หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปรับปรุงดิน (Soil Stabilization)

ในปัจจุบันทั่วโลกต่างก็มีการสร้างถนนต่าง ๆ มากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยจัดได้ว่าการคมนาคมอันดับหนึ่งก็คือ การคมนาคมทางถนน ทั้งนี้ก็เนื่องจากไปได้รวดเร็วและมีความสะดวกสบาย การก่อสร้างถนนหนทางขณะนี้ได้ก้าวหน้าไปมาก วิศวกรสามารถลดระยะเวลาในการก่อสร้าง และพยายามที่จะหาวิธีการในการลดค่าใช้จ่าย โดยการปรับปรุงดินเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างถนน หลักการที่สำคัญของการปรับปรุงดินสามารถจะแบ่งออกได้ถึง 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

ก. พยายามนำวัสดุท้องถิ่นมาประยุกต์ใช้ให้มีเสถียรภาพดีขึ้น

ข. พยายามผสมสารเคมีหรือวัสดุอื่น ๆ ลงไปในดินเดิม เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินให้ดีขึ้น

ค. นำเอาวัสดุใหม่มาใช้แทน

ในการวิจัยครั้งนี้ จะทำการเน้นการปรับปรุงดินในขั้นที่สอง ซึ่งจะต้องอาศัยวิทยาการอันทันสมัยเข้าช่วย ได้มีการรวบรวมรูปแบบและวิธีการ และข้อมูลต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงปฏิบัติ ข้อที่ควรคำนึงถึงในการปรับปรุงดินวิธีนี้ ได้แก่ การจัดหาวิธีการที่เหมาะสมกับประเภทของดิน และการใช้สารเคมีหรือวัสดุที่นำมาปรับปรุงดินในปริมาณที่เหมาะสม แต่เนื่องจากดินเองมีองค์ประกอบต่าง ๆ มากมาย ซึ่งเป็นเรื่องของความไม่แน่นอน การศึกษาถึงคุณสมบัติของดินจึงมีวิธีการที่ซับซ้อนไปด้วย ดังนั้นหลักการเบื้องต้นที่ต้องทำการศึกษาก่อนที่จะปรับปรุงดินก็คือ คุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมี (Physico-Chemical Properties) ซึ่งจะส่งผลถึงวิธีการปรับปรุงดินเป็นอย่างมาก นอกเหนือไปจากนี้แล้วการปรับปรุงดินยังจะต้องคำนึงถึงส่วนประกอบอื่น ๆ อีก เช่น

ก. ค่าใช้จ่ายและช่วงเวลาในการก่อสร้าง

ข. สภาพภูมิประเทศ สภาพของท้องถิ่น รวมถึงทรัพยากรธรรมชาติ

ค. อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำงาน

ง. อิทธิพลจากสภาพแวดล้อมอื่น ๆ เช่น ภูมิอากาศ

การปรับปรุงดิน (Soil Stabilization) มีนิยามต่าง ๆ มากมาย "Lambe"[1] ได้กล่าวถึงนิยามของคำนี้ว่า เป็นการทำการแก้ไขคุณสมบัติบางอย่างของดิน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดคุณลักษณะที่ดีในทางวิศวกรรม ในปัจจุบันนี้ในทางวิศวกรรมมีการบัญญัติคำขึ้นอีกคำหนึ่ง คือ "Modified" มีความหมายว่า เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของดิน โดยมิได้คาดหวังถึงผลทางความแข็งแรง (Strength) เป็นหลักซึ่งแตกต่างจากคัพท์บัญญัติของคำว่า "Stabilized" ซึ่งจะเน้นหนักถึงคุณสมบัติความแข็งแรง (Strength) เป็นหลัก แต่ยังมีวิศวกรอีกหลายท่าน ที่ยังคงรวมความหมายของคัพท์ทั้ง 2 คำเข้าด้วยกัน และให้ความหมายที่คล้ายคลึงกัน โดยทั่วไปวิธีการปรับปรุงดินจะถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. การปรับปรุงดินทางกลศาสตร์ (Mechanical Stabiliaztion)

