4

การศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้สารผสมช่วยการเกาะยึดผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์

นาย ชวลิต สหธรรมปกรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2532

ISBN 974-576-544-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

015311

I 10302153

COMPARATIVE STUDY OF THE EFFECT OF USING ADHESION PROMOTING AGENT ON THE ADHESIVE PROPERTY OF ASPHALT CEMENT

Mr. Chawalit Sahathampakorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1989

ISBN 974-576-544-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้สารผสมช่วยการเกาะยึดผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์
โดย	นาย ชวลิต สหธรรมปกรณ์
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

---------- คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---------- ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ศุกรี กัมปนานนท์)

---------- กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ อนุกัลย์ อิศรเสนา ณ อยุธยา)

---------- กรรมการ

(ดร. ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์)

---------- กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชวลิต สหธรรมปกรณ์ : การศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้สารผสมช่วยการเกาะยึดผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (COMPARATIVE STUDY OF THE EFFECT OF USING ADHESION PROMOTING AGENT ON THE ADHESIVE PROPERTY OF ASPHALT CEMENT) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ , 226 หน้า .

การวิจัยมุ่งเน้นเฉพาะการใช้สารผสมในรูปสารเคมีที่ผสมในแอสฟัลต์เมนต์ 80-100 โดยตรง สารเคมีที่เลือกศึกษา 2 ชนิด ใช้ยี่ห้อทางการค้าว่า Welfix C และ Nostrip ซึ่งเคยใช้ในงานผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนต์ อีก 2 ชนิดใช้ยี่ห้อทางการค้าว่า CAVCO MOD CPGและ FPGทดลองนำมาใช้เป็นสารผสม โดยศึกษาเปรียบเทียบเฉพาะคุณสมบัติทางกายภาพในห้องทดลองเท่านั้น ได้แก่ ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ศึกษาผลของการเกาะยึดและการหลุดลอกในงานผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนต์ และศึกษาผลของความแข็งแรงทางกลในงานผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ผลการวิจัยพบว่า สารผสมทำให้ค่า Penetration, Ductility ของแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้นและค่าความหนืดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ลดลง

ในงานผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนต์ เมื่อใช้ปริมาณสารผสม Wetfix Cหรือ Nostrip ประมาณร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ หรือใช้ปริมาณสารผสม CAVCO MOD CPG หรือ FPG ประมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ ช่วยลดการหลุดลอกให้น้อยกว่า 20%

ในงานแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อใช้ปริมาณสารผสม Wetfix C หรือ Nostrip ประมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแอสฟัลต์ หรือใช้ปริมาณสารผสม CAVCO MOD FPG ประมาณร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนักแอสฟัลต์ ช่วยเพิ่มค่าดัชนีความแข็งแรงที่เปรียบเทียบระหว่างค่าเสถียรภาพของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตสภาพอิ่มตัวกับสภาพแห้ง ซึ่งทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ได้ค่าสูงกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มค่าอัตราส่วนแรงดึงที่เปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดึงของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตสภาพอิ่มตัวกับสภาพแห้ง ซึ่งทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ได้ค่าสูงกว่า 0.70 แต่ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สารผสม CAVCO MOD CPG มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่ำกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ และค่าอัตราส่วนแรงดึงต่ำกว่า 0.70

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2531 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

CHAWALIT SAHATHAMPAKORN : COMPARATIVE STUDY OF THE EFFECT OF USING ADHESION PROMOTING AGENT ON THE ADHESIVE PROPERTY OF ASPHALT CEMENT. THESIS ADVISOR : PROF. DIREK LAWANSIRI, Ph.D. 226 pp.

This study concentrates on the using of chemical additives added directly to asphalt cement 80 - 100 penetration. Two kinds of chemical additives to be tested are known under the commercial names Wetfix C and Nostrip , they have been used in surface treatment. The other two are CAVCO MOD CPG and FPG, they have never been used in bitumen surface pavement. Tests were conducted by comparing only their physical properties in the laboratory. The procedures are to determine the changing of asphalt properties, the effect of adhesion and stripping in surface treatment and mechanical strength in asphalt concrete.

