester



บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมผิวทางเก่า (Aged aggregates) และวัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin Aggregates) และคัดเลือกการทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติที่ใช้ในการประเมินค่าความต้านทานการลื่นไถล โดยแสดงผลการทดสอบดังต่อไปนี้

4.1.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม

ตารางที่ 4-1 ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin Aggregates)

คุณสมบัติ	Virgin Aggregate					เกณฑ์กำหนด
	Fine Aggregate		Coarse Aggregate			
	Passing #200	Retained #200	3/8"	1/2"	3/4"	
Bulk Specific Gravity	-	2.651	2.714	2.710	2.714	-
Apparent Specific Gravity	2.727	2.686	2.699	2.674	2.679	-
Water Absorption (%)	-	1.42	0.60	0.50	0.48	-
Flakiness Index (%)	-	-	-	26.0	-	≤ 35
Elongation Index (%)	-	-	-	31.1	-	-
Soundness (%WT. Loss)	Coarse Aggregate = 1.73, Fine Aggregate = 2.38					< 9
Sand Equivalent (%)	84.4					≥ 50

ตารางที่ 4-2 ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมผิวทางเก่า (RAP)

คุณสมบัติ	Aged aggregates (RAP)					เกณฑ์ กำหนด
	Fine Aggregate		Coarse Aggregate			
	Passing #200	Retained #200	3/8"	1/2"	3/4"	
Bulk Specific Gravity	-	2.653	2.758	2.798	2.799	-
Apparent Specific Gravity	2.704	2.719	2.771	2.821	2.819	-
Water Absorption (%)	-	0.91	0.17	0.29	0.25	-
Flakiness Index (%)	-	-	-	42.4	-	≤ 35
Elongation Index (%)	-	-	-	9.5	-	-
Soundness (%WT. Loss)	Coarse Aggregate = 0.10, Fine Aggregate = 1.91					< 9
Sand Equivalent (%)	90.0					≥ 50

ตารางที่ 4-3 ผลทดสอบคุณสมบัติวิศวกรรมของวัสดุมวลรวม

คุณสมบัติ	วัสดุมวลรวม (Aggregates)		เกณฑ์ กำหนด
	Virgin Aggregates	Aged Aggregates	
Aggregate Impact Value (%)	22.5	19.7	< 25
Aggregate Crushing Value (%)	21.0	21.7	< 25
Los Angeles Abrasion (%)	24.4	29.6	≤ 40
Polishing Stone Value (Initial)	54.0	52.0	-
Polishing Stone Value (Final)	35.0	37.0	-

จากตารางที่ 4-1 และ 4-2 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลใหม่ และวัสดุมวลรวมผิวทางเก่า พบว่าผลการทดสอบนั้นผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง มีเพียงการทดสอบดัชนีความแบน ของวัสดุมวลรวมผิวทางเก่าให้ค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดของมาตรฐานกรมทางหลวง

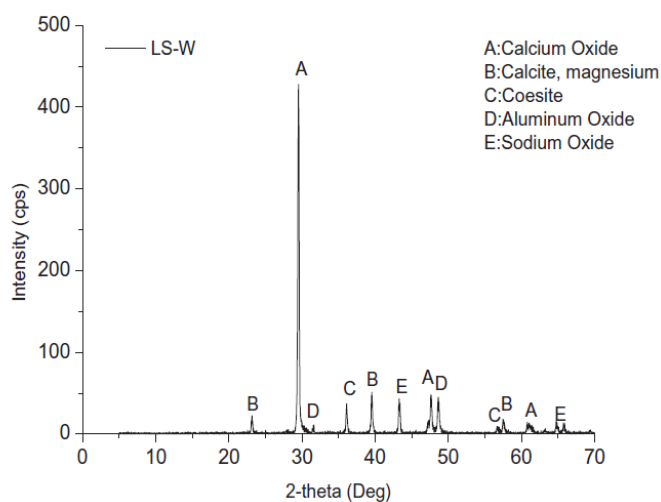
จากตารางที่ 4-3 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุมวลรวมเพื่อประเมินค่าความต้านทานการสึกกร่อน ซึ่งวัสดุมวลรวมใหม่ และวัสดุมวลรวมผิวทางเก่าให้ผลการทดสอบที่มีค่าใกล้เคียงกัน และผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนดของมาตรฐานกรมทางหลวง มีเพียงผลการทดสอบการสึกกร่อน (LAA) ของวัสดุมวลรวมผิวทางเก่าให้ค่าสูงกว่าวัสดุมวลรวมใหม่ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าวัสดุผิวทางเก่ามีความทนทานต่อการสึกกร่อนต่ำกว่าอันเนื่องมาจากเป็นวัสดุที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว

4.1.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุมวลรวม

สิ่งที่สำคัญที่สุดในการรักษาระดับค่าความเสียหายในระยะยาวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต คือ การรักษาเสถียรภาพของพื้นผิวระดับ Micro-texture ของวัสดุมวลรวม (กรมทางหลวง, 2018) ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงทดสอบคุณสมบัติเชิงโครงสร้างระดับจุลภาคทั้ง 3 แบบของวัสดุมวลรวมทั้ง 2 ประเภท เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติ และพฤติกรรมในระดับ Micro-texture ของวัสดุมวลรวม รวมถึงเพื่อตรวจสอบประเภทของวัสดุมวลรวม โดยมีการทดสอบดังนี้ (1) X-Ray Diffractometer (2) Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) และ (3) Scanning electron microscope (SEM)

4.1.2.1 X-Ray Diffractometer (XRD)

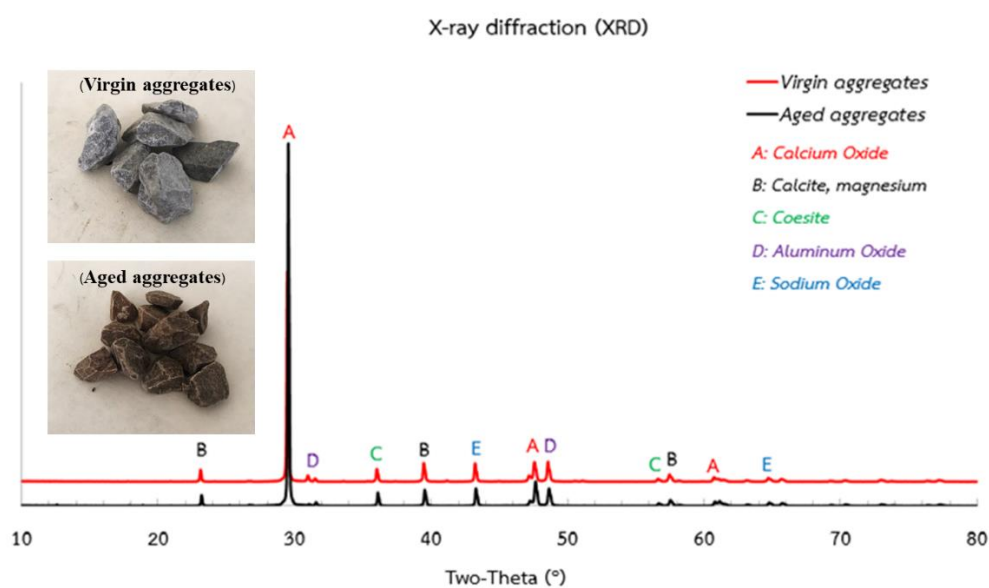
Gökalp et al. (2018) ได้นำวัสดุมวลรวมประเภทหินปูน (สีขาว) จาก Ceyhan, Adana มาทดสอบ XRD พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีในหินปูน (สีขาว) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลไซต์ (CaCO₃) แมกนีเซียม (Mg) โคไซด์ (SiO₂) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และ โซเดียมออกไซด์ (Na₂O) ดังแสดงดังรูปที่ 4-1 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของหินปูน คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO)



รูปที่ 4-1 ผลทดสอบ XRD ของวัสดุมวลรวมประเภทหินปูน (สีขาว)

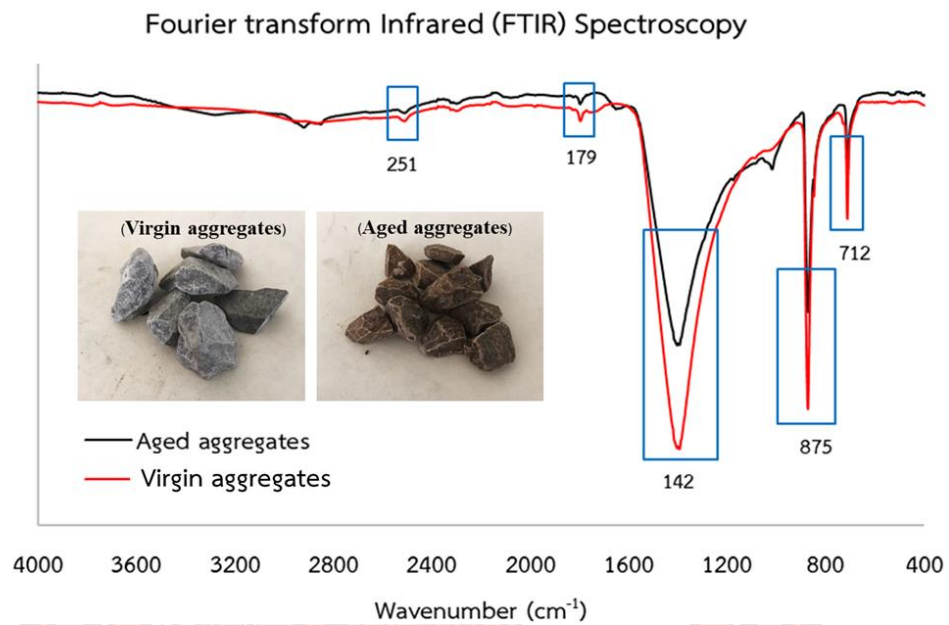
(Gökalp et al., 2018)

ผลการทดสอบ XRD ของวัสดุมวลรวมทั้ง 2 ประเภท ได้แก่ วัสดุมวลรวมผิวทางเก่า และ วัสดุมวลรวมใหม่ สำหรับในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4-2 มีลักษณะเทียบเคียงกับงานวิจัยของ Gökalp et al. (2018) และจากผลการทดสอบของผู้วิจัยสามารถบ่งชี้ได้ว่าวัสดุมวลรวมทั้ง 2 ประเภทนั้นเป็นหินประเภทเดียวกัน คือ หินปูน (Limestone) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แคลไซต์ (CaCO₃) แมกนีเซียม (Mg) โคไซต์ (SiO₂) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และ โซเดียมออกไซด์ (Na₂O)



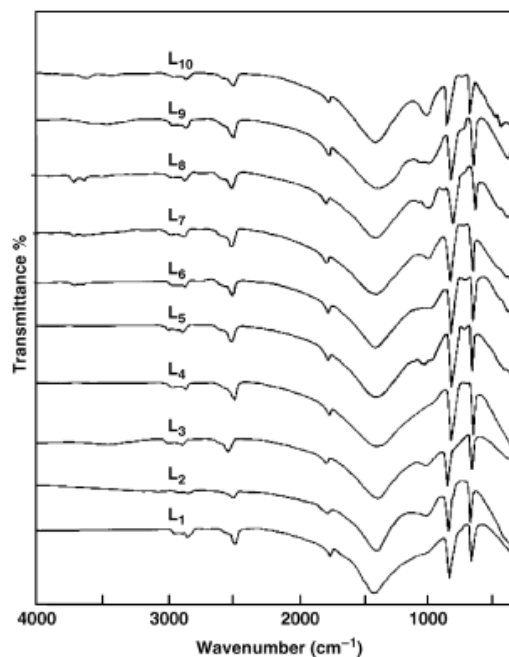
รูปที่ 4-2 ผลทดสอบ X-Ray Diffractometer (XRD) ของวัสดุมวลรวมใหม่ และวัสดุมวลรวมผิวทางเก่า

4.1.2.2 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)



รูปที่ 4-3 ผลทดสอบ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)
ของวัสดุมวลรวมใหม่ และผิวทางเก่า

Gunasekaran et al. (2006) ได้นำวัสดุมวลรวมประเภทหินปูนทั้ง 10 ตัวอย่างในประเทศอินเดีย มาทดสอบ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) พบว่าตำแหน่งจุดสูงสุด (Peak) ของกราฟ FT-IR ที่บ่งบอกถึงวัสดุมวลรวมประเภทหินปูน เกิดในตำแหน่งของ Wavenumber ที่ 2514, 1798, 1425, 874 และ 712 cm⁻¹ แสดงดังรูปที่ 4-4

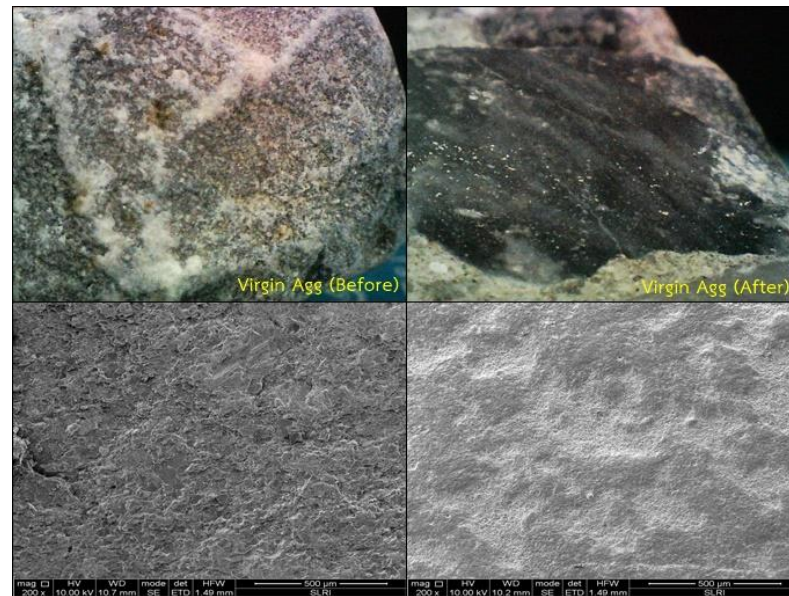


รูปที่ 4-4 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ของวัสดุมวลรวมประเภทหินปูน (Gunasekaran et al., 2006)

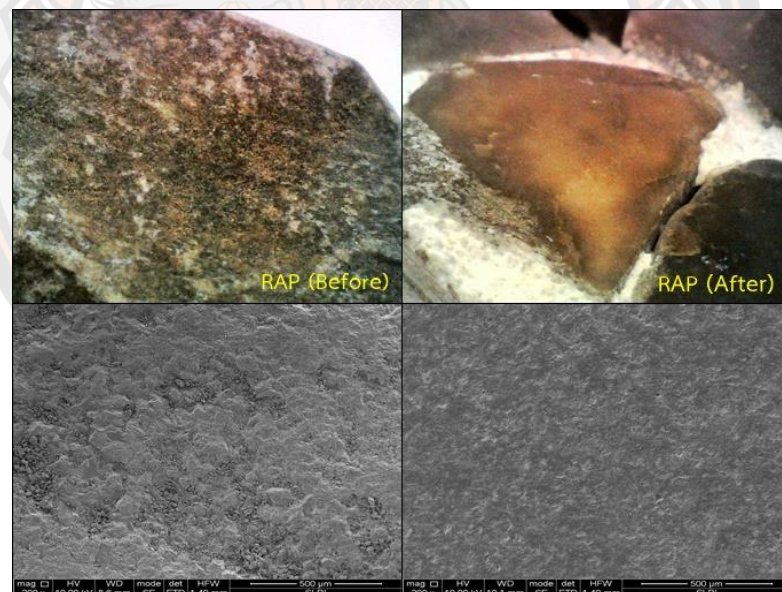
ผลการทดสอบ FT-IR ของวัสดุมวลรวมทั้ง 2 ประเภท ได้แก่ วัสดุมวลรวมผิวทางเก่า และ วัสดุมวลรวมใหม่ สำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4-3 มีลักษณะเทียบเคียงกับงานวิจัยของ Gunasekaran et al. (2006) และจากผลการทดสอบของผู้วิจัยนั้นสามารถบ่งชี้ได้ว่าวัสดุมวลรวมทั้ง 2 ประเภทนั้นเป็นหินประเภทเดียวกัน คือ หินปูน (Limestone) ซึ่งเกิดตำแหน่งของกราฟ FT-IR Wavenumber ที่ตำแหน่ง 2514, 1798, 1425, 874 และ 712 cm^{-1}

4.1.2.3 Scanning electron microscope (SEM)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างวัสดุมวลรวมที่ผ่านการทดสอบ PSV นำมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิววัสดุมวลรวม (Micro-Texture) จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าพื้นผิวของวัสดุมวลรวมผิวทางเก่า (RAP) ก่อนการทดสอบ PSV มีลักษณะ Micro-texture ที่เรียกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin Aggregates) และภายหลังการทดสอบ PSV พื้นผิววัสดุมวลรวมทั้ง 2 ประเภทที่ถูกขัดสีจากการจำลองสภาพการใช้งานเป็นเวลา 10 ชั่วโมง มีลักษณะ Micro-texture ใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4-5 และ 4-6



รูปที่ 4-5 Scanning electron microscope (SEM) ของวัสดุมวลรวมใหม่



รูปที่ 4-6 Scanning electron microscope (SEM) ของวัสดุมวลรวมผิวทางเก่า

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement)

ในงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกการทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) ประเภทเกรด AC 60/70 และแอสฟัลต์ซีเมนต์ในวัสดุผิวทางเก่า (RAP binder) เพื่อประเมินร่วมกับผลการทดสอบความต้านทานการลื่นไถลของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ผลทดสอบคุณสมบัติวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement)

คุณสมบัติ	หน่วย	ผลการทดสอบ		เกณฑ์ที่
		Virgin binder (AC 60/70)	Aged binder (RAP binder)	กำหนด (AC 60/70)
Penetration	0.1 mm	66.5	30.0	60 – 70
Softening Point	°C	40.7	75.3	45 – 55
Ductility	°C	> 100	1.8	≥100
Flash and Fire Points	°C			≥ 232
- Flash Points		328	322	
- Fire Points		364	368	

จากผลการทดสอบวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) ประเภทเกรด AC 60/70 และแอสฟัลต์ซีเมนต์ในวัสดุผิวทางเก่า (Aged binder) แสดงให้เห็นว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่า มีค่า Penetration และ Ductility ต่ำกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 แต่ให้ค่า Softening ที่สูงกว่า ส่วน Flash and Fire Points มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งส่งผลทำให้วัสดุมีความแข็งหรือมีความชื้นเหนียวเพิ่มขึ้น

4.3 การออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต และการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน

4.3.1 การออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต

การออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้ จะดำเนินการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีของมาร์แชลล์ (Marshall Mix Design) ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 604 (ASTM, 1998) “วิธีการทดลองแอสฟัลต์ติกคอนกรีต โดยวิธี Marshall” โดยอ้างอิงข้อกำหนดมาตรฐานผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 408 (DOH, 1989) “แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete or Hot – Mix Asphalt)” และ มาตรฐาน

งานทางที่ ทล.-ม. 410 (DOH, 1999) “Asphalt Hot-Mix Recycling” โดยผลการออกแบบอัตราส่วนผสมนั้นแนบในภาคผนวก ข (Appendix B) ซึ่งสัญลักษณ์รูปที่ 4-7 แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 3.3

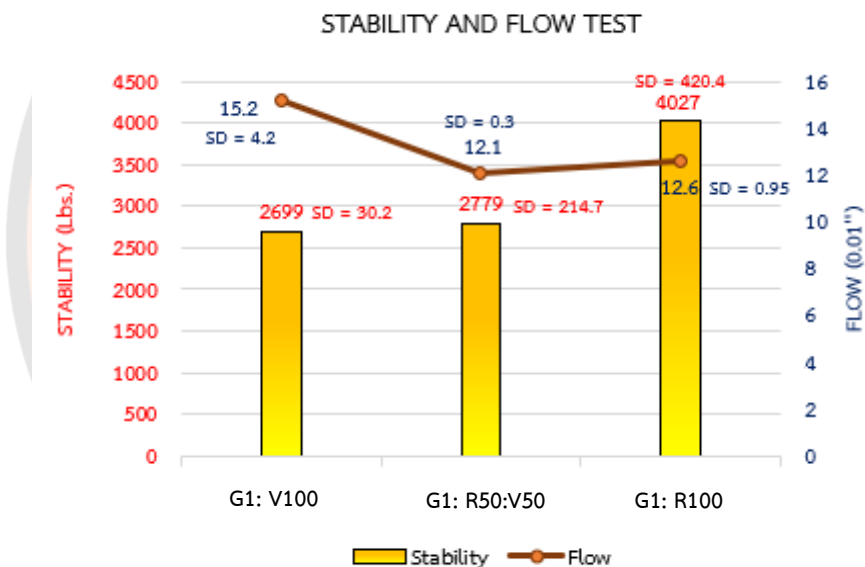
ตารางที่ 4-5 สรุปผลการออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตกลุ่มที่ 1

Mix design	V100	R50:V50	R100
Proportion (%)	50:20:15:15	50:35:5:5:5	100:0:0:0:0
Total Asphalt (%)	5.0	4.8	5.4
(Virgin:Aged)	(5.0:0.0)	(2.65:2.35)	(0.70:4.70)
Density (gm/ml.)	2.400	2.360	2.390
Air void (%)	3.3	5.0	3.1
VMA (%)	14.0	15.1	14.5
VFB (%)	76.4	65.8	78.3
Stability (lbs.)	2,699	2,799	4,027
Flow (0.01")	15.2	12.1	12.6

ตารางที่ 4-6 สรุปผลการออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตกลุ่มที่ 2

Mix design	G1	G2	G2	G2
	V100	CR50:FV50	CV50:FR50	(CR50:FR50)
Proportion (%)	Dust	50	50	50
	9.5 mm	20	20	20
	12.5 mm	15	15	15
	19.0 mm	15	15	15
Total Asphalt (%)	5.00	5.00	5.00	5.00
(Virgin: Aged)	(5.0:0.0)	(2.7:2.4)	(2.7:2.4)	(0.3:4.7)
Remarks	V = Virgin aggregate CV = Coarse virgin aggregate FV = Fine virgin aggregate CR = Coarse RAP aggregate FR = Fine RAP aggregate.			

อัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในกลุ่มที่ 1 นำไปออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติเชิงปริมาตร และคุณสมบัติเชิงกลของมาร์แชลล์ จากผลทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-5 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากสามก้อนตัวอย่าง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผิวทางเก่าในอัตราส่วนผสมส่งผลให้ในด้านประสิทธิภาพการใช้งาน (Performance) เพิ่มขึ้นแต่มีพฤติกรรมแข็งเปราะ และขาดความยืดหยุ่นซึ่งบ่งชี้จากค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow) ดังแสดงในรูปที่ 4-7 เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่าผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งอาจเสื่อมสภาพ ส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็ง และเกิดการแตกร้าวได้ง่าย แต่อัตราส่วนผสมทั้ง 3 ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดของมาตรฐานกรมทางหลวงพร้อมนำไปขึ้นแผ่นตัวอย่างสำหรับจำลองสภาพการใช้งาน และทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลโดยจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4-7 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพ และการไหล

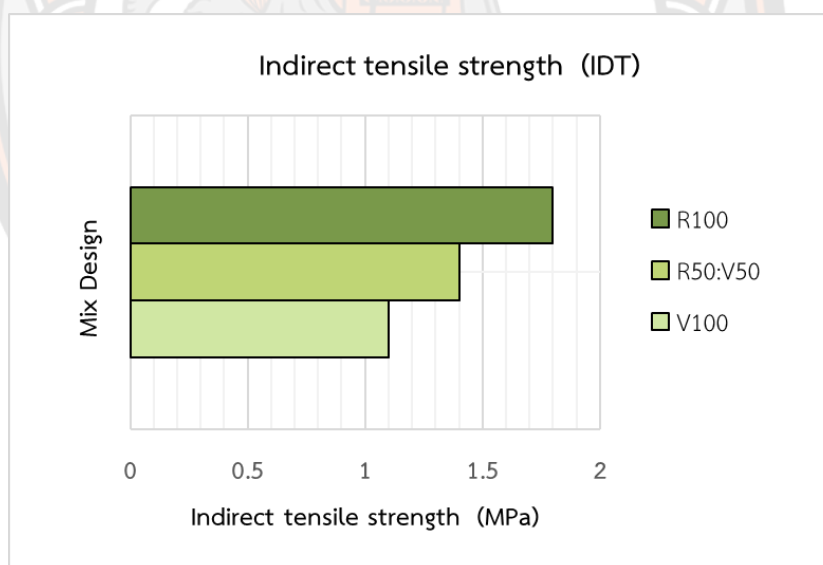
สำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในกลุ่มที่ 2 นั้นอ้างอิงขนาดคละ (Particle size distribution) ของวัสดุมวลรวม G1 : V100 (Hot-Mix Asphalt) และใช้ปริมาณร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์เทียบเท่า โดยใช้วัสดุมวลรวมละเอียด (FRAP) และมวลรวมหยาบ (CRAP) ของผิวทางเก่ามาออกแบบอัตราส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 4-6

4.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต

สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) และการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

4.3.2.1 การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength)

ก่อนการทดสอบแรงดึงทางอ้อม ทำการแช่ตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีไม่เกิน 120 นาที แล้วทำการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, IDT) การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D6931 – 17 (ASTM, 2018) การทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตในกลุ่มที่ 1 ได้แก่ แอสฟัลต์คอนกรีตของวัสดุมวลรวมใหม่ (V100) แอสฟัลต์คอนกรีตของวัสดุผิวทางเก้าร้อยละ 50 (R50:V50) และ แอสฟัลต์คอนกรีตของวัสดุผิวทางเก้าร้อยละ 100 (R100) โดยมีค่าแรงดึงทางอ้อมเฉลี่ย 1.1, 1.4 และ 1.8 MPa ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าค่าแรงดึงทางอ้อมที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงขึ้น เมื่อมีปริมาณผิวทางเก่าในอัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้น

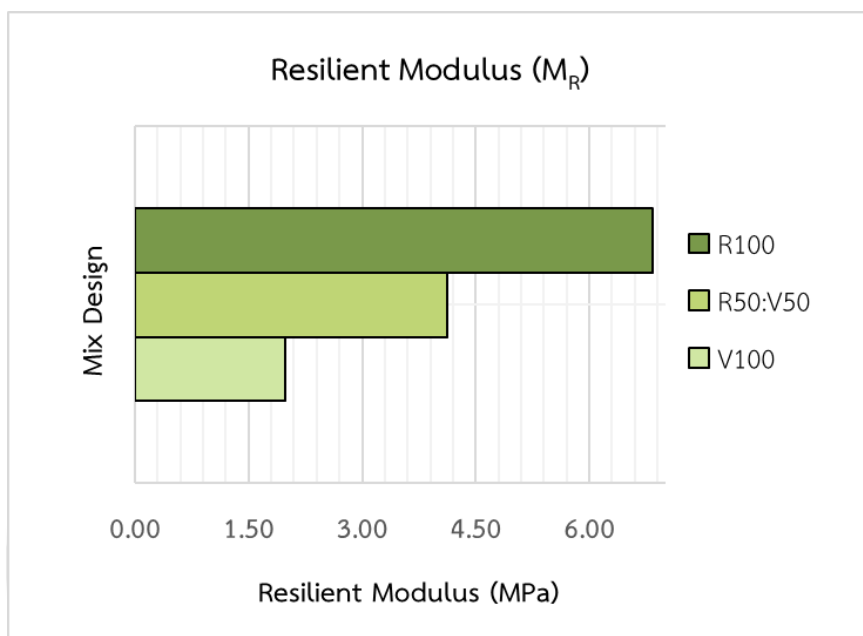


รูปที่ 4-8 ผลการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength)

4.3.2.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวโดยมีตัวแปรที่ใช้ คือค่าความเค้น (Stress) สูงสุด ที่ได้จากการทดสอบค่าแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, IDT) ก่อนการทดสอบตัวอย่าง ทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

(Resilient Modulus Test, M_R) การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D7369 – 11 (ASTM, 2019) จากการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเฉลี่ย 1.98, 4.12 และ 6.83 MPa จากผลการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณผิวทางเก่าในอัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้น



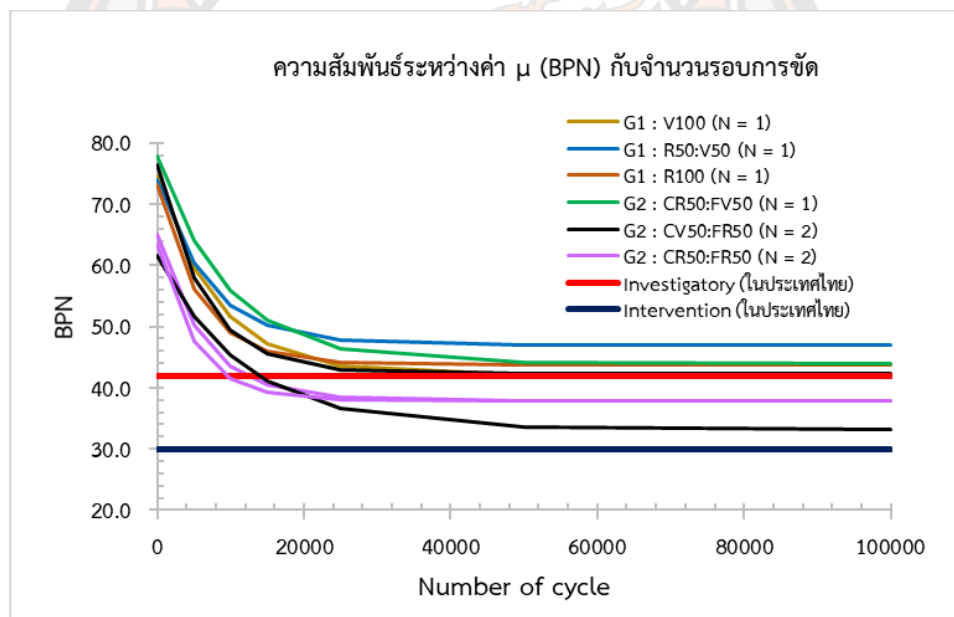
รูปที่ 4-9 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

4.4 การจำลองสภาพการใช้งาน และทดสอบค่าความต้านทานการสึกหรอในห้องปฏิบัติการ

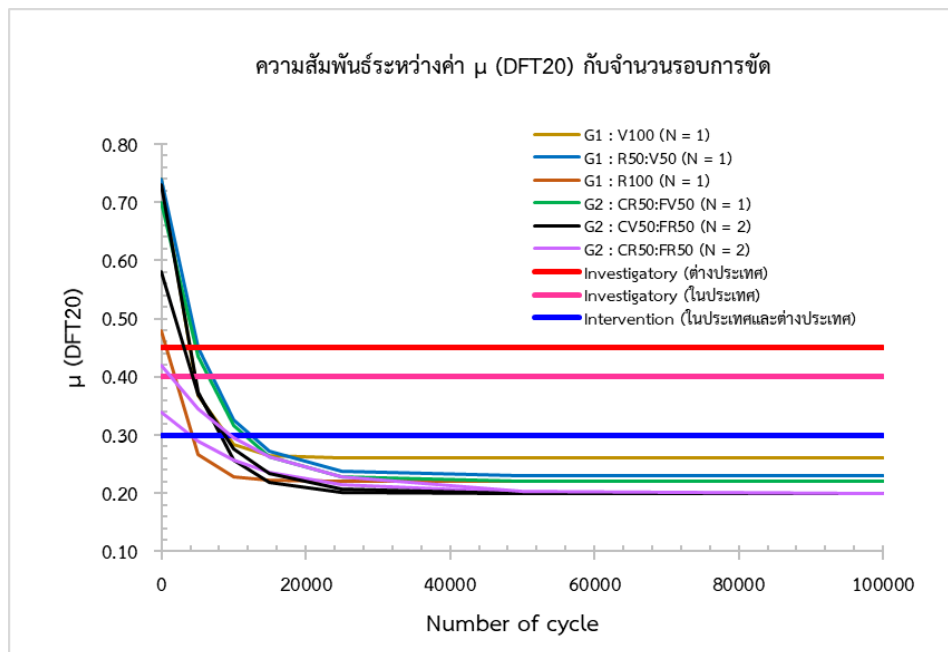
ในงานวิจัยเรื่องนี้ได้ดำเนินการทดสอบค่าความต้านทานการสึกหรอในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือทดสอบ British Pendulum Tester (BPT) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E303 (ASTM, 2008) และเครื่องมือทดสอบ Dynamic Friction tester (DFT) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1911 (ASTM, 2002) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้รับการออกแบบในหัวข้อที่ 3.6 โดยเตรียมแผ่นตัวอย่างซึ่งมีรายละเอียดดังหัวข้อ 3.7.1 โดยมีรายละเอียดของจำนวนการขึ้นแผ่นตัวอย่างดังตารางที่ 4-6 หลังจากนั้นทำการจำลองสภาพการใช้งานด้วยเครื่องเร่งการขัดสี (Three-Wheel Polishing Device: TWPD) ดังหัวข้อ 3.4.2

ตารางที่ 4-7 จำนวนการขึ้นแผ่นตัวอย่างเพื่อทดสอบความต้านทานการลื่นไถลในห้องปฏิบัติการ

Mix Design	จำนวนตัวอย่าง (แผ่น)
G1 : V100	1
G1 : R50:V50	1
G1 : R100	1
G2 : CR50:VF50	1
G2 : CV50:FR50	2
G2 : CV50:FR50	2
รวม	8



รูปที่ 4-10 ผลทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ BPT



รูปที่ 4-11 ผลทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ DFT

จากรูปที่ 4-10 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ทดสอบด้วยเครื่องมือ BPT เทียบกับจำนวนรอบการขัดสีของอัตราส่วนผสมทั้ง 2 กลุ่ม โดยในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงเกณฑ์ระดับพึงระวัง และปรับปรุงแก้ไข (กรมทางหลวง, 2018) ดังแสดงในตารางที่ 4-8 และค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น (Initial skid resistance) และช่วงสุดท้าย (Terminal skid resistance) (Thai Industrial Standard, 2556; กรมทางหลวง, 2018) ดังแสดงในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-8 สรุปเกณฑ์ระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไข

เกณฑ์ระดับความต้านทานการลื่นไถล (BPN)	BPN
ค่าระดับพึงระวัง (Investigatory Level)	42
ค่าระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level)	30

ตารางที่ 4-9 เกณฑ์ค่าความต้านทานการลื่นไถล (BPN) ในช่วงเริ่มต้น และช่วงสุดท้าย

เกณฑ์ค่าความต้านทานการลื่นไถล (BPN)	Value
Initial skid resistance	≥ 55
Terminal skid resistance	≥ 30

ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น (Initial skid resistance) ของอัตราส่วนผสมกลุ่มที่ 1 มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ระดับพึงระวัง และเกณฑ์ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น ($BPN_{Initial}$) ซึ่งทั้ง 3 อัตราส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกัน โดย V100 ให้ค่าสูงกว่า R50:V50 เล็กน้อย และ R100 ให้ค่าต่ำสุด ช่วงข้อมูลค่า $BPN_{Initial}$ อยู่ที่ประมาณ 72 - 75 หน่วย เมื่อจำลองสภาพการใช้งานครบ 100,000 รอบ (Terminal skid resistance) อัตราส่วนผสมของ R50:V50 มีค่าสูงกว่า R100 เล็กน้อย และ V100 มีต่ำสุด แต่ทั้ง 3 อัตราส่วนผสมอยู่สูงกว่าเกณฑ์ระดับพึงระวัง และเกณฑ์ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้าย ($BPN_{Terminal}$) ช่วงข้อมูลค่า $BPN_{Terminal}$ อยู่ที่ประมาณ 42 - 48 หน่วย

อัตราส่วนผสมกลุ่มที่ 2 ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น (Initial skid resistance) มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ระดับพึงระวัง และเกณฑ์ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น ($BPN_{Initial}$) ช่วงข้อมูลอยู่ที่ประมาณ 62 - 85 หน่วย ซึ่ง CR50:FV50 ให้ค่าสูงกว่า CV50:FR50 และ CR50:FR50 ให้ค่าต่ำสุด เมื่อจำลองสภาพการใช้งานครบ 100,000 รอบ (Terminal skid resistance) ทั้ง 3 อัตราส่วนผสมมีค่าความต้านทานการลื่นไถลดจนกระทั่งคงที่ ซึ่ง CR50:FV50 ให้ค่าสูงกว่า CV50:FR50 และ CR50:FR50 ให้ค่าต่ำสุด โดย CR50:FV50 อยู่สูงกว่าเกณฑ์ระดับพึงระวัง แต่ CV50:FR50 และ CR50:FR50 อยู่ต่ำกว่าระดับระดับพึงระวัง ทั้ง 3 อัตราส่วนผสมมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้าย ($BPN_{Terminal}$) ช่วงข้อมูลค่า $BPN_{Terminal}$ อยู่ที่ประมาณ 32 - 42 หน่วย

จากรูปที่ 4-11 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเสียดทานที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเทียบกับจำนวนรอบการขัดสีของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 กลุ่ม ค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องแบบต่อเนื่อง (Dynamic test) ในต่างประเทศมีการศึกษาและผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานาน เช่น ออสเตรเลีย นิวซีแลนด์ และสหรัฐอเมริกา โดยใช้เครื่องมือ Sideway-Force Coefficient Routine Investigation Machine (SCRIM) ทดสอบ ค่าความต้านทานการลื่นไถล (Abdullah, 2020) สำหรับงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงเกณฑ์ระดับพึงระวัง และปรับปรุงแก้ไข ดังแสดงในตารางที่ 4-10 และค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น (Initial skid resistance) และช่วงสุดท้าย (Terminal skid resistance) (กรมทางหลวง, 2018) ดังแสดงในตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-10 สรุปเกณฑ์ระดับพึงระวัง และระดับปรับปรุงแก้ไข

เกณฑ์ค่าความต้านทานการลื่นไถล (μ)	ออสเตรเลีย	นิวซีแลนด์	สหรัฐอเมริกา	ประเทศไทย
ระดับพึงระวัง (Investigatory Level)	0.45 - 0.50	0.45 - 0.55	0.45 - 0.55	0.45 - 0.50
ระดับปรับปรุงแก้ไข (Intervention Level)	0.30 - 0.40	0.30 - 0.40	0.30 - 0.40	0.30 - 0.45

ตารางที่ 4-11 เกณฑ์ค่าความต้านทานการลื่นไถล (DFT) ในช่วงเริ่มต้น และช่วงสุดท้าย

เกณฑ์ค่าความต้านทานการลื่นไถล (DFT)	Value
Initial skid resistance	0.77
Terminal skid resistance	0.22

พบว่าค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น (Initial skid resistance) อัตราส่วนผสมกลุ่มที่ 1 มีค่าความต้านทานการลื่นไถลสูงกว่าเกณฑ์ระดับพึงระวัง แต่ต่ำกว่าเกณฑ์ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น ($DFT_{Initial}$) ช่วงข้อมูลค่า $DFT_{Initial}$ อยู่ที่ประมาณ 0.48 – 0.74 หน่วย โดย V100 ให้ค่าใกล้เคียงกับ R50:V50 และ R100 ให้ค่าต่ำสุด เมื่อจำลองสภาพการใช้งานครบ 100,000 รอบ (Terminal skid resistance) อัตราส่วนผสมของ V100 มีค่าสูงกว่า R50:V50 และ V100 ต่ำที่สุด แต่ทั้ง 3 อัตราส่วนผสม อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ระดับปรับปรุงแก้ไข และมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้าย ($DFT_{Terminal}$) เล็กน้อย ช่วงข้อมูลค่า $DFT_{Terminal}$ อยู่ที่ประมาณ 0.48 – 0.74

อัตราส่วนผสมกลุ่มที่ 2 ทั้ง 3 อัตราส่วนผสมให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น ($DFT_{Initial}$) ต่ำกว่าเกณฑ์อ้างอิง ช่วงข้อมูลค่า $DFT_{Initial}$ อยู่ที่ประมาณ 0.34 – 0.72 หน่วย ซึ่ง CR50:FR50 ให้ค่าใกล้เคียงกับ CV50:FR50 โดยอยู่สูงกว่าเกณฑ์ระดับพึงระวัง และ CR50:FR50 มีค่าต่ำสุด และอยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ระดับพึงระวัง เมื่อจำลองสภาพการใช้งานครบ 100,000 (Terminal skid resistance) รอบ ทั้ง 3 อัตราส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ระดับปรับปรุงแก้ไข แต่มีค่าสูงกว่าเกณฑ์อ้างอิงของค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้าย ($DFT_{Terminal}$) เพียงเล็กน้อย ช่วงข้อมูลค่า $DFT_{Terminal}$ อยู่ที่ประมาณ 0.22 – 0.24

บทที่ 5

อภิปรายผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของผิวทางเก่า โดยจะแสดงดังต่อไปนี้

5.1 ผลกระทบของตัวแปรที่ส่งผลต่อความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของผิวทางเก่า

5.1.1 ผลกระทบของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล

วัสดุมวลรวมที่มีความแข็งแรง และทนทานต่อการขัดสีเป็นวัสดุมวลรวมที่มีความเหมาะสมจะนำไปใช้เป็นวัสดุมวลรวมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต สำหรับวัสดุมวลรวมที่มีความแข็งแรงต่ำมักจะสูญเสียค่าความต้านทานการลื่นไถลอย่างรวดเร็วหากความเป็นเหลี่ยมคมสึกหรอได้ง่ายไม่ทนทาน ในยุโรปนิยมใช้เครื่องมือ British Polishing wheel เพื่อวัดค่า Polished Stone Value (PSV) ของวัสดุมวลรวม โดยทั่วไปวัสดุมวลรวมที่มีค่า PSV มากจะให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลที่สูง ซึ่งค่า PSV สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพมวลรวมได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ในการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตควรพิจารณาปัจจัยหลายอย่างนอกจากค่า PSV และ Texture depth เนื่องจาก PSV ที่มีค่ามากอาจไม่สามารถบ่งบอกถึงความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้นของการใช้งานได้ (Williams, 2008)

Pawar et al. (2017) ศึกษาคุณสมบัติมาร์แชลล์ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่วัสดุผิวทางเก่า โดยใช้ปริมาณ RAP ร้อยละ 0, 30 และ 40 ทดสอบคุณสมบัติมาร์แชลล์ของแอสฟัลต์คอนกรีต รวมถึงทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมใหม่และวัสดุ RAP ได้แก่ Aggregates Impact Value (AIV), Aggregates Crushing value (ACV), ความถ่วงจำเพาะ, การดูดซึมน้ำ และ Abrasion value (AV) จากผลการทดสอบวัสดุมวลรวมใหม่นั้นมีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุมวลรวมผิวทางเก่า เนื่องจากวัสดุมวลรวมผิวทางเก่าผ่านการใช้งานมาหลายครั้งส่งผลให้ความแข็งแรง รวมถึงความเป็นเหลี่ยมคมนั้นลดลง

จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมเพื่อประเมินหาค่าความต้านทานการลื่นไถลในงานวิจัยนี้ แสดงไว้ในตารางที่ดังตารางที่ 5-1 ซึ่งประมาณค่าได้จากสมการที่ 5-1 – 5-4

ในการศึกษานี้คุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบ PSV การทดสอบ AIV การทดสอบ ACV และการทดสอบการสึกหรอ LAA (Abrasion) มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อประเมินผลร่วมกับค่าความต้านทานการลื่นไถล พบว่าค่าความต้านทานการลื่นไถลมีค่ามากที่สุดในช่วงเริ่มต้น (Initial skid resistance)

และลดลงจนกระทั่งคงที่ในช่วงสุดท้าย (Terminal skid resistance) ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุผสมรวมสามารถบ่งชี้ถึงความต้านทานการลื่นไถลของการใช้งานในระยะยาวได้ดีกว่าในช่วงเริ่มต้น เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เคลือบผิวทางเกิดการหลุดร่อน และพื้นผิวของวัสดุผสมรวมทำหน้าที่สัมผัสกับล้อยางพาหนะแทน สำหรับงานวิจัยนี้จะเห็นค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้าย (Terminal skid resistance) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 กลุ่ม ให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้จากคุณสมบัติของวัสดุผสมรวมที่ได้ทำการทดสอบว่าวัสดุผสมรวมทั้ง 2 ประเภทมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน รวมทั้งจากผลการทดสอบเชิงโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุผสมรวม ซึ่งให้เห็นว่าเป็นวัสดุประเภทเดียวกัน คือ หินปูน (Limestone) ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญส่วนใหญ่คือ CaO ทั้งนี้ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้ายของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผสมรวมใหม่เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียว (Hot-mix asphalt) กับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม (Asphalt hot-mix recycling) มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุผสมรวมมีคุณสมบัติค่าที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5-1 ตารางสรุปคุณสมบัติวัสดุผสมรวม (Aggregate properties)

Mix Design	Aggregate properties			
	AIV (%)	ACV (%)	PSV _D	LAA (%)
G1 : V100	22.5	21.0	19.9	24.4
G1 : R50:V50	19.7	21.7	15.1	29.6
G1 : R100	20.0	21.6	15.5	28.7
G2_1 : CR50:VF50	19.7	21.7	15.1	29.6
G2_1 : CV50:FR50	22.5	21.0	19.9	24.4
G2_2 : CV50:FR50	22.5	21.0	19.9	24.4
G2_1 : CR50:FR50	19.7	21.7	15.1	29.6
G2_2 : CR50:FR50	19.7	21.7	15.1	29.6

$$\text{AIV of Total Aggregates} = \frac{[\text{AIV4} \times \text{HB4}] + [\text{AIV3} \times \text{HB3}] + [\text{AIV2} \times \text{HB2}]}{\text{HB4} + \text{HB3} + \text{HB2}} \quad (5-1)$$

$$\text{ACV of Total Aggregates} = \frac{[\text{ACV4} \times \text{HB4}] + [\text{ACV3} \times \text{HB3}] + [\text{ACV2} \times \text{HB2}]}{\text{HB4} + \text{HB3} + \text{HB2}} \quad (5-2)$$

$$\text{PSV of Total Aggregates} = \frac{[\text{PSV4} \times \text{HB4}] + [\text{PSV3} \times \text{HB3}] + [\text{PSV2} \times \text{HB2}]}{\text{HB4} + \text{HB3} + \text{HB2}} \quad (5-3)$$

$$\text{LAA of Total Aggregates} = \frac{[\text{LAA4} \times \text{HB4}] + [\text{LAA3} \times \text{HB3}] + [\text{LAA2} \times \text{HB2}]}{\text{HB4} + \text{HB3} + \text{HB2}} \quad (5-4)$$

5.1.2 ผลกระทบของขนาดคละมวลรวมต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล

Williams (2008) ได้กล่าวว่าขนาดอนุภาค (Particle size) และขนาดคละ (Gradation) ของวัสดุมวลรวมมีผลต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล เมื่อขนาดของวัสดุมวลรวมลดลง ค่าความต้านทานการลื่นไถลจะเพิ่มขึ้น ส่วนหนึ่งเป็นเพราะวัสดุมวลละเอียด (Fine Aggregate) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักของการสร้าง Micro-Texture อีกทั้งขนาดคละมีความสำคัญต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลเช่นกัน เนื่องจากระยะห่างระหว่างวัสดุมวลรวมลดลงความต้านทานการลื่นไถลก็จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีวัสดุมวลละเอียดในส่วนผสมซึ่งจะประกอบไปด้วยอนุภาคมวลรวมขนาดเล็กจำนวนมากส่งผลให้ระยะห่างระหว่างมวลรวมใกล้กันมากขึ้นช่องว่างน้อยลง และวัสดุมวลรวมแบบละเอียดนั้นจะสร้าง Micro-Texture ซึ่งจะเพิ่มความต้านทานการลื่นไถล ในทางกลับกันการผสมมวลรวมแบบหยาบจะประกอบไปด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ในสัดส่วนที่มากส่งผลให้ช่องว่างระหว่างมวลรวมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งช่องว่างขนาดใหญ่จะทำให้พื้นที่สำคัญของผิวทางไม่สัมผัสกับล้อรถยนต์พาหะ

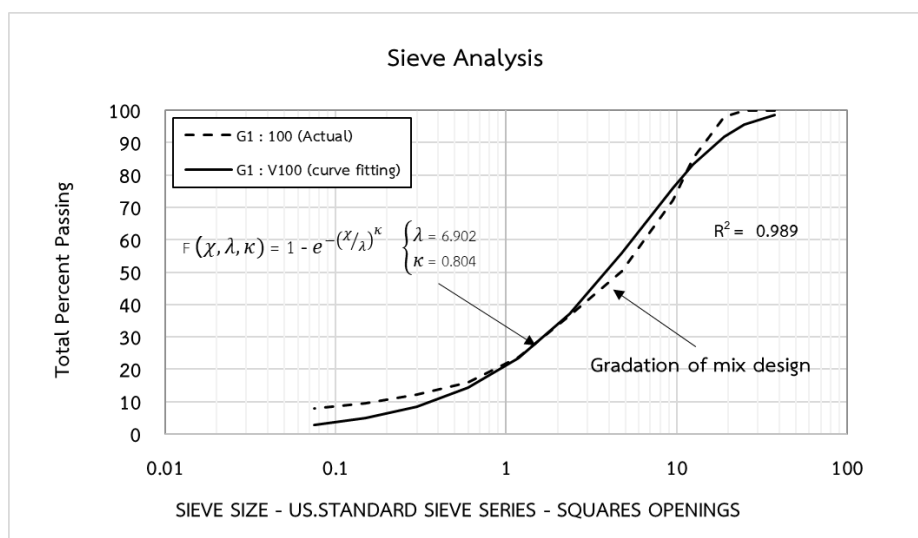
จากการศึกษาวิจัยของ Rezaei and Masad (2013) พบว่าขนาดคละของวัสดุมวลรวม (Gradation of aggregates) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล โดยพบว่าชุดข้อมูลขนาดคละของวัสดุมวลรวมนั้นมีความเหมาะสมกับสมการที่ (5-5) ของ Weibull distribution

$$F(\chi, \lambda, K) = 1 - e^{-(\chi/\lambda)^K} \quad (5-5)$$

โดยที่ χ คือ Aggregate size (mm) λ คือ Shape parameter และ K คือ Scale parameter โดยที่พารามิเตอร์ทั้ง 2 สองมีความแตกต่างกันไปตามขนาดคละของอัตราส่วนผสม

สำหรับงานวิจัยนี้อ้างอิงสมการที่ (5-5) ในการหาพารามิเตอร์ λ และ K ซึ่งเป็นตัวแทนของชุดข้อมูลขนาดคละของอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 6 อัตราส่วนผสม ตัวอย่าง curve fitting สำหรับจากสมการที่ (5-5) ของอัตราส่วนผสม V100 แสดงดังรูปที่ 5-1 อีกทั้งผู้วิจัยได้ดำเนินการวัดค่าความหยาบเฉลี่ยของผิวทางเริ่มต้น (Mean Texture Depth, $\text{MTD}_{\text{Initial}}$) โดยใช้วิธี Sand patch

ซึ่งเห็นได้ชัดว่าอัตราส่วนผสมที่มีวัสดุมวลรวมใหม่เพียงอย่างเดียวจะให้ค่า $MTD_{Initial}$ สูงสุด และอัตราส่วนผสมที่มีผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียวจะให้ค่าต่ำสุด สำหรับอัตราส่วนผสมที่มีผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมร้อยละ 50 มีผล $MTD_{Initial}$ จากการทดสอบไม่เพียงพอในการอภิปรายผลทดสอบ เนื่องจากการทดสอบค่า $MTD_{Initial}$ ที่ได้จาก Sand patch method (SPM) สำหรับการศึกษานี้มีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ซึ่งค่า $MTD_{Initial}$ กับพารามิเตอร์ λ และ K แสดงดังตารางที่ 5-2



รูปที่ 5-1 ตัวอย่าง curve fitting จากสมการ Weibull distribution ของอัตราส่วนผสม V100

ตารางที่ 5-2 ตารางสรุปพารามิเตอร์ λ , κ และ $MTD_{Initial}$

Mix design	λ	κ	$MTD_{Initial}$
G1 : V100	6.092	0.804	0.870
G1 : R50:V50	4.178	0.856	0.682
G1 : R100	4.481	1.103	0.660
G2_1 : CR50:VF50	5.430	0.885	0.883
G2_1 : CV50:FR50	7.760	0.770	0.910
G2_2 : CV50:FR50	7.760	0.770	0.782
G2_1 : CR50:FR50	5.697	0.806	0.792
G2_2 : CR50:FR50	5.697	0.806	0.754

5.1.3 ผลกระทบของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล

จากการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 พบว่าวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ของผิวทางเก่า (Aged binder) มีลักษณะที่แข็ง และขาดความยืดหยุ่น มากกว่าวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ (Virgin binder) เนื่องจากวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่าผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งซึ่งอาจเกิดการเสื่อมสภาพได้ โดยผลทดสอบมีความคล้ายกับงานวิจัยของ Izaks et al. (2015) ได้ทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในวัสดุผิวทางเก่าโดยใช้การทดสอบ Penetration, Fraass Breaking Point และ Softening Point พบว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่ามีลักษณะที่แข็ง ขาดความยืดหยุ่น จึงได้ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ชนิดเกรดอ่อน พบว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่ามีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น และผ่านเกณฑ์มาตรฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Hussain and Yanjun (2013) ที่ได้ศึกษาผลกระทบของแอสฟัลต์ซีเมนต์ปริมาณสูงในผิวทางเก่า (RAP) ที่มีต่อคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ ซึ่งทดสอบคุณสมบัติแบบเก่า (Conventional Test) ได้แก่ การทดสอบ Penetration และ Ductility รวมถึงทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน (Performance Test) ได้แก่ Dynamic Shear Rheometer (DSR), Bending Beam Rheometer (BBR) and Rotational Viscometer (RV) tests จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผิวทางเก่าในส่วนผสม ส่งผลให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความแข็งขึ้น แต่จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

Williams (2008) ได้กล่าวว่าส่วนผสมที่มีปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์มากกว่ามีแนวโน้มที่จะเกิดการเยิ้ม (Bleeding) บนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตส่งผลให้ความต้านทานการลื่นไถลลดลง โดยพื้นฐานแล้วแอสฟัลต์ซีเมนต์ส่วนเกินบนผิวทางจะส่งผลให้การสัมผัสระหว่างล้อยางพาหนะกับพื้นผิวทางลดลง แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เกิดการเยิ้มนั้นจะติดไปกับยางพาหนะถ้าอุณหภูมิสูงหรือมีความหนืดต่ำ และแอสฟัลต์ส่วนเกินจะไปเกาะกับพื้นผิวทางตำแหน่งอื่นโดยไปปิด Micro texture ของวัสดุผสมรวมทำให้ความต้านทานการลื่นไถลบนผิวทางลดลง และเกรดของแอสฟัลต์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้รับการปรับปรุง (Modified Asphalt) จะทนทานต่อการหลุดร่อนออกจากพื้นผิววัสดุผสมรวม ดังนั้นจึงใช้เวลานานกว่าจะถึงสภาพความต้านทานการลื่นไถลสูงสุด ส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ไม่ได้รับการปรับปรุง (Unmodified Asphalt) มีแนวโน้มลักษณะที่นุ่ม และอ่อน ซึ่งเสื่อมสภาพเร็วกว่าส่งผลให้วัสดุผสมรวมทำหน้าที่รับสภาพความต้านทานการลื่นไถลได้เร็วกว่า ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุผสมรวมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับส่วนผสมที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ไม่ได้รับการปรับปรุง ในบางกรณีผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผสมรวมที่อ่อน และไม่ทนทานต่อการหลุดลอกอาจส่งผลให้ความต้านทานการลื่นไถลในช่วงต้นได้ดีกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผสมรวมแข็ง เนื่องจากวัสดุผสมรวมทำหน้าที่รับสภาพความต้านทานการลื่นไถลได้เร็วกว่า

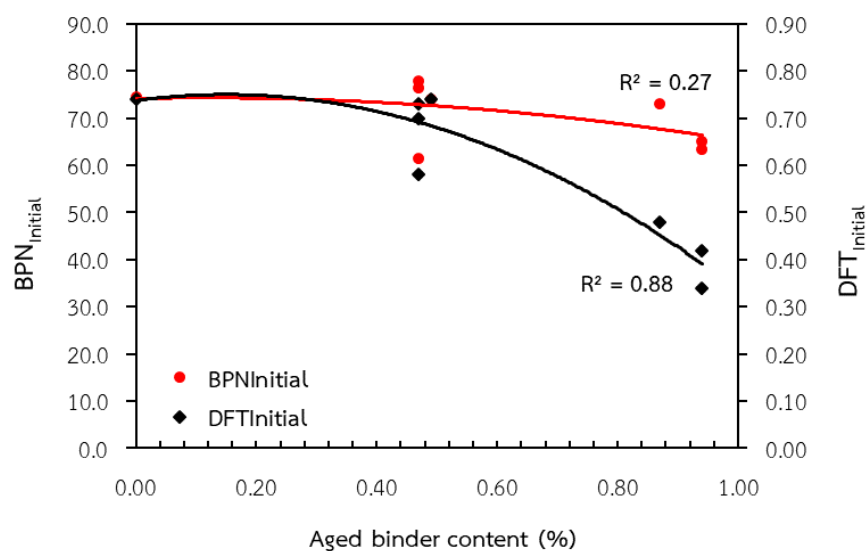
ชลัท ทิพากรเกียรติ (2019) ได้ทำการศึกษาการออกแบบพาราสเลอร์ซีลจากวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ (RAP) โดยออกแบบอัตราส่วนผสมที่ต่างกัน และทำการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ BPT พบว่าค่าความต้านทานการลื่นไถลจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผิวทางเก่าในส่วนผสม เนื่องจากในผิวทางเก่ามีแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่าเคลือบวัสดุมวลรวม

จากผลการทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 5-4 และปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 5-3 เมื่อประเมินร่วมกับค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตของทั้ง 2 กลุ่ม มีแนวโน้มคล้ายกันจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงแรก (Initial skid resistance) เมื่อเพิ่มปริมาณผิวทางเก่าในแอสฟัลต์คอนกรีตมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลลดลง โดยอัตราส่วนผสมที่มีผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียวให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลต่ำที่สุด เนื่องจากในส่วนผสมมีปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่ามากกว่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่าเคลือบนั้นจะมีความแข็ง และทำให้ผิวทางลื่น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ ในทางกลับกันอัตราส่วนผสมที่มีวัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมทั้งหมด จะให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลที่สูงสุดเนื่องจากใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียว และรองลงมาคือ อัตราส่วนผสมที่มีผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมร้อยละ 50 ให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ใกล้เคียงกับอัตราส่วนผสมที่มีวัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมทั้งหมด เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่มีส่วนช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่าให้มีพฤติกรรมที่ยืดหยุ่นขึ้น ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีผลกระทบต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น และในช่วงสุดท้าย (Final) แอสฟัลต์ซีเมนต์ในส่วนผสมมีผลกระทบกับค่าความต้านทานการลื่นไถลเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 5-3 ตารางสรุปปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ในส่วนผสม (Asphalt content)

Mix Design	Asphalt content						
	Virgin (%)	Aged (%)	Total (%)	Ratio A/V	Ratio A/T	Ratio V/T	Ratio RAP
G1 : V100	5.00	0.00	5.00	0.00	0.00	1.00	0.00
G1 : R50:V50	2.45	2.35	4.80	0.96	0.49	0.51	0.24
G1 : R100	0.70	4.70	5.40	6.71	0.87	0.13	0.87
G2_1 : CR50:VF50	2.65	2.35	5.00	0.89	0.47	0.53	0.24
G2_1 : CV50:FR50	2.65	2.35	5.00	0.89	0.47	0.53	0.24
G2_2 : CV50:FR50	2.65	2.35	5.00	0.89	0.47	0.53	0.24
G2_1 : CR50:FR50	0.30	4.70	5.00	15.67	0.94	0.06	0.94
G2_2 : CR50:FR50	0.30	4.70	5.00	15.67	0.94	0.06	0.94
Remark	A = Aged binder, V = Virgin binder, T = Total binder						

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Initial skid resistance กับ Aged binder content



รูปที่ 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการลื่นไถลเริ่มต้นของ BPN และ DFT กับร้อยละปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการสั่นไถลเริ่มต้นของ BPN กับร้อยละปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า พบว่ามีข้อมูลจากอัตราส่วนผสมในกลุ่มที่ 2 ส่งผลให้ค่าความต้านทานการสั่นไถลเริ่มต้นของ BPN กับร้อยละปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่ามีความสัมพันธ์ที่ต่ำ ($R^2 = 0.27$) เนื่องจากในการออกแบบอัตราส่วนผสมในกลุ่มที่ 2 นั้นสำหรับงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมุติฐานในการออกแบบคือ 1. ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า (Aged binder) ของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดของผิวทางเก่ามีปริมาณเท่ากัน และ 2. ในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ (Virgin binder) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า (Aged binder) ผสมกันโดยสมบูรณ์ จากการศึกษาในงานวิจัยในอดีตพบว่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่าในมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดของผิวทางเก่ามีปริมาณไม่เท่ากัน และในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่กับแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า ผสมกันโดยไม่สมบูรณ์ (Yu et al., 2017) รวมไปถึงบริเวณพื้นผิวของวัสดุมวลรวมไม่เท่ากัน เมื่อผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่อัตราส่วนผสมไม่เท่ากัน และการวัดค่าความต้านทานการสั่นไถลเริ่มต้นจากเครื่องมือ BPT นั้นมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง ส่งผลให้เกิดการแปรปรวนของข้อมูล

แต่สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการสั่นไถลเริ่มต้นของ DFT กับร้อยละปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า พบว่ามีค่าความต้านทานการสั่นไถลเริ่มต้นของ DFT กับร้อยละปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่ามีความสัมพันธ์ที่ดี ($R^2 = 0.88$) ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าเครื่องมือ DFT นั้นมีความเหมาะสมสำหรับวัดค่าความต้านทานการสั่นไถล เนื่องจากเครื่องมือ DFT นั้นทดสอบโดยการจำลองการหมุนของล้อยานพาหนะที่เสียดสีกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่เกิดขึ้นจริง

ตารางที่ 5-4 ตารางสรุปคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement properties)

Asphalt cement properties			
Mix Design	Penetration	Softening Point	Ductility
G1 : V100	66.46	40.67	156.00
G1 : R50:V50	38.10	46.80	67.60
G1 : R100	11.80	65.60	18.90
G2_1 : CR50:VF50	39.50	46.20	70.50
G2_1 : CV50:FR50	39.50	46.20	70.50
G2_2 : CV50:FR50	39.50	46.20	70.50
G2_1 : CR50:FR50	6.90	70.40	11.10
G2_2 : CR50:FR50	6.90	70.40	11.10

5.1.4 ผลกระทบของประสิทธิภาพการใช้งานที่มีต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน (Performance) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเก่าที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติมาร์แชลล์ พบว่าค่าเสถียรภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าการไหลมีค่าต่ำลงเมื่อปริมาณผิวทางเก่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลทดสอบนั้นมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับการทดสอบแรงดึงทางอ้อม และการทดสอบโมดูลัสการคืนตัว โดยพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณผิวทางเก่าส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีประสิทธิภาพการใช้งานสูงขึ้น แต่มีลักษณะแข็งเปราะและขาดความยืดหยุ่น เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่าผ่านการใช้งานมาอาจเสื่อมสภาพส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็ง และเกิดการแตกร้าวได้ง่าย

McDaniel (2012) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผิวทางเก่าที่มีคุณภาพต่ำในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นส่งผลให้ค่าความความต้านทานการลื่นไถล และประสิทธิภาพการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิลดลง แต่เมื่อใช้ปริมาณผิวทางเก่าลดลงจะส่งผลกระทบต่อเพียงเล็กน้อยเล็กน้อย

อัตราส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีส่วนช่วยในด้านความต้านทานการลื่นไถล เมื่อก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่นั้น แอสฟัลต์ซีเมนต์ยังคงยึดเกาะอยู่บนพื้นผิววัสดุมวลรวมซึ่งก่อให้เกิดความต้านทานการลื่นไถล ดังนั้นคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์จึงมีความสำคัญมากที่สุดสำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ เมื่อผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลาอันยาวนานส่งผลให้แอสฟัลต์ซีเมนต์

เสื่อมสภาพ และวัสดุมวลรวมทำหน้าที่สร้างความต้านทานการลื่นไถลแทน เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์มี Micro-Texture และ Macro-Texture น้อยกว่าวัสดุมวลรวม (Williams, 2008) ดังนั้นสำหรับงานวิจัยเรื่องนี้ประสิทธิภาพการใช้งานเพิ่มขึ้นของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมที่ อาจเป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ในวัสดุผิวทางเก่าโดยเป็นคุณสมบัติที่บ่งชี้ถึงค่าความต้านทานการลื่นไถล

5.2 บทสรุปผลกระทบของตัวแปรที่ส่งผลต่อความต้านทานการลื่นไถล

จากการอภิปรายตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลพบว่า ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt content) และคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมนั้นมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น (Initial skid resistance) พบว่าในอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า (Aged binder) เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลช่วงเริ่มต้นลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากรูปที่ 4-10 และ 4-11 เนื่องจากคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่านั้นเกิดการเสื่อมสภาพ เมื่อผิวทางเปียกจะทำให้ลื่น และเมื่อเพิ่มแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ (Virgin binder) ในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมนั้นทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่นั้นช่วยปรับปรุงคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้มีความเหนียวมากขึ้น

เมื่อผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้ผ่านการใช้งาน แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เคลือบวัสดุมวลรวมเริ่มหลุดลอกออก โดยวัสดุมวลรวมทำหน้าที่สร้างแรงเสียดทานแทน ดังนั้นค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้าย (Terminal skid resistance) สามารถบ่งชี้ได้จาก Macro-texture และ Micro-texture ของวัสดุมวลรวม รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม ซึ่งจากค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในช่วงสุดท้ายมีช่วงข้อมูลที่ใกล้เคียงกัน บ่งชี้ได้จากคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมนั้นมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย และวัสดุมวลรวมทั้ง 2 ชนิด เป็นชนิดเดียวกันคือ หินปูน โดยบ่งชี้ได้จากผลการทดสอบ XRD และ FT-IR รวมทั้งภาพจากการทดสอบ SEM ของวัสดุมวลรวมทั้ง 2 ชนิด ทั้งก่อนการขัดสี และหลังการขัดสีจากการทดสอบ PSV นั้นบ่งชี้ได้ว่าลักษณะของ Micro-texture มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยแสดงดังรูปที่ 4-5 และ 4-6

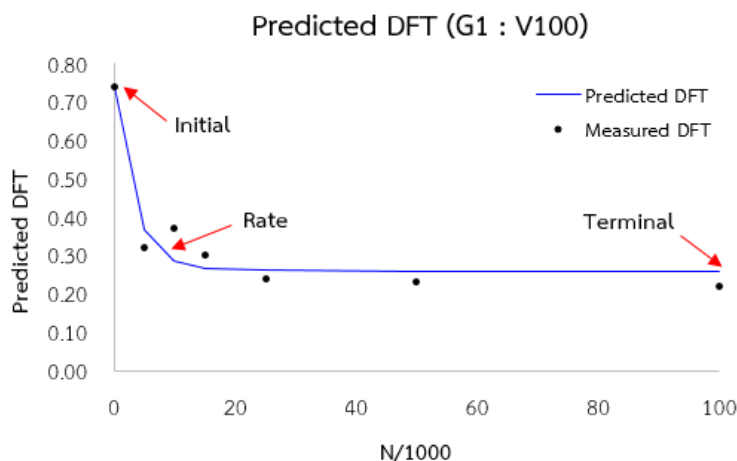
5.3 สมการสำหรับทำนาย (Prediction Model) ค่าความต้านทานการลื่นไถลของแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ที่วัดได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

5.3.1 การศึกษา (Past Research)