การปรับปรุงดินโดยวิธี เป็นการก่อให้เกิดความสามารถในการรับน้ำหนักเพิ่มอันเกิดจากแรงเสียดทานภายในของเม็ดดิน (Soil grain) และการยึดเหนี่ยว (Cohesion) ทั้งนี้เพื่อให้สามารถที่จะจับตัวกันรักษาสภาพนั้นไว้ให้นานที่สุด โดยเฉพาะดินที่มีขนาดเล็กบางประเภท ได้แก่ ดินเหนียว (Clay) หรือดินเม็ดละเอียด พวกนี้จะมีคุณสมบัติในการยึดเหนี่ยว ดังนั้นการปรับปรุงดิน โดยวิธีนี้จึงต้องมีหลายแนวทางประกอบกัน ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ตามวิธีการปฏิบัติ

ก. การปรับปรุงโดยการกระทำกับมวลดินโดยตรง ได้แก่ การบดอัด อันทำให้ดินยุบตัวจนมีช่องว่างน้อยที่สุด (Consolidation) การใช้ไฟฟ้าหรือความร้อนช่วย (Elictrical and Thermal) จนทำให้ดินมีเสถียรภาพดีขึ้น

ข. การปรับปรุงดินโดยการเพิ่มวัสดุใหม่ หรือแยกวัสดุเก่าออกมาบางส่วน ทั้งนี้เพื่อเน้นถึง การจัดขนาดคละของวัสดุให้เหมาะสมจนเกิดความหนาแน่นมากที่สุด

2. การปรับปรุงโดยทางเคมี (Chemical Stabilization) มีอยู่หลายอย่าง แต่ที่นิยมใช้กันมากมีอยู่ 2 ชนิด คือ

ก. การปรับปรุงดิน โดยใช้ปูนขาว (Lime Stabilization)

ข. การปรับปรุงดิน โดยใช้ปูนซีเมนต์ (Cement Stabilization)

3. การปรับปรุงดินโดยใส่สารช่วยการยึดเหนี่ยว ได้แก่ สารแอสฟัลต์

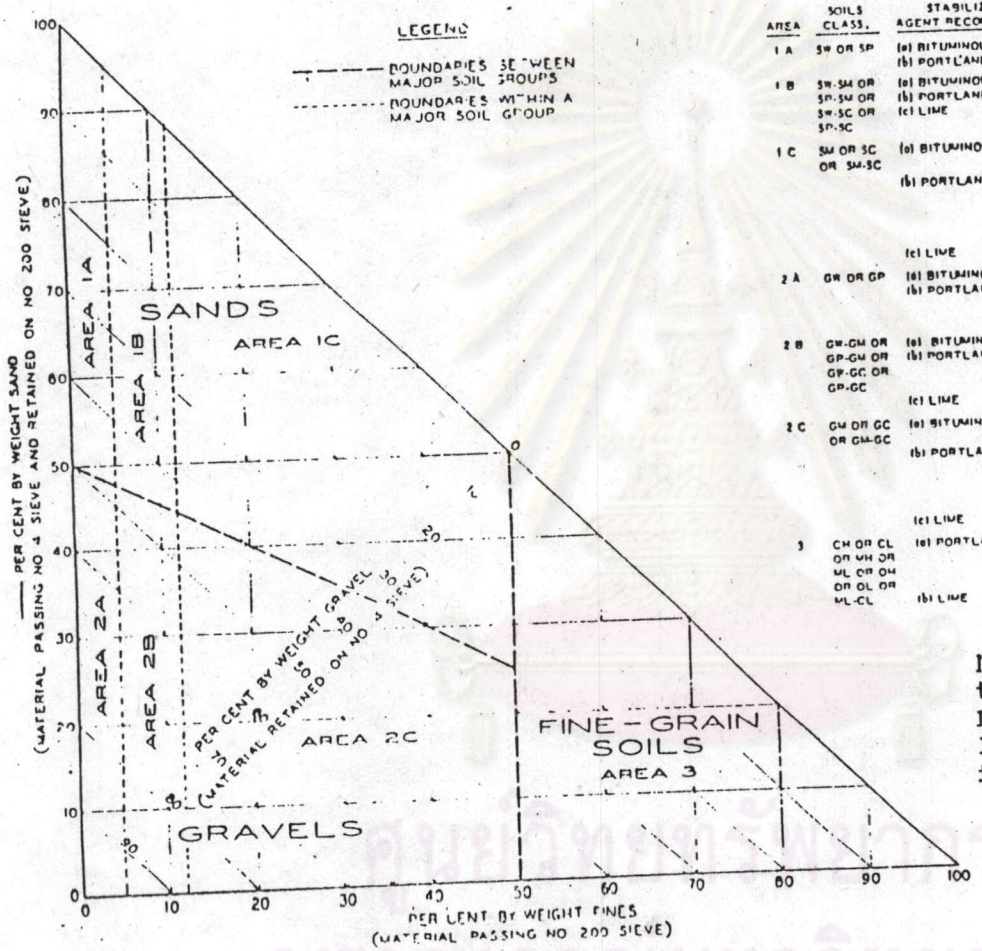
การปรับปรุงดินโดยใช้สารเคมี ได้เข้ามามีบทบาทในทางวิศวกรรมการทางมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นทางสถาบัน Department of the Air Force[2] จึงได้ทำการสรุปเป็นแผนภาพ ดังภาพที่ 2.1 เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวิธีการทางเคมีในการปรับปรุงดินแบบคร่าว ๆ โดยอาศัยข้อมูลของขนาดคละของวัสดุ และค่า Consistency ของดิน นอกจากนี้ Oglesby และ Hewes[3] ได้ทำการสรุปแผนภาพ ดังภาพที่ 2.2 เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกสารเคมีมาปรับปรุงดิน โดยอาศัยข้อมูล Plasticity Index และปริมาณของดินที่ลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานหมายเลข 200 ทั้งนี้ได้เสนอผ่านทางสถาบันค้นคว้าวิจัย Division of Physical Research Bureau of Public Roads แล้ว