The test results indicated that the additives increased the penetration, the ductility and decrease the viscosity of asphalt cement.

For surface treatment when Wetfix C or Nostrip was used at the quantity of 0.3% by weight of asphalt cement or CAVCO MOD CPG or FPG at the quantity of 1.5% by weight of asphalt cement, stripping decreased to less than 20%

For asphalt concrete when Wetfix C or Nostrip was used at the quantity of 0.5% by weight of asphalt cement or CAVCO MOD FPG at the quantity of 1.2% by weight of asphalt cement to increase the strength index which was used in comparing stability of soaked and dry specimens at testing temperature25°C increased by more than 75% and tensile strength ratio which was used in comparing tensile strength of soaked and dry specimens at testing temperature 25°C increased by more than 0.70 but CAVCO MOD CPG was ineffective increasing the strengths.

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา .....

ปีการศึกษา 2531 ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ เพราะได้รับการสนับสนุน การให้ความรู้และข้อเสนอแนะจากอาจารย์และบุคคลที่เกี่ยวข้อง ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับ

ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ ที่กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ โดยให้คำปรึกษาแนะนำ ติดตาม พร้อมทั้งตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ดร.ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ วิศวกรโยธา 8 กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวง ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และเสนอแนะหัวข้อวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

รองศาสตราจารย์ อนุกัลย์ อิศรเสนา ณ อยุธยา ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ และอำนวยความสะดวก จัดหาเครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ต้องการในการทดลองวิจัย

รองศาสตราจารย์ ศุกรี กัมปนานนท์ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

รองศาสตราจารย์ วรุณ คุณาสี หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่กรุณาอนุมัติให้ใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ การทดลองของภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คุณ จำรัส พรหมไชยวงศ์ บริษัท Siam Qualified Produces Ltd. Part. ที่กรุณาเอื้อเฟื้อ คำแนะนำ และมอบตัวอย่างสารผสม Wetfix C ให้ใช้ในการทดลองวิจัย

คุณสมพงษ์ ดาวพิเศษ บริษัท กลุ่มฮาโก้ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อมอบตัวอย่างสารผสม CAVCO MOD CPG และ FPG ให้ใช้ในการทดลองวิจัย

คุณ เมฆศิริ สอ้านวงศ์ บริษัท ยูเนียนแอ็สโซซิเอทส์ จำกัด ที่กรุณาเอื้อเฟื้อมอบตัวอย่างสารผสม Nostrip ให้ใช้ในการทดลองวิจัย

เจ้าหน้าที่ห้องทดลองภาควิชาวิศวกรรมโยธา ทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือแนะนำการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ การทดลองในห้องปฏิบัติการของภาควิชา

เจ้าหน้าที่ศูนย์หนังสือเอเชีย กรมทางหลวง เอไอที ที่ได้อำนวยความสะดวกในการจัดยืมเอกสารวิชาการ

ผู้บังคับบัญชาทุกระดับ ที่ได้สนับสนุนและอนุมัติให้ลาศึกษาต่อ

ระลึกถึงพระคุณ บิดา มารดา เป็นอย่างยิ่งที่ได้ช่วยเหลือ อบรม ส่งเสริม เลี้ยงดูให้ได้รับการศึกษาที่ดี

และขออุทิศ แด่ นาย เชย สหธรรมปกรณ์ บิดาของผู้เขียนที่ได้ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการศึกษาวิจัยวิทยานิพนธ์ จนใกล้จะเสร็จสมบูรณ์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ต

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 คำนำ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย 4

