

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
2 ทัศนวิสัยและการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete).....	5
2.1.1 ความสัมพันธ์เชิงมวลและปริมาตรของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	6
2.2 องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต.....	7
2.2.1 ความแน่น (Density).....	7
2.2.2 ช่องว่างอากาศ (Air Voids).....	7
2.2.3 ช่องว่างระหว่างวัสดุผสมรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA).....	8
2.2.4 ปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt Content).....	8
2.3 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	9
2.4 วิธีมาร์แชล (Marshall Method).....	10
2.5 คุณสมบัติในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	10
2.5.1 เสถียรภาพ (Stability).....	10
2.5.2 ความคงทน (Durability).....	11
2.5.3 ความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำและอากาศ (Impermeability).....	11
2.5.4 ความง่ายในการปูและการบดทับ (Workability).....	11
2.5.5 ความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance).....	11
2.5.6 ความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid Resistance).....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6	วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)	13
2.6.1	วัสดุมวลรวม	14
2.6.2	วัสดุผสมแทรก (Mineral Filler)	16
2.6.3	แอสฟัลต์ (Asphalt)	17
2.6.4	วัสดุอื่น ๆ	18
2.7	การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม	18
2.7.1	ค่าเทียบเท่าทราย (Sand Equivalent)	18
2.7.2	ความสึกหรอ (Abrasion)	18
2.7.3	ขนาดผลของมวลรวม (Gradation)	19
2.7.4	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (absorption) ของมวลรวมหยาบ	19
2.7.5	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (absorption) ของมวลรวมหยาบ	19
2.7.6	ค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index)	19
2.7.7	ค่าดัชนีความยาว (Elongation Index)	20
2.7.8	ความคงทนต่อการกัดกร่อน (Soundness)	20
2.8	การทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์	20
2.8.1	การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของบิโทมินัส Penetration	20
2.8.2	การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุบิโทมินัส	20
2.8.3	ทดสอบความหนืด (Viscosity)	21
2.8.4	การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility)	21
2.8.5	การทดสอบหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดึง (Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilimeter)	21
2.9	พลาสติก (Plastics)	21
2.9.1	โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET)	21
2.9.2	โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)	22
2.9.3	โพลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC)	22
2.9.4	โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)	22
2.9.5	โพลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)	22
2.9.6	โพลีสไตรีน (Polystyrene, PS)	22
2.10	วัสดุโพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.10.1	คุณสมบัติของ PET	23
2.10.2	การประยุกต์ใช้ PET ในแอสฟัลต์คอนกรีต.....	23
2.11	การประเมินสภาพความเสียหายประเภทต่าง ๆ ของถนนลาดยาง.....	24
2.12	ร่องล้อ (Rutting).....	26
2.13	การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS)	26
2.14	การทดสอบโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus, ITMR).....	28
2.15	การทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test)	29
2.16	สมการทำนายความเสียหายเนื่องจากการล้า.....	30
2.17	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
3	วิธีดำเนินการวิจัย	33
3.1	บทนำ.....	33
3.2	วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	36
3.2.1	วัสดุผสมรวม.....	36
3.2.2	วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	37
3.2.3	วัสดุผสมเพิ่ม.....	37
3.3	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์	39
3.3.1	การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของบิทูมินัส (Penetration)	39
3.3.2	การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุบิทูเมน	40
3.3.3	ทดสอบความหนืด (Viscosity)	40
3.3.4	การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility)	40
3.3.5	การทดสอบหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดึง (Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilimeter)	41
3.4	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสมรวม	41
3.4.1	ค่าเทียบเท่าทราย (Sand Equivalent)	41
3.4.2	ความสึกหรอ (Abrasion)	41
3.4.3	ขนาดคละ ของมวลรวม (Gradation).....	41
3.4.4	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (Absorption) ของมวลรวมหยาบ.....	42
3.4.5	ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (Absorption) ของมวล รวมละเอียด	42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.6	ค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index)	43
3.4.7	ค่าดัชนีความยาว (Elongation Index)	43
3.4.8	ความคงทนต่อการกัดกร่อน (Soundness)	43
3.5	การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล	45
3.5.1	ประสิทธิภาพโดยน้ำหนักของส่วนผสม (Effective Asphalt Cement by Weight of Mix)	45
3.5.2	ค่าความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน (Bulk Specific Gravity)	45
3.5.3	หาค่าร้อยละของปริมาตรของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ	45
3.5.4	หาค่าร้อยละของปริมาตรของมวลรวม	46
3.5.5	หาค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ	46
3.5.6	หาค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม	46
3.5.7	หาค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์	46
3.6	การออกแบบและทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต	46
3.7	การทดสอบสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต	49
3.7.1	การทดสอบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล	49
3.7.2	การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS)	50
3.7.3	การทดสอบโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus, ITMR)	51
3.7.4	การทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue)	52
3.7.5	การทดสอบการเกิดร่องล้อ (Rutting Resistance)	53
3.7.6	การทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance)	54
4	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	56
4.1	บทนำ	56
4.2	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์	56
4.3	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม	58
4.4	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุขยะพลาสติก	61
4.5	ผลการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต	62
4.6	ผลการทดสอบสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต	65
4.6.1	ผลการทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS)	65
4.6.2	ผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus, ITMr)	67

