

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 องค์ประกอบธาตุต่างๆของแอสฟัลต์	4
2.2 การจัดขนาดกละส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตระบบซูเปอร์เพฟ	9
2.3 ขนาดกละของข้อกำหนดระบบซูเปอร์เพฟที่ 37.5 มม.	9
2.4 ขนาดกละของข้อกำหนดระบบซูเปอร์เพฟที่ 25 มม.	10
2.5 ขนาดกละของข้อกำหนดระบบซูเปอร์เพฟที่ 19 มม.	10
2.6 ขนาดกละของข้อกำหนดระบบซูเปอร์เพฟที่ 12.5 มม.	11
2.7 ขนาดกละของข้อกำหนดระบบซูเปอร์เพฟที่ 9.5 มม.	11
2.8 ค่าเฉลี่ยของความเครียดสูงสุดและ E_{50} ของแอสฟัลต์ดีกคอนกรีตและโพลิเมอร์ โมดิฟายด์	12
2.9 เปรียบเทียบสมบัติแอสฟัลต์เมื่อผสมยางพาราในรูปน้ำยางข้นร้อยละ 5	19
2.10 สมบัติแอสฟัลต์ผสมยางพาราอัตราต่างๆตามมอก. 851-2532	27
2.11 เปรียบเทียบวิธีการตัดยางรถยนต์ทั้ง 2 วิธี	30
2.12 มาตรฐานของแอสฟัลต์ผสมยางรถยนต์	30
3.1 คุณสมบัติแอสฟัลต์ AC 60-70	35
3.2 ขนาดกละมวลรวมที่ทำการศึกษา	37
3.3 แสดงขนาดข้อกำหนดซูเปอร์เพฟสำหรับขนาดตะแกรง 19.0 มิลลิเมตรที่ระบุ	38
3.4 ผลการทดสอบดัชนีความยาว (Elongation Index)	39

ตาราง	หน้า
3.5 ผลการทดสอบครรชนีความแบน (Flakiness Index)	40
3.6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในการผสม Binder	43
3.7 ค่าพารามิเตอร์ในการบดอัด	50
3.8 โปรแกรมการทดสอบ	57
4.1 ผลการทดสอบ Penetration	62
4.2 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัว	64
4.3 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ	66
4.4 ผลการทดสอบยืดตัว Ductility	66
4.5 ผลการทดสอบ Indirect tensile test	97
4.6 ผลการทดสอบ Marshall test	99
4.7 ราคาวัสดุต่อต้าน	101
4.8 ผลการเปรียบเทียบด้านราคา	102

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 ภาพตัดประเภทถนนต่างๆ	3
2.2 แสดงฐานรากของชั้นทางต่างๆ (a) ถนน (b) รางรถไฟ	4
2.3 มวลรวมหลายอนุภาคยึดประสานกันด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์และช่องว่างอากาศ	5
2.4 ความสัมพันธ์ของมวลและปริมาตรของส่วนผสมประเภทแอสฟัลต์คอนกรีต	6
2.5 หลักการผลิต Emulsified Asphalts	7
2.6 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสสมมูลย์ที่ความหนาแน่น 1.90 g/cm^3	13
2.7 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสสมมูลย์ที่ความหนาแน่น 2.15 g/cm^3	13
2.8 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสสมมูลย์ที่ความหนาแน่น 2.37 g/cm^3	14
2.9 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปัวของสมมูลย์ที่ความหนาแน่น 1.90 g/cm^3	14
2.10 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปัวของสมมูลย์ที่ความหนาแน่น 2.15 g/cm^3	15
2.11 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปัวของสมมูลย์ที่ความหนาแน่น 2.37 g/cm^3	15
2.12 ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางพาราบริเวณหน้าศูนย์วิจัยยาง	18
2.13 ถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางพารา	19
2.14 ความลึกของร่องล้อของชั้นงานถนนที่ราดด้วยแอสฟัลต์ผสมยางพารา	20
2.15 ลักษณะของเครื่องผสมแอสฟัลต์กับน้ำยางพาราข้น	21
2.16 การผสมยางพารากับแอสฟัลต์	22

รูป	หน้า
2.17	ลักษณะการเกิดฟองของการผสม22
2.18	ภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่าของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสม ยางพารา23
2.19	ภาพขยาย Micro surfacing25
2.20	แสดงการผสมแบบเปียก28
2.21	แสดงการตัดที่อุณหภูมิปกติ29
2.22	แสดงการตัดที่อุณหภูมิเย็นจัด29
2.23	Nuclear magnetic resonance (NMR) ของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์32
2.24	Nuclear magnetic resonance (NMR) ของแอสฟัลต์ผสมยางพารา32
2.25	ค่าบวมตัวของแอสฟัลต์ประเภทต่างๆ33
2.26	(a) ภาพขยายของแอสฟัลต์ (b,c) ภาพขยายของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์วิธี แบบ MAPP (d) ภาพขยายของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์วิธีแบบ Wet technology34
2.27	(a) เศษยางรถยนต์ที่ยังไม่ได้รับการผสม (b) เศษยางรถยนต์ที่ได้รับการผสมแล้ว34
3.1	เศษผงยางรถยนต์36
3.2	น้ำยางพาราความเข้มข้น 60%36
3.3	แสดงการกระจายขนาดมวลรวม37
3.4	ลักษณะโมล41
3.5	การผสมแอสฟัลต์ AC 60/70 กับยางพารา42