2.1.1 <u>คุณสมบัติของดินในทางวิศวกรรมการทาง</u>

2.1.1.1 ความแข็งแรง

โดยทั่วไปความแข็งแรงของดินมักจะขึ้นกับความสามารถในการรับน้ำหนัก โดยการรับการบดอัด หากจะมองอีกแง่จะเห็นได้ว่าสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ การถูกทำลายให้เสียรูปร่างไป ซึ่งอาจเกิดจากการรับน้ำหนักภายนอก หรือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลดิน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นก็ได้ ความเสียหายที่เกิดจากการสูญเสียความสามารถรับน้ำหนัก ได้แก่ การเคลื่อนตัวของดิน หรือเกิดรอยแตกแยกขึ้น สาเหตุ อาจเกิดจากการระบายน้ำ (Drainage) การมีขนาดคละ (Gradation) ที่ไม่เหมาะสมหรือภัยธรรมชาติ จากการทดสอบความแข็งแกร่งของดิน โดยทั่วไปจะพบว่าดินอ่อนมักจะมีปัญหาในการรับน้ำหนัก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร และดินที่เป็นเม็ดเมื่อแข็งมักจะเปราะและขาดการยึดเหนี่ยว ดังนั้นการทดสอบความแข็งแรงจึงประกอบด้วยค่าการทดสอบแรงเฉือน (Shearing Strength) หรือค่าความยึดเหนี่ยว (Cohesion) และค่าความสามารถรับน้ำหนักกด (Bearing Capacity) หรือค่าเสถียรภาพ (Stability)

การปรับปรุงดินเพื่อให้ได้ความแข็งแรงและลดการเสียรูปร่างอาจกระทำได้หลายวิธี ได้แก่การขจัดชั้นที่มีองค์ประกอบสารประกอบอินทรีย์มากออก การเพิ่มความหนาแน่นของดินโดยการบดอัด และการจัดขนาดคละของดินต่างก็เป็นการเพิ่มความแข็งแรงแก่ดิน อาจสรุปได้พอสังเขปดังนี้