1.5 ความสำคัญหรือผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 7

2. ทฤษฎีการเกาะยึด การหลุดลอก และการใช้สารผสม 8

2.1 ตัวแปรเทอร์โมไดนามิก 8

2.1.1 พลังงานอิสระที่ผิว 9

2.1.2 การเปียกหรือการแผ่กระจาย 10

2.1.3 งานของแรงยึดเหนี่ยว 12

2.1.4 พลังงานของการจมตัว หรือแรงดึงเกาะยึด 13

2.1.5 สัมประสิทธิ์การแผ่กระจายตัว 13

2.1.6 ผลของชั้นดูดซึม 13

2.1.7 หน้าที่ของรูพรุน และรอยแตกในมวลรวม 14

2.1.8 ผลของความหยาบของผิวมวลรวม 16

2.1.9 พลังงานการหลุดลอก 16

2.1.10 พฤติกรรมการบุ้มและการพองตัว 19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.11 ผลของอุณหภูมิ 19

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการเกาะยึดของส่วนผสม 19

2.2.1 คุณสมบัติของแอลฟัลต์ 20

2.2.2 คุณสมบัติของมวลรวม 24

2.2.3 คุณสมบัติของน้ำ 28

2.3 กลวิธีในการเกาะยึด 28

2.3.1 ทฤษฎีทางกล 28

2.3.2 ทฤษฎีการจัดเรียงตัวของโมเลกุล 29

2.3.3 ทฤษฎีปฏิกิริยาทางเคมี 29

2.3.4 ทฤษฎีพลังงานระหว่างผิว 31

2.4 การชำรุดของแรงยึดเกาะในส่วนผสม 31

2.4.1 การชำรุดที่แรงยึดเหนี่ยว 31

2.4.2 การชำรุดที่การเกาะยึด 33

2.5 กลวิธีในการหลุดลอก 33

2.5.1 ทฤษฎีการแทนที่ 33

2.5.2 ทฤษฎีการถอดถอน 34

2.5.3 ทฤษฎีการฉีกขาดของฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบ 34

2.5.4 ทฤษฎีความดันโพรง 34

2.6 สารผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ 36

2.6.1 คำจำกัดความ 36

2.6.2 การแก้ไขปัญหาหลักของผิวทางแอลฟัลต์ด้วยสารผสม ... 36

2.6.3 ประเภทของสารผสมที่ใช้แก้ไขปัญหา 39

2.6.4 สารผสมช่วยการเกาะยึด หรือสารผสมปรับปรุง
การเกาะยึด หรือสารต้านการหลุดลอก 39

2.6.5 ชนิดของสารผสมช่วยการเกาะยึด 41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3. ทบทวนงานวิจัยในอดีต 44

3.1 การวิจัยหาตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกในการเกาะยึด 44

3.1.1 การหามุมสัมผัส 44

3.1.2 การหาแรงตึงผิว 45

3.1.3 การหาพลังงานอิสระระหว่างผิว หรือแรงดึงระหว่างผิว . 49

3.1.4 การหาความหยาบของผิว 55

3.1.5 การหาพื้นที่ผิว 55

3.2 การพัฒนาการทดลองการเกาะยึดและการหลุดลอก 56

3.2.1 การประเมินเปอร์เซนต์การเคลือบด้วยตา 57

3.2.2 การประเมินเปอร์เซนต์การเคลือบด้วยเครื่องมือ 57

3.2.3 การทดลองแบบไม่ทำลาย 61

3.2.4 การทดลองแบบจำลองสภาพการจราจร 61

3.2.5 การทดลองทางกลของตัวอย่างที่แช่น้ำ 61

3.3 การทำนายการทำลายของน้ำต่อแอลฟัลต์คอนกรีต 79

3.4 ผลของสารผสมต้านการหลุดลอกต่อคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ 86