รูป	หน้า
3.6 การผสมแอสฟัลต์ AC 60/70 กับเศษยางรถยนต์	42
3.7 เครื่องทดสอบเพรนิเทชั่น	43
3.8 เข็มมาตรฐาน	44
3.9 การทดสอบจุดอ่อนตัว	45
3.10 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ	47
3.11 เครื่องดิงชั่นทดสอบ	48
3.12 แบบหล่อทดสอบ	48
3.13 ขั้นตอนการบดอัด (ก) การผสมระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม (ข) การเทใส่ mold (ค) การบดอัด (ง) การบดอัดเสร็จสิ้น	49
3.14 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบแบบ displacement-controlled compression loading	51
3.15 รูปแบบเครื่องมือกดแบบ cyclic	51
3.16 Load cell	52
3.17 LVDT ขนาดความยาวลูกสูบ 10 มม.	52
3.18 (ก) รูปร่าง LDT (ข) ลักษณะการเชื่อมต่อภายใน LDT	53
3.19 Clip gage	53
3.20 การติดตั้งตัวอย่าง	54
3.21 ก้อนตัวอย่างที่ติด LDT และ clip gages (CG)	54
3.22 (ก) โหลดการกดแบบ Monotonic (ข) โหลดการกดแบบ Cyclic	56

รูป	หน้า
3.23 การทดสอบจาก LDT และ clip gages	59
3.24 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม KENPAVE	60
3.25 โครงสร้างชั้นทางที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้	60
4.1 เปรียบเทียบค่า Penetration ประเภทต่างๆ	63
4.2 เปรียบเทียบค่าจุดอ่อนตัวประเภทต่างๆ	65
4.3 เปรียบเทียบค่า Ductility ประเภทต่างๆ	67
4.4 ความสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมเศษ ยางรถยนต์ที่ 3%, 5 % และ 7% ที่ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	68
4.5 ความสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมยางพารา ที่ 3 %, 5 % และ 7% ที่ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	69
4.6 ค่าความเค้นสูงสุดของแอสฟัลต์ประเภทต่างๆ	70
4.7 ค่าความเค้นสูงสุดของแอสฟัลต์ประเภทต่างๆ	70
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่เปอร์เซ็นต์ การผสม 3 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	72
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่เปอร์เซ็นต์ การผสม 5 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	72
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่เปอร์เซ็นต์ การผสม 7 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	73

รูป	หน้า
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ ที่เปอร์เซ็นต์การผสม 5 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	73
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ ที่เปอร์เซ็นต์การผสม 7 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	74
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ ที่เปอร์เซ็นต์การผสม 9 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	74
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ เปอร์เซ็นต์การผสม 3 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	75
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ เปอร์เซ็นต์การผสม 5 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	75
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ เปอร์เซ็นต์การผสม 7 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	76
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ ที่เปอร์เซ็นต์การผสม 5 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	76
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ ที่เปอร์เซ็นต์การผสม 7 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	77
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ ที่เปอร์เซ็นต์การผสม 9 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	77

รูป		หน้า
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ใช้นิยามค่าโมดูลัสอีลาสติคสมมูลย์	78
4.21	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ใช้นิยามค่าโมดูลัสอีลาสติคสมมูลย์ ที่ได้จากช่วงถอดแรงกระทำรอบที่ 6-10 ของการให้แรงกระทำแบบ CL	79
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวตั้งและแนวนอนที่ใช้นิยามอัตราส่วนปัวซอง	79
4.23	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวนอนและแนวตั้งที่ใช้นิยามอัตราส่วน ปัวซองที่ได้จากช่วงถอดแรงกระทำรอบที่ 6-10 ของการให้แรงกระทำแบบ CL	80
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติคสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษ ยางรถยนต์ 5 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	80
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติคสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษ ยางรถยนต์ 7 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	81
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติคสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษ ยางรถยนต์ 9 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	81
4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม เศษยางรถยนต์ 5 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	82
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม เศษยางรถยนต์ 7 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	82
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม เศษยางรถยนต์ 9 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	83

รูป	หน้า
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติคสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม เศษยางรถยนต์ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	83
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม เศษยางรถยนต์ที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	84
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติคสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม ยางพารา 3 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	85
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติคสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม ยางพารา 5 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	85
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติคสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม ยางพารา 7 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	86
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม ยางพารา 3 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	86
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม ยางพารา 5 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	87
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม ยางพารา 7 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	87
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติคสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม ยางพาราที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	88