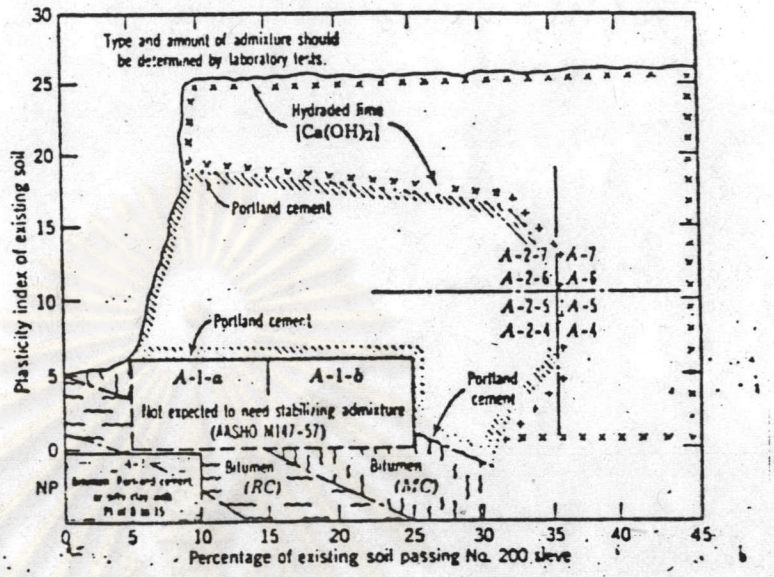
AREA	SOILS CLASS.	TYPE STABILIZING AGENT RECOMMENDED	RESTRICTION ON LL, PL & PI OF SOIL	RESTRICTION ON I-200 MATL	REMARKS
1 A	SW OR SP	(a) BITUMINOUS (b) PORTLAND CEMENT			See note (A).
1 B	SW-SM OR SP-SM OR SW-SC OR SP-SC	(a) BITUMINOUS (b) PORTLAND CEMENT (c) LIME	PI NOT TO EXCEED 10 PI NOT TO EXCEED 30 PI NOT LESS THAN 12		
1 C	SM OR SC OR SM-SC	(a) BITUMINOUS	PI NOT TO EXCEED 10	NOT TO EXCEED 30% BY WT	
		(b) PORTLAND CEMENT	PI NOT TO EXCEED NO. IND. BY EQ: $20 + \frac{50 - \text{FINES CONT.}}{4}$		
		(c) LIME	PI NOT LESS THAN 12		
2 A	GW OR GP	(a) BITUMINOUS (b) PORTLAND CEMENT			WELL-GRADED MATL ONLY MATL SHOULD CONTAIN AT LEAST 45% BY WT OF MATL PASSING NO. 4 SIEVE
2 B	GW-GM OR GP-GM OR GW-GC OR GP-GC	(a) BITUMINOUS (b) PORTLAND CEMENT	PI NOT TO EXCEED 10 PI NOT TO EXCEED 30		WELL-GRADED MATL ONLY MATL SHOULD CONTAIN AT LEAST 45% BY WT OF MATL PASSING NO. 4 SIEVE
		(c) LIME	PI NOT LESS THAN 12		
2 C	GW OR GC OR GM-GC	(a) BITUMINOUS	PI NOT TO EXCEED 10	NOT TO EXCEED 30% BY WT	WELL-GRADED MATL ONLY
		(b) PORTLAND CEMENT	PI NOT TO EXCEED NO. IND. BY EQ $20 + \frac{50 - \text{FINES CONT.}}{4}$		MATL SHOULD CONTAIN AT LEAST 45% BY WT OF MATL PASSING NO. 4 SIEVE
		(c) LIME	PI NOT LESS THAN 12		
3	CH OR CL OR MH OR ML OR OH OR OL OR ML-CL	(a) PORTLAND CEMENT	LIQUID LIMIT LESS THAN 40 AND PI LESS THAN 20		ORGANIC AND STRONGLY ACID SOILS FALLING WITHIN THIS AREA ARE NOT SUSCEPTIBLE OF STABILIZATION BY ORDINARY MEANS
		(b) LIME			

NOTE: (A) Soil classification corresponds to MIL-STD-619B. Restriction on Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index is in accordance with Method 103 in MIL-STD-621A.

GRADATION TRIANGLE FOR AID IN SELECTING A COMMERCIAL STABILIZING AGENT.