3.4.1 ผลต่อประสิทธิภาพในการเคลือบ 87

3.4.2 ผลต่อส่วนประกอบของแอสฟัลต์ 87

3.4.3 ผลต่อความข้นเหลว 87

3.4.4 ผลต่อความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ 90

3.4.5 ผลต่อการแข็งตัว 90

3.5 ผลของสารผสมต้านการหลุดลอกในแอสฟัลต์คอนกรีต 90

4. วิธีดำเนินการทดลอง 95

4.1 มวลรวม 95

4.1.1 ทดลองร่อนตะแกรงหาขนาดคละ 95

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	4.1.2 ทดลองหาค่าดรรชนีความแบน	96
	4.1.3 ทดลองหาค่าดรรชนีความยาว	96
	4.1.4 ทดลองหาความถ่วงจำเพาะและอัตราการดูดซึม	97
	4.1.5 ทดลองหาค่าการสึกหรอของมวลรวมหยาบ	98
	4.1.6 ทดลองหาค่า Soundness	98
	4.1.7 ทดลองหาค่า Sand Equivalent	98
4.2	สารผสมช่วยการเกาะยึดหรือต้านการหลุดลอก	99
4.3	แอสฟัลต์	100
	4.3.1 ทดลองหาค่าการจมตัวของเข็มมาตราฐาน	100
	4.3.2 ทดลองหาค่าการดึงยืดเป็นเส้น	101
	4.3.3 ทดลองหาจุดอ่อนตัวของแอสฟัลต์	101
	4.3.4 ทดลองหาความหนืดแอสฟัลต์แบบคิเนมาติก	102
	4.3.5 ผลของความร้อนและอากาศ ต่อวัสดุแอสฟัลต์โดย Thin Film Oven Test (TFOT)	102
	4.3.6 ทดลองหาจุดวาบไฟ	103
	4.3.7 ทดลองการละลายของแอสฟัลต์ในไตรคลอโรเอทธีลีน ..	103
	4.3.8 ทดลองหาความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์	104
4.4	ทดลองส่วนผสมแอสฟัลต์ และมวลรวม โดยการประเมินด้วยตา	104
	4.4.1 ทดลองการหลุดลอกโดย Plate Test	104
	4.4.2 ทดลองการหลุดลอกโดย Tray Test	105
	4.4.3 ทดลองการเคลือบและการหลุดลอกของส่วนผสมแอสฟัลต์ มวลรวม	105
	4.4.4 ทดลองผลของน้ำต่อส่วนผสมแอสฟัลต์ มวลรวม โดยใช้การต้มในน้ำเดือด	106

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 ทดลองส่วนผสมแอสฟัลต์ มวลรวม โดยการประเมินความแข็งแรงทางกล 106
4.5.1 การออกแบบส่วนผสมร้อน หรือแอสฟัลต์คอนกรีต 108
4.5.2 การเตรียมตัวอย่าง ทดลองหาค่าดัชนีความแข็งแรงและอัตราส่วนแรงดึง 117
4.5.3 ทดลองหาค่าดัชนีความแข็งแรง และอัตราส่วนแรงดึง ... 118
4.5.4 ทดลองหาผลของระยะเวลาบ่มตัว โดยการทดลองหาค่าแรงดึงทางอ้อม 121
4.5.5 ทดลองหาผลของความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ โดยการทดลองหาค่าแรงดึงทางอ้อม 121

5. ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล 122
5.1 ผลการทดลอง 122
5.1.1 ผลการทดลองคุณสมบัติมวลรวม 122
5.1.2 ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต 122
5.1.3 ผลการทดลองคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ และเมื่อใส่สารผสมช่วยการเกาะยึด 129
5.1.4 ผลการทดลองการเคลือบ และการหลุดลอก 138
5.1.5 ผลการเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์ติกคอนกรีต 140
5.1.6 ผลการทดลองหาค่าเสถียรภาพ ค่าการไหลตัว และค่าดัชนีความแข็งแรง 144
5.1.7 ผลการทดลองหาค่าแรงดึงทางอ้อม และอัตราส่วนแรงดึง 150
5.1.8 ผลการประมาณพื้นที่การหลุดลอก 150

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.9 ผลการทดลองค่าแรงดึง และอัตราส่วนแรงดึง ต่อระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง 150

5.1.10 ผลการทดลองหาค่าแรงดึงทางอ้อม ที่อุณหภูมิ 15, 25, 40, 60 °C 155

5.2 การวิเคราะห์ผล 155

5.2.1 ความสัมพันธ์ของค่าความข้นเหลว ของแอลฟัลต์กับเปอร์เซนต์สารผสม 155

5.2.2 ความสัมพันธ์ของค่าความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ ของแอสฟัลต์กับเปอร์เซนต์สารผสม 158