รูป		หน้า
4.39	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองของสมมุทธ์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสม ยางพาราที่ทำการบดอัดในแนวตั้งและมีความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	88
4.40	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติคสมมุทธ์และความเค้นแนวตั้งสำหรับแอสฟัลต์ผสม ยางพาราและแอสฟัลต์ผสมยางรถยนต์ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	89
4.41	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองของสมมุทธ์และความเค้นแนวตั้งสำหรับแอสฟัลต์ผสม ยางพาราและแอสฟัลต์ผสมยางรถยนต์ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	90
4.42	ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติคสมมุทธ์และความเค้นแนวตั้งสำหรับแอสฟัลต์ผสม ยางพารา,แอสฟัลต์ผสมยางรถยนต์,แอสฟัลต์คอนกรีตและ โมลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ที่ ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	92
4.43	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองของสมมุทธ์และความเค้นแนวตั้งสำหรับแอสฟัลต์ผสม ยางพารา,แอสฟัลต์ผสมยางรถยนต์,แอสฟัลต์คอนกรีตและ โมลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ที่ ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร	93
4.44	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	94
4.45	ค่า E_{eq} หรือ E_v ที่เปรียบเทียบกัน	95
4.46	ค่า E_{eq} ที่เปรียบเทียบกับค่า Resilient Modulus	95
4.47	ค่า v_{eq} หรือ v_v ที่เปรียบเทียบกัน	96
4.48	ค่า Indirect tensile strength ที่เปรียบเทียบกัน	98
4.49	ผลการทดสอบ Marshall Stability	100

รูป	หน้า
4.50 ผลการทดสอบ Marshall Flow	100
4.51 ลักษณะถนนที่ทำการเปรียบเทียบ	101
4.52 ลักษณะถนนและโหลดที่กระทำต่อถนน	103
4.53 ผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Kenpave โดยใช้สูตรของ Asphalt Institute (9th edition)	103
(ก) ผลการวิเคราะห์ชั้น Subgrade (ข) ผลการวิเคราะห์ชั้น Asphalt	
4.51 ผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Kenpave โดยใช้สูตรของกรมทางหลวง (ก) ผลการวิเคราะห์ชั้น Subgrade (ข) ผลการวิเคราะห์ชั้น Asphalt	104

รายการสัญลักษณ์

AASHTO	=	The American Association of State Highway and Transportation Officials
AV	=	ช่องว่าง
ASTM	=	American society for testing and materials
NRA	=	แอสฟัลต์คอนกรีตผสมยางพารา
CRA	=	แอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์
PMA	=	โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์
HMA	=	แอสฟัลต์คอนกรีต
AC 60/70	=	แอสฟัลต์ชนิด 60 – 70
E_v	=	โมดูลัสอีลาสติกในแนวตั้ง
E_h	=	โมดูลัสอีลาสติกในแนวนอน
V_{vh}	=	อัตราส่วนปัวของสำหรับความเครียดในแนวนอนเนื่องจากความเครียดในแนวตั้ง
V_{hv}	=	อัตราส่วนปัวของสำหรับความเครียดในแนวตั้งเนื่องจากความเครียดในแนวนอน
$V_{vh,eq}$	=	อัตราส่วนปัวของสมมูลสำหรับความเครียดในแนวนอนเนื่องจากความเครียดในแนวตั้ง
$E_{v,eq}$	=	โมดูลัสอีลาสติกสมมูลในแนวตั้ง

M	=	มวลทั้งหมด
M_G	=	มวลของมวลรวม
M_B	=	มวลของแอสฟัลต์
M_{BE}	=	มวลของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ
M_{BA}	=	มวลของแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึม
V	=	ปริมาตรทั้งหมดของส่วนผสมที่บดอัดแล้ว
V_G	=	ปริมาตรของมวลรวม
V_{BE}	=	ปริมาตรแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ
V_{BA}	=	ปริมาตรแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึม
V_B	=	ปริมาตรแอสฟัลต์ในส่วนผสม
V_A	=	ปริมาตรของอากาศที่อยู่ระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์
V_{GE}	=	ปริมาตรประสิทธิภาพของมวลรวม
V_{MM}	=	ปริมาตรของส่วนผสมที่ปราศจากช่องว่างอากาศ
LDT	=	Local deformation transducers
LVDT	=	Linear variable displacement transducer
CG	=	clip gage transducers
σ_v	=	ความเค้นแนวตั้ง
σ_h	=	ความเค้นแนวนอน
ε_v	=	ความเครียดแนวตั้ง

ε_h = ความเครียดแนวนอน

CL = การให้โหลดแบบกระทำซ้ำ

SL = การให้โหลดแบบคงแรงกระทำ