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.3	ผลการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue)...	67
4.6.4	ผลสมการทำนายความเสียหายเนื่องจากการล้า.....	70
4.6.5	การทดสอบการเกิดร่องล้อ (Rutting Resistance).....	73
4.6.6	การทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance)	75
5	สรุปและวิเคราะห์ผลงานวิจัย.....	76
5.1	สรุปผลการทดสอบ	76
5.2	ข้อเสนอแนะ	76
รายการอ้างอิง		78
ภาคผนวก		
ก	การเข้าร่วมประชุมวิชาการ.....	81
ข	เอกสารวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	83
ประวัติผู้เขียน		93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต.....9
2.2	ขนาดผลของวัสดุมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ 14
2.3	ข้อกำหนดของวัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้ผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (ASHTO M29)..... 16
2.4	ขนาดผลของวัสดุผสมแทรก..... 17
2.5	ความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิด 22
2.6	ลักษณะและสาเหตุของความเสียหายประเภทต่างๆของถนนลาดยาง 25
3.1	การทดสอบ อัตราส่วนผสมและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ..... 35
3.2	แหล่งวัสดุมวลรวม 36
3.3	รายละเอียดวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย 37
3.4	ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิ, น้ำหนัก, เวลา ในการทดสอบ 40
4.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ AC 60/70 57
4.2	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมที่ใช้ออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต 59
4.3	ผลการทดสอบขนาดผลของวัสดุมวลรวม..... 60
4.4	ผลการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี XRF 61
4.5	ผลการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี LECO (ASTM D5373-16) 61
4.6	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนแบบธรรมดา (HMA) 62
4.7	ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตเปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมทางหลวง 64
4.8	สมการและค่าคงที่ของวัสดุ k และ N_f จากความสัมพันธ์ระหว่าง N_f และ μ_e ที่ปริมาณ PET ต่าง ๆ 71
4.9	เปรียบเทียบลักษณะของแอสฟัลต์คอนกรีตหลังการทดสอบการเกิดร่อนล้อ 74

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	ส่วนประกอบทั่วไปของแอสฟัลต์คอนกรีต.....5
2.2	ความสัมพันธ์เชิงมวลและปริมาตรในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต 7
2.3	คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตจากการออกแบบโดยวิธีมาร์แชล..... 13
2.4	วัสดุมวลรวมหยาบ.....15
2.5	วัสดุมวลรวมละเอียด 16
2.6	โครงสร้างโมเลกุล (Poly Ethylene Terephthalate, PET) 23
2.7	การให้น้ำหนักกระทำก่อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง..... 27
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง Load–Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ ITS แบบ Repeated Load 29
3.1	แผนผังแสดงการดำเนินการวิจัยแอสฟัลต์คอนกรีต 34
3.2	วัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย 36
3.3	แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60 70 ที่ใช้ในงานวิจัย..... 37
3.4	ขวดพลาสติก PET รอกการบดย่อยในกระบวนการรีไซเคิล 38
3.5	วัสดุเศษขยะพลาสติก PET ที่เหลือทิ้งจากขบวนการรีไซเคิล..... 38
3.6	วัสดุผสมเพิ่ม เศษพลาสติก PET 39
3.7	เครื่องทดสอบ X-ray Fluorescence Energy Dispersive Spectrometer, XRF 39
3.8	การควบคุมอุณหภูมิขณะผสมแอสฟัลต์คอนกรีต..... 47
3.9	การผสมแอสฟัลต์คอนกรีต 47
3.10	การบดอัดก้อนตัวอย่างด้วยเครื่อง Marshall Compactor Automatic 48
3.11	ก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผลิตเสร็จรอทดสอบ 48
3.12	การหาค่าคุณสมบัติต่างๆของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต..... 49
3.13	การทดสอบเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีต 50
3.14	การทดสอบแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีต 51
3.15	การทดสอบโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม..... 52
3.16	การทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม 53
3.17	ความเสียหายของก้อนตัวอย่างหลังการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม 53
3.18	การทดสอบการเกิดร่อนล้อ..... 54
3.19	ก้อนตัวอย่างหลังจากการทดสอบการเกิดร่อนล้อ..... 54
3.20	เครื่อง British pendulum tester 55

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21	การทดสอบความต้านทานการลื่นไถล..... 55
4.1	ผลการทดสอบขนาดคละของวัสดุรวม..... 60
4.2	ผลการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน (HMA) 63
4.3	ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดร้อนที่มีส่วนผสมพลาสติกผสมเพิ่ม (A-PET-HMA)..... 66
4.4	ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมพลาสติกทดแทนในมวลรวมส่วนละเอียด (R-PET-HMA)..... 66
4.5	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม 67
4.6	ผลการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ที่กำลัง 250 กิโลปาสคาล..... 68
4.7	ผลการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ที่กำลัง 300 กิโลปาสคาล..... 69
4.8	ผลการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม ที่กำลัง 350 กิโลปาสคาล..... 69
4.9	เปรียบเทียบอายุการล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยเศษขวด PET ร้อยละ 0.6 กับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ปรับปรุง ที่กำลัง 250 300 และ 350 กิโลปาสคาล 70
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Fatigue Life..... 72
4.11	ผลการทดสอบการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีต 73
4.12	ผลการทดสอบความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance)..... 75