5.2.3 ความสัมพันธ์ของการแข็งตัว ของแอสฟัลต์กับเปอร์เซนต์สารผสม 158

5.2.4 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติแอสฟัลต์ด้านอื่น ๆ กับเปอร์เซนต์สารผสม 163

5.2.5 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซนต์การหลุดลอก กับเปอร์เซนต์สารผสม 163

5.2.6 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซนต์การเคลือบ กับเปอร์เซนต์สารผสม 166

5.2.7 ความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่น ของตัวอย่างกับเปอร์เซนต์สารผสม 169

5.2.8 ความสัมพันธ์ของค่าเปอร์เซนต์การอิ่มตัว ของตัวอย่างกับเปอร์เซนต์สารผสม 169

5.2.9 ความสัมพันธ์ของค่าเสถียรภาพ ของตัวอย่างสภาพแห้งกับเปอร์เซนต์สารผสม 172

5.2.10 ความสัมพันธ์ของค่าเสถียรภาพ ของตัวอย่างสภาพอิ่มตัวกับเปอร์เซนต์สารผสม 172

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.11 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีความแข็งแรง กับเปอร์เซนต์สารผสม 172
5.2.12 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงทางอ้อม ของตัวอย่างสภาพแห้ง กับเปอร์เซนต์สารผสม 176
5.2.13 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงทางอ้อม ของตัวอย่างสภาพอิ่มตัว กับเปอร์เซนต์สารผสม 176
5.2.14 ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนแรงดึง กับเปอร์เซนต์สารผสม 176
5.2.15 ความสัมพันธ์ของค่าเสถียรภาพ กับค่าแรงดึงทางอ้อม ... 180
5.2.16 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีความแข็งแรง กับค่าอัตราส่วนแรงดึง 180
5.2.17 การเปลี่ยนแปลงการเกาะยึด และการเปลี่ยนแปลงแรงยึดเหนี่ยว 183
5.2.18 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึง และอัตราส่วนแรงดึงกับผลของระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง 183
5.2.19 ความสัมพันธ์ของแรงดึง กับอุณหภูมิการทดลอง 183

6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 189
6.1 สรุปผลการทดลอง 189
6.2 ข้อเสนอแนะ 195

เอกสารอ้างอิง 197

ภาคผนวก ส่วนประกอบและหน้าที่ สารผสมต้านการหลุดลอกบางชนิด 211

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ก. Cationic Surfactants 212

ข. Fatty Amines 214

ค. Amidoamines and Imidazolines 220

ง. Emulsifying Agents 222

จ. การใช้สารผสมต้านการหลุดลอก 223

ประวัติผู้เขียน 226

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การแบ่งประเภทมวลรวมตามปริมาณ SiO_2 27

2.2 เปอร์เซนต์เฉลี่ยส่วนประกอบเนื้อแร่ของมวลรวม 27

2.3 ปัญหาหลักของผิวทางแอสฟัลต์ กับทางเลือกในการใช้สารผสม 38

2.4 สารผสมต้านการหลุดลอกที่ใช้ในส่วนผสมแอสฟัลต์ 42

3.1 แรงตึงผิวของแอสฟัลต์ 51

3.2 ข้อมูลของโปรแกรม ACMODAS 85

4.1 ข้อกำหนดขนาดคละแบบแน่น 110

4.2 เกณฑ์การออกแบบส่วนผสมร้อนโดยวิธีมาร์แชล 110

4.3 ตัวประกอบปรับแก้ค่าเสถียรภาพ 114

5.1 ผลการทดลองคุณสมบัติมวลรวมแหล่ง ชบ-1 123

5.2 ผลการทดลองคุณสมบัติมวลรวมแหล่ง ชบ-2 124

5.3 ผลการจัดขนาดคละแบบแน่นมวลรวมแหล่ง ชบ-1 125

5.4 ผลการจัดขนาดคละแบบแน่นมวลรวมแหล่ง ชบ-2 127

5.5 ผลการออกแบบส่วนผสมร้อนโดยวิธีมาร์แชลมวลรวม ชบ-1 130

5.6 ผลการออกแบบส่วนผสมร้อนโดยวิธีมาร์แชลมวลรวม ชบ-2 133

5.7 ผลการทดลองคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ และเมื่อใส่สารผสม 137