Rezaei and Masad (2013) ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีต อันเนื่องมาจากการจำลองการขัดสีในห้องปฏิบัติการ จากฟังก์ชัน IFI (International Friction Index) แสดงดังสมการที่ 5-6

$$IFI(N) = a + be^{-c\left(\frac{N}{1000}\right)} \quad (5-6)$$

โดยที่ a , b และ c คือ Regression coefficients ของสมการถูกกำหนดขึ้นและสามารถอธิบายฟังก์ชัน IFI ได้อย่างแม่นยำ โดยที่ a คือ Terminal value (ค่า IFI ต่ำสุด) $a+b$ คือ Initial value (ค่าเริ่มต้น) และ c คือ Rate of change (อัตราการถดถอย) ส่วน N คือ จำนวนรอบการขัดสีด้วยเครื่อง TWPD รูปที่ 5-1 อธิบายความหมายของ Regression coefficients – a , $a + b$ และ c จากสมการการทำนายที่แนะนำโดย Rezaei and Masad (2013)



รูปที่ 5-3 ความหมายของ Regression coefficients – (a) Terminal value, (a + b) Initial value และ (c) Rate of change

5.3.2 การพัฒนาสมการทำนายค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Skid Resistance Prediction Model Development)

จากการศึกษาในอดีตพบว่า Regression coefficients ของสมการที่พัฒนาโดย Rezaei and Masad (2013) สมการที่ 5-6 มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมแอสฟัลต์คอนกรีต

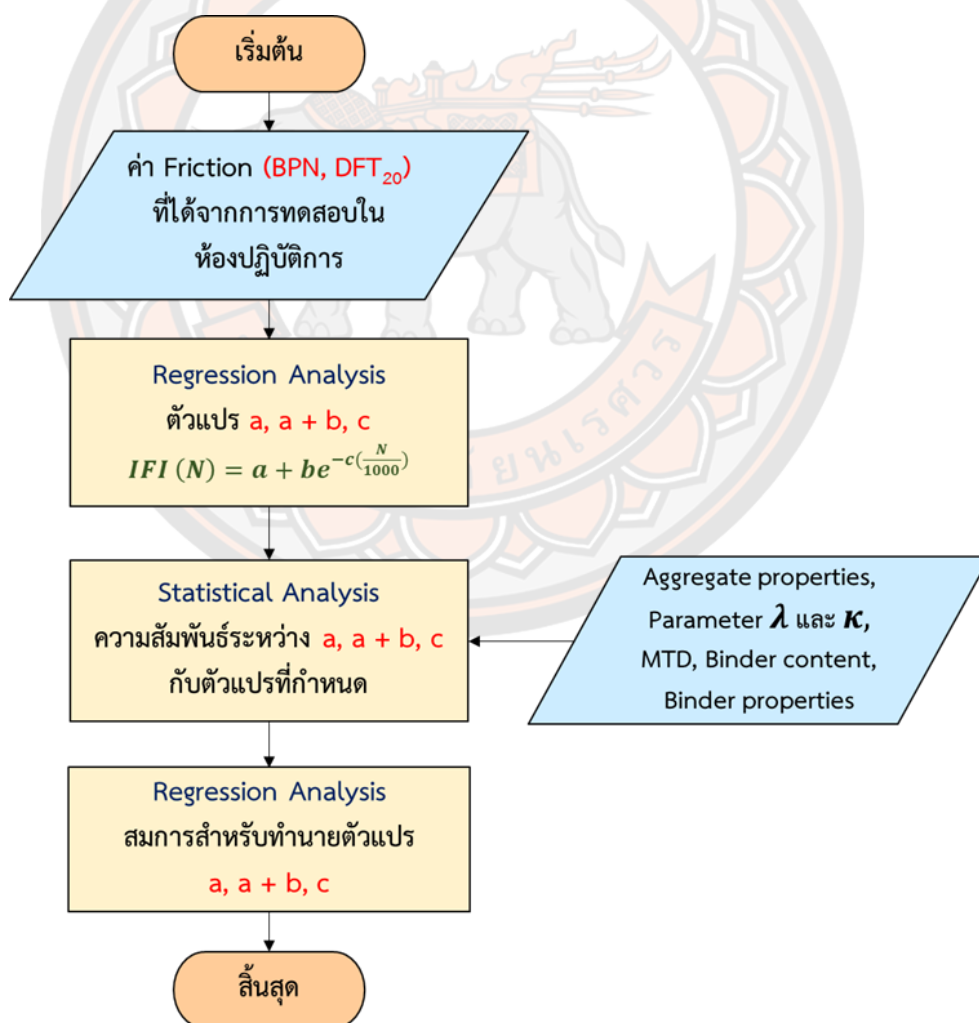
กรมทางหลวง (2018) ได้มีการวิเคราะห์คุณลักษณะของค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงต้นอายุของผิวทางพบว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์นั้นส่งผลต่อค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ และในงานวิจัยนี้พบว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของผิวทางเก่าให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น (Initial skid resistance) ต่ำกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุมวลรวมใหม่เพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจเกิดจากคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ของผิวทางเก่า (Aged binder) ที่มีประสิทธิภาพการใช้งานต่ำกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ (Virgin binder) เมื่อเพิ่มปริมาณผิวทางเก่าในส่วนผสมปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่าจะเพิ่มขึ้น เมื่อแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่าปกคลุมผิวของวัสดุมวลรวมในปริมาณที่มากอาจทำให้เกิดการเอี่ยมของผิวทาง (Bleeding) และส่งผลให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลต่ำกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุมวลรวมใหม่เพียงอย่างเดียว

ในการศึกษานี้สามารถสร้างสมการทำนายค่าความต้านทานการลื่นไถล จากสมมติฐาน (Assumption) โดยอ้างอิงจากการศึกษางานวิจัยในอดีตที่กล่าวไปข้างต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- (1) a , $a + b$ และ c มีความสัมพันธ์กับ คุณสมบัติความแข็งแรง ความทนทานต่อการขีดสี และความคงทนต่อการสึกหรอ (AIV, ACV, PSV, LAA)
- (2) a , $a + b$ และ c มีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ λ และ K ที่ได้จาก Weibull distribution ของข้อมูลขนาดคละ (Particle size distribution) ของอัตราส่วนผสม
- (3) a , $a + b$ และ c มีความสัมพันธ์กับค่าความหยาบเฉลี่ยของผิวทางเริ่มต้น (Mean Texture Depth, $MTD_{Initial}$)
- (4) a , $a + b$ และ c มีความสัมพันธ์กับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Aged binder/Virgin binder, Aged binder/Total binder, Virgin binder/Total binder, Ratio RAP binder)
- (5) a , $a + b$ และ c มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Penetration, Softening Points, Ductility)

จากสมมติฐานที่กำหนดขึ้น และผลการทดสอบวัสดุต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการพัฒนาสมการทำนายค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ทดสอบด้วยเครื่องมือ BPN และ DFT ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ดังแสดงรูปที่ 5-4

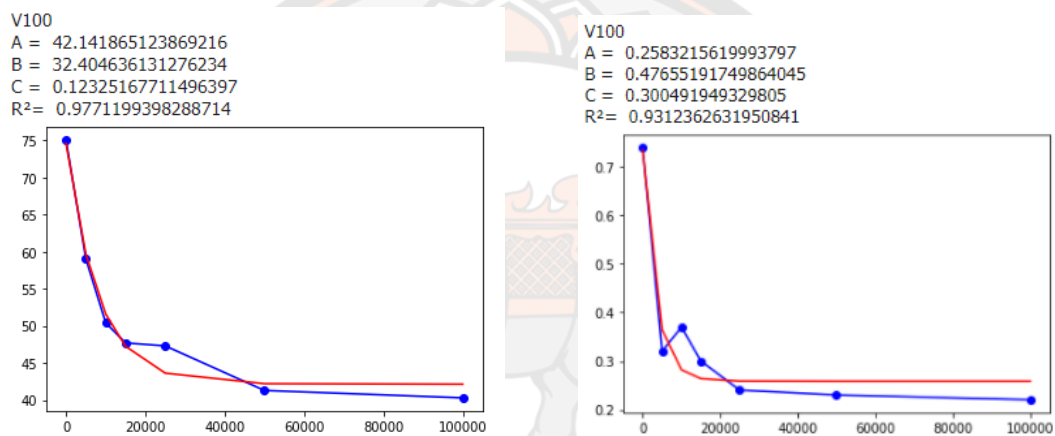
1. หาค่า a , $a + b$ และ c จากค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ทดสอบด้วยเครื่องมือ BPN และ DFT ในห้องปฏิบัติการ
2. หาความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างค่า a , $a + b$ และ c กับคุณสมบัติของวัสดุผสมรวมพารามิเตอร์ λ และ K ที่ได้จาก Weibull distribution ค่าความหยาบเฉลี่ยของผิวทางเริ่มต้น ($MTD_{Initial}$) อัตราส่วนปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ และคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ จากสมมติฐานที่ตั้งไว้
3. สร้างสมการสำหรับทำนายตัวแปร a , $a + b$ และ c



รูปที่ 5-4 ขั้นตอนการพัฒนาสมการทำนายค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ขั้นตอนที่ 1 หาค่า a , $a + b$ และ c จากค่าความต้านทานการสั่นไถลที่ทดสอบด้วยเครื่องมือ BPN และ DFT ในห้องปฏิบัติการโดย

การหาค่า a , $a + b$ ดำเนินการจากขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ด้วยโปรแกรมภาษา Python โดยใช้โมดูล Scikit-learn สำหรับทำ Machine Learning และ Data Mining จากค่าความต้านทานการสั่นไถลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการวัดด้วยเครื่องมือ British Pendulum Test (BPT) และ Dynamic Friction Test (DFT) ซึ่ง Regression Analysis ที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 5-5



รูปที่ 5-5 ตัวอย่าง Regression Analysis ด้วยโปรแกรมภาษา Python เพื่อหาค่า a , $a + b$ และ c

ตารางที่ 5-5 ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยเพื่อหาค่า a , $a + b$ และ c จากผลการทดสอบค่าความต้านทานการสิ้นไถล (BPN, DFT₂₀) ในห้องปฏิบัติการ

Type	BPN					DFT				
	a	b	c	a + b	R ²	a	b	a + b	c	R ²
G1 : V100	42.142	32.405	0.123	74.547	0.98	0.258	0.477	0.735	0.300	0.93
G1 : R50:V50	46.913	27.108	0.141	74.021	0.98	0.225	0.514	0.739	0.167	0.99
G1 : R100	43.744	29.393	0.172	73.137	0.98	0.221	0.258	0.479	0.341	0.92
G2_1 : CR50:VF50	43.881	33.878	0.104	77.759	0.92	0.222	0.481	0.703	0.160	0.99
G2_1 : CV50:FR50	42.278	34.103	0.156	76.381	0.96	0.203	0.533	0.736	0.222	0.99
G2_2 : CV50:FR50	33.243	28.268	0.085	61.511	0.90	0.201	0.379	0.580	0.160	0.96
G2_1 : CR50:FR50	37.853	27.230	0.157	65.083	0.98	0.205	0.142	0.347	0.089	0.99
G2_2 : CR50:FR50	37.849	25.649	0.194	63.498	0.86	0.198	0.219	0.417	0.083	0.98

ขั้นตอนที่ 2 หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า a , $a + b$ และ c กับตัวแปรต่าง ๆ จากสมมติฐานที่ตั้งไว้

- (1) จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ โดยแสดงดังตารางที่ 5-6

ตารางที่ 5-6 ผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า
a, a + b และ c กับตัวแปรต่าง ๆ

Item	Regression Analysis (R^2)					
	a + b	a	c	a + b	a	c
	(BPT)	(BPT)	(BPT)	(DFT)	(DFT)	(DFT)
MTDInitial	0.82	0.64	0.16	0.46	0.09	0.50
λ	0.09	0.47	0.09	0.14	0.17	0.14
κ	0.23	0.48	0.10	0.10	0.16	0.45
AIV (%)	0.03	0.14	0.26	0.25	0.04	0.73
ACV (%)	0.03	0.14	0.26	0.25	0.04	0.73
PSV _d	0.03	0.14	0.26	0.25	0.04	0.73
LAA (%)	0.03	0.14	0.26	0.25	0.04	0.73
Ratio A/V	0.39	0.22	0.56	0.89	0.24	0.62
Ratio A/T	0.27	0.07	0.57	0.88	0.68	0.21
Ratio V/T	0.27	0.07	0.57	0.88	0.68	0.21
Ratio RAP	0.25	0.07	0.57	0.88	0.61	0.14
Pen _{mix}	0.27	0.07	0.57	0.88	0.67	0.29
TR&B _{mix}	0.30	0.13	0.56	0.89	0.44	0.12
duct _{mix}	0.26	0.07	0.57	0.88	0.69	0.23

ตารางที่ 5-7 เกณฑ์ความสัมพันธ์ในการกำหนด R^2

Value	Strength of association
$R^2 = 0$	No correlation
$0 < R^2 < 0.25$	Very weak correlation
$0.25 \leq R^2 < 0.50$	Weak correlation
$0.50 \leq R^2 < 0.75$	Moderate correlation
$0.75 \leq R^2 < 0.90$	Strong correlation
$0.90 \leq R^2 < 1$	Very strong correlation
$R^2 = 1$	Perfect correlation

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า a , $a + b$ และ c ที่ได้จาก BPN Value และ DFT Value กับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวม (AIV, ACV, PSV_d, และ LAA) พบว่าค่า a , $a + b$ มีความสัมพันธ์ต่ำถึงต่ำมากกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวม สำหรับค่า c ที่ได้จาก DFT Value มีความสัมพันธ์ปานกลางกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวม ($R^2 = 0.73$) ในทางกลับกันค่า c ให้ความสัมพันธ์ที่ต่ำกับ BPN Value ทั้งนี้ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมนั้นมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย อาจส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีตผิวทางเท่านั้นไม่ได้รับผลกระทบจากคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวม สำหรับงานวิจัยนี้จึงลดตัวแปรคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมสำหรับพิจารณาใช้ในการพัฒนาสมการทำนายค่า a , $a + b$ และ c

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า a , $a + b$ ที่ได้จาก BPN Value กับความหยาบเฉลี่ยของผิวทางเริ่มต้น (MTD_{Initial}) พบว่าค่า a , $a + b$ มีความสัมพันธ์ปานกลางถึงมาก ($R^2 = 0.64 - 0.82$) กับ MTD_{Initial} สำหรับค่า a ที่ได้จาก DFT Value พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ต่ำมากกับ MTD_{Initial} แต่ค่า $a + b$ มีความสัมพันธ์ต่ำ ($R^2 = 0.46$) และค่า c ที่ได้จาก DFT Value นั้นมีความสัมพันธ์ปานกลาง ($R^2 = 0.50$) กับ MTD_{Initial} แต่ค่า c ที่ได้จาก BPN Value มีความสัมพันธ์ที่ต่ำมากกับ MTD_{Initial}

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า a , $a + b$ และ c ที่ได้จาก BPN Value กับพารามิเตอร์ของขนาดคละที่ได้จาก curve fitting Weibull distribution พบว่าค่า $a + b$ และ c มีความสัมพันธ์ที่ต่ำมากกับ λ และ k แต่ค่า a มีความสัมพันธ์ต่ำกับ λ และ k ($R^2 = 0.47 - 0.48$) สำหรับค่า a , $a + b$ ที่ได้จาก DFT Value พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ต่ำมากกับ λ และ k แต่ค่า c มีความสัมพันธ์ต่ำกับ k ($R^2 = 0.45$) และให้ความสัมพันธ์ที่ต่ำกับ λ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a , $a + b$ ที่ได้จากเครื่องมือทดสอบ BPT กับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ พบว่าค่า a , $a + b$ มีความสัมพันธ์ที่ต่ำมากกับอัตราส่วนของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์แต่มีความสัมพันธ์ปานกลางกับค่า c ($R^2 = 0.56 - 0.57$) สำหรับค่า a , $a + b$ ที่ได้จาก DFT Value พบว่ามีความสัมพันธ์ปานกลางถึงมาก ($R^2 = 0.68 - 0.88$) กับอัตราส่วนของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ แต่มีความสัมพันธ์ที่ต่ำกับค่า c

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a , $a + b$ ที่ได้จากเครื่องมือทดสอบ BPT กับคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ พบว่าค่า a , $a + b$ มีความสัมพันธ์ที่ต่ำมากกับคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ แต่มีความสัมพันธ์ปานกลางกับค่า c ($R^2 = 0.56 - 0.57$) สำหรับค่า a , $a + b$ ที่ได้จาก DFT Value พบว่ามีความสัมพันธ์ปานกลางถึงมาก ($R^2 = 0.44 - 0.88$) กับอัตราส่วนของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ แต่มีความสัมพันธ์ที่ต่ำมากกับค่า c

(2) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติของตัวแปรต่าง ๆ ด้วยวิธี T-Test จาก ANOVA แสดงดังตารางที่ 5-8

ตารางที่ 5-8 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติของตัวแปรต่าง ๆ ด้วยวิธี T-Test จาก ANOVA

Independent Variable	Dependent Variable					
	P-Value (95% Confidence Level)					
	BPN			DFT20		
	a	a + b	c	a	a + b	c
MTD _{Initial}	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000
λ	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000
Ratio A/V	0.000	0.000	0.072	0.076	0.102	0.076
Ratio A/T	0.000	0.000	0.004	0.018	0.953	0.020
Ratio V/T	0.000	0.000	0.058	0.104	0.046	0.064
Ratio RAP	0.000	0.000	0.039	0.121	0.523	0.110
Pen _{mix}	0.211	0.001	0.004	0.004	0.004	0.004
TR&B _{mix}	0.360	0.025	0.000	0.000	0.000	0.000
Duct _{mix}	0.303	0.508	0.010	0.010	0.010	0.010

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ จากการวิเคราะห์การถดถอย และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติด้วยวิธี T-Test จาก ANOVA ซึ่งสามารถลดตัวแปรที่ใช้ในการทำนายค่า a, a + b และ c ที่ได้จาก DFT Value และ BPT Value

ในงานวิจัยนี้ตั้งสมมุติฐานสำหรับพิจารณาตัวแปรในการพัฒนาสมการทำนายค่า a, a + b และ c จากการวิเคราะห์การถดถอยความสัมพันธ์ระหว่างค่า a, a + b และ c กับตัวแปรต่าง ๆ ของ DFT Value เนื่องจากการวิเคราะห์การถดถอยของ DFT Value นั้นมีความแปรปรวน (Variation) น้อยกว่า BPT Value รวมถึงพิจารณาจากค่า P-value ที่วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a, a + b และ c กับตัวแปรต่าง ๆ ทางสถิติ สามารถกำหนดได้ดังนี้

- ค่า a + b มีความสัมพันธ์มากกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ และคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากการทดสอบ Penetration , Softening point และ Ductility เนื่องจากปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ที่เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนผสมทำให้ค่า a + b เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า a + b ลดลง เนื่องจากผิวแอสฟัลต์คอนกรีตของตัวอย่างทดสอบถูกปกคลุมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีความแข็ง และพื้นผิวลื่นเมื่อเปียก ในทาง

กลับกันปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ และคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า a และ c เพียงเล็กน้อย

- ค่า a จะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของขนาดคละที่ได้จาก curve fitting Weibull distribution คือค่า λ และ k อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ของขนาดคละส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า a เพียงเล็กน้อยเท่านั้น
- ค่า c จะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ และค่าความหยาบเฉลี่ยของผิวทางเริ่มต้น ($MTD_{Initial}$)

ขั้นตอนที่ 3 สร้างสมการสำหรับคำนวณตัวแปร a , $a + b$ และ c

ในการสร้างสมการทำนายค่า $a + b$ เมื่อทดสอบด้วยเครื่องมือ BPT และ DFT โดยแบ่งสมการออกเป็น 2 ชุด ซึ่งพิจารณาจากตัวแปรอัตราส่วนของแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้งหมดในส่วนผสม (%Virgin Asphalt / %Total Asphalt) และพิจารณาตัวแปรคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Penetration, Softening Points, Ductility) เนื่องจากการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 2 พบว่าอัตราส่วนของแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้งหมดในส่วนผสม และคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์มีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับค่า $a + b$ และจากการการศึกษาในอดีตพบว่าในช่วงเริ่มต้นการใช้งานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นแอสฟัลต์ซีเมนต์จะปกคลุมวัสดุมวลรวม และทำหน้าที่สัมผัสกับล้ออย่างพาหนะก่อนที่จะเกิดการหลุดร่อนออกไป ซึ่งตัวแปรอัตราส่วนของแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้งหมดในส่วนผสม และคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์อาจจะส่งผลต่อค่า $a + b$ สำหรับในการแบ่งสมการเป็น 2 ชุดนั้น เนื่องจากการศึกษานี้ได้เร่งเห็นถึงการนำสมการอย่างง่าย (สมการที่ 5-7) มาใช้ในการทำนายค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น หรือค่า $a + b$ ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และในกรณีที่มีผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ก็สามารถทำนายค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้นได้จากสมการที่ 5-8

สำหรับการสร้างสมการทำนายค่า a นั้นจะพิจารณาจากพารามิเตอร์ λ และ k ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของชุดข้อมูลขนาดคละวัสดุมวลรวมในแต่ละอัตราส่วนผสม เมื่อแอสฟัลต์ซีเมนต์เกิดการหลุดร่อนภายหลังการใช้งาน และพารามิเตอร์ λ และ k จะควบคุมค่า a ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 2 นั้น พารามิเตอร์ λ และ k อาจส่งผลต่อค่า a เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สำหรับการสร้างสมการทำนายค่า c นั้นจะพิจารณาจากค่า $MTD_{Initial}$ และคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เพียงเท่านั้น เนื่องตัวแปรต่างจากค่า c มีความสัมพันธ์ปานกลางกับค่า $MTD_{Initial}$ เมื่อทำการทดสอบจาก DFT และจากการวิเคราะห์ทางสถิติในขั้นตอนที่ 2 พบว่าปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์

นั้นไม่มีความสัมพันธ์กับค่า c อย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} > 0.05$) จึงลดตัวแปรปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ในการพิจารณาสำหรับการสร้างสมการทำนายค่า c

ทั้งนี้จึงแบ่งชุดสมการการทำนายค่า a , $a + b$ และ c เป็น 2 ชุด ได้แก่ **(1) ชุด A (Series A)** ใช้สมการที่ (5-7), (5-11), (5-13) สำหรับเครื่องมือทดสอบ BPT และสมการที่ (5-9), (5-12), (5-14) สำหรับเครื่องมือทดสอบ DFT และ **(2) ชุด B (Series B)** ใช้สมการที่ (5-8), (5-11), (5-13) สำหรับเครื่องมือทดสอบ BPT และสมการที่ (5-10), (5-11), (5-13) สำหรับเครื่องมือทดสอบ DFT โดยสรุปตัวแปรในการทำนายค่า a , $a + b$ และ c แสดงดังตารางที่ 5-9

ตารางที่ 5-9 ตารางสรุปตัวแปรในการทำนายค่า a , $a + b$ และ c		
a	$a + b$	c
$F(\lambda, k)$	F (%Virgin Asphalt / %Total Asphalt)	F (Penetration, Softening, Ductility, MTD _{Initial})
	F (Penetration, Softening, Ductility)	

สมการทำนายค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น (Initial skid resistance)

- สำหรับเครื่องมือทดสอบ BPT

$$a + b \text{ (BPT)} = \alpha_1 (\% \text{Virgin Asphalt} / \% \text{Total Asphalt}) + \alpha_2 \quad (5-7)$$

$$a + b \text{ (BPT)} = \alpha_3 \text{Pen}_{\text{mix}} + \alpha_4 \text{T}_{\text{R\&Bmix}} + \alpha_5 \text{Duct}_{\text{mix}} + \alpha_6 \quad (5-8)$$

- สำหรับเครื่องมือทดสอบ DFT

$$a + b \text{ (DFT)} = \beta_1 (\% \text{Virgin Asphalt} / \% \text{Total Asphalt}) + \beta_2 \quad (5-9)$$

$$a + b \text{ (DFT)} = \beta_3 \text{Pen}_{\text{mix}} + \beta_4 \text{T}_{\text{R\&Bmix}} + \beta_5 \text{Duct}_{\text{mix}} + \beta_6 \quad (5-10)$$

สมการทำนายค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มสุดท้าย (Terminal skid resistance)

- สำหรับเครื่องมือทดสอบ BPT

$$a \text{ (BPT)} = \alpha_7 \lambda + \alpha_8 k + \alpha_9 \quad (5-11)$$

- สำหรับเครื่องมือทดสอบ DFT

$$a \text{ (DFT)} = \beta_7 \lambda + \beta_8 k + \beta_9 \quad (5-12)$$

สมการทำนายอัตราการถดถอยของค่าความต้านทานการลื่นไถล (Rate of change)

- สำหรับเครื่องมือทดสอบ BPT

$$c \text{ (BPT)} = \alpha_{10} \text{Pen}_{\text{mix}} + \alpha_{11} \text{T}_{\text{R\&Bmix}} + \alpha_{12} \text{Duct}_{\text{mix}} + \alpha_{13} \text{MTD}_{\text{Initial}} + \alpha_{14} \quad (5-13)$$

- สำหรับเครื่องมือทดสอบ DFT

$$c \text{ (DFT)} = \beta_{10} \text{Pen}_{\text{mix}} + \beta_{11} \text{T}_{\text{R\&Bmix}} + \beta_{12} \text{Duct}_{\text{mix}} + \beta_{13} \text{MTD}_{\text{Initial}} + \beta_{14} \quad (5-14)$$

เมื่อ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9, \alpha_{10}, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{14}, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9, \beta_{10}, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13}$ และ β_{14} คือ Regression Parameter สำหรับทำนายค่า $a, a + b$ และ c แสดงดังตารางที่ 5-8 ถึง 5-11

จากรูปที่ 5-5 ถึง 5-12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า BPN กับจำนวนรอบการขัด และจากรูปที่ 5-13 ถึง 5-20 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า DFT กับจำนวนรอบการขัด โดยใช้สมการ (5-1) ของ Rezaei and Masad (2013) และ ค่า $a, a + b$ และ c ที่ได้จากการทำนายของสมการทั้ง 2 ชุด (Series A และ Series B) เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีตของอัตราส่วนผสมทั้ง 6 อัตราส่วนผสม

ตารางที่ 5-10 ค่า Regression Parameter ชุด A (Series A) และ ชุด B (Series B) สำหรับทำนายค่า a + b

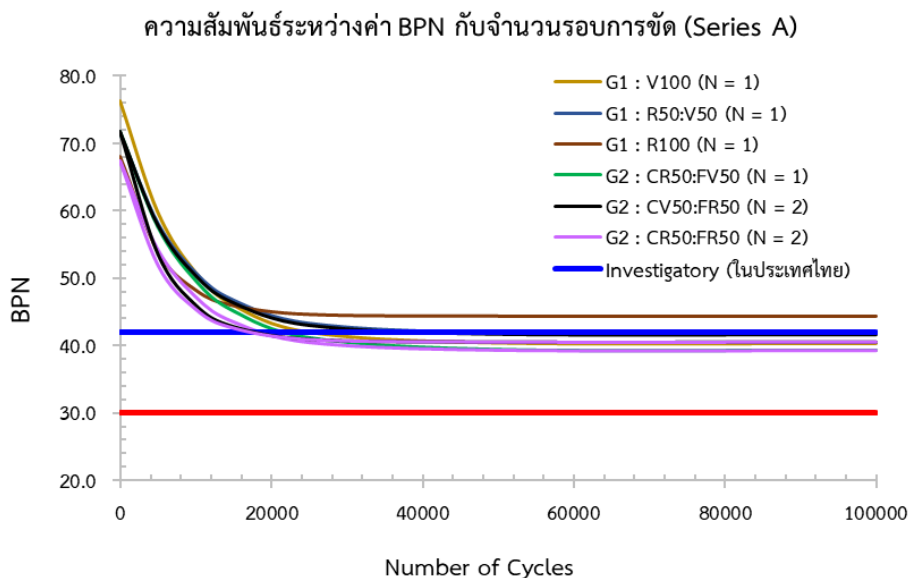
a + b (Series A)															
British Pendulum Tester			Dynamic Friction Tester			British Pendulum Tester			Dynamic Friction Tester						
α_1	α_2	R ²	β_1	β_2	R ²	α_3	α_4	α_5	α_6	R ²	β_3	β_4	β_5	β_6	R ²
9.4546	66.7663	0.23	0.4281	0.412	0.74	-14.6674	-10.2626	3.9934	843.6996	0.42	-0.0447	-0.0334	0.0133	2.9957	0.30

ตารางที่ 5-11 ค่า Regression Parameter สำหรับทำนายค่า a

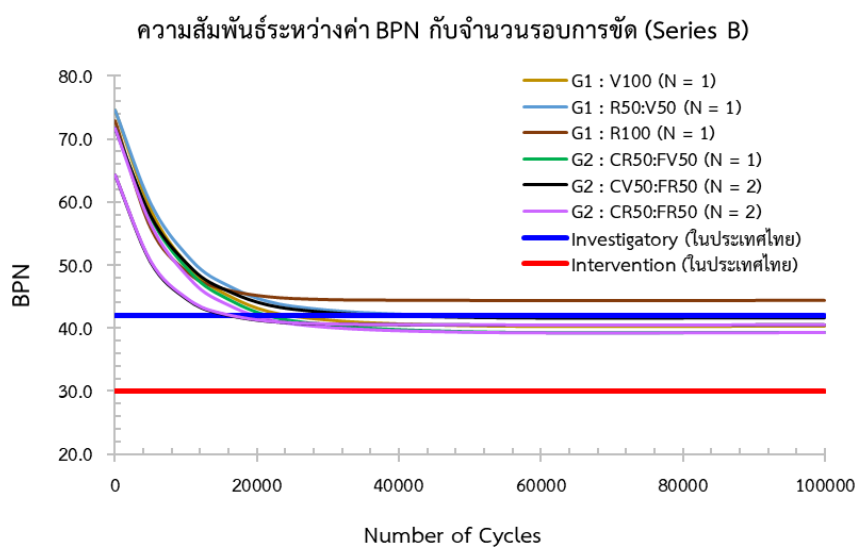
a				
British Pendulum Tester			Dynamic Friction Tester	
α_7	α_8	α_9	R ²	R ²
-0.4099	11.1472	33.9126	0.14	0.03
			-0.0033	0.2493
			-0.0160	0.2493

ตารางที่ 5-12 ค่า Regression Parameter สำหรับทำนายค่า c

c													
British Pendulum Tester				Dynamic Friction Tester									
α_{10}	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}	β_{10}	β_{11}	β_{12}	β_{13}	β_{14}	R ²	R ²	R ²	R ²
-0.0646	-0.041	0.0177	0.0906	3.2474	0.61	-0.6423	-0.4355	0.1760	0.6298	32.7417	0.96		

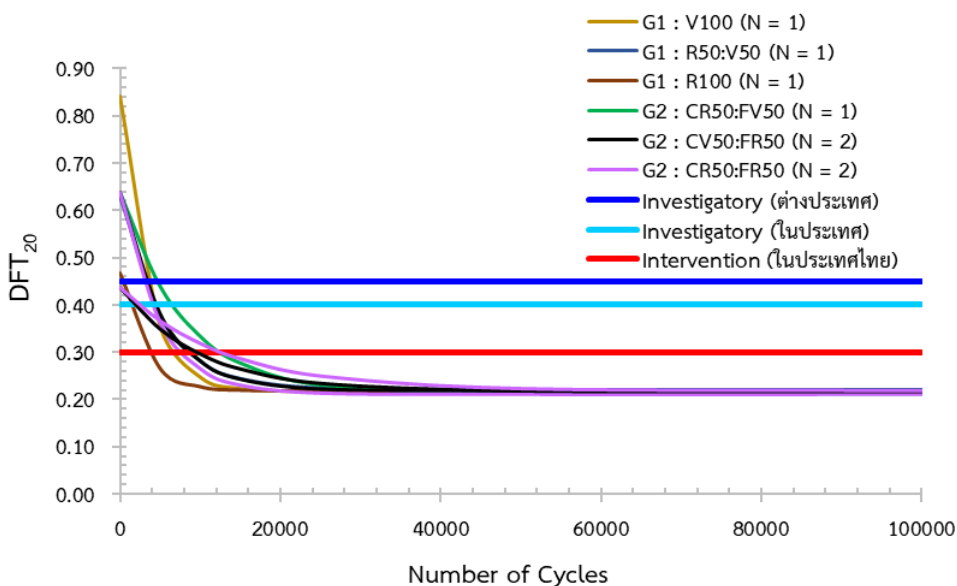


รูปที่ 5-6 ผลทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ BPT



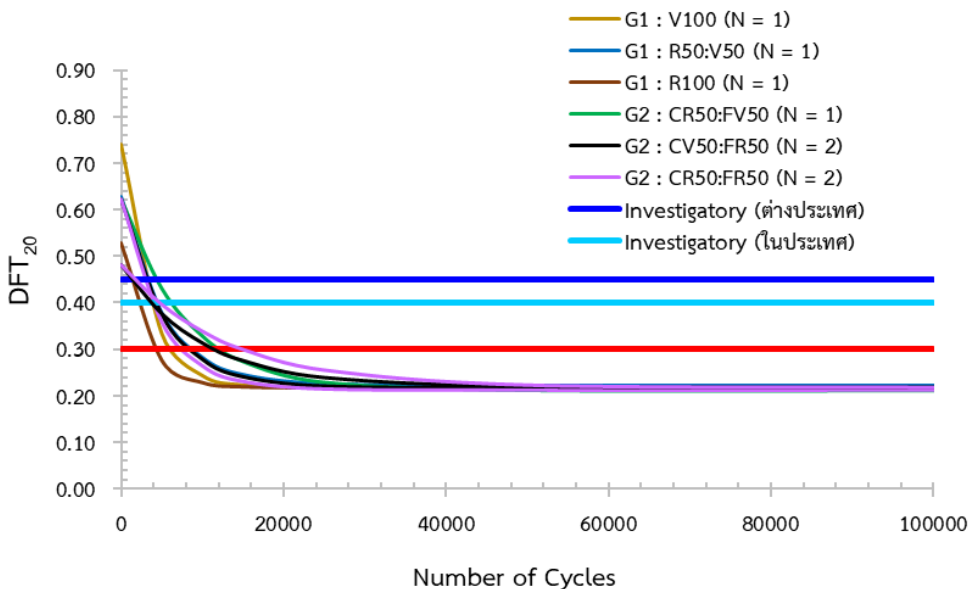
รูปที่ 5-7 ผลทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ BPT