5.8 ผลทดลองการหลุดลอกโดยวิธี Plate Test 139

5.9 ผลทดลองการหลุดลอกโดยวิธี Tray Test 139

5.10 ผลทดลองการเคลือบและการหลุดลอก ASTM D - 1664 141

5.11 ผลทดลองการเคลือบและการหลุดลอก ASTM D - 3625 142

5.12 ผลการเตรียมตัวอย่างส่วนผสมร้อน มวลรวม ชบ-1 145

5.13 ผลการเตรียมตัวอย่างส่วนผสมร้อน มวลรวม ชบ-2 146

5.14 ผลการทดลองหาค่าเสถียรภาพ การไหลตัว และดัชนีความแข็งแรง
มวลรวม ชบ-1 148

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

5.15 ผลการทดลองหาค่าเสถียรภาพ การไหลตัว และดัชนีความแข็งแรง มวลรวม ชบ-2 149

5.16 ผลการทดลองหาค่าแรงดึงทางอ้อม และอัตราส่วนแรงดึง มวลรวมแหล่ง ชบ-1 151

5.17 ผลการทดลองหาค่าแรงดึงทางอ้อม และอัตราส่วนแรงดึง มวลรวมแหล่ง ชบ-2 152

5.18 การคำนวณหาผลการเปลี่ยนแปลงการเกาะยึดและการเปลี่ยนแปลงแรงยึดเหนี่ยว มวลรวม ชบ-1 153

5.19 การคำนวนหาผลการเปลี่ยนแปลงการเกาะยึดและการเปลี่ยนแปลงแรงยึดเหนี่ยว มวลรวม ชบ-2 154

5.20 ผลการทดลองหาค่าแรงดึงทางอ้อม และค่าอัตราส่วนแรงดึงที่บ่มตัว 156

5.21 ผลการทดลองหาค่าแรงดึงทางอ้อม ที่อุณหภูมิ 15, 25, 40, 60 °C 157

5.22 ความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ กับเปอร์เซนต์สารผสม 162

ข.1 ปริมาณการใช้อะมีนเป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนักแอสฟัลต์ 219

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แผนผังวิธีดำเนินการทดลอง	5
2.1	แผนผังแสดงส่วนระหว่างผิวระบบ อากาศ - ของเหลว - ของแข็ง	11
2.2	แผนผังแสดงส่วนระหว่างผิวสมดุลย์ ก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงพื้นที่สัมผัสเล็กน้อย	11
2.3	การหลุดลอก	17
2.4	รูปแบบการพองตัวของแอสฟัลต์	17
2.5	รูปแบบการเกิดรอยบุ๋มบนผิวแอสฟัลต์	17
2.6	กระบวนการหลุดลอก	18
2.7	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ผิว และภายในของเหลว	21
2.8	ความสามารถในการเปียก หรือการแผ่กระจายของของเหลวบนผิวของแข็ง ...	21
2.9	ผลของความหนืดของแอสฟัลต์ ต่อความสามารถในการแผ่กระจาย	23
2.10	เมื่อมีความชื้นบนผิวมวลรวม Siliceous	26
2.11	เมื่อมีความชื้นบนผิวมวลรวม Calcareous	26
2.12	การแบ่งมวลรวมตามปริมาณ Silica (SiO_2)	26
2.13	ขั้วประจุโมเลกุลของน้ำ	27
2.14	ส่วนประกอบทางเคมีของแอสฟัลต์กับการเกาะติดมวลรวม Basic ในสภาพแห้ง	30
2.15	ส่วนประกอบทางเคมีของแอสฟัลต์กับการเกาะติดกับมวลรวม Basic ในสภาพชื้น	30
2.16	การดูดซึมขั้วประจุโมเลกุลของแอสฟัลต์กับมวลรวม	32
2.17	การหลุดลอกของแอสฟัลต์ แบบม้วนกลับ (Roll Back)	32
2.18	การหลุดลอกของแอสฟัลต์ แบบยกขึ้น (Lift Off)	32
2.19	การร่นตัวของจุดสัมผัส แอสฟัลต์-มวลรวม เมื่อมีน้ำมากระทำ	35
2.20	การเกิดความดันโพรงในส่วนผสม	35
2.21	การเกิด Active Adhesion	43
3.1	การคำนวณมุมสัมผัสจากขนาดหยดน้ำ	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.2	การหาขนาดมุมสัมผัสโดยแผ่นเอียง	47
3.3	Du Nouy Tensiometer (Ring Method)	47
3.4	การหาแรงตึงผิวโดย Pendant Drop Method	47
3.5	เครื่องมือหาแรงดึงระหว่างผิว	51
3.6	เครื่องมือหาแรงดึงเกาะยึด	54
3.7	ชนิดการดึงชั้นเกาะติดโดยวิธี Peel Test	54
3.8	รายละเอียดจุดดึงของการทดลอง Peel Test	54
3.9	เปรียบเทียบพื้นที่ผิวมวลรวม กับปริมาณการดูดซึมแอสฟัลต์	59
3.10	พื้นที่ผิวมวลรวมหินปูน กับความต้านแก๊ส	59
3.11	เครื่องมือ Surface Reaction Test	60
3.12	กราฟความต้านแก๊สกับเวลา	60
3.13	การทดลอง Double Punch	63
3.14	ชุดเครื่องมือให้ความเค้นและการอิ่มตัว	63
3.15	ผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่าแรงดึง	65
3.16	ผลของเปอร์เซนต์การอิ่มตัวต่อค่าแรงดึง	65
3.17	การทดลองหาแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tesile Test)	67
3.18	ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงสูงสุด กับเปอร์เซนต์ช่องว่างอากาศ	69
3.19	ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนแรงดึง กับเปอร์เซนต์ช่องว่างอากาศ	70
3.20	เครื่องมือทดลองแรงดึงทางอ้อม ที่บันทึกการเปลี่ยนรูปร่างในแนวดิ่ง แนวนอน อัตโนมัติ	72
3.21	การหาค่า E-Modulus จากการทดลอง	72
3.22	ความสัมพันธ์ของค่า Tensile Modulus กับ TSR	74
3.23	ความสัมพันธ์ของค่ากำลังต้านทานแรงดึง กับความล้า	76
3.24	การคำนวณความเค้นล้า	76
3.25	ความสัมพันธ์ของปริมาณช่องว่างอากาศ กับความเค้นล้า	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.26	ความสัมพันธ์ของความเค้นกด กับความล้า	78
3.27	การคาดการณ์อายุของทางที่ออกแบบไว้ 10, 15, 20 ปี	81
3.28	การคำนวณอายุของทาง	85
3.29	เปอร์เซนต์น้ำหนักที่หายไปหลังการทดลอง TFOT	88
3.30	ความหนืดที่ 60 °C ก่อนและหลังการทดลอง TFOT	88
3.31	ค่า Penetration ก่อนและหลังการทดลอง TFOT	89
3.32	ผลของความดันช่องว่างอากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ	92
4.1	ค่าเปอร์เซนต์ VMA	112
4.2	กราฟ Fuller Maximum Density Curve	112
4.3	การดูดอากาศควบคุมการอิ่มตัวของตัวอย่าง	119
4.4	การทดลองหาค่าแรงดึงทางอ้อม	119
5.1	ผลการจัดขนาดคละแบบแน่น (Dense Graded) มวลรวมแหล่ง ชบ-1	126
5.2	ผลการจัดขนาดคละแบบแน่น (Dense Graded) มวลรวมแหล่ง ชบ-2	128
5.3	การออกแบบเปอร์เซนต์แอสฟัลต์มวลรวมแหล่ง ชบ-1	132
5.4	การออกแบบเปอร์เซนต์แอสฟัลต์มวลรวมแหล่ง ชบ-2	135
5.5	การหาจำนวนครั้งในการบดอัด เพื่อควบคุมปริมาณช่องว่างอากาศที่ 7 %	143
5.6	การหาระยะเวลาในการดูดอากาศ เพื่อควบคุมการอิ่มตัวที่ 55 - 80 %	147
5.7	ความสัมพันธ์ของค่า Penetration กับเปอร์เซนต์สารผสม	159
5.8	ความสัมพันธ์ของค่า Viscosity กับเปอร์เซนต์สารผสม	160
5.9	ความสัมพันธ์ของค่า Ductility กับเปอร์เซนต์สารผสม	161
5.10	ความสัมพันธ์ของเปอร์เซนต์การหลุดลอกที่ระยะเวลาการบ่มตัว 1, 14, 30 วัน กับเปอร์เซนต์สารผสม ทดลองตามวิธี Plate Test (Passive Adhesion)	164
5.11	ความสัมพันธ์ของเปอร์เซนต์การหลุดลอกกับเปอร์เซนต์สารผสมที่ทดลองโดย Tray Test (Active Adhesion)	165