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DFT กับจำนวนรอบการขีด (Series A)

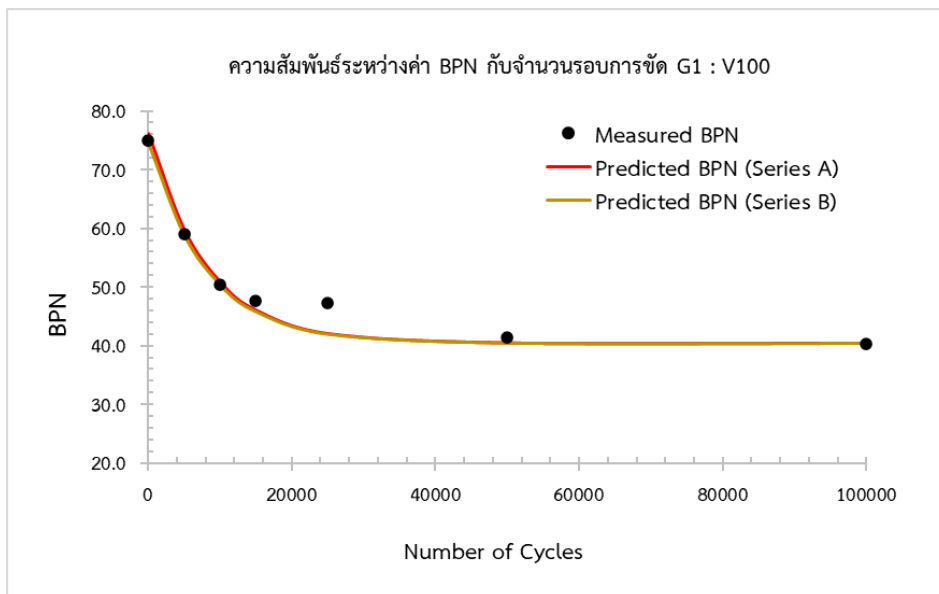


รูปที่ 5-8 ผลทดสอบค่าความต้านทานการสิ้นไกลด้วยเครื่องมือ DFT

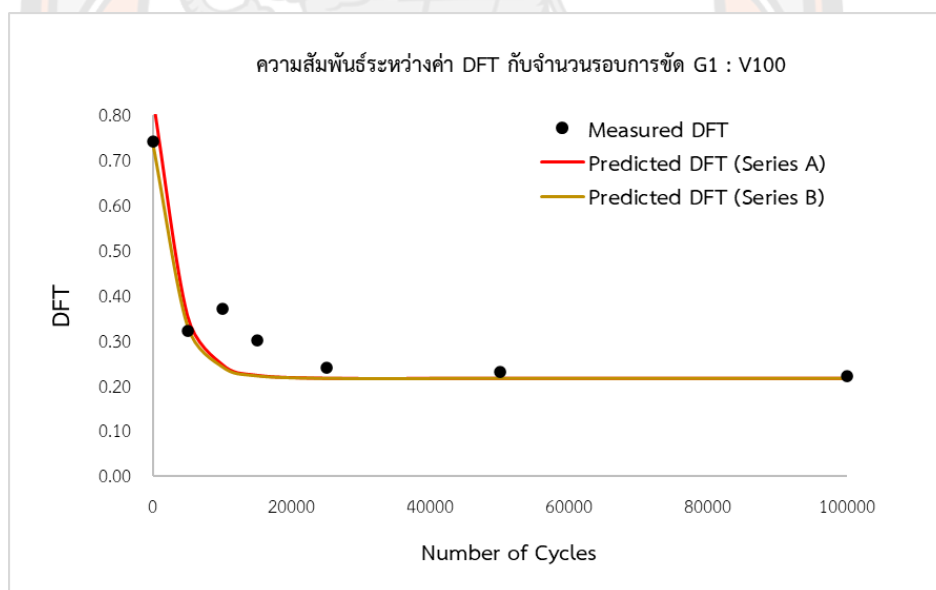
ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DFT กับจำนวนรอบการขีด (Series B)



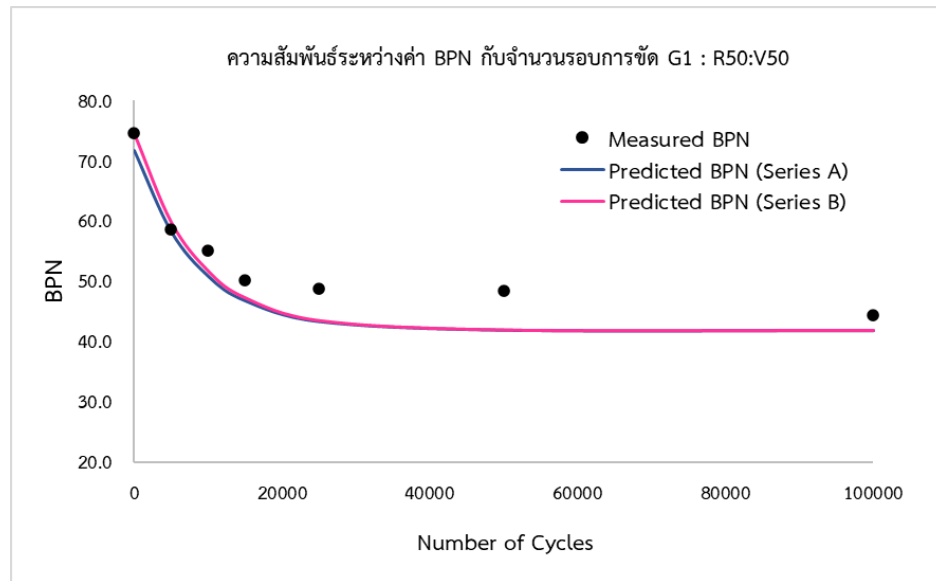
รูปที่ 5-9 ผลทดสอบค่าความต้านทานการสิ้นไกลด้วยไกลด้วยเครื่องมือ DFT



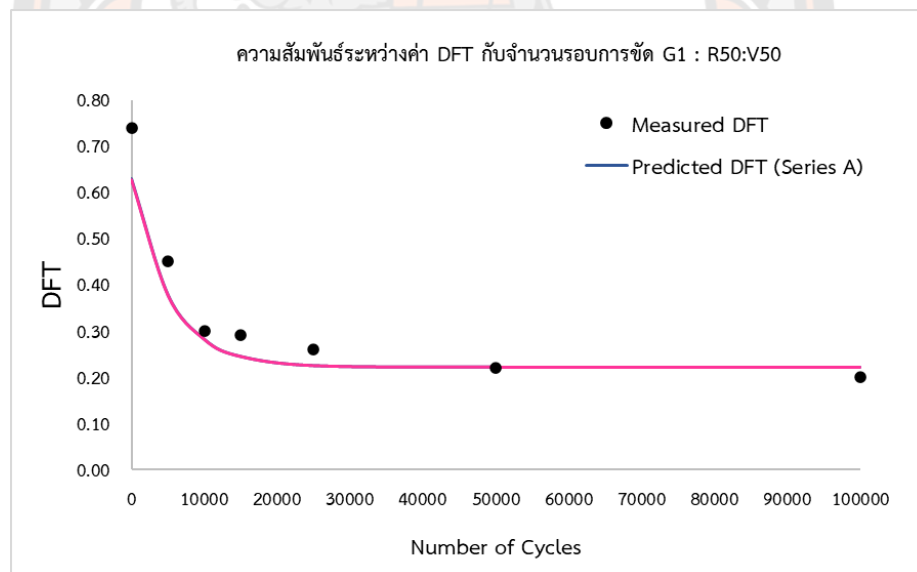
รูปที่ 5-10 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ BPT (G1 : V100)



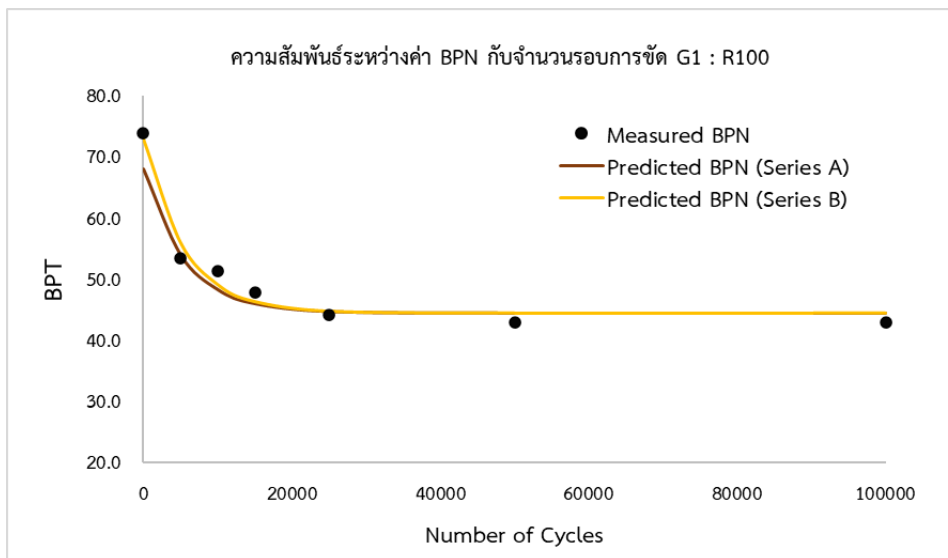
รูปที่ 5-11 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ DFT (G1 : V100)



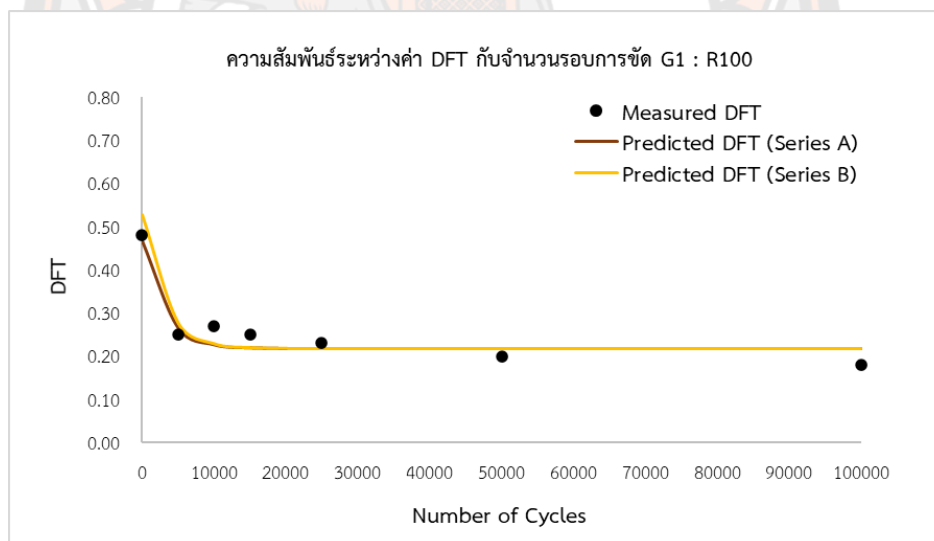
รูปที่ 5-12 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ BPT (G1 : R50:V50)



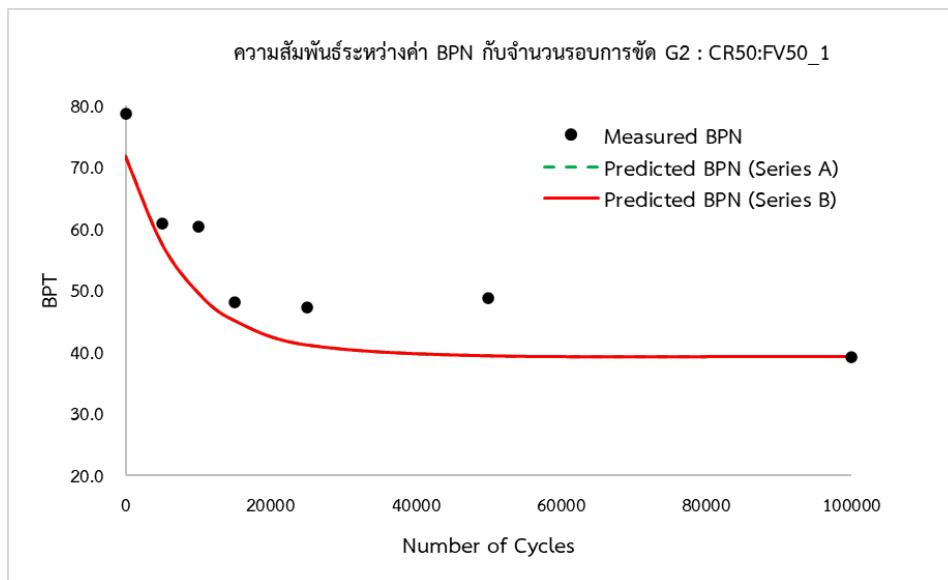
รูปที่ 5-13 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ DFT (G1 : R50:V50)



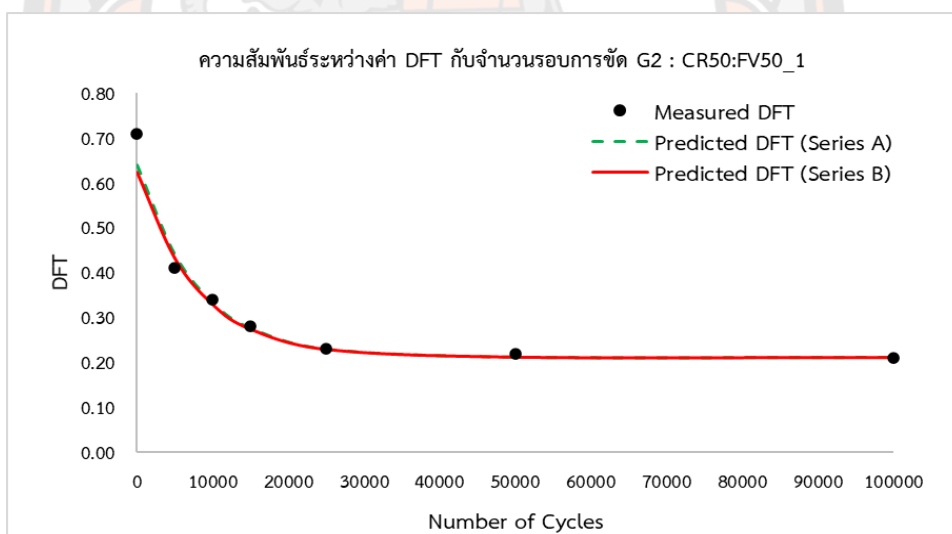
รูปที่ 5-14 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ BPT (G1 : R100)



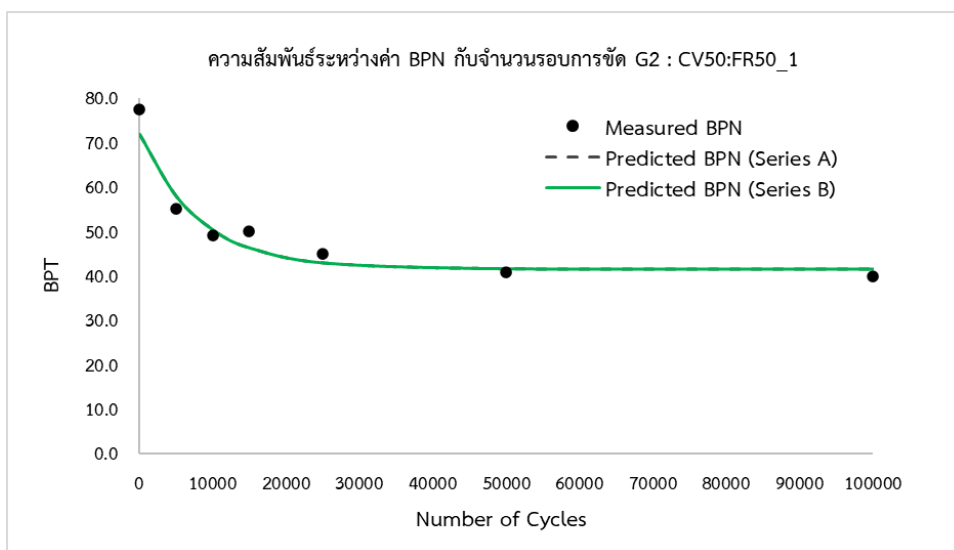
รูปที่ 5-15 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ DFT (G1 : R100)



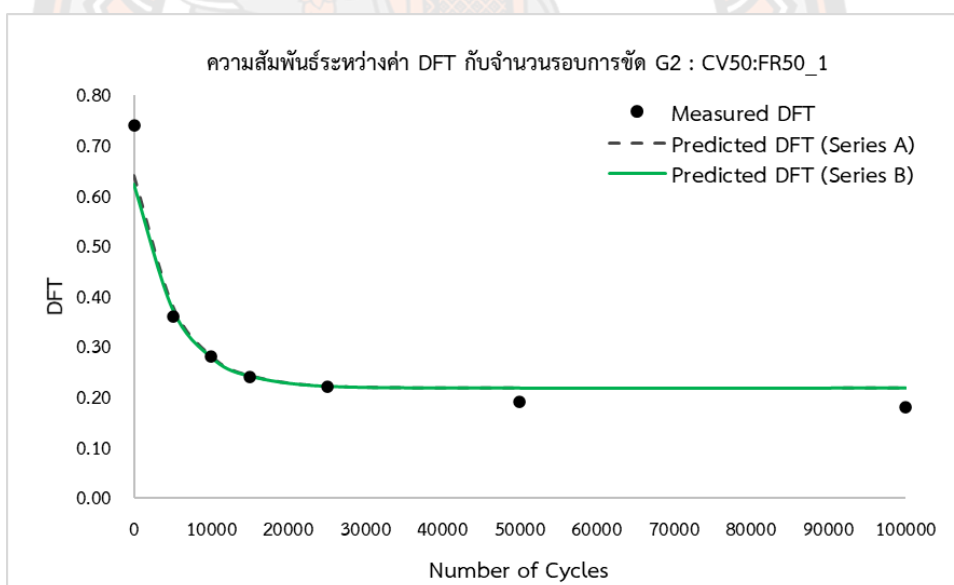
รูปที่ 5-16 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ BPT (G2 : CR50:FV50_1)



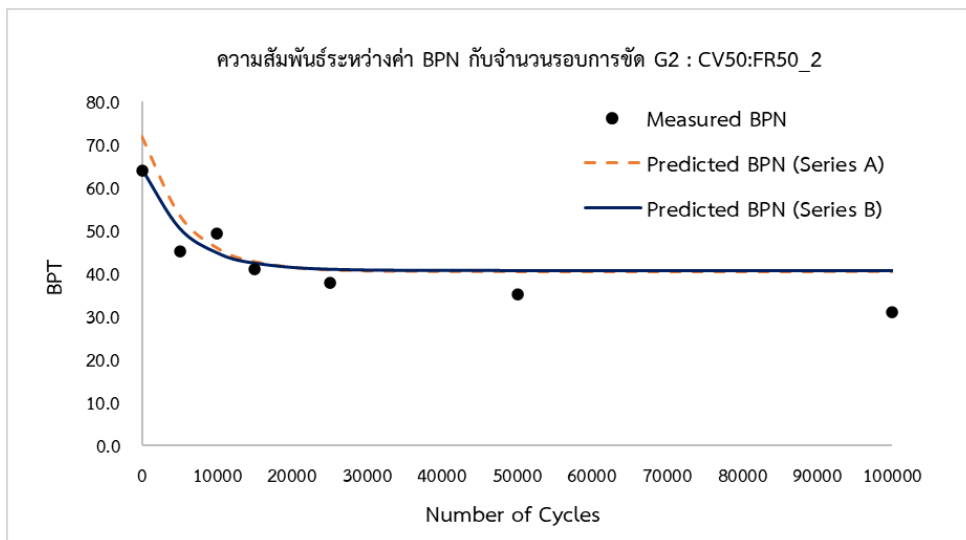
รูปที่ 5-17 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ DFT (G2 : CR50:FV50_1)



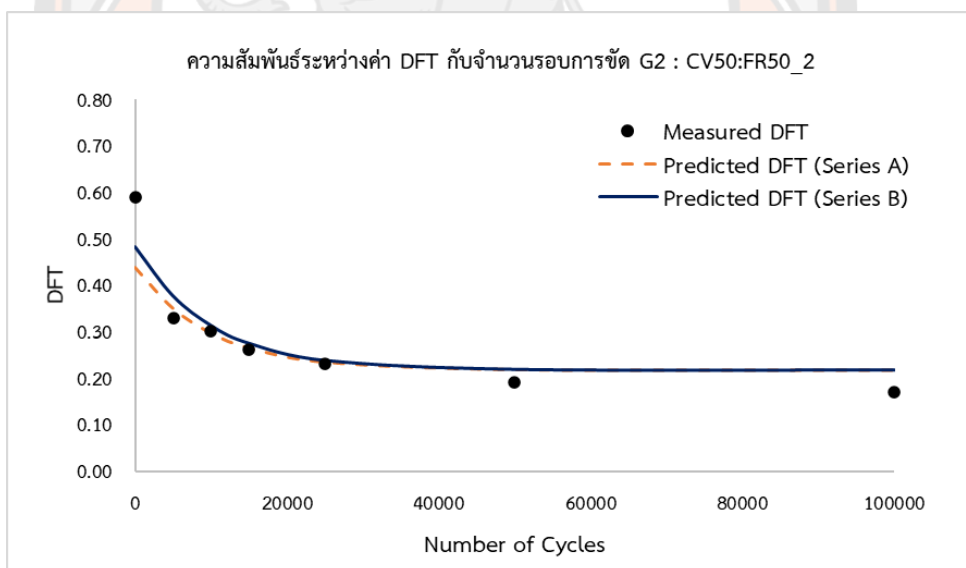
รูปที่ 5-18 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ BPT (G2 : CV50:FR50_1)



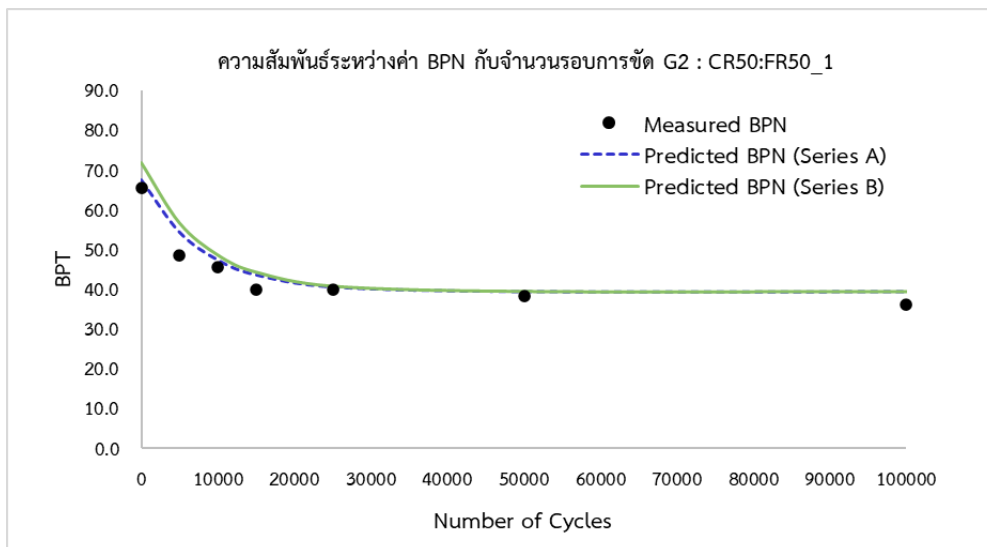
รูปที่ 5-19 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ DFT (G2 : CV50:FR50_1)



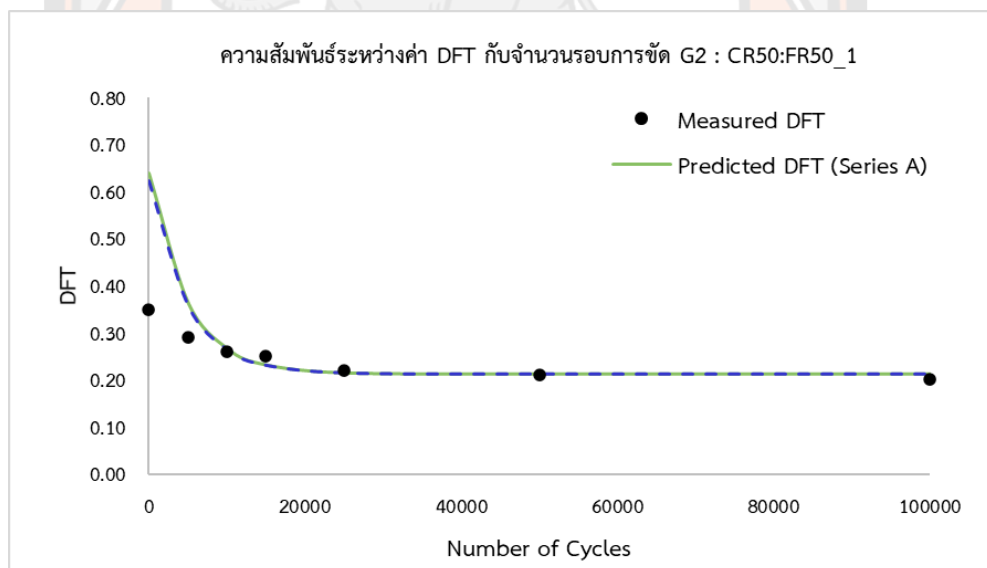
รูปที่ 5-20 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ BPT (G2 : CV50:FR50_2)



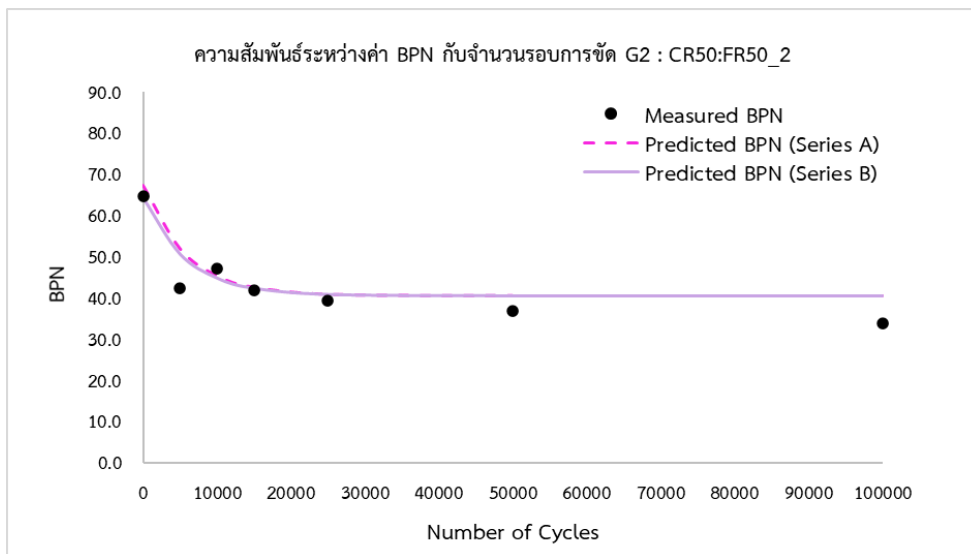
รูปที่ 5-21 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ DFT (G2 : CV50:FR50_2)



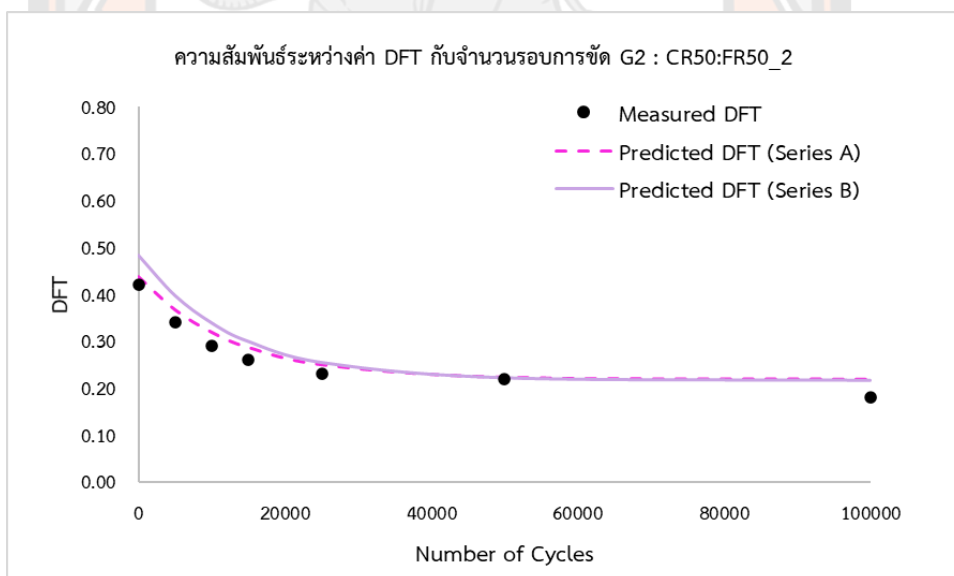
รูปที่ 5-22 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ BPT (G2 : CR50:FR50_1)



รูปที่ 5-23 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบด้วยเครื่องมือ DFT (G2 : CR50:FR50_1)



รูปที่ 5-24 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ BPT (G2 : CR50:FR50_2)



รูปที่ 5-25 ผลเปรียบเทียบค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทำนาย และจากการทดสอบ ด้วยเครื่องมือ DFT (G2 : CR50:FR50_2)

บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์ผสมร้อนที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม (2) ศึกษาพฤติกรรม และวิเคราะห์ค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม และ (3) หาวิธีการออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุผิวทางเก่าที่ส่งผลให้มีความปลอดภัย (Safety) และเหมาะสมทั้งในเบื้องต้นและระยะยาว ซึ่งงานวิจัยนี้มีการศึกษาในเชิงลึกเกี่ยวกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่า (Aged binder) และวัสดุมวลรวมเก่า (Aged aggregates) (สกัดจาก RAP) รวมถึงตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ (Virgin binder) และวัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin aggregates) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานการลื่นไถลของตัวอย่างที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ สำหรับเครื่องเร่งการขัดสี (Three-Wheel Polishing Device: TWPD) ถูกใช้สำหรับจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากปริมาณการจราจร และความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้นถูกวัดจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนการจำลองการเสื่อมสภาพ (0 รอบ) และค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้าย (100,000 รอบ) ผลการวิจัยนี้สามารถสรุปตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

6.1 ศึกษาค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสม (Asphalt hot-mix recycling) เปรียบเทียบกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสม (Hot-Mix Asphalt)

- ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น (Initial skid resistance) สำหรับอัตราส่วนผสมกลุ่มที่ 1 (ใช้วัสดุมวลรวมผิวทางเก่าทุกขนาดในการออกแบบอัตราส่วนผสม) พบว่าอัตราส่วนผสมของ V100 ให้ค่าสูงกว่า R50:V50 และ R100 ให้ค่าต่ำสุด สำหรับอัตราส่วนผสมกลุ่มที่ 2 (ควบคุมขนาดคละของวัสดุผิวทางเก่าโดยอ้างอิงอัตราส่วนผสมของ V100) พบว่าของ CR50:FV50 มีค่าใกล้เคียงกับ CV50:FR50 และ CR50:FR50 ให้ค่าต่ำสุด สำหรับค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้าย (Terminal skid resistance) อัตราส่วนผสมทั้ง 2 กลุ่มมีค่าที่ใกล้เคียงกัน
- จากผลการศึกษาพบว่า ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น (Initial skid resistance) ลดลง เมื่อเทียบกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุมวลรวมใหม่เป็น

ส่วนผสมเพียงอย่างเดียวให้ค่าสูงสุด เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ในวัสดุผิวทางเก่า นั้น (Aged binder) มีคุณสมบัติการใช้งานที่ลดลง มีความแข็งขาดความยืดหยุ่นมากกว่าเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ (Virgin binder) ผิวทางที่มีความแข็งเมื่อเปียกส่งผลทำให้ลื่น ทั้งนี้เมื่อเพิ่มวัสดุผิวทางเก่าในส่วนผสมส่งผลให้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลลดลง และในงานวิจัยนี้ได้จำลองการเสื่อมสภาพการใช้งานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต พร้อมทั้งทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้าย (Final skid resistance) แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมและแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผสมรวมใหม่เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียวให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้ผ่านการใช้งานแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปกคลุมผิวทางเริ่มหลุดร่อน และวัสดุผสมรวมทำหน้าที่สัมผัสกับล้ออย่างพาหนะแทน โดยค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้ายมีค่าใกล้เคียงกันนั้น อาจเป็นผลมาจากคุณสมบัติที่ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกัน

6.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรม และวิเคราะห์ค่าความต้านทานการลื่นไถลผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเก่า (Asphalt hot-mix recycling) จากการจำลองสภาพการใช้งานภายใต้สภาพการจราจรที่ระดับต่าง ๆ โดยใช้เครื่องเร่งการขัดสี เปรียบเทียบกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่มีวัสดุผสมรวมใหม่เป็นส่วนผสม (Hot-mix Asphalt)

ตารางที่ 6-1 ตารางสรุปความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ a, a + b, c กับตัวแปรต่าง ๆ

Regression coefficients	Correlation					
	BPN			DFT		
	a + b	a	c	a + b	a	c
Properties aggregates	Very weak		Weak	Weak	Very weak	Moderate (R ² = 0.73)
MTD _{Initial}	Strong (R ² = 0.64 - 0.82)	Moderate (R ² = 0.64)	Very weak	Weak	Very weak	Moderate (R ² = 0.50)
λ	Very weak	Weak	Weak		Very weak	
κ	Very weak	Weak	Very weak	Very weak	Very weak	Weak
Asphalt content	weak	Very weak	Moderate (R ² = 0.56 - 0.57)	Strong (R ² = 0.68 - 0.88)	Moderate (R ² = 0.44 - 0.88)	Very weak
Properties asphalt	weak	Very weak	Moderate (R ² = 0.56 - 0.57)	Strong (R ² = 0.68 - 0.88)	Moderate (R ² = 0.44 - 0.88)	Weak

- ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น และในช่วงสุดท้ายไม่แสดงถึงความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมรวม ทั้งนี้ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้ายของ Hot-mix asphalt กับ Asphalt hot-mix recycling มีความต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมรวมให้ค่าใกล้เคียงกัน
- ปริมาณแอสฟัลต์คอนกรีต และคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตมีความสัมพันธ์มากกับค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้น เมื่อปริมาณ Aged binder เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลช่วงเริ่มต้นลดลง เนื่องจากผิวทางถูกปกคลุมด้วย Aged binder ที่มีความแข็ง และลื่นเมื่อผิวทางเปียก แต่ค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้าย และอัตราการถดถอย มีความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อย
- พารามิเตอร์ λ และ k มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้นต่ำกว่าค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้าย และอัตราการถดถอย
- ค่า $MTD_{Initial}$ มีความสัมพันธ์มากกับค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงเริ่มต้นเมื่อทดสอบด้วย BPT และมีความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อยกับค่าความต้านทานการลื่นไถลในช่วงสุดท้าย และอัตราการถดถอย

6.3 ออกแบบวิธีการหาอัตราส่วนผสมของผิวทางเก่า (Asphalt hot-mix recycling mixture) ที่ส่งผลให้ค่าความปลอดภัย (Safety) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีความเหมาะสมทั้งในเบื้องต้น และการใช้งานในระยะยาว เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการนำวัสดุผิวทางเก่ามาใช้ประโยชน์สูงสุดในอนาคต

ตารางที่ 6-2 ตารางสรุปค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ทดสอบด้วย BPT

เกณฑ์	BPN _{Initial} (0 Cycle)		BPN _{Terminal} (100,000 Cycle)		
	กลุ่ม 1	กลุ่ม 2	กลุ่ม 1	กลุ่ม 2	
ระดับพึงระวัง	สูงกว่า	1. V100	1. CR50:FV50	มีค่าใกล้เคียงกัน	1. CR50:FV50
		2. R50:V50	2. CV50:FR50		
		3. R100	3. CR50:FR50		
ระดับปรับปรุงแก้ไข	สูงกว่า				2. CV50:FR50 3. CR50:FR50
Initial skid resistance		สูงกว่า			-
Terminal skid resistance					สูงกว่า

ตารางที่ 6-3 ตารางสรุปค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ทดสอบด้วย DFT

เกณฑ์		BPN _{Initial} (0 Cycle)		BPN _{Terminal} (100,000 Cycle)	
		กลุ่ม 1	กลุ่ม 2	กลุ่ม 1	กลุ่ม 2
ระดับพึงระวัง	สูงกว่า	1. V100	1. CR50:FV50	มีค่าใกล้เคียงกัน	1. CR50:FV50
		2. R50:V50	2. CV50:FR50		
		3. R100	3. CR50:FR50		
ระดับปรับปรุงแก้ไข	สูงกว่า				2. CV50:FR50 3. CR50:FR50
Initial skid resistance			ต่ำกว่า		-
Terminal skid resistance			-		สูงกว่า

- จากผลการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลของอัตราส่วนผสมทั้ง 2 กลุ่ม พบว่าเมื่อใช้วัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลนั้นลดลงเมื่อเทียบกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมทั้งหมด (Hot-Mix Asphalt) แต่สำหรับงานวิจัยนี้แนะนำให้ใช้วัสดุผิวทางเก่าในปริมาณร้อยละ 50 เนื่องจากให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลใกล้เคียงกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียว เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่ในส่วนผสมที่ใช้วัสดุผิวทางเก่าร้อยละ 50 มีส่วนช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เก่าให้มีประสิทธิภาพการใช้งานดีขึ้น
- จากการศึกษาพบว่าในการออกแบบ Asphalt hot-mix recycling เพื่อให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลมีความเหมาะสมทั้งในเบื้องต้น และระยะยาวนั้น ต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานการลื่นไถล เนื่องจากส่งผลต่อค่า Initial และ Terminal skid resistance ประกอบไปด้วย
 - ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ – Aged binder content, Virgin binder content
 - คุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ - Penetration, Softening point, Ductility
 - พารามิเตอร์ λ และ K เป็นตัวแทนจากชุดข้อมูล Particle size distribution ของอัตราส่วนผสม)
 - ค่า $MTD_{Initial}$ ของอัตราส่วนผสม

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษานี้พบว่า การตรวจสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลให้มีความเหมาะสมทั้งในเบื้องต้น และการใช้งานระยะยาวของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเก่าเป็นส่วนผสมนั้นมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมดังนี้

- ในการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมนั้นอาจต้องเพิ่มจำนวนตัวอย่าง หรือแหล่งวัสดุมวลรวมในการทดสอบเพิ่มมากขึ้นเพื่อตรวจสอบผลกระทบที่มีต่อค่าความต้านทานการลื่นไถล
- ในการตรวจสอบค่า Mean texture depth ที่ทดสอบด้วยวิธี sand patch นั้นมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ผู้วิจัยแนะนำให้เปลี่ยนวิธีการทดสอบ เช่น CTM (Circular Track Meter)
- ในการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างในการทดสอบ เนื่องจากชุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในการศึกษานี้อาจยังไม่ครอบคลุม
- ในการศึกษานี้ไม่มีการสอบทวน (Validation) ของสมการทำนายค่าความต้านทานการลื่นไถล เนื่องจากมีจำนวนตัวอย่างไม่เพียงพอต่อการทดสอบ ทั้งนี้ผู้วิจัยแนะนำให้ทำการสอบทวน (Validation) ก่อนการนำไปใช้งานจริง

บรรณานุกรม

- Abdullah, W. A. r. (2020). *Quantifying the Relationship between Skid Resistance and Crashes for Iowa Roadways: A Framework for a Skid Resistance Policy* Iowa State University].
- Arshad Hussain, Q. Y. (2013). Effect of Reclaimed Asphalt Pavement on the Properties of Asphalt Binders. *Procedia Engineering*, 54, 840-850.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.077>
- ASTM. (1998). D1559 Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (Withdrawn 1998). In. American Society for Testing and Materials: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2002). ASTM E1911 - 98 Standard Test Method for Measuring Paved Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester. In. American Society for Testing and Materials: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2003). D5404 – 03 Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator. In. American Society for Testing and Materials: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2006). ASTM C131 / C131M Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. In. American Society for Testing and Materials: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2008). ASTM E303-93 Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester. In. American Society for Testing and Materials: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2011). D2172 Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures. In. American Society for Testing and Materials: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2017). D3319 - 11 Standard Practice for the Accelerated Polishing of Aggregates Using the British Wheel. In. American Society for Testing and Materials: American Society for Testing and Materials.

- ASTM. (2018). D6931 – 17 Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures. In. American Society for Testing and Materials: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2019). D7369 – 11 Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test. In. American Society for Testing and Materials: American Society for Testing and Materials.
- B.S. (1967). B.S. 812 Aggregate Crushing Test (ACV). In. British Standard Institution: British Standard Institution.
- B.S. (1990). B.S. 812-112 Testing Aggregates. Method for Determination of Aggregate Impact Value (AIV). In. British Standard Institution: British Standard Institution.
- Dinis-Almeida, M., Castro-Gomes, J., Sangiorgi, C., Zoorob, S., & Afonso, M. (2016). Performance of Warm Mix Recycled Asphalt Containing Up to 100% RAP. *Construction and Building Materials*, 112, 1-6.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.108>
- DOH. (1989). DH-S 408 Asphalt Concrete of Hot-Mix Asphalt. In. Department of Highway: Department of Highway.
- DOH. (1999). DH-S. 410 Asphalt Hot-Mix Recycling. In. Department of Highway: Department of Highway.
- Fatimatul Munawaroh, F. M., Triwikantoro, dan Zaenal Arifin. (2018). CALCIUM OXIDE CHARACTERISTICS PREPARED FROM AMBUNTEN'S CALCINED LIMESTONE. *Jurnal Pena Sains*, 5. <https://doi.org/10.21107/jps.v5i1.3836>
- Gökalp, İ., Uz, V. E., Saltan, M., & Tutumluer, E. (2018). Technical and Environmental Evaluation of Metallurgical Slags as Aggregate for Sustainable Pavement Layer Applications. *Transportation Geotechnics*, 14, 61-69.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.10.003>
- Gunasekaran, S., Anbalagan, G., & Pandi, S. (2006). Raman and Infrared Spectra of Carbonates of Calcite Structure. *Journal of Raman Spectroscopy*, 37, 892-899.
<https://doi.org/10.1002/jrs.1518>
- Han, S., Cheng, X., Liu, Y., & Zhang, Y. (2019). Laboratory Performance of Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and Fine Reclaimed Asphalt Pavement (FRAP) Content. *Materials*, 12, 2536.

<https://doi.org/10.3390/ma12162536>

- Hu, X., Nie, Y., Feng, Y., & Zheng, Q. (2012). Pavement Performance of Asphalt Surface Course Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Journal of Testing and Evaluation*, 40, 20120128. <https://doi.org/10.1520/JTE20120128>
- Huang, B., Li, G., Vukosavljevic, D., Shu, X., & Egan, B. (2005). Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Recycled Asphalt Pavement. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1929, 37-45. <https://doi.org/10.3141/1929-05>
- Hussain, A., & Yanjun, Q. (2013). Effect of Reclaimed Asphalt Pavement on the Properties of Asphalt Binders. *Procedia Engineering*, 54, 840-850. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.077>
- Izaks, R., Haritonovs, V., Klasa, I., & Zaumanis, M. (2015). Hot Mix Asphalt with High RAP Content. *Procedia Engineering*, 114, 676-684. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.009>
- Johnson, E., Watson, M., Olson, R., Moon, K., Turos, M., & Marasteanu, M. (2013). Recycled Asphalt Pavement: Study of High-RAP Asphalt Mixtures on Minnesota County Roads.
- Kandhal, P., & Foo, K. (1997). Designing Recycled Hot Mix Asphalt Mixtures Using Superpave Technology.
- Lin, C., & Wang, T. (2018). Effect of Fine Aggregate Angularity on Skid-Resistance of Asphalt Pavement Using Accelerated Pavement Testing. *Construction and Building Materials*, 168, 41-46. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.171>
- McDaniel, R. S., K. J. Kowalski, and A. Shah. (2012). *Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement for Surface Mixtures* (FHWA/IN/JTRP-2012/03). <https://doi.org/10.5703/1288284314665>
- Miró, R., Vidal, G., Martínez, A., Segura, P., & Rodríguez, C. (2011). Evaluation of High Modulus Mixture Behaviour with High Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Percentages for Sustainable Road Construction. *Construction and Building Materials - CONSTR BUILD MATER*, 25, 3854-3862. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.006>
- NCAT. (2006). *Development of Laboratory Procedure for Measuring Friction of HMA*

Mixtures - Phase I (06-06).

NCHRP. (2009). *Guide for Pavement Friction* 108). T. R. Board.

<http://www.trb.org/Publications/Blurbs/161756.aspx>

Pawar, R., Patted, A., & B S, K. G. (2017). *Recycling of Bituminous Pavement by RAP Method.*

Porot, L., & Gomes, V. (2020). *Multi-Recycling of Asphalt Mix with Reclaimed Asphalt and Rejuvenator.*

Putra, A., Hadiwardoyo, S., & Sumabrata, R. (2019). *Skid Resistance Performance Against Temperature Change of Hot-Mix Recycled Asphalt Pavement with Added Crumb Rubber* (Vol. 2114). <https://doi.org/10.1063/1.5112441>

Rezaei, A., & Masad, E. (2013). Experimental-Based Model for Predicting the Skid Resistance of Asphalt Pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(1), 24-35. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.643793>

Su, K., Hachiya, Y., & Maekawa, R. (2009). Study on Recycled Asphalt Concrete for Use in Surface Course in Airport Pavement. *Resources Conservation and Recycling - RESOUR CONSERV RECYCL*, 54, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.06.003>

Thai Industrial Standard. (2556). วัสดุโคลด์พลาสติกสำหรับทำเครื่องหมายบนผิวทาง (Cold Plastic for Road Marking Materials). In (Vol. มอก. 2611-2556, pp. 4). กรุงเทพมหานคร: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (Thai Industrial Standard).

Vidal, G., Pérez-Jiménez, F., Miró, R., Martínez, A., & Botella, R. (2011). Experimental Study of Recycled Asphalt Mixtures with High Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Construction and Building Materials*, 25, 1289-1297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.016>

Williams, S. G. (2008). Surface Friction Measurements of Fine-Graded Asphalt Mixtures : Final Report [Tech Report]. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/17013>

Xiao, F., Amirhanian, S., Shen, J., & Putman, B. (2009). Influences of Crumb Rubber Size and Type on Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mixtures. *Construction and Building Materials*, 23, 1028-1034. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.002>

Yu, S., Shen, S., Zhang, C., Zhang, W., & Jia, X. (2017). Evaluation of the Blending

Effectiveness of Reclaimed Asphalt Pavement Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29, 04017230. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002095](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002095)

Zhao, S., Huang, B., Shu, X., & Woods, M. (2013). Comparative Evaluation of Warm Mix Asphalt Containing High Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement. *Construction and Building Materials*, 44, 92–100.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.010>

กรมทางหลวง. (1989). ทล.-ม. 408/2532 แอสฟัลต์คอนกรีต (Hot-Mix Asphalt). In. กองวิเคราะห์ และวิจัย กรมทางหลวง: กองวิเคราะห์ และวิจัย กรมทางหลวง.

กรมทางหลวง. (1999). ทล.-ม. 410 Asphalt Hot-Mix Recycling. In. กรมทางหลวง: กรมทางหลวง.

กรมทางหลวง. (2012). คู่มือการปฏิบัติงาน *Asphalt Hot-Mix Recycling*.

กรมทางหลวง. (2018). รายงานขั้นสุดท้าย (*Final Report*) โครงการยกระดับมาตรฐานความผิดของผิวทางแอสฟัลต์ เพื่อมุ่งสู่ทศวรรษแห่งความปลอดภัยทางถนน.

กฤษณะ จันทโรจติ. (2016). การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต ระหว่างวัสดุผสมรวมตามข้อกำหนดขอบบนและขอบล่างที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 และ PMA. *วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 29(95), 11-22.

ชลัท ทิพากรเกียรติ. (2019). คุณสมบัติของวัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ในการออกแบบพาราสเลอร์ซีล. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 9.

นิรชร นกแก้ว, ด. ป. (2016). สมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ต่างกัน. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 11, 28-37.

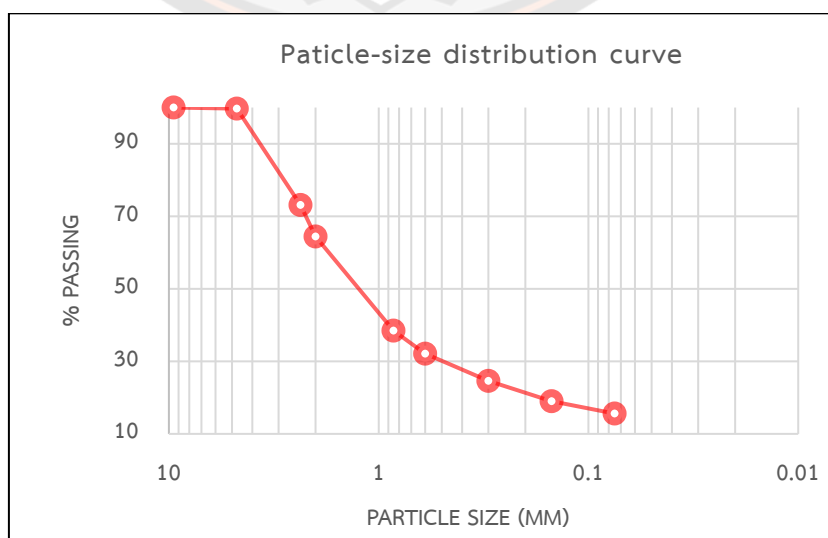
วัชรินทร์ วิทยกุล. (2001). การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต ชนิดผสมร้อน วิธีมาร์แชลล์.



ภาคผนวก ก
คุณสมบัติของวัสดุมวลรวม

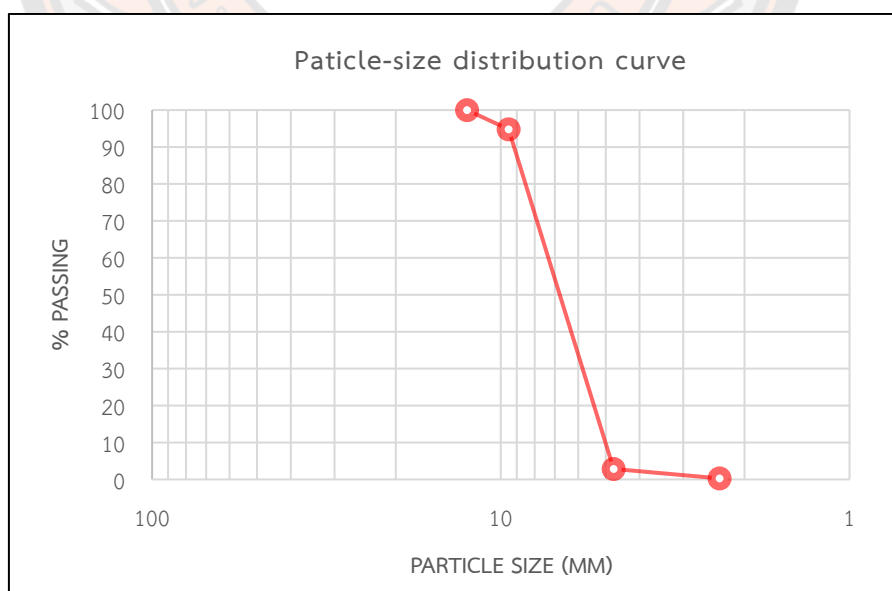
การทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 204/2516
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชญ์ เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) หินฝุ่น
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Sieve Sizes	First Trial			Second Trial			Average
	Retained (gm.)	Passing (gm.)	Passing %	Retained (gm.)	Passing (gm.)	Passing %	Passing %
#3/8	0.0	1,000.0	100.0	0.0	1,000.0	100.0	100.0
#4	3.9	996.1	99.6	2.2	997.8	99.8	99.7
#8	307.4	688.7	68.9	223.8	774.0	77.4	73.1
#10	93.3	595.4	59.5	80.6	693.4	69.3	64.4
#20	262.9	332.5	33.3	256.5	436.9	43.7	38.5
#30	58.4	274.1	27.4	68.4	368.5	36.9	32.1
#50	64.1	210.0	21.0	85.9	282.6	28.3	24.6
#100	46.7	163.3	16.3	65.3	217.3	21.7	19.0
#200	28.4	134.9	13.5	40.2	177.1	17.7	15.6
Pan	134.9			177.1			
รวม	1,000.0			1,000.0			



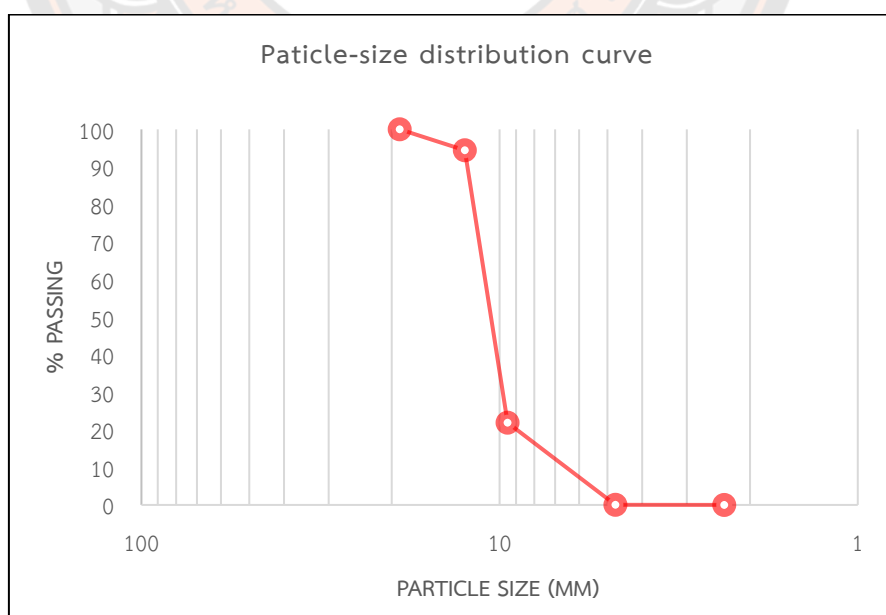
การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 204/2516
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) ขนาด 3/8 นิ้ว
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Sieve Sizes	First Trial			Second Trial			Average
	Retained (gm.)	Passing (gm.)	Passing %	Retained (gm.)	Passing (gm.)	Passing %	Passing %
1/2"	0.0	1,000.0	100.0	0.0	1,000.0	100.0	100.0
3/8"	51.0	949.0	94.9	53.0	947.0	94.7	94.8
#4	933.0	16.0	1.6	906.0	41.0	4.1	2.9
#8	11.0	5.0	0.5	40.0	40.0	0.1	0.3
pan	5.0			1.0			
รวม	1,000.0			1,000.0			



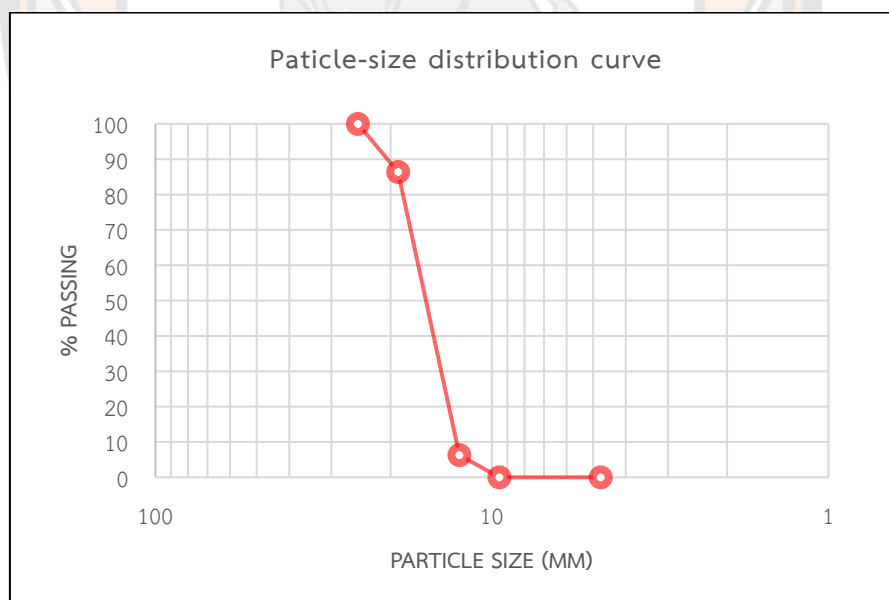
การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 204/2516
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) ขนาด 1/2 นิ้ว
แหล่งวัสดุ	โรงไม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Sieve Sizes	First Trial			Second Trial			Average
	Retained (gm.)	Passing (gm.)	Passing %	Retained (gm.)	Passing (gm.)	Passing %	Passing %
3/4	0.0	2,000.0	100.00	0.0	2,000.0	100.0	100.0
1/2	136.0	1,864.0	93.20	87.0	1913.0	95.7	94.4
3/8	1,421.0	443.0	22.15	1,480.0	433.0	21.7	21.9
4	442.0	1.0	0.05	433.0	0.0	0.0	0.03
8	1.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0
Pan	0.0			0.0			
รวม	2,000.0			2,000.0			



การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 204/2516
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) ขนาด 3/4 นิ้ว
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Sieve Sizes	First Trial			Second Trial			Third Trial			Average
	Retained (gm.)	Passing (gm.)	Passing %	Retained (gm.)	Passing (gm.)	Passing %	Retained (gm.)	Passing (gm.)	Passing %	Passing %
1	0.0	2,000.0	100.0	0.0	2,000.0	100.0	0.0	2,000.0	100.0	100.0
3/4	124.0	1,876.0	93.8	461.0	1,539.0	77.0	230.0	1,770.0	88.5	86.4
1/2	1,700.0	176.0	8.8	1,501.0	38.0	1.9	1,607.0	163.0	8.2	6.3
3/8	176.0	1.0	0.0	38.0	0.0	0.0	163.0	0.0	0.0	0.0
Pan	0.0			0.0			0.0			
รวม	2,000.0			2,000.0			2,000.0			



การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดหยาบ	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 207/2517
วันที่ทดสอบ	11 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin)
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

ตัวอย่าง	น้ำหนักของตัวอย่าง (gm)			G_B	G_A	% ดูดซึมน้ำ	
	สภาพ อบแห้ง (A) (g)	สภาพอิ่มตัว ผิวแห้ง (B) (g)	แช่ในน้ำ (C) (g)				
หิน 3/4"	No.1	498.6	500.5	314.9	2.662	2.736	0.38
	No.2	497.7	500.2	314.0	2.698	2.743	0.50
	No.3	498.5	501.2	315.1	2.660	2.755	0.54
	Average				2.714	2.679	0.48
หิน 1/2"	No.1	496.3	498.8	313.0	2.708	2.671	0.50
	No.2	496.4	498.9	313.2	2.710	2.673	0.50
	No.3	496.4	498.8	313.5	2.714	2.679	0.48
	Average				2.710	2.674	0.50
หิน 3/8"	No.1	355.2	357.6	224.6	2.720	2.671	0.68
	No.2	342.5	344.3	215.9	2.705	2.667	0.53
	Average				2.714	2.669	0.60

การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 209/2518
วันที่ทดสอบ	11 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยรัตนนคร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) Retained #200 (ตัวอย่างที่ 1)
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Pycnometer No.1

Wt. Pycnometer + SSD Sample = 596.7 gm

Wt. Pycnometer = 154.0 gm

Wt. SSD Sample (A) = 442.7 gm

Wt. Container + Dry Sample = 669.8 gm

Wt. Container = 231.8 gm

Wt. Dry Sample (B) = 438.0 gm

Absorption = 1.073

Temperature (°C)	Wt. Pycnometer + Water Sample (W ₁) (g)	Wt. Pycnometer + Water (W ₂) (g)	Density of Water (dt)	G _a	G _b
70	922.6	642.2	0.9778	2.717	2.639
65	923.3	643.5	0.9806	2.715	2.637
60	923.9	644.8	0.9832	2.710	2.632
55	925.0	646.1	0.9857	2.714	2.636
50	925.8	647.0	0.9881	2.719	2.641
45	926.7	648.3	0.9902	2.717	2.640
40	926.7	649.4	0.9922	2.704	2.627
35	927.2	649.9	0.9942	2.710	2.633
Average				2.715	2.640
Temperature 30 °C			0.9957	2.727	2.651

โดยที่

Apparent Specific Gravity

$$G_A (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (B + W_2 - W_1)$$

$$G_A (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_A * t / 0.9957$$

Bulk Specific Gravity (Oven-Dry Basic)

$$G_B (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (A + W_2 - W_1)$$

$$G_B (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_B * t / 0.9957$$

การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 209/2518
วันที่ทดสอบ	11 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) Passing #200 (ตัวอย่างที่ 1)
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Pycnometer No.2

Wt. Pycnometer = 154.0 gm Wt. Container + Dry Sample = 636.5 gm

Wt. Container = 274.0 gm Wt. Dry Sample (B) = 362.5 gm

Temperature (°C)	Wt. Pycnometer + Water Sample (W ₁) (g)	Wt. Pycnometer + Water (W ₂) (g)	Density of Water (dt)	G _a
70	872.7	642.1	0.9778	2.687
65	874.7	643.9	0.9806	2.699
60	876.0	645.1	0.9832	2.708
55	877.0	646.4	0.9857	2.709
50	877.5	647.6	0.9881	2.702
45	879.0	648.5	0.9902	2.719
40	879.7	649.6	0.9922	2.717
35	880.3	650.0	0.9942	2.726
Average				2.715
Temperature 30 °C			0.9957	2.727

โดยที่

Apparent Specific Gravity

$$G_A (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (B + W_2 - W_1)$$

$$G_A (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_A * t / 0.9957$$

การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 209/2518
วันที่ทดสอบ	12 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) Retained #200 (ตัวอย่างที่ 2)
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Pycnometer No.1

Wt. Pycnometer + SSD Sample = 574.2 gm

Wt. Pycnometer = 154.0 gm

Wt. SSD Sample (A) = 420.2 gm

Wt. Container + Dry Sample = 577.7 gm

Wt. Container = 164.2 gm

Wt. Dry Sample (B) = 413.5 gm

Absorption = 1.621

Temperature (°C)	Wt. Pycnometer + Water Sample (W ₁) (g)	Wt. Pycnometer + Water (W ₂) (g)	Density of Water (dt)	G _a	G _b
70	922.6	642.2	0.9778	2.717	2.639
65	923.3	643.5	0.9806	2.715	2.637
60	923.9	644.8	0.9832	2.710	2.632
55	925.0	646.1	0.9857	2.714	2.636
50	925.8	647.0	0.9881	2.719	2.641
45	926.7	648.3	0.9902	2.717	2.640
40	926.7	649.4	0.9922	2.704	2.627
35	927.2	649.9	0.9942	2.710	2.633
Average				2.715	2.640
Temperature 30 °C			0.9957	2.727	2.651

โดยที่ Apparent Specific Gravity

$$G_A (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (B + W_2 - W_1)$$

$$G_A (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_A * t / 0.9957$$

Bulk Specific Gravity (Oven-Dry Basic)

$$G_B (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (A + W_2 - W_1)$$

$$G_B (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_B * t / 0.9957$$

การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 209/2518
วันที่ทดสอบ	12 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) Passing #200 (ตัวอย่างที่ 2)
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Pycnometer No.2

Wt. Pycnometer = 154.0 gm Wt. Container + Dry Sample = 418.1 gm

Wt. Container = 161.5 gm Wt. Dry Sample (B) = 256.6 gm

Temperature (°C)	Wt. Pycnometer + Water Sample (W ₁) (g)	Wt. Pycnometer + Water (W ₂) (g)	Density of Water (dt)	G _a
70	806.5	642.1	0.9778	2.721
65	807.2	643.9	0.9806	2.697
60	808.6	645.1	0.9832	2.710
55	810.0	646.4	0.9857	2.719
50	810.7	647.6	0.9882	2.712
45	811.6	648.5	0.9902	2.717
40	812.6	649.6	0.9922	2.720
35	813.6	650.0	0.9942	2.743
Average				2.720
Temperature 30 °C			0.9957	2.732

โดยที่ Apparent Specific Gravity

$$G_A (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (B + W_2 - W_1)$$

$$G_A (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_A * t / 0.9957$$

การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 209/2518
วันที่ทดสอบ	13 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยรัตนนคร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) Retained #200 (ตัวอย่างที่ 3)
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Pycnometer No.1

Wt. Pycnometer + SSD Sample = 565.6 gm

Wt. Pycnometer = 161.8 gm

Wt. SSD Sample (A) = 403.8 gm

Wt. Container + Dry Sample = 619.7 gm

Wt. Container = 222.1 gm

Wt. Dry Sample (B) = 397.6 gm

Absorption = 1.559

Temperature (°C)	Wt. Pycnometer + Water Sample (W ₁) (g)	Wt. Pycnometer + Water (W ₂) (g)	Density of Water (dt)	G _a	G _b
70	903.7	650.1	0.9778	2.700	2.588
65	904.9	651.5	0.9806	2.704	2.592
60	906.9	653.0	0.9832	2.720	2.608
55	907.0	654.3	0.9857	2.705	2.594
50	907.4	655.2	0.9881	2.702	2.592
45	908.3	656.3	0.9902	2.704	2.594
40	909.0	657.4	0.9922	2.702	2.592
35	909.5	658.2	0.9942	2.702	2.592
Average				2.702	2.592
Temperature 30 °C			0.9957	2.603	2.651

โดยที่ Apparent Specific Gravity

$$G_A (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (B + W_2 - W_1)$$

$$G_A (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_A * t / 0.9957$$

Bulk Specific Gravity (Oven-Dry Basic)

$$G_B (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (A + W_2 - W_1)$$

$$G_B (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_B * t / 0.9957$$

การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 209/2518
วันที่ทดสอบ	13 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) Passing #200 (ตัวอย่างที่ 3)
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Pycnometer No.2

Wt. Pycnometer = 154.0 gm

Wt. Container + Dry Sample = 633.1 gm

Wt. Container = 220.4 gm

Wt. Dry Sample (B) = 412.7 gm

Temperature (°C)	Wt. Pycnometer + Water Sample (W ₁) (g)	Wt. Pycnometer + Water (W ₂) (g)	Density of Water (dt)	G _a
70	904.2	642.1	0.9778	2.680
65	905.9	643.9	0.9806	2.685
60	906.2	645.1	0.9832	2.677
55	908.0	646.4	0.9857	2.692
50	909.2	647.6	0.9882	2.699
45	909.3	648.5	0.9902	2.690
40	910.3	649.6	0.9922	2.694
35	910.8	650.0	0.9942	2.701
Average				2.720
Temperature 30 °C			0.9957	2.732

โดยที่ Apparent Specific Gravity

$$G_A (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (B + W_2 - W_1)$$

$$G_A (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_A * t / 0.9957$$

Bulk Specific Gravity of Combined Aggregate Blend	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 204/2516
วันที่ทดสอบ	9 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย ศรีษะรุยทพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP) Passing #200 (ตัวอย่างที่ 3)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลี้ยวเมืองพิษณุโลก

	Retained #200	Passing #200
G _B No. 1	2.651	2.718
G _B No. 2	2.612	2.732
G _B No. 3	2.603	2.704
Average	2.622	2.718
Content %	84.4	15.6
Combined Aggregate Blend	2.637	

การทดลองหาความสึกหรอของมวลรวมหยาบโดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 202/2515
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิษณุ เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin)
แหล่งวัสดุ	โรงไม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Sample No. 1 of 1 Grading B
Number of revolutions 500 Number of abrasive -
Weight of charges 4,607 gm

Original Mass of sample (W_1)	=	5,000 gm.
Final Mass of sample (W_2)	=	3,779 gm.
Loss ($W_1 - W_2$)	=	1,221 gm.
Percentage of wear $\frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$	=	24.42 % \leq 40% (OK)

การทดลองตรวจดัชนีความแบน (Flakiness Index)	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 210/2518
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยรัตนนคร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) หิน 3/4"
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Sieve Size U.S. Standard Square Opening (mm.)	Width of Slot sieve (mm.)	Mass Retained X (gm.)	Mass Passing Y (gm.)	Total Mass X + Y (gm.)	Flakiness Index %
63.5-50.8 (2 1/2"-2")	34.29 (1.350")				
50.8-38.1 (2"-1 1/2")	26.67 (1.050")				
38.1-25.4 (1 1/2"-1")	19.05 (0.750")				
25.4-19.05 (1"-3/4")	13.34 (0.525")				
19.05-12.7 (3/4"-1/2")	9.53 (0.375")	42	54	96	56.25
12.7-9.52 (1/2"-3/8")	6.68 (0.263")				
9.52-4.76 (3/8"-#4)	4.29 (0.169")				
Total		42	54	96	56.25

$$\begin{aligned}
 \text{ดัชนีความแบน (FI)} &= \frac{\text{Total mass passing slot sieve (gm.)}}{\text{Total mass (gm.)}} \times 100\% \\
 &= \frac{Y}{X + Y} \times 100
 \end{aligned}$$

การทดลองตรวจดัชนีความยาว (Elongation Index)	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 211/2518
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) หิน 3/4"
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Sieve Size U.S. Standard Square Opening (mm.)	Width of Slot sieve (mm.)	Mass Passing X (gm.)	Mass Retained Y (gm.)	Total Mass X + Y (gm.)	Flakiness Index %
63.5-50.8 (2 1/2"-2")	34.29 (1.350")				
50.8-38.1 (2"-1 1/2")	26.67 (1.050")				
38.1-25.4 (1 1/2"- 1")	19.05 (0.750")				
25.4-19.05 (1" -3/4")	13.34 (0.525")				
19.05-12.7 (3/4"-1/2")	9.53 (0.375")	68	29	97	29.89
12.7-9.52 (1/2"-3/8")	6.68 (0.263")				
9.52-4.76 (3/8"-#4)	4.29 (0.169")				
Total		68	29	97	29.89

$$\begin{aligned}
 \text{ดัชนีความยาว (FI)} &= \frac{\text{Total mass retained}}{\text{Total mass}} \times 100\% \\
 &= \frac{Y}{X + Y} \times 100
 \end{aligned}$$

การทดลองตรวจดัชนีความแบน (Flakiness Index)	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 210/2518
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย ศรีษะบุญฤทธิ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยรัตนนคร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) หิน 1/2"
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Sieve Size U.S. Standard Square Opening (mm.)	Width of Slot sieve (mm.)	Mass Retained X (gm.)	Mass Passing Y (gm.)	Total Mass X + Y (gm.)	Flakiness Index %
63.5-50.8 (2 1/2"-2")	34.29 (1.350")				
50.8-38.1 (2"-1 1/2")	26.67 (1.050")				
38.1-25.4 (1 1/2"- 1")	19.05 (0.750")				
25.4-19.05 (1" -3/4")	13.34 (0.525")				
19.05-12.7 (3/4"-1/2")	9.53 (0.375")				
12.7-9.52 (1/2"-3/8")	6.68 (0.263")	387	97	484	20.04
9.52-4.76 (3/8"-#4)	4.29 (0.169")				
Total		387	97	484	20.04

$$\begin{aligned}
 \text{ดัชนีความแบน (FI)} &= \frac{\text{Total mass passing slot sieve (gm.)}}{\text{Total mass (gm.)}} \times 100\% \\
 &= \frac{Y}{X + Y} \times 100
 \end{aligned}$$

การทดลองตรวจนิคมยาว (Elongation Index)	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 211/2518
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) หิน 1/2"
แหล่งวัสดุ	โรงไม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Sieve Size U.S. Standard Square Opening (mm.)	Width of Slot sieve (mm.)	Mass Passing X (gm.)	Mass Retained Y (gm.)	Total Mass X + Y (gm.)	Flakiness Index %
63.5-50.8 (2 1/2"-2")	34.29 (1.350")				
50.8-38.1 (2"-1 1/2")	26.67 (1.050")				
38.1-25.4 (1 1/2"- 1")	19.05 (0.750")				
25.4-19.05 (1" -3/4")	13.34 (0.525")				
19.05-12.7 (3/4"-1/2")	9.53 (0.375")				
12.7-9.52 (1/2"-3/8")	6.68 (0.263")	387	97	484	20.04
9.52-4.76 (3/8"-#4)	4.29 (0.169")				
Total		387	97	484	20.04

$$\begin{aligned}
 \text{ดัชนีนิคมยาว (FI)} &= \frac{\text{Total mass retained}}{\text{Total mass}} \times 100\% \\
 &= \frac{Y}{X + Y} \times 100
 \end{aligned}$$

การทดลองตรวจดัชนีความแบน (Flakiness Index)	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 210/2518
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย ศรีษะบุญฤทธิ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยรัตนนคร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) หิน 3/8"
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Sieve Size U.S. Standard Square Opening (mm.)	Width of Slot sieve (mm.)	Mass Retained X (gm.)	Mass Passing Y (gm.)	Total Mass X + Y (gm.)	Flakiness Index %
63.5-50.8 (2 1/2"-2")	34.29 (1.350")				
50.8-38.1 (2"-1 1/2")	26.67 (1.050")				
38.1-25.4 (1 1/2"- 1")	19.05 (0.750")				
25.4-19.05 (1" -3/4")	13.34 (0.525")				
19.05-12.7 (3/4"-1/2")	9.53 (0.375")				
12.7-9.52 (1/2"-3/8")	6.68 (0.263")				
9.52-4.76 (3/8"-#4)	4.29 (0.169")	1,874	146	2,020	7.23
Total		1,874	146	2,020	7.23

$$\begin{aligned}
 \text{ดัชนีความแบน (FI)} &= \frac{\text{Total mass passing slot sieve (gm.)}}{\text{Total mass (gm.)}} \times 100\% \\
 &= \frac{Y}{X + Y} \times 100
 \end{aligned}$$

การทดลองความคงทนของมวลรวม (Soundness Test)	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 213/2531
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยรัตนนคร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) มวลละเอียด
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Quantitative Examination Coarse Aggregate Fine Aggregate
 Plus 4.75 mm.....% Minus 4.75 mm.....%

Sieve Size (mm.)	% Retained of Original Sample (1)	Mass of Test Fraction Before Test gm. (2)	Mass of Test Fraction After Test gm. (3)	Actual Loss, gm. (4) = (2)-(3)	Actual % Loss. (5) = (4)x100/(2)	Weighted % Loss (6) = (1)x(5)/100
9.5 - 4.75	28.11	260	258	2	0.77	0.22
4.75 - 2.36	25.41	235	227	8	3.40	0.87
2.36 - 1.18	16.11	149	149	0	0.00	0.00
1.18 - 0.60	11.68	108	107	1	0.93	0.11
0.60 - 0.30	18.70	173	162	11	6.36	1.19
Total % Loss						2.38

2. Qualitative Examination of Aggregate Larger than 19.0 mm.

Sieve Size (mm.)	Particles Exhibiting of Discrec								Total No. of Particles Before Test
	Splitting		Crumbling		Cracking		Flaking		
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3. Solution Sodium Sulfate Magnesium Sulfate
 Freshly Prepared Previously Used

4. Number of Cycles 5 Cycle.

การทดสอบความคงทนของมวลรวม (Soundness Test)	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 213/2531
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) มวลหยาบ
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Quantitative Examination Coarse Aggregate Fine Aggregate
 Plus 4.75 mm.....% Minus 4.75 mm.....%

Sieve Size (mm.)	% Retained of Original Sample (1)	Mass of Test Fraction Before Test gm. (2)	Mass of Test Fraction After Test gm. (3)	Actual Loss, gm. (4) = (2)-(3)	Actual % Loss. (5) = (4)x100/(2)	Weighted % Loss (6) = (1)x(5)/100
19.0 - 9.5	67.00	670	674	-4	-0.60	-0.40
9.5 - 4.75	33.00	325	304	21	6.46	2.13
Total % Loss						1.73

2. Qualitative Examination of Aggregate Larger than 19.0 mm.

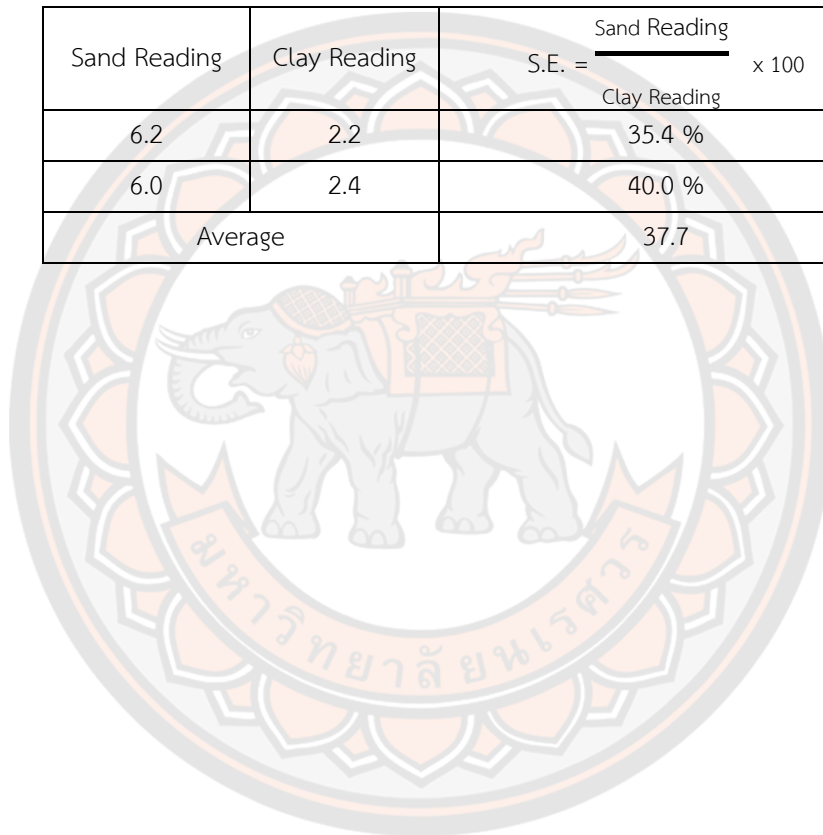
Sieve Size (mm.)	Particles Exhibiting of Discrec								Total No. of Particles Before Test
	Splitting		Crumbling		Cracking		Flaking		
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3. Solution Sodium Sulfate Magnesium Sulfate
 Freshly Prepared Previously Used

4. Number of Cycles 5 Cycle.

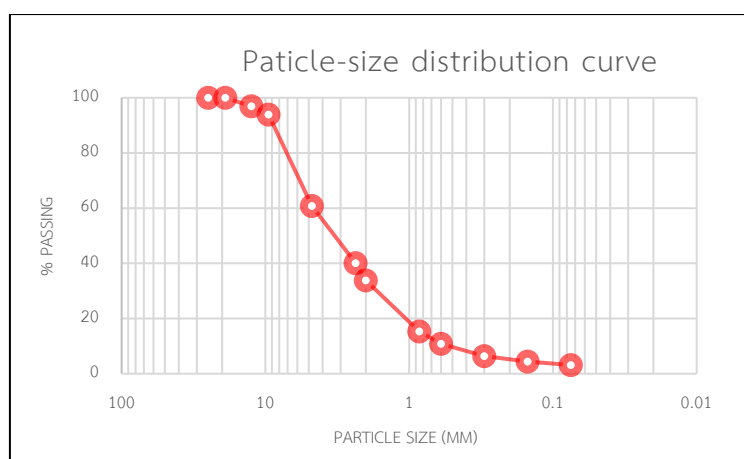
การทดลองความคงทนของมวลรวม (Sand Equivalent Test)	
มาตรฐาน	AASHO Desingnation : 176 - 56
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิษณุ เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	หินปูน (Hot Bin) มวลหยาบ
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Sand Reading	Clay Reading	S.E. = $\frac{\text{Sand Reading}}{\text{Clay Reading}} \times 100$
6.2	2.2	35.4 %
6.0	2.4	40.0 %
Average		37.7



การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยผ่านตะแกรงแบบล้าง	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 204/2516
วันที่ทดสอบ	9 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิษณุ เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลี่ยงเมืองพิษณุโลก

Sieve Sizes	First Trial			Second Trial			Average
	Retained (gm.)	Passing (gm.)	Passing %	Retained (gm.)	Passing (gm.)	Passing %	Passing %
1	0.0	1,000.0	100.0	0.0	1,000.0	100.0	100.0
3/4"	0.0	1,000.0	100.0	0.0	1,000.0	100.0	100.0
1/2"	20.0	980.0	98.0	41.0	959.0	95.9	96.9
3/8"	25.0	955.0	95.5	36.0	923.0	92.3	93.9
#4	378.4	576.6	57.6	281.5	641.5	64.1	60.8
#8	166.7	409.9	40.9	246.9	394.6	39.3	40.1
#10	63.8	346.1	34.5	61.8	332.8	33.1	33.8
#20	186.5	159.6	15.8	182.4	150.4	14.8	15.3
#30	45.2	114.4	11.3	43.7	106.7	10.5	10.9
#50	44.8	69.6	6.8	44.3	62.4	6.0	6.4
#100	20.2	49.4	4.7	18.9	43.5	4.1	4.4
#200	13.3	36.1	3.4	12.2	31.3	2.9	3.2
Pan	34.0			28.8			
รวม	997.9			997.5			



การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดหยาบ	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 207/2517
วันที่ทดสอบ	9 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิษณุ เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลี่ยงเมืองพิษณุโลก

ตัวอย่าง	น้ำหนักของตัวอย่าง (gm)			G _B	G _A	% ดูดซึมน้ำ	
	สภาพอบแห้ง (A)	สภาพ อิ่มตัวผิว แห้ง (B)	แช่ในน้ำ (C)	$\frac{A}{B - C}$	$\frac{A}{A - C}$	$\frac{B - A}{A} \times 100$	
RAP 3/4"	No.1	231.7	231.9	147.5	2.752	2.745	0.09
	No.2	236.9	237.8	153.8	2.851	2.820	0.38
	No.3	274.0	274.8	178.0	2.854	2.831	0.29
	Average				2.819	2.799	0.25
RAP 1/2"	No.1	300.7	301.3	194.0	2.818	2.802	0.20
	No.2	299.2	300.2	193.5	2.831	2.804	0.33
	No.3	299.2	300.2	192.9	2.815	2.788	0.33
	Average				2.821	2.798	0.29
RAP 3/8"	No.1	498.7	499.6	317.8	2.757	2.743	0.18
	No.2	499.3	500.1	319.3	2.774	2.762	0.16
	No.3	499.5	500.4	320.0	2.783	2.769	0.18
	Average				2.771	2.758	0.17

การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 209/2518
วันที่ทดสอบ	9 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชญ์ เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP) Retained #200 (ตัวอย่างที่ 1)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลี่ยงเมืองพิษณุโลก

Pycnometer No.1

Wt. Pycnometer + SSD Sample = 646.8 gm

Wt. Pycnometer = 161.8 gm

Wt. SSD Sample (A) = 485.0 gm

Wt. Container + Dry Sample = 752.9 gm

Wt. Container = 273.6 gm

Wt. Dry Sample (B) = 479.3 gm

Absorption = 1.189

Temperature (°C)	Wt. Pycnometer + Water Sample (W ₁) (g)	Wt. Pycnometer + Water (W ₂) (g)	Density of Water (dt)	G _a	G _b
70	956.4	650.1	0.9778	2.709	2.623
65	957.0	651.5	0.9806	2.704	2.618
60	958.3	653.0	0.9832	2.708	2.622
55	958.9	654.3	0.9857	2.704	2.619
50	959.0	655.2	0.9881	2.699	2.614
45	960.6	656.3	0.9902	2.712	2.626
40	961.1	657.4	0.9922	2.708	2.623
35	961.5	658.2	0.9942	2.708	2.623
Average				2.708	2.623
Temperature 30 °C			0.9957	2.720	2.634

โดยที่

Apparent Specific Gravity

$$G_A (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (B + W_2 - W_1)$$

$$G_A (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_A * t / 0.9957$$

Bulk Specific Gravity (Oven-Dry Basic)

$$G_B (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (A + W_2 - W_1)$$

$$G_B (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_B * t / 0.9957$$

การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 209/2518
วันที่ทดสอบ	9 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิษณุ เศรษฐยุทพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP) Passing #200 (ตัวอย่างที่ 1)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลี้ยวเมืองพิษณุโลก

Pycnometer No.2

Wt. Pycnometer = 154.0 gm

Wt. Container + Dry Sample = 491.4 gm

Wt. Container = 231.3 gm

Wt. Dry Sample (B) = 260.1 gm

Temperature (°C)	Wt. Pycnometer + Water Sample (W ₁) (g)	Wt. Pycnometer + Water (W ₂) (g)	Density of Water (dt)	G _a
70	807.7	642.1	0.9778	2.691
65	809.0	643.9	0.9806	2.685
60	810.2	645.1	0.9832	2.692
55	810.5	646.4	0.9857	2.671
50	811.5	647.6	0.9881	2.672
45	813.2	648.5	0.9902	2.700
40	813.2	649.6	0.9922	2.674
35	814.5	650.0	0.9942	2.705
Average				2.672
Temperature 30 °C			0.9957	2.684

โดยที่ Apparent Specific Gravity

$$G_A (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (B + W_2 - W_1)$$

$$G_A (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_A * t / 0.9957$$

การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 209/2518
วันที่ทดสอบ	9 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิษณุ เศรษฐบุษยทรัพย์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP) Retained #200 (ตัวอย่างที่ 2)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลียบเมืองพิษณุโลก

Pycnometer No.1

Wt. Pycnometer + SSD Sample = 648.4 gm

Wt. Pycnometer = 161.8 gm

Wt. SSD Sample (A) = 486.6 gm

Wt. Container + Dry Sample = 714.5 gm

Wt. Container = 232.7 gm

Wt. Dry Sample (B) = 481.8 gm

Absorption = 0.996

Temperature (°C)	Wt. Pycnometer + Water Sample (W ₁) (g)	Wt. Pycnometer + Water (W ₂) (g)	Density of Water (dt)	G _a	G _b
70	958.3	650.1	0.9778	2.714	2.641
65	959.3	651.5	0.9806	2.715	2.642
60	960.0	653.0	0.9832	2.710	2.638
55	960.4	654.3	0.9857	2.703	2.631
50	961.3	655.2	0.9881	2.710	2.638
45	962.4	656.3	0.9902	2.715	2.643
40	962.9	657.4	0.9922	2.712	2.640
35	963.0	658.2	0.9942	2.706	2.635
Average				2.710	2.641
Temperature 30 °C			0.9957	2.722	2.652

โดยที่

Apparent Specific Gravity

$$G_A (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (B + W_2 - W_1)$$

$$G_A (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_A * t / 0.9957$$

Bulk Specific Gravity (Oven-Dry Basic)

$$G_B (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (A + W_2 - W_1)$$

$$G_B (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_B * t / 0.9957$$

การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 209/2518
วันที่ทดสอบ	9 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิษณุ เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP) Passing #200 (ตัวอย่างที่ 2)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลี้ยวเมืองพิษณุโลก

Pycnometer No.2

Wt. Pycnometer = 154.0 gm

Wt. Container + Dry Sample = 514.9 gm

Wt. Container = 231.4 gm

Wt. Dry Sample (B) = 283.5 gm

Temperature (°C)	Wt. Pycnometer + Water Sample (W ₁) (g)	Wt. Pycnometer + Water (W ₂) (g)	Density of Water (dt)	G _a
70	824.0	642.1	0.9778	2.728
65	825.0	643.9	0.9806	2.715
60	826.5	645.1	0.9832	2.730
55	827.1	646.4	0.9857	2.718
50	828.1	647.6	0.9881	2.720
45	828.9	648.5	0.9902	2.723
40	829.7	649.6	0.9922	2.720
35	830.7	650.0	0.9942	2.742
Average				2.720
Temperature 30 °C			0.9957	2.731

โดยที่ Apparent Specific Gravity

$$G_A (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (B + W_2 - W_1)$$

$$G_A (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_A * t / 0.9957$$

การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 209/2518
วันที่ทดสอบ	9 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิษณุ เศรษฐบุษยทรัพย์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP) Retained #200 (ตัวอย่างที่ 3)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลี่ยงเมืองพิษณุโลก

Pycnometer No.1

Wt. Pycnometer + SSD Sample = 627.0 gm Wt. Pycnometer = 161.8 gm
 Wt. SSD Sample (A) = 465.2 gm Wt. Dry Sample (B) = 462.7 gm
 Absorption = 0.540

Temperature (°C)	Wt. Pycnometer + Water Sample (W ₁) (g)	Wt. Pycnometer + Water (W ₂) (g)	Density of Water (dt)	G _a	G _b
70	958.3	650.1	0.9778	2.714	2.641
65	959.3	651.5	0.9806	2.715	2.642
60	960.0	653.0	0.9832	2.710	2.638
55	960.4	654.3	0.9857	2.703	2.631
50	961.3	655.2	0.9881	2.710	2.638
45	962.4	656.3	0.9902	2.715	2.643
40	962.9	657.4	0.9922	2.712	2.640
35	963.0	658.2	0.9942	2.706	2.635
Average				2.710	2.641
Temperature 30 °C			0.9957	2.722	2.652

โดยที่

Apparent Specific Gravity

$$G_A (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (B + W_2 - W_1)$$

$$G_A (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_A * t / 0.9957$$

Bulk Specific Gravity (Oven-Dry Basic)

$$G_B (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (A + W_2 - W_1)$$

$$G_B (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_B * t / 0.9957$$

การทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 209/2518
วันที่ทดสอบ	9 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิษณุ เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP) Passing #200 (ตัวอย่างที่ 3)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลี่ยงเมืองพิษณุโลก

Pycnometer No.2

Wt. Pycnometer = 154.0 gm

Wt. Dry Sample (B) = 128.0 gm

Temperature (°C)	Wt. Pycnometer + Water Sample (W ₁) (g)	Wt. Pycnometer + Water (W ₂) (g)	Density of Water (dt)	G _a
70	724.3	642.1	0.9778	2.733
65	725.9	643.9	0.9806	2.729
60	726.8	645.1	0.9832	2.718
55	727.8	646.4	0.9857	2.708
50	728.9	647.6	0.9881	2.709
45	729.7	648.5	0.9902	2.708
40	730.6	649.6	0.9922	2.702
35	731.6	650.0	0.9942	2.743
Average				2.708
Temperature 30 °C			0.9957	2.720

โดยที่

Apparent Specific Gravity

$$G_A (t \text{ } ^\circ\text{C}) = B * dt / (B + W_2 - W_1)$$

$$G_A (30 \text{ } ^\circ\text{C}) = G_A * t / 0.9957$$

Bulk Specific Gravity of Combined Aggregate Blend	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 204/2516
วันที่ทดสอบ	9 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชญ์ เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP) Passing #200 (ตัวอย่างที่ 3)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลี้ยวเมืองพิษณุโลก

	Retained #200	Passing #200
G _B No. 1	2.634	2.684
G _B No. 2	2.652	2.731
G _B No. 3	2.674	2.720
Average	2.653	2.712
Content %	96.85	3.15
Combined Aggregate Blend	2.655	

	Coarse Aggregate	Fine Aggregate
Content %	39.18	60.82
G _B (Average)	2.666	2.655
G _B (Average)	2.674	2.720
Combined Aggregate Blend	2.659	

การทดลองตรวจความแบน (Flakiness Index)	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 210/2518
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลี่ยงเมืองพิษณุโลก

Sieve Size U.S. Standard Square Opening (mm.)	Width of Slot sieve (mm.)	Mass Retained X (gm.)	Mass Passing Y (gm.)	Total Mass X + Y (gm.)	Flakiness Index %
63.5-50.8 (2 1/2"-2")	34.29 (1.350")				
50.8-38.1 (2"-1 1/2")	26.67 (1.050")				
38.1-25.4 (1 1/2"- 1")	19.05 (0.750")				
25.4-19.05 (1" -3/4")	13.34 (0.525")				
19.05-12.7 (3/4"-1/2")	9.53 (0.375")	330	910	1,240	26.61
12.7-9.52 (1/2"-3/8")	6.68 (0.263")	341	102	443	76.98
9.52-4.76 (3/8"-#4)	4.29 (0.169")	104	38	142	73.24
Total		775	1050	1,825	42.47

$$\begin{aligned}
 \text{ดัชนีความแบน (FI)} &= \frac{\text{Total mass passing slot sieve (gm.)}}{\text{Total mass (gm.)}} \times 100\% \\
 &= \frac{Y}{X + Y} \times 100
 \end{aligned}$$

การทดลองตรวจนิเวศความแบน (Elongation Index)	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 211/2518
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2562
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย ศรีษะรัฐทพพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลี่ยงเมืองพิษณุโลก

Sieve Size U.S. Standard Square Opening (mm.)	Width of Slot sieve (mm.)	Mass Retained X (gm.)	Mass Passing Y (gm.)	Total Mass X + Y (gm.)	Flakiness Index %
63.5-50.8 (2 1/2"-2")	34.29 (1.350")				
50.8-38.1 (2"-1 1/2")	26.67 (1.050")				
38.1-25.4 (1 1/2"- 1")	19.05 (0.750")				
25.4-19.05 (1" -3/4")	13.34 (0.525")				
19.05-12.7 (3/4"-1/2")	9.53 (0.375")	1,132	0.11	1,132.11	0.00
12.7-9.52 (1/2"-3/8")	6.68 (0.263")	376	65	441	14.74
9.52-4.76 (3/8"-#4)	4.29 (0.169")	45	97	142	68.31
Total		1,553	162.11	1,715.11	9.45

$$\begin{aligned}
 \text{ดัชนีความยาว (FI)} &= \frac{\text{Total mass retained}}{\text{Total mass}} \times 100\% \\
 &= \frac{Y}{X + Y} \times 100
 \end{aligned}$$

การทดลองหาความสึกหรอของมวลรวมหยาบโดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 202/2515
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2562
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย ศรีษะรุทพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP)
แหล่งวัสดุ	ถนนทางหลวงหมายเลข 126 กม. 46 ด้าน RT. ถนนเลี่ยงเมืองพิษณุโลก

Sample No. 1 of 1 Grading B
 Number of revolutions 500 Number of abrasive -
 Weight of charges 4,607 gm

Original Mass of sample (W_1)	=	5,000 gm.
Final Mass of sample (W_2)	=	3,522 gm.
Loss ($W_1 - W_2$)	=	1,478 gm.
Percentage of wear $\frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$	=	29.56% \leq 40% (OK)

การทดลองความคงทนของมวลรวม (Soundness Test)	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 213/2531
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP) มวลละเอียด
แหล่งวัสดุ	โรงไม้หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Quantitative Examination Coarse Aggregate Fine Aggregate
 Plus 4.75 mm.....% Minus 4.75 mm.....%

Sieve Size (mm.)	% Retained of Original Sample (1)	Mass of Test Fraction Before Test gm. (2)	Mass of Test Fraction After Test gm. (3)	Actual Loss, gm. (4) = (2)-(3)	Actual % Loss. (5) = (4)x100/(2)	Weighted % Loss (6) = (1)x(5)/100
9.5 - 4.75	22.90	204	202	2	0.98	0.22
4.75 - 2.36	22.67	202	202	0	0.00	0.00
2.36 - 1.18	16.95	151	149	2	1.32	0.22
1.18 - 0.60	24.92	222	218	4	1.80	0.45
0.60 - 0.30	12.57	112	103	9	8.04	1.01
Total % Loss						1.91

2. Qualitative Examination of Aggregate Larger than 19.0 mm.

Sieve Size (mm.)	Particles Exhibiting of Discrec								Total No. of Particles Before Test
	Splitting		Crumbling		Cracking		Flaking		
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3. Solution Sodium Sulfate Magnesium Sulfate
 Freshly Prepared Previously Used

4. Number of Cycles 5 Cycle.

การทดลองความคงทนของมวลรวม (Soundness Test)	
มาตรฐาน	ทล.-ท. 213/2531
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวัชณ์ เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP) มวลหยาบ
แหล่งวัสดุ	โรงไม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Quantitative Examination Coarse Aggregate Fine Aggregate
 Plus 4.75 mm.....% Minus 4.75 mm.....%

Sieve Size (mm.)	% Retained of Original Sample (1)	Mass of Test Fraction Before Test gm. (2)	Mass of Test Fraction After Test gm. (3)	Actual Loss, gm. (4) = (2)-(3)	Actual % Loss. (5) = (4)x100/(2)	Weighted % Loss (6) = (1)x(5)/100
19.0 - 9.5	67.00	671	700	-29	-4.32	-2.90
9.5 - 4.75	33.00	330	300	30	9.09	3.00
Total % Loss						0.10

2. Qualitative Examination of Aggregate Larger than 19.0 mm.

Sieve Size (mm.)	Particles Exhibiting of Discrec								Total No. of Particles Before Test
	Splitting		Crumbling		Cracking		Flaking		
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3. Solution Sodium Sulfate Magnesium Sulfate
 Freshly Prepared Previously Used

4. Number of Cycles 5 Cycle.

การทดลองความคงทนของมวลรวม (Sand Equivalent Test)	
มาตรฐาน	AASHO Desingnation : 176 - 56
วันที่ทดสอบ	8 ธันวาคม 2563
ผู้ทดสอบ	ณัฐวิษณุ เศรษฐยุทธพงษ์
สถานที่ทดสอบ	ห้องปฏิบัติการวัสดุงานทาง มหาวิทยาลัยนเรศวร
วัสดุ	ผิวทางเก่า (RAP)
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย

Sand Reading	Clay Reading	S.E. = $\frac{\text{Sand Reading}}{\text{Clay Reading}} \times 100$
4.0	3.5	87.5 %
4.0	3.7	92.5 %
Average		90.0 %







คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

99 หมู่ 9 ถนนพิชัยโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง

จังหวัดพิชัยโลก 65000

AC 60/70	G _{ac}	1.0334					
Agg Mix	G _{agg} (SSD)	2.655		CB1	CB2	CB3	CB4
CHARACTERISTICS of AGGREGATES			ฝุ่น	3/8	1/2	3/4	
Nature			หินปูน				
Source			โรงโม่หินสุวรรณ จ.สุโขทัย				
Soudness (Sodium Sulfate)	DH-T 213/2531						
Bulk Sp Gr OD	DH-T 207/2517 DH-T 209/2518	2.637	2.669	2.674	2.679		
Bulk Sp Gr SSD	DH-T 207/2517 DH-T 209/2518						
Apparent Spec Gravity	DH-T 207/2517 DH-T 209/2518		2.713	2.710	2.714		
Water Absorption	DH-T 207/2517 DH-T 209/2518		0.60	0.50	0.48		
Los Angeles Abrasion	DH-T 202/2531		24.42				
Flakiness Index	DH-T 210/2518		7.23	20.04	56.25		
Elongation Index	DH-T 211/2518		40.5	20.04	29.89		

Marshall Characteristics	Unit	DH-S 408/2532	
		Wearing Course	Binder Course
Compaction per face	blows	75	75
Marshall Density	g/cm ³	-	-
Air Void	%	3 - 5	3 - 6
Voids in Mineral Aggregate (VMA)	%	>14	>13
Voids Filled with Asphalt (VFB)	%	-	-
Marshall Stability	lbs	>1,800	>1,800
Flow 0.25 mm	0.01 in.	8 - 16	8 - 16
Stability/Flow	lbs / 0.01in	>160	>160
Strength Index	%	>75	>75



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
 99 หมู่ 9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง
 จังหวัดพิษณุโลก 65000

RAP (Recailm Asphalt Pavement)

AC 60/70	G_{ac}	1.0334		
Agg Mix	G_{agg} (SSD)	2.659		
CHARACTERISTICS of AGGREGATES			RAP	
Soudness (Sodium Sulfate)	DH-T 213/2531			
Bulk Sp Gr OD	DH-T 207/2517 DH-T 209/2518			
Bulk Sp Gr SSD	DH-T 207/2517 DH-T 209/2518			
Apparent Spec Gravity	DH-T 207/2517 DH-T 209/2518			
Water Absorption	DH-T 207/2517 DH-T 209/2518			
Los Angeles Abrasion	DH-T 202/2531		29.56	< 40
Flakiness Index	DH-T 210/2518		42.42	< 30
Elongation Index	DH-T 211/2518		9.45	< 30

BS 812

BS 812

Marshall Characteristics	Unit	DH-S 410/2542	
		Wearing Course	Binder Course
Compaction per face	blows	75	75
Marshall Density	g/cm^3	-	-
Air Void	%	3 - 6	3 - 6
Voids in Mineral Aggregate (VMA)	%	>14	>13
Voids Filled with Asphalt (VFB)	%	-	-
Marshall Stability	lbs	>1,500	>1,500
Flow 0.25 mm	0.01 in.	8 - 16	8 - 16
Stability/Flow	lbs / 0.01in	>125	>125
Strength Index	%	>75	>75



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
99 หมู่ 9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง
จังหวัดพิษณุโลก 65000

Nominal Size		HB1	HB2	HB3	HB4	Combine	Tolerances		DH-S 408/2532			
Proportion %		50	20	15	15	100	Lower	Upper	Wearing Course		Binder Course	
Mesh	# mm								Lower	Upper	Lower	Upper
1 1/2	37.5	100.00	100.00	100.00	100.00	100.0	100.0	100.0				
1	25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.0	95.0	100.0				100
3/4	19	100.00	100.00	100.00	86.42	98.0	93.0	100.0		100	90	100
1/2	12.5	100.00	100.00	94.43	6.28	85.1	80.1	90.1	80	100		
3/8	9.5	100.00	94.80	21.90	0.00	72.2	67.2	77.2			56	80
4	4.75	99.70	2.85	0.03	0.00	50.4	45.4	55.4	44	74	35	65
8	2.36	73.14	0.30	0.00	0.00	36.6	31.6	41.6	28	58	23	49
16	1.18	47.43	0.00	0.00	0.00	23.7	19.7	27.7				
30	0.6	32.13	0.00	0.00	0.00	16.1	12.1	20.1				
50	0.3	24.63	0.00	0.00	0.00	12.3	8.3	16.3	5	21	5	19
100	0.15	19.03	0.00	0.00	0.00	9.5	6.5	12.5				
200	0.075	15.60	0.00	0.00	0.00	7.8	5.8	9.8	2	10	2	8
Bulk Sp Gr		2.637	2.669	2.674	2.679	2.655						