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.12 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซนต์การเคลือบ กับเปอร์เซนต์สารผสมที่ทดลองโดยการแช่ในน้ำนึ่ง 167

5.13 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซนต์การเคลือบ กับเปอร์เซนต์สารผสมที่ทดลองโดยการต้มในน้ำเดือด 168

5.14 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับเปอร์เซนต์สารผสม 170

5.15 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซนต์การอิ่มตัว ของตัวอย่างกับเปอร์เซนต์สารผสม ... 171

5.16 ความสัมพันธ์ของค่าเสถียรภาพ ตัวอย่างสภาพแห้งกับเปอร์เซนต์สารผสม 173

5.17 ความสัมพันธ์ของค่าเสถียรภาพ ตัวอย่างสภาพอิ่มตัวกับเปอร์เซนต์สารผสม 174

5.18 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีความแข็งแรงกับเปอร์เซนต์สารผสม 175

5.19 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงทางอ้อม ตัวอย่างสภาพแห้งกับเปอร์เซนต์สารผสม .. 177

5.20 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงทางอ้อม ตัวอย่างสภาพอิ่มตัวกับเปอร์เซนต์สารผสม 178

5.21 ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนแรงดึงกับเปอร์เซนต์สารผสม 179

5.22 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงทางอ้อม กับค่าเสถียรภาพมาร์แชล 181

5.23 ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีความแข็งแรง กับอัตราส่วนแรงดึง 182

5.24 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงทางอ้อม ตัวอย่างสภาพแห้ง กับระยะเวลาการบ่มตัว 184

5.25 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงทางอ้อม ตัวอย่างสภาพอิ่มตัว กับระยะเวลาการบ่มตัว 185

5.26 ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนแรงดึง กับระยะเวลาการบ่มตัว 186

5.27 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงทางอ้อม กับอุณหภูมิการทดลองมวลรวมแหล่งชบ-1 187

5.28 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงทางอ้อม กับอุณหภูมิการทดลองมวลรวมแหล่งชบ-2 188

ก.1 ความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิของ Fatty Diamine 213

ก.2 Fatty Diamine Dihydrochloride Salt (ละลายน้ำได้) 213

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ช.1	ตัวอย่างอะมีนอิ่มตัว Octadecylamine	215
ช.2	ตัวอย่างอะมีนไม่อิ่มตัว Oleylamine	215
ช.3	Stearyl Diamine with Primary and Secondary Amine Group	215
ช.4	ปฏิกิริยาเคมีได้ Nitrile	216
ช.5	ปฏิกิริยาเคมีได้ Amine	216
ช.6	ปฏิกิริยาเคมีได้ Diamine	216
ช.7	หน้าที่ของ Fatty Amine	216
ค.1	ปฏิกิริยาเคมีในการผลิต Amidoamine	221
ค.2	ปฏิกิริยาเคมีในการผลิต Imidazoline	221