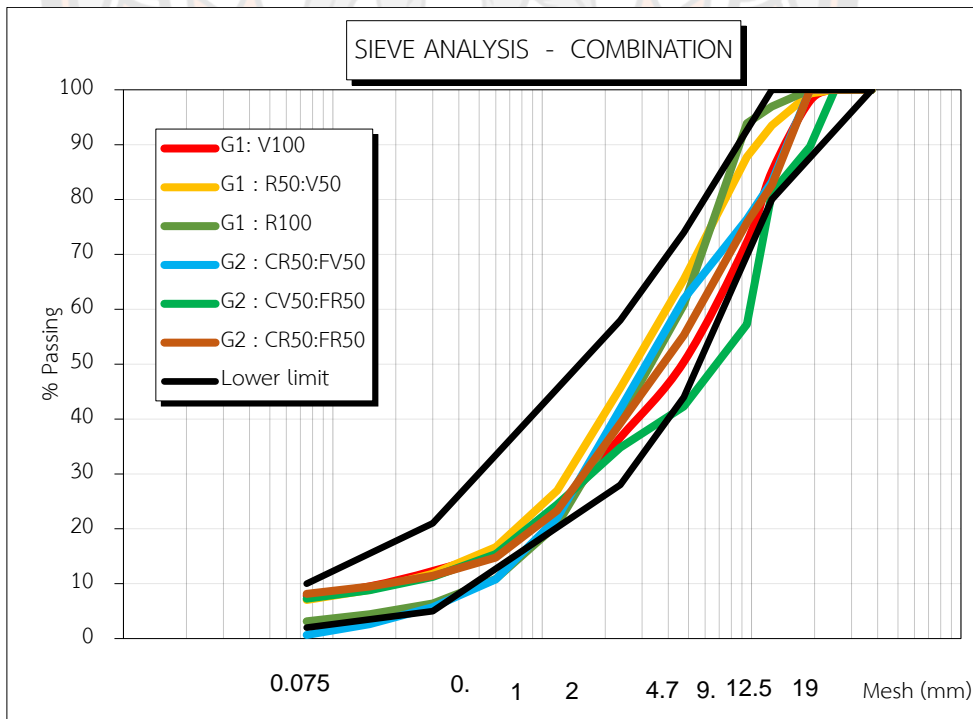
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
99 หมู่ 9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง
จังหวัดพิษณุโลก 65000

Nominal Size		Rap	HB1	HB2	HB3	HB4	Combine	Tolerances		DH-S 408/2532			
Proportion %		50	35	5	5	5	100	Lower	Upper	Wearing Course		Binder Course	
Mesh	# mm									Lower	Upper	Lower	Upper
1 1/2	37.5	100.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.0	100.0	100.0				
1	25	100.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.0	95.0	100.0				100
3/4	19	100.0	100.00	100.00	100.00	86.42	99.3	94.3	100.0		100	90	100
1/2	12.5	96.94	100.00	100.00	94.43	6.28	93.5	88.5	98.5	80	100		
3/8	9.5	93.89	100.00	94.80	21.90	0.00	87.8	82.8	92.8			56	80
4	4.75	60.82	99.70	2.85	0.03	0.00	65.4	60.4	70.4	44	74	35	65
8	2.36	40.09	73.14	0.30	0.00	0.00	45.7	40.7	50.7	28	58	23	49
16	1.18	20.79	47.43	0.00	0.00	0.00	27.0	23.0	31.0				
30	0.6	10.85	32.13	0.00	0.00	0.00	16.7	12.7	20.7				
50	0.3	6.38	24.63	0.00	0.00	0.00	11.8	7.8	15.8	5	21	5	19
100	0.15	4.43	19.03	0.00	0.00	0.00	8.9	5.9	11.9				
200	0.08	3.15	15.60	0.00	0.00	0.00	7.0	5.0	9.0	2	10	2	8
Bulk Sp Gr		2.659	2.637	2.669	2.674	2.679	2.653						



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบรจรัม
 99 หมู่ 9 ถนนพธิษณโลก-นครสวรจรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอมือง
 จังหวัตพธิษณโลก 65000

Nominal Size		RAP	Combine	Tolerances		DH-S 410/2542			
Proportion %		100	100			Wearing Course		Binder Course	
Mesh	# mm			Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper
1 1/2	37.5	100.0	100.0	100.0	100.0				
1	25	100.0	100.0	95.0	100.0				100
3/4	19	100.0	100.0	95.0	100.0		100	90	100
1/2	12.5	96.94	96.9	91.9	100.0	80	100		
3/8	9.5	93.89	93.9	88.9	98.9			56	80
4	4.75	60.82	60.8	55.8	65.8	44	74	35	65
8	2.36	40.09	40.1	35.1	45.1	28	58	23	49
16	1.18	20.79	20.8	16.8	24.8				
30	0.6	10.85	10.8	6.8	14.8				
50	0.3	6.38	6.4	2.4	10.4	5	21	5	19
100	0.15	4.43	4.4	1.4	7.4				
200	0.075	3.15	3.1	1.1	5.1	2	10	2	8
Bulk	Sp Gr	2.659	0.399						




No. of Sample		A1	A2	A3	B1	B2	B3
TEST NO. 1 PROJECT HOT MIX DESIGN DATA BY THE MARSHALL METHOD							
Mix Proportion Hot Bin 1:2:3:4 =		50 : 20 : 15 : 15 (By Weight)			Pen. Grade AC 60-70		
Avg. Sp. Gr. Agg. And Filler (G_{ac}) =		2.655			Sp. Gr. AC (G_{ac}) = 1.0334		
Compaction, number of blows each end =		75			Bitumen Absorption (X) = 25.00%		
% AC by Wgt. Of Agg (a)		4.50			5.00		
% AC by Wgt. Of Mix (b)		4.31			4.76		
%Eff. AC by Wgt. Of Mix (c): $b \cdot x(100-b)/100$		4.07			4.52		
Spec. Hgt.	mm (D)	68.33	67.34	68.26	66.70	65.65	65.56
DENSITY							
Wt. in air	gm. (e)	1242.5	1242	1247.1	1258.7	1253.3	1247.7
Wt. Sat. surface dry	gm. (f)	1249.0	1246.8	1252.0	1259.7	1255.5	1249.3
Wt. in water	gm. (g)	714.6	715.9	716.1	736.0	734.1	730.2
Bulk Volume	gm. (h) : f-g	534.4	530.9	535.9	523.7	521.4	519.1
Bulk Density	gm./ml (i) : e/h	2.325	2.339	2.327	2.403	2.404	2.404
Average Density		2.331			2.404		
VOIDS ANALYSIS							
Volume AC	% Total (j) : $c \cdot i / G_{ac}$	9.2			10.5		
Volume Agg.	% Total (k) : $(100-b) / i / G_{ag}$	84.0			86.2		
VMA	% Total (l) : $100-k$	16.0			13.8		
Air Voids	% Total (m) : l-j	6.8			3.3		
VFB	% Total (n) : $100 \cdot j / l$	57.3			76.4		
STABILITY							
Read (Proving ring)		1014.00	1009.00	1016.00	1080.00	1064.00	1039.00
Meas.	Kn	12.07	12.01	12.09	12.85	12.66	12.36
Correlation Ratio		0.8894	0.9140	0.8910	0.9300	0.9403	0.9386
Adjusted	Kn	10.73	10.97	10.77	11.95	11.91	11.60
Adjusted	Lbs	2413	2467	2422	2687	2676	2609
Average Stability		2434			2657		
FLOWS							
Meas.	0.01"	3.72	3.09	3.07	3.99	2.74	3.84
Average Flow	0.01"	3.29			3.52		
Average Flow	mm	13.0			13.9		
STABILITY/FLOW	Lbs/mm	188			192		




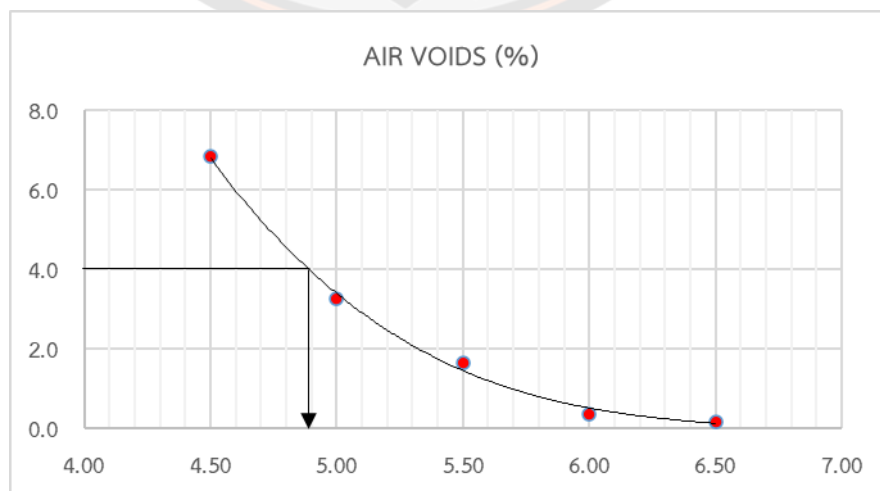
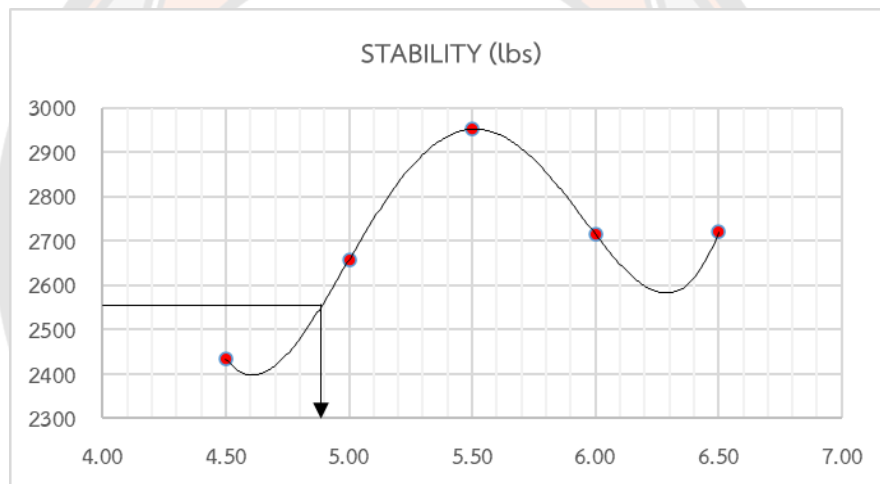
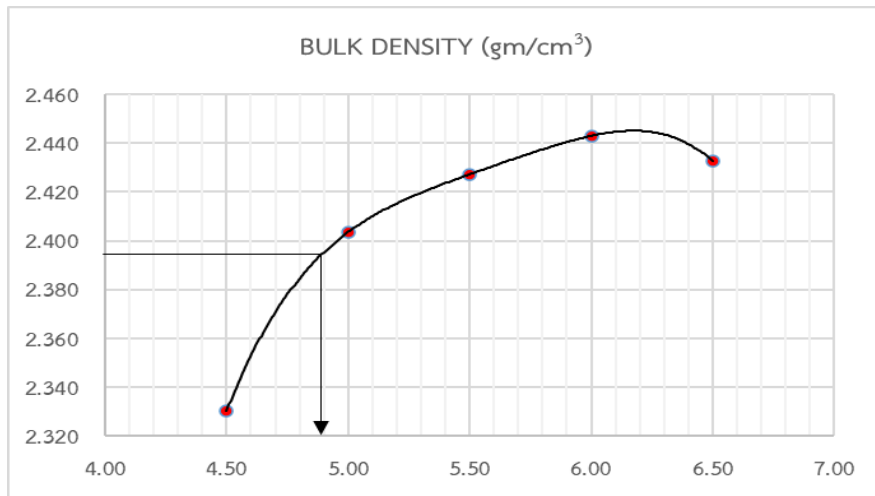
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

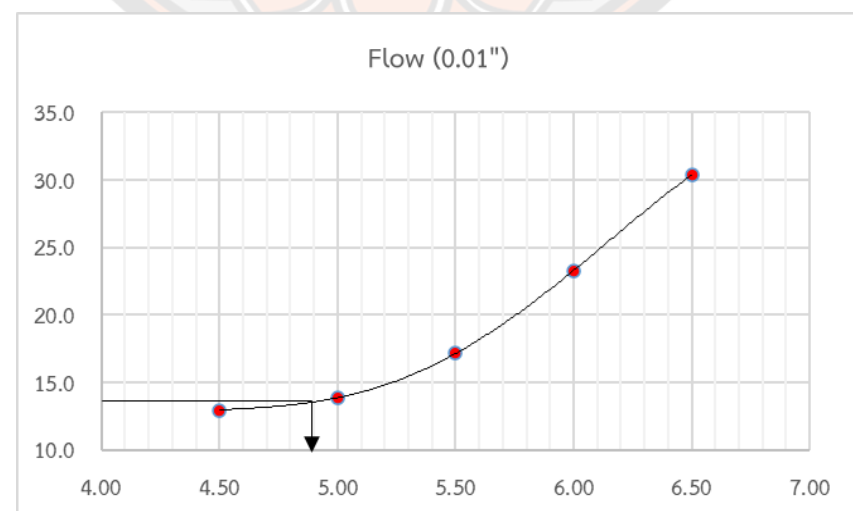
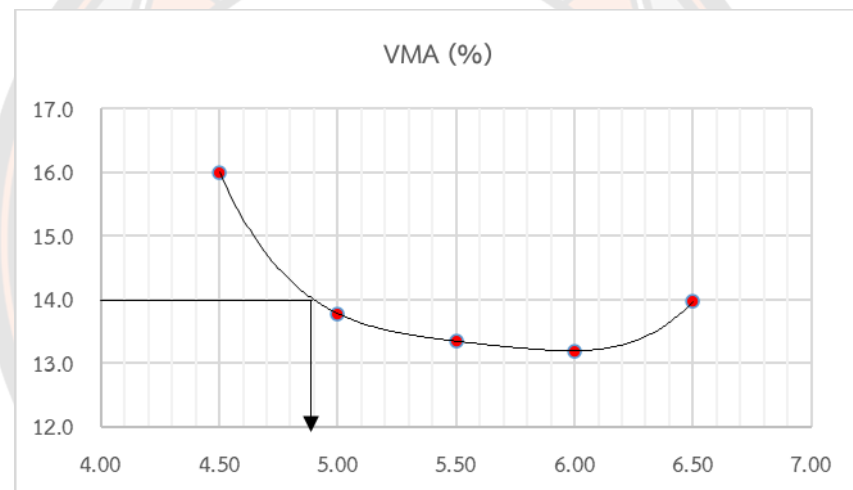
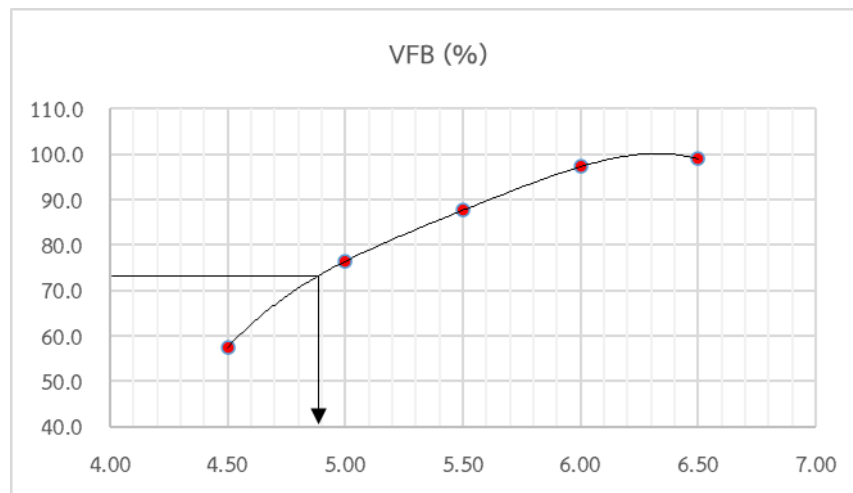
99 หมู่ 9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง

จังหวัดพิษณุโลก 65000

		คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี				
		99 หมู่ 9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000				
TEST NO.	1	PROJECT	HOT MIX DESIGN DATA BY THE MARSHALL METHOD			
Mix Proportion Hot Bin 1:2:3:4 =	50 : 20 : 15 : 15 (By Weight)			Pen. Grade AC 60-70		
Avg. Sp. Gr. Agg. And Filler (G_{ac}) =	2.655		Sp. Gr. AC (G_{ac}) =		1.0334	
Compaction, number of blows each end =	75		Bitumen Absorption (X) =		25.00%	
No. of Sample	A1	A2	A3	B1	B2	B3
% AC by Wgt. Of Agg (a)	5.50			6.00		
% AC by Wgt. Of Mix (b)	5.21			5.66		
%Eff. AC by Wgt. Of Mix (c): $b \times (100-b)/100$	4.98			5.42		
Spec. Hgt. mm (D)	65.47	65.15	65.84	65.59	64.95	
DENSITY						
Wt. in air gm. (e)	1257.7	1255.1	1266.9	1266.5	1265.4	
Wt. Sat. surface dry gm. (f)	1258.8	1256.4	1267.6	1267.5	1266.2	
Wt. in water gm. (g)	739.4	737.7	748.5	748.3	749.0	
Bulk Volume gm. (h) : f-g	519.4	518.7	519.1	519.2	517.2	
Bulk Density gm./ml (i) : e/h	2.421	2.420	2.441	2.439	2.447	
Average Density	2.427			2.443		
VOIDS ANALYSIS						
Volume AC % Total (j) : $c \cdot i / G_{ac}$	11.7			12.8		
Volume Agg. % Total (k) : $(100-b) \cdot i / G_{ag}$	86.7			86.8		
VMA % Total (l) : $100-k$	13.3			13.2		
Air Voids % Total (m) : l-j	1.7			0.4		
VFB % Total (n) : $100 \cdot j / l$	87.6			97.2		
STABILITY						
Read (Proving ring)	1190.00	1274.00	1069.00	1026.00	1094.00	
Meas. Kn	14.16	15.16	12.72	12.21	13.02	
Correlation Ratio	0.9369	0.9309	0.9439	0.9508	0.9638	
Adjusted Kn	13.27	14.11	12.01	11.61	12.55	
Adjusted Lbs	2983	3173	2699	2610	2821	
Average Stability	2951			2715		
FLOWS						
Meas. 0.01"	3.57	4.73	4.77	5.93	5.91	
Average Flow 0.01"	4.36			5.92		
Average Flow mm	17.2			23.3		
STABILITY/FLOW Lbs/mm	172			116		

		คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ 99 หมู่ 9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000						
		TEST NO. <u>1</u>	PROJECT	HOT MIX DESIGN DATA BY THE MARSHALL METHOD				
		Mix Proportion Hot Bin 1:2:3:4 =		50 : 20 : 15 : 15 (By Weight)			Pen. Grade AC 60-70	
		Avg. Sp. Gr. Agg. And Filler (G_{ac}) =		2.655		Sp. Gr. AC (G_{ac}) =		1.0334
Compaction, number of blows each end =		75		Bitumen Absorption (X) =		25.00%		
No. of Sample		A1	A2	A3				
% AC by Wgt. Of Agg (a)		6.50						
% AC by Wgt. Of Mix (b)		6.10						
%Eff. AC by Wgt. Of Mix (c): $b \times (100-b)/100$		5.87						
Spec. Hgt.	mm (D)	65.63	65.72					
DENSITY								
Wt. in air	gm. (e)	1269.2	1276.8					
Wt. Sat. surface dry	gm. (f)	1269.6	1277.1					
Wt. in water	gm. (g)	747.6	752.5					
Bulk Volume	gm. (h) : f-g	522.0	524.6					
Bulk Density	gm./ml (i) : e/h	2.431	2.434					
Average Density		2.433						
VOIDS ANALYSIS								
Volume AC	% Total (j) : $c \cdot i / G_{ac}$	13.8						
Volume Agg.	% Total (k) : $(100-b) \cdot i / G_{ac}$	86.0						
VMA	% Total (l) : $100-k$	14.0						
Air Voids	% Total (m) : l-j	0.2						
VFB	% Total (n) : $100 \cdot j / l$	98.9						
STABILITY								
Read (Proving ring)		1084.00	1058.00					
Meas.	Kn	12.90	12.59					
Correlation Ratio		0.9501	0.9484					
Adjusted	Kn	12.26	11.94					
Adjusted	Lbs	2755	2684					
Average Stability		2720						
FLOWS								
Meas.	0.01"	7.67	7.76					
Average Flow	0.01"	7.72						
Average Flow	mm	30.4						
STABILITY/FLOW	Lbs/mm	90						





No. of Sample	A1	A2	A3	B1	B2	B3
% AC by Wgt. Of Agg (a)	4.50			5.00		
% AC by Wgt. Of Mix (b)	4.31			4.76		
%Eff. AC by Wgt. Of Mix (c): $b \times (100-b)/100$	4.07			4.52		
Spec. Hgt. mm (D)	64.27	63.06	64.63	64.43	63.35	62.96
DENSITY						
Wt. in air gm. (e)	1202.9	1209	1210.9	1212.5	1212.6	1207.2
Wt. Sat. surface dry gm. (f)	1213.7	1217.5	1219.9	1217.2	1216.6	1209.6
Wt. in water gm. (g)	703.5	713.8	710.0	711.7	714.3	710.9
Bulk Volume gm. (h) : f-g	510.2	503.7	509.9	505.5	502.3	498.7
Bulk Density gm./ml (i) : e/h	2.358	2.400	2.375	2.399	2.414	2.421
Average Density	2.378			2.411		
VOIDS ANALYSIS						
Volume AC % Total (j) : $c*/G_{ac}$	9.4			10.6		
Volume Agg. % Total (k) : $(100-b)i/G_{ag}$	85.8			86.6		
VMA % Total (l) : $100-k$	14.2			13.4		
Air Voids % Total (m) : $l-j$	4.9			2.9		
VFB % Total (n) : $100*j/l$	65.7			78.5		
STABILITY						
Read (Proving ring)	1149.00	1160.00	1340.00	1430.00	1485.00	1270.00
Meas. Kn	13.67	13.80	15.95	17.02	17.67	15.11
Correlation Ratio	0.9756	0.9983	0.9688	0.9726	0.9928	1.0001
Adjusted Kn	13.34	13.78	15.45	16.55	17.54	15.11
Adjusted Lbs	2999	3098	3473	3721	3944	3398
Average Stability	3190			3687		
FLOWS						
Meas. 0.01"	3.07	2.90	2.94	3.23	2.93	3.75
Average Flow 0.01"	2.97			3.30		
Average Flow mm	11.7			13.0		
STABILITY/FLOW Lbs/mm	273			284		



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

99 หมู่ 9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง

จังหวัดพิษณุโลก 65000

TEST NO. 1 PROJECT HOT MIX DESIGN DATA BY THE MARSHALL METHOD

Mix Proportion 50RAP : 50HB = 50 : 35 : 5 : 5 : 5 Pen. Grade AC 60-70

Avg. Sp. Gr. Agg. And Filler (G_{ac}) = 2.653 Sp. Gr. AC (G_{ac}) = 1.0334

Compaction, number of blows each end = 75 Bitumen Absorption (X) = 25.00%

No. of Sample		C1	C2	C3	D1	D2	D3
% AC by Wgt. Of Agg (a)		5.50			6.03		
% AC by Wgt. Of Mix (b)		5.21			5.69		
%Eff. AC by Wgt. Of Mix (c): $b \times (100-b)/100$		4.98			5.45		
Spec. Hgt.	mm (D)	63.12	62.54	63.98	63.73	63.84	63.53
DENSITY							
Wt. in air	gm. (e)	1210.7	1216.0	1212.5	1220.3	1215.5	1221.8
Wt. Sat. surface dry	gm. (f)	1212.7	1217.8	1218.2	1221.4	1217.7	1222.8
Wt. in water	gm. (g)	712.8	714.5	712.4	717.8	716.1	720.3
Bulk Volume	gm. (h) : f-g	499.9	503.3	505.8	503.6	501.6	502.5
Bulk Density	gm./ml (i) : e/h	2.422	2.416	2.397	2.423	2.423	2.431
Average Density		2.412			2.426		
VOIDS ANALYSIS							
Volume AC	% Total (j) : $c*/G_{ac}$	11.6			12.8		
Volume Agg.	% Total (k) : $(100-b)/G_{ag}$	86.2			86.2		
VMA	% Total (l) : $100-k$	13.8			13.8		
Air Voids	% Total (m) : $l-j$	2.2			1.0		
VFB	% Total (n) : $100*j/l$	83.9			93.0		
STABILITY							
Read (Proving ring)		1070.00	1000.00	1000.00	880.00	860.00	910.00
Meas.	Kn	12.73	11.90	11.90	10.47	10.23	10.83
Correlation Ratio		0.9971	1.0080	0.9798	0.9857	0.9836	0.9894
Adjusted	Kn	12.70	12.00	11.66	10.32	10.07	10.71
Adjusted	Lbs	2854	2697	2621	2320	2263	2409
Average Stability		2724			2331		
FLOWS							
Meas.	0.01"	4.15	4.03	3.27	3.75	3.55	4.05
Average Flow	0.01"	3.82			3.78		
Average Flow	mm	15.0			14.9		
STABILITY/FLOW	Lbs/mm	181			156		



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

99 หมู่ 9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง


จังหวัดพิษณุโลก 65000

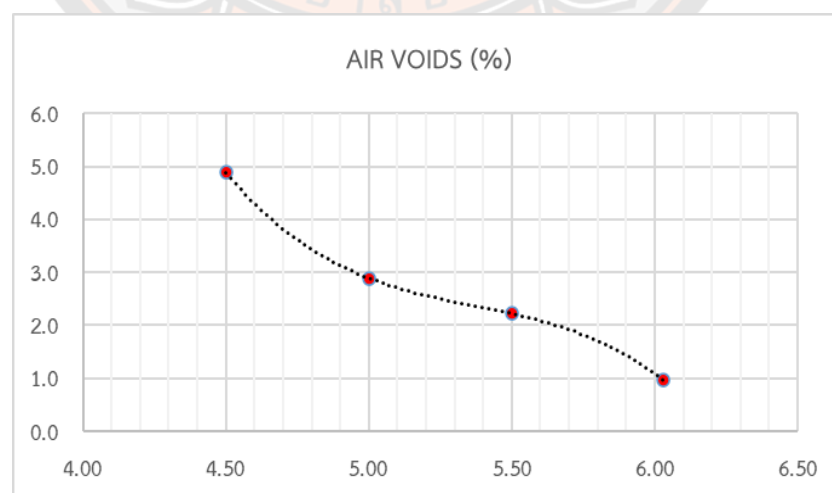
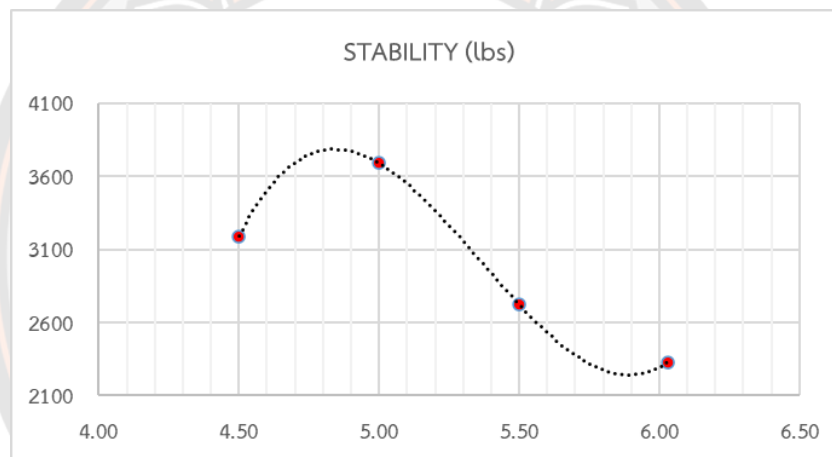
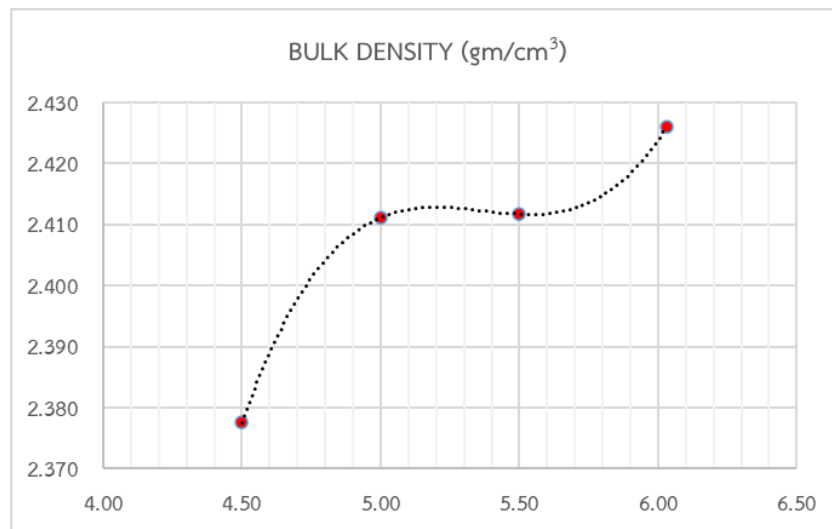
TEST NO. 1 PROJECT HOT MIX DESIGN DATA BY THE MARSHALL METHOD

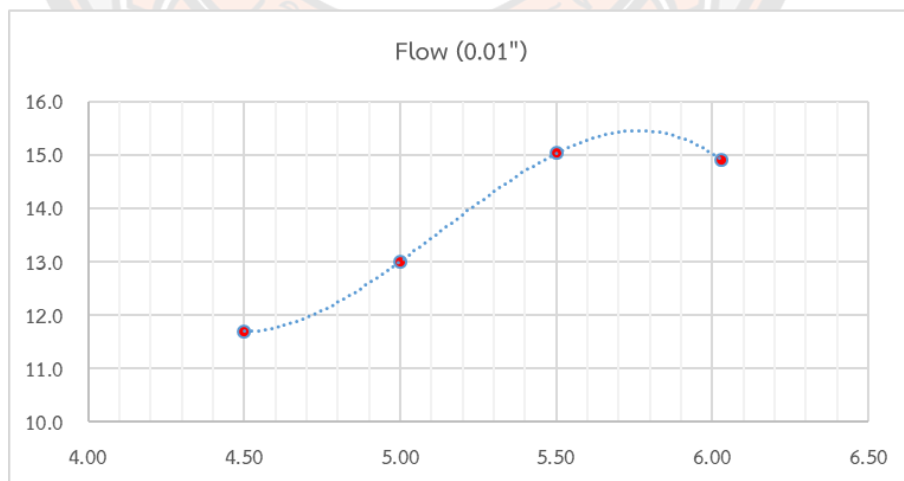
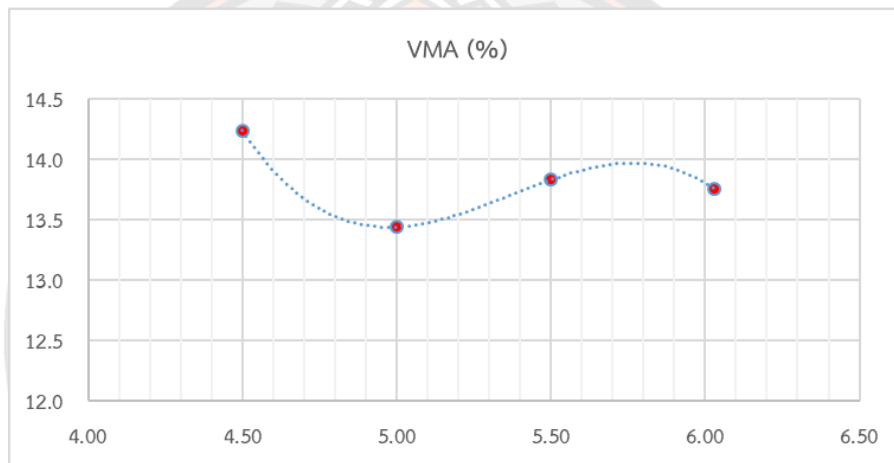
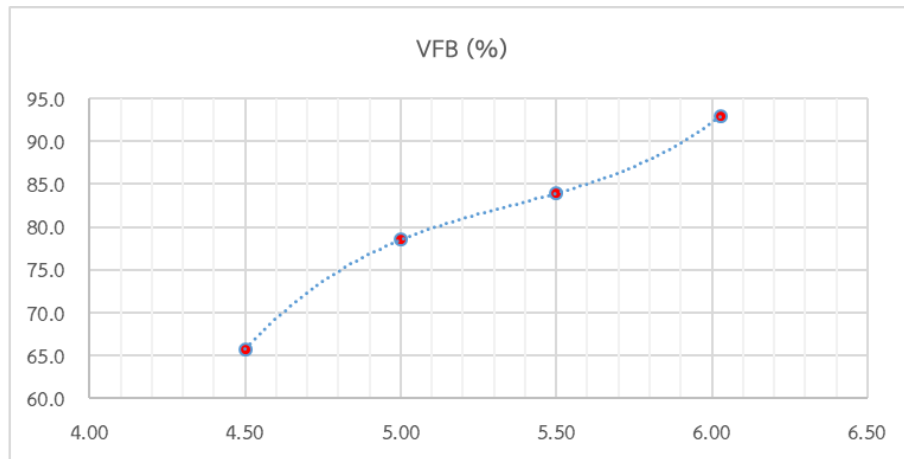
Mix Proportion Hot Bin 1:2:3:4 = 50 : 35 : 5 : 5 : 5 Pen. Grade AC 60-70


Avg. Sp. Gr. Agg. And Filler (G_{ac}) = 2.653 Sp. Gr. AC (G_{ac}) = 1.0334


Compaction, number of blows each end = 75 Bitumen Absorption (X) = 25.00%

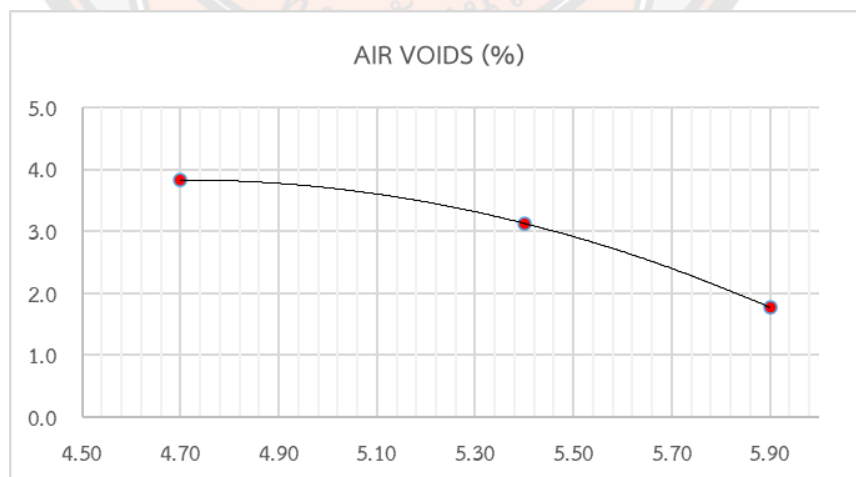
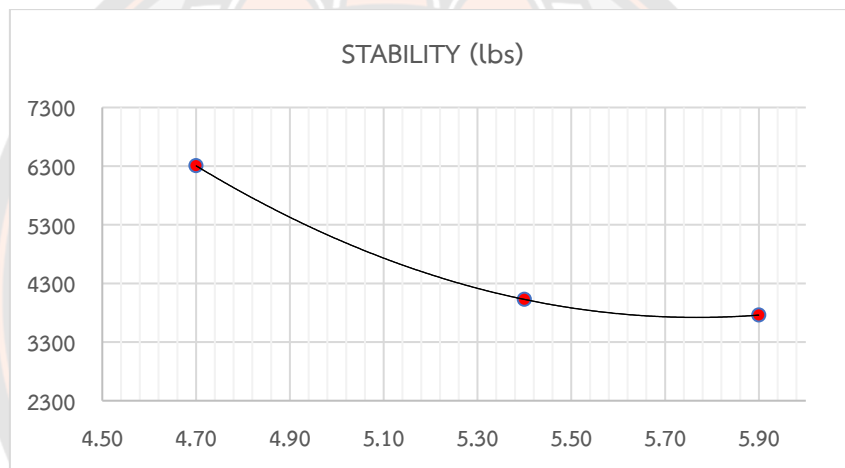
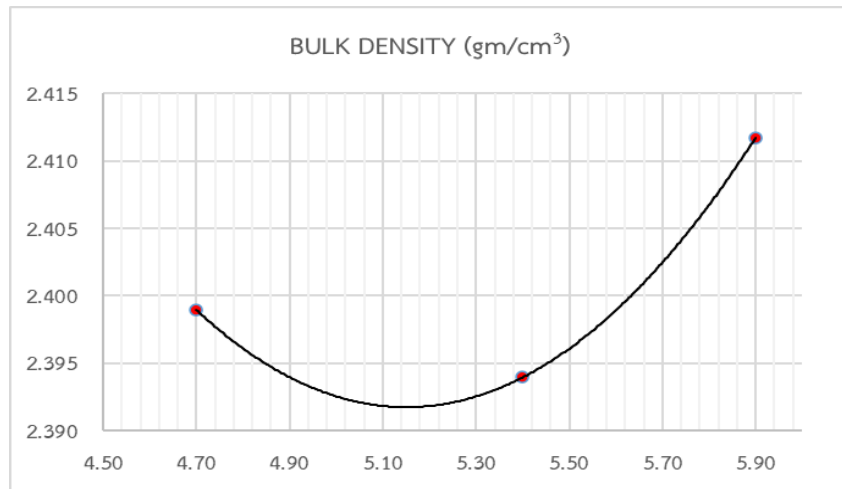
No. of Sample	A1	A2	A3			
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ 99 หมู่ 9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000						
TEST NO.	1		PROJECT	HOT MIX DESIGN DATA BY THE MARSHALL METHOD		
Mix Proportion Hot Bin 1:2:3:4 =	50 : 35 : 5 : 5 : 5			Pen. Grade AC 60-70		
Avg. Sp. Gr. Agg. And Filler (G_{ac}) =	2.653		Sp. Gr. AC (G_{ac}) =	1.0334		
Compaction, number of blows each end =	75		Bitumen Absorption (X) =	25.00%		
% AC by Wgt. Of Agg (a)	4.80					
% AC by Wgt. Of Mix (b)	4.58					
%Eff. AC by Wgt. Of Mix (c): $b \times (100-b) / 100$	4.34					
Spec. Hgt. mm (D)	66.45	65.82	66.31			
DENSITY						
Wt. in air gm. (e)	1230.2	1227.9	1227.4			
Wt. Sat. surface dry gm. (f)	1233.7	1228.6	1230.7			
Wt. in water gm. (g)	710.7	710.6	710.6			
Bulk Volume gm. (h) : f-g	523.0	518.0	520.1			
Bulk Density gm./ml (i) : e/h	2.352	2.370	2.360			
Average Density	2.361					
VOIDS ANALYSIS						
Volume AC % Total (j) : c^*i/G_{ac}	9.9					
Volume Agg. % Total (k) : $(100-b)/G_{ag}$	84.9					
VMA % Total (l) : $100-k$	15.1					
Air Voids % Total (m) : l-j	5.2					
VFB % Total (n) : $100*j/l$	65.7					
STABILITY						
Read (Proving ring)	1168.00	1000.00	1150.00			
Meas. Kn	13.90	11.90	13.69			
Correlation Ratio	0.9347	0.9465	0.9373			
Adjusted Kn	12.99	11.26	12.83			
Adjusted Lbs	2921	2532	2883			
Average Stability	2779					
FLOWS						
Meas. 0.01"	3.09	2.98	3.14			
Average Flow 0.01"	3.07					
Average Flow mm	12.1					
STABILITY/FLOW Lbs/mm	230					

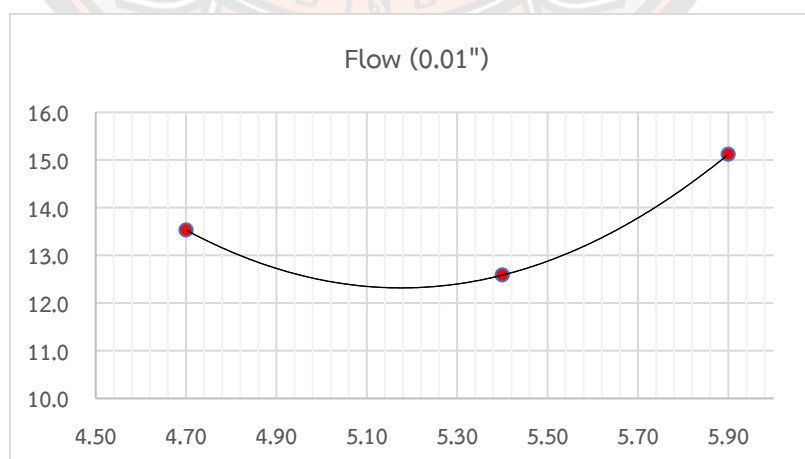
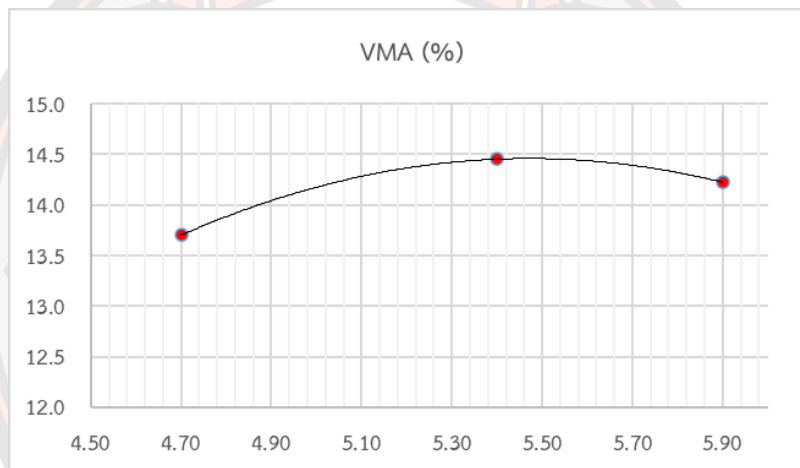
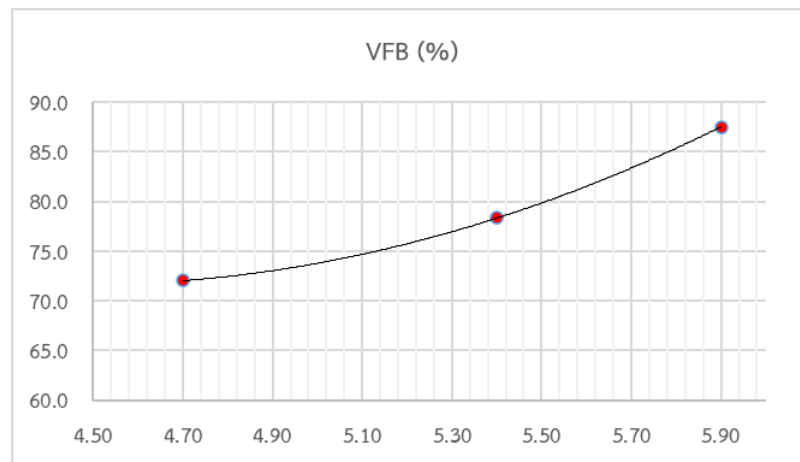




		คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี				
		99 หมู่ 9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง				
		จังหวัดพิษณุโลก 65000				
TEST NO.	1	PROJECT	HOT MIX DESIGN DATA BY THE MARSHALL METHOD			
Mix Proportion Hot Bin 1:2:3:4 =	100 : 0 : 0 : 0 (By Weight)			Pen. Grade AC 60-70		
Avg. Sp. Gr. Agg. And Filler (G_{ac}) =	2.655	Sp. Gr. AC (G_{ac}) =		1.0334		
Compaction, number of blows each end =	75	Bitumen Absorption (X) =		25.00%		
No. of Sample	A1	A2	A3	B1	B2	B3
% AC by Wgt. Of Agg (a)	4.70			5.40		
% AC by Wgt. Of Mix (b)	4.49			5.12		
%Eff. AC by Wgt. Of Mix (c): $b \times (100-b)/100$	4.25			4.89		
Spec. Hgt. mm (D)	63.88	62.70	62.94	63.34	63.39	63.58
DENSITY						
Wt. in air gm. (e)	1194.5	1194.7	1194.3	1198.7	1200.3	1201.5
Wt. Sat. surface dry gm. (f)	1200.6	1196.1	1196.9	1201.5	1205.0	1204.8
Wt. in water gm. (g)	700.1	698.8	700.9	702.3	703.0	702.0
Bulk Volume gm. (h) : f-g	500.5	497.3	496.0	499.2	502.0	502.8
Bulk Density gm./ml (i) : e/h	2.387	2.402	2.408	2.401	2.391	2.390
Average Density	2.399			2.394		
VOIDS ANALYSIS						
Volume AC % Total (j) : $c \times i / G_{ac}$	9.9			11.3		
Volume Agg. % Total (k) : $(100-b)i / G_{ag}$	86.3			85.5		
VMA % Total (l) : $100-k$	13.7			14.5		
Air Voids % Total (m) : l-j	3.8			3.1		
VFB % Total (n) : $100 \times j / l$	72.0			78.3		
STABILITY						
Read (Proving ring)	2495.00	2545.00	1977.00	1679.00	1429.00	1400.00
Meas. Kn	29.69	30.29	23.53	19.98	17.01	16.66
Correlation Ratio	0.9905	1.0200	1.0140	1.0040	1.0028	0.9980
Adjusted Kn	29.41	30.89	23.86	20.06	17.05	16.63
Adjusted Lbs	6611	6944	5363	4509	3833	3738
Average Stability	6306			4027		
FLOWS						
Meas. 0.01"	4.48	2.83	3.00	3.44	2.96	3.19
Average Flow 0.01"	3.44			3.20		
Average Flow mm	13.5			12.6		
STABILITY/FLOW Lbs/mm	466			320		

		คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี				
		99 หมู่ 9 ถนนพิชัยโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000				
TEST NO.	1	PROJECT		HOT MIX DESIGN DATA BY THE MARSHALL METHOD		
Mix Proportion Hot Bin 1:2:3:4 =	100 : 0 : 0 : 0 (By Weight)		Pen. Grade AC 60-70			
Avg. Sp. Gr. Agg. And Filler (G_{ac}) =	2.655		Sp. Gr. AC (G_{ac}) =		1.0334	
Compaction, number of blows each end =	75		Bitumen Absorption (X) =		25.00%	
No. of Sample	A1	A2	A3	B1	B2	B3
% AC by Wgt. Of Agg (a)	5.90					
% AC by Wgt. Of Mix (b)	5.57					
%Eff. AC by Wgt. Of Mix (c): $b \times (100-b)/100$	5.34					
Spec. Hgt. mm (D)	62.31	62.42	63.34			
DENSITY						
Wt. in air gm. (e)	1207.7	1204.5	1205.7			
Wt. Sat. surface dry gm. (f)	1210.0	1207.0	1209.2			
Wt. in water gm. (g)	713.7	706.9	705.4			
Bulk Volume gm. (h) : f-g	496.3	500.1	503.8			
Bulk Density gm./ml (i) : e/h	2.433	2.409	2.393			
Average Density	2.412					
VOIDS ANALYSIS						
Volume AC % Total (j) : $c \times i / G_{ac}$	12.5					
Volume Agg. % Total (k) : $(100-b)i / G_{ag}$	85.8					
VMA % Total (l) : $100-k$	14.2					
Air Voids % Total (m) : l-j	1.8					
VFB % Total (n) : $100 \times j / l$	87.5					
STABILITY						
Read (Proving ring)	1422.00	1378.00	1327.00			
Meas. Kn	16.92	16.40	15.79			
Correlation Ratio	1.0300	1.0300	1.0040			
Adjusted Kn	17.43	16.89	15.85			
Adjusted Lbs	3918	3797	3564			
Average Stability	3760					
FLOWS						
Meas. 0.01"	3.79	3.67	4.06			
Average Flow 0.01"	3.84					
Average Flow mm	15.1					
STABILITY/FLOW Lbs/mm	249					





Marshall Characteristics	Unit	DH-S 408/2532	DH-S 410/2542	100%HB	100%RAP	50%RAP
		Wearing Course	Wearing Course	%AC 5	%AC 5.4	%AC 4.8
Compaction per face	blows	75	75	75	75	75
Marshall Density	g/cm ³	-	-	2.404	2.394	2.361
Air Void	%	3 - 5	3 - 6	3.3	3.1	5.2
Voids in Mineral Aggregate (VMA)	%	>14	>14	14.0	14.5	15.1
Voids Filled with Asphalt (VFB)	%	-	-	76.4	78.3	65.7
Marshall Stability	lbs	>1,800	>1,500	2657	4027	2779
Flow 0.25 mm	0.01 in.	8 - 16	8 - 16	13.9	12.6	12.1
Stability/Flow	lbs / 0.01in	>160	>125	192	320	230
Strength Index	%	>75	>75	-	-	-





ภาคผนวก ค

การทดสอบความต้านทานการสิ้นไถล

มหาวิทยาลัยบูรพา

Number of Cycles	MTD					BPN							DFT				
	Density (gm/ml)	Weight (g)	Volume (ml)	Area (cm ²)	MTD	อุณหภูมิ (°C)	BPN					BPN	BPN ₃₅	BPN (10)	DFT (20)	DFT (40)	DFT (60)
							1	2	3	4	5						
0	1.455	72.5	49.8	572.6	0.870	28.2	84	83	80	80	79	79.0	75.0	0.88	0.74	0.39	0.34
5,000	1.455	41.0	28.2	360.1	0.783	25.6	66	64	63	62	62	63.4	59.0	0.65	0.32	0.24	0.29
10,000	1.455	32.0	22.0	360.1	0.611	24.6	55	55	55	54	54	54.6	50.4	0.54	0.37	0.31	0.30
15,000	1.455	29.1	20.0	360.1	0.555	25.3	52	52	51	51	51	51.4	47.7	0.51	0.30	0.28	0.28
25,000	1.455	29.3	20.1	360.1	0.559	25.7	52	51	51	50	50	50.8	47.3	0.50	0.24	0.25	0.25
50,000	1.455	28.5	19.6	360.1	0.544	23.4	46	45	45	45	45	45.2	41.3	0.43	0.22	0.23	0.23
100,000	1.455	24.8	17.0	360.1	0.473	23.0	45	44	44	44	44	44.2	40.3	0.42	0.22	0.22	0.21

Number of Cycles	MTD					BPN							DFT				
	Density (gm/ml)	Weight (g)	Volume (ml)	Area (cm ²)	MTD	อุณหภูมิ (°C)	BPN					BPN	BPN ₃₅	BPN (10)	DFT (20)	DFT (40)	DFT (60)
							1	2	3	4	5						
0	1.455	72.5	49.8	730.6	0.682	29.8	80	79	78	76	75	77.5	74.5	0.88	0.74	0.32	0.30
5,000	1.455	40.7	28.0	360.1	0.777	24.8	65	64	63	63	62	63.4	58.6	0.65	0.45	0.34	0.34
10,000	1.455	30.5	21.0	360.1	0.582	24.5	60	60	59	59	60	59.6	55.0	0.60	0.30	0.29	0.29
15,000	1.455	26.8	18.4	360.1	0.512	25.0	55	54	54	54	54	54.2	50.2	0.54	0.29	0.26	0.26
25,000	1.455	25.8	17.7	360.1	0.492	23.0	54	54	53	53	53	53.4	48.7	0.52	0.26	0.25	0.24
50,000	1.455	24.1	16.6	360.1	0.460	23.5	53	53	53	53	52	52.8	48.3	0.51	0.22	0.22	0.21
100,000	1.455	22.2	15.3	360.1	0.424	23.4	49	49	49	48	48	48.6	44.4	0.47	0.20	0.19	0.19

Number of Cycles	MTD					BPN							DFT				
	Density (gm/ml)	Weight (g)	Volume (ml)	Area (cm ²)	MTD	อุณหภูมิ (°C)	BPN					BPN	BPN ₃₅	BPN (10)	DFT (20)	DFT (40)	DFT (60)
							1	2	3	4	5						
0	1.455	72.5	49.8	754.8	0.660	29.0	77	77	76	75	74	77.3	73.8	0.87	0.48	0.33	0.35
5,000	1.455	36.0	24.7	360.1	0.687	25.5	58	58	58	57	56	57.4	53.4	0.58	0.25	0.20	0.21
10,000	1.455	31.0	21.3	360.1	0.592	25.6	55	55	55	55	55	55.0	51.2	0.55	0.27	0.26	0.27
15,000	1.455	25.6	17.6	360.1	0.489	25.5	52	51	51	52	51	51.4	47.8	0.51	0.25	0.24	0.24
25,000	1.455	25.2	17.3	360.1	0.481	23.5	49	48	48	48	48	48.2	44.1	0.46	0.23	0.22	0.21
50,000	1.455	20.7	14.2	360.1	0.395	23.8	47	47	47	46	46	46.6	42.7	0.45	0.20	0.18	0.18
100,000	1.455	18.9	13.0	360.1	0.361	24.5	47	47	46	46	46	46.4	42.8	0.45	0.18	0.16	0.16

Number of Cycles	MTD					BPN							DFT				
	Density (gm/ml)	Weight (g)	Volume (ml)	Area (cm ²)	MTD	อุณหภูมิ (°C)	BPN					BPN	BPN ₃₅	BPN (10)	DFT (20)	DFT (40)	DFT (60)
							1	2	3	4	5						
0	1.455	72.5	49.8	564.1	0.883	26.0	84	83	83	84	87	84.2	78.6	0.94	0.71	0.65	0.64
5,000	1.455	33.0	22.7	468.5	0.484	24.0	66	66	65	65	65	65.4	60.8	0.68	0.41	0.40	0.39
10,000	1.455	49.3	33.9	468.5	0.723	25.6	66	65	66	66	65	65.6	60.3	0.67	0.34	0.35	0.36
15,000	1.455	57.0	39.2	468.5	0.836	23.5	54	53	52	52	52	52.6	48.1	0.51	0.28	0.29	0.30
25,000	1.455	57.8	39.7	468.5	0.848	26.0	52	51	50	50	50	50.6	47.2	0.50	0.21	0.24	0.25
50,000	1.455	58.8	40.4	468.5	0.863	24.2	53	52	52	54	54	53.0	48.8	0.52	0.23	0.24	0.26
100,000	1.455	63.9	43.9	468.5	0.938	20.0	44	44	44	44	44	44.0	39.1	0.40	0.21	0.23	0.24

G2 : CV50:FR50_1		MTD					BPN							DFT			
Number of Cycles	Density (gm/ml)	Weight (g)	Volume (ml)	Area (cm ²)	MTD	อุณหภูมิ (°C)	BPN					BPN	BPN ₃₅	BPN (10)	DFT (20)	DFT (40)	DFT (60)
	1	2	3	4	5												
0	1.455	72.5	49.8	547.4	0.910	27.6	81	83	83	82	80	81.8	77.3	0.92	0.74	0.45	0.39
5,000	1.455	55.7	38.2	468.5	0.816	27.0	60	60	59	58	56	58.6	55.1	0.60	0.36	0.29	0.27
10,000	1.455	59.6	40.9	468.5	0.874	23.7	53	54	54	54	53	53.6	49.1	0.52	0.28	0.24	0.23
15,000	1.455	58.6	40.2	468.5	0.859	22.5	55	55	55	55	55	55.0	49.9	0.53	0.24	0.22	0.21
25,000	1.455	58.8	40.4	468.5	0.862	25.5	50	49	48	48	47	48.4	45.0	0.47	0.22	0.22	0.21
50,000	1.455	60.1	41.3	468.5	0.881	22.8	46	44	43	42	42	43.4	40.7	0.42	0.18	0.18	0.18
100,000	1.455	59.8	41.1	468.5	0.877	26.7	44	44	44	44	43	43.8	39.8	0.41	0.19	0.18	0.18

G2 : CV50:FR50_2		MTD					BPN							DFT			
Number of Cycles	Density (gm/ml)	Weight (g)	Volume (ml)	Area (cm ²)	MTD	อุณหภูมิ (°C)	BPN					BPN	BPN ₃₅	BPN (10)	DFT (20)	DFT (40)	DFT (60)
	1	2	3	4	5												
0	1.455	72.5	49.8	637.4	0.782	25.0	71	73	69	67	65	69.0	63.9	0.72	0.59	0.39	0.33
5,000	1.455	51.2	35.2	468.5	0.752	24.0	50	50	48	49	49	49.2	45.2	0.48	0.33	0.30	0.30
10,000	1.455	45.4	31.2	468.5	0.666	25.5	55	55	54	51	50	53.0	49.3	0.53	0.30	0.28	0.27
15,000	1.455	58.3	40.1	468.5	0.856	23.7	46	45	45	44	44	44.8	41.1	0.43	0.26	0.25	0.24
25,000	1.455	59.0	40.5	468.5	0.866	24.9	42	41	41	40	40	40.8	37.7	0.39	0.23	0.21	0.21
50,000	1.455	59.5	40.9	468.5	0.873	23.8	39	38	38	38	38	38.2	35.0	0.36	0.19	0.19	0.20
100,000	1.455	63.2	43.4	468.5	0.927	21.2	35	35	34	34	34	34.4	30.9	0.31	0.17	0.18	0.18

G2 : CR50:FR50_1		MTD					BPN							DFT			
Number of Cycles	Density (gm/ml)	Weight (g)	Volume (ml)	Area (cm ²)	MTD	อุณหภูมิ (°C)	BPN					BPN	BPN ₃₅	BPN (10)	DFT (20)	DFT (40)	DFT (60)
	1	2	3	4	5												
0	1.455	72.5	49.8	629.0	0.792	28.5	70	71	69	68	66	68.8	65.5	0.74	0.35	0.28	0.26
5,000	1.455	46.5	32.0	468.5	0.682	25.0	56	54	53	50	49	52.4	48.5	0.52	0.29	0.26	0.24
10,000	1.455	43.0	29.6	468.5	0.631	23.3	52	51	50	48	48	49.8	45.5	0.48	0.26	0.23	0.22
15,000	1.455	42.9	29.5	468.5	0.629	22.5	46	44	43	41	40	42.8	39.9	0.41	0.25	0.22	0.22
25,000	1.455	36.8	25.3	468.5	0.540	22.0	45	45	44	43	42	43.8	39.7	0.41	0.22	0.21	0.20
50,000	1.455	46.5	31.9	468.5	0.682	23.1	44	43	42	41	40	42.0	38.3	0.39	0.21	0.18	0.17
100,000	1.455	32.6	22.4	468.5	0.478	25.7	42	40	39	39	39	39.8	36.0	0.37	0.20	0.20	0.19

G2 : CR50:FR50_2		MTD					BPN							DFT			
Number of Cycles	Density (gm/ml)	Weight (g)	Volume (ml)	Area (cm ²)	MTD	อุณหภูมิ (°C)	BPN					BPN	BPN ₃₅	BPN (10)	DFT (20)	DFT (40)	DFT (60)
	1	2	3	4	5												
0	1.455	72.5	49.8	660.5	0.754	25.0	71	74	69	69	66	69.8	64.6	0.73	0.42	0.25	0.24
5,000	1.455	49.4	34.0	468.5	0.725	24.5	48	46	45	45	45	45.8	42.2	0.44	0.34	0.27	0.26
10,000	1.455	43.8	30.1	468.5	0.643	26.0	54	51	50	49	48	50.4	47.0	0.50	0.29	0.26	0.24
15,000	1.455	50.1	34.5	468.5	0.735	24.7	46	45	45	45	45	45.2	41.8	0.43	0.26	0.24	0.22
25,000	1.455	52.9	36.3	468.5	0.776	25.0	43	43	42	42	42	42.4	39.3	0.40	0.23	0.21	0.22
50,000	1.455	54.3	37.3	468.5	0.796	28.0	39	39	38	39	39	38.8	36.8	0.38	0.22	0.21	0.21
100,000	1.455	56.0	38.5	468.5	0.821	23.0	39	38	37	36	36	37.2	33.9	0.34	0.18	0.18	0.17

G1 : V100								
Number of Cycles	MTD	BPT	DFT(20)	Sp (Km/h)	BPT (FR60)	DFT (FR60)	BPT (F60)	DFT (F60)
0	0.870	75.0	0.74	87.26	42.28	0.47	0.39	0.42
5,000	0.783	59.0	0.32	77.29	30.89	0.19	0.30	0.22
10,000	0.611	50.4	0.37	57.78	21.21	0.19	0.23	0.22
15,000	0.555	47.7	0.30	51.49	18.07	0.14	0.20	0.18
25,000	0.559	47.3	0.24	51.93	18.06	0.11	0.20	0.16
50,000	0.544	41.3	0.22	50.19	15.26	0.10	0.18	0.15
100,000	0.473	40.3	0.22	42.17	12.30	0.09	0.15	0.14

G1 : R50:V50								
Number of Cycles	MTD	BPT	DFT(20)	Sp (Km/h)	BPT (FR60)	DFT (FR60)	BPT (F60)	DFT (F60)
0	0.682	74.5	0.74	65.88	34.88	0.40	0.34	0.38
5,000	0.777	58.6	0.45	76.64	30.52	0.27	0.30	0.28
10,000	0.582	55.0	0.30	54.53	21.97	0.14	0.23	0.19
15,000	0.512	50.2	0.29	46.51	17.13	0.12	0.19	0.17
25,000	0.492	48.7	0.26	44.34	15.75	0.11	0.18	0.16
50,000	0.460	48.3	0.22	40.65	14.12	0.08	0.17	0.14
100,000	0.424	44.4	0.20	36.53	11.30	0.07	0.15	0.13

G1 : R100								
Number of Cycles	MTD	BPT	DFT(20)	Sp (Km/h)	BPT (FR60)	DFT (FR60)	BPT (F60)	DFT (F60)
0	0.660	73.8	0.48	63.40	33.55	0.26	0.32	0.27
5,000	0.687	53.4	0.25	66.45	25.15	0.14	0.26	0.18
10,000	0.592	51.2	0.27	55.61	20.82	0.13	0.22	0.18
15,000	0.489	47.8	0.25	43.91	15.30	0.10	0.18	0.15
25,000	0.481	44.1	0.23	43.04	13.80	0.09	0.17	0.15
50,000	0.395	42.7	0.20	33.28	9.51	0.06	0.13	0.13
100,000	0.361	42.8	0.18	29.38	7.80	0.05	0.12	0.11

G2 : CR50:FV50								
Number of Cycles	MTD	BPT	DFT(20)	Sp (Km/h)	BPT (FR60)	DFT (FR60)	BPT (F60)	DFT (F60)
0	0.883	78.6	0.71	88.75	44.74	0.45	0.41	0.41
5,000	0.484	60.3	0.41	43.41	19.05	0.16	0.21	0.20
10,000	0.723	60.8	0.34	70.54	29.95	0.19	0.30	0.22
15,000	0.836	48.1	0.28	83.41	26.42	0.17	0.27	0.21
25,000	0.848	47.2	0.21	84.74	26.18	0.13	0.27	0.18
50,000	0.863	48.8	0.23	86.41	27.34	0.14	0.27	0.19
100,000	0.938	39.1	0.21	94.96	23.10	0.14	0.24	0.18

G2 : CV50:FR50_1								
Number of Cycles	MTD	BPT	DFT(20)	Sp (Km/h)	BPT (FR60)	DFT (FR60)	BPT (F60)	DFT (F60)
0	0.910	77.3	0.74	91.81	44.85	0.48	0.41	0.43
5,000	0.816	55.1	0.36	81.14	29.77	0.22	0.29	0.24
10,000	0.874	49.1	0.28	87.67	27.77	0.18	0.28	0.21
15,000	0.859	49.9	0.24	85.97	27.90	0.15	0.28	0.19
25,000	0.862	45.0	0.22	86.36	25.22	0.14	0.26	0.18
50,000	0.881	39.8	0.18	88.47	22.64	0.11	0.24	0.16
100,000	0.877	40.7	0.19	87.97	23.07	0.12	0.24	0.17

G2 : CV50:FR50_2								
Number of Cycles	MTD	BPT	DFT(20)	Sp (Km/h)	BPT (FR60)	DFT (FR60)	BPT (F60)	DFT (F60)
0	0.782	63.9	0.59	77.21	33.43	0.35	0.32	0.34
5,000	0.752	45.2	0.33	73.77	22.95	0.19	0.24	0.22
10,000	0.666	49.3	0.30	64.04	22.57	0.16	0.24	0.20
15,000	0.856	41.1	0.26	85.59	22.89	0.16	0.24	0.20
25,000	0.866	37.7	0.23	86.72	21.21	0.15	0.23	0.19
50,000	0.873	35.0	0.19	87.61	19.80	0.12	0.21	0.17
100,000	0.927	30.9	0.17	93.69	18.11	0.11	0.20	0.16

G2 : CR50:FR50_1								
Number of Cycles	MTD	BPT	DFT(20)	Sp (Km/h)	BPT (FR60)	DFT (FR60)	BPT (F60)	DFT (F60)
0	0.792	65.5	0.35	78.39	34.61	0.21	0.33	0.23
5,000	0.682	48.5	0.29	65.91	22.72	0.16	0.24	0.20
10,000	0.631	45.5	0.26	60.13	19.80	0.13	0.21	0.18
15,000	0.629	39.7	0.25	59.88	17.24	0.13	0.19	0.17
25,000	0.540	36.0	0.22	49.73	13.16	0.10	0.16	0.15
50,000	0.682	38.3	0.21	65.83	17.92	0.11	0.20	0.16
100,000	0.478	39.9	0.20	42.66	12.34	0.08	0.15	0.14

G2 : CR50:FR50_2								
Number of Cycles	MTD	BPT	DFT(20)	Sp (Km/h)	BPT (FR60)	DFT (FR60)	BPT (F60)	DFT (F60)
0	0.754	64.6	0.42	74.10	32.91	0.24	0.32	0.26
5,000	0.725	42.2	0.34	70.79	20.84	0.19	0.22	0.22
10,000	0.643	47.0	0.29	61.39	20.83	0.15	0.22	0.19
15,000	0.735	41.8	0.26	71.94	20.84	0.15	0.22	0.19
25,000	0.776	39.3	0.23	76.52	20.43	0.14	0.22	0.18
50,000	0.796	36.8	0.22	78.82	19.51	0.13	0.21	0.18
100,000	0.821	33.9	0.18	81.71	18.38	0.11	0.20	0.16

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์
วัน เดือน ปี เกิด	
ที่อยู่ปัจจุบัน	
ที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร 99 หมู่ 9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	นิสิตระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ประสบการณ์การทำงาน	-
ประวัติการศึกษา	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพระบางวิทยา จบการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร กำลังศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผลงานตีพิมพ์	1. บทความวิจัยเรื่อง "ค่าดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการทดสอบกาลังความแข็งแรงของวัสดุแบบต่าง ๆ" ประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24 ปี 2562 2. บทความวิจัยเรื่อง "ความต้านทานการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเดิมเป็นส่วนผสม" วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร เผยแพร่เมื่อ 18 มิถุนายน 2021 หน้า 53 - 63
รางวัลที่ได้รับ	ได้รับรางวัลรองชนะเลิศ ของการเข้าร่วมแข่งขัน APEC Innovation in Public Transport (INPUT) Competition ปี 2021 หัวข้อที่เข้าร่วมประกวด "Does Asphalt Hot-Mix Recycling Provide Enough Friction"