ภาพที่ 2.1 แนวทางการเลือกวิธีการปรับปรุงดิน (U.S. Air Force, 1969)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Suggested stabilizing admixtures suitable for use with soils, as indicated by plasticity index and amount passing No. 200 sieve. (Source: Div. of Physical Research, Bureau of Public Roads, slightly modified).

ภาพที่ 2.2 แสดงการเลือกสารเคมีในการปรับปรุงดิน

(Oglesby and Hewes, 1963)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. การบดอัด โดย Rolling, Vibration

ข. การทำ Sand-Pile และ Vibroflot Process สำหรับดินที่นุ่มหรือบริเวณที่ชุ่มน้ำ

ค. การปรับปรุงดินโดยทางกลศาสตร์ (Mechanical Stabilization)

ง. การทำ Lateral Consolidate

จ. การเพิ่มน้ำช่วยลด Interparticle Force เพื่อช่วยให้ได้ความหนาแน่นสูงขึ้น

ดังนั้นจะเห็นว่า การสร้างความแข็งแรงมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้วัสดุที่มีลักษณะคล้ายก้อนแข็ง (Rigid) ทั้งนี้เพื่อให้อยู่ในสภาพที่มีเสถียรภาพของปริมาตร (Volume Stability) อาจกระทำโดยการปรับปรุงดินโดยปูนขาว (Lime) หรือปูนซิเมนต์ (Cement) และอีกวิธีหนึ่งที่มักจะใช้กับวัสดุเม็ดเล็กก็คือการปรับปรุง โดยการเพิ่มการยึดเหนี่ยว (Cohesion) ด้วยวัสดุยางมะตอย วิธีนี้เรียกกันว่า Asphalt Stabilizaiton แต่ถึงอย่างไรก็จะต้องประกอบด้วยการปรับปรุงดิน โดยทางกลศาสตร์ร่วมด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีราคาถูก และสะดวกในการทำงานด้วย

2.1.1.2 เสถียรภาพทางปริมาตร

ดินมักจะมีการขยายและหดตัวเมื่อมีการเปลี่ยนปริมาณน้ำ โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณน้ำในดิน ก่อให้เกิดปัญหาการถูกทำลายของดิน การซึมของน้ำและแรงดันของน้ำ ทำให้เกิดรอยแตกในมวลดิน การวัดการเคลื่อนตัวของดินโดยเฉพาะที่ผิวอาจกระทำได้ในสนาม ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำกระทำได้ยาก ทั้งนี้นอกจากจะขึ้นกับชนิดของดินแล้วยังขึ้นกับค่าความซึมได้ของดินนั้น ๆ แต่หากมีการเปลี่ยนแปลงมาก ๆ ก็จะแสดงให้เห็นโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อมา

ในปัจจุบันวิศวกรได้หาแนวทางเพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตร วิธีการมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ การให้น้ำหนักกดทับแก่ดิน เพื่อให้เกิดการทรุดจนปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง การสร้างชั้นฐานรองรับโครงสร้างอื่น ๆ บนชั้นดิน หรือการสร้างชั้นที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impervious Membrane) รวมความพยายามทำให้ดินจับตัวกันเป็นก้อนแข็ง

(Rigid) โดยเฉพาะดินเหนียว (Clay) ที่มักจะมีปัญหาการยืดและหดตัวของมวลดิน ดังนั้น ทำการปรับปรุงดิน โดยใช้วัสดุแอสฟัลต์ก็ได้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการกระทำให้เกิดการบวมตัวจากน้ำ และสามารถรับน้ำหนักได้ดีขึ้นด้วย

2.1.1.3 ความซึมผ่าน (Permeability)

คุณสมบัตินี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำ (Water Movement) ในดิน ทั้งนี้ค่าความซึมผ่านยังขึ้นกับค่าแรงดันน้ำในดิน (Pore Water Pressure), ปริมาตร (Volume) และขนาดคละของดิน (Gradation) โดยดินที่มีลักษณะเป็น Open-Textured จะให้ค่าความซึมผ่านสูงมาก ส่วนดินเหนียวจะให้ค่าความซึมผ่านที่ต่ำมาก คือ ประมาณ 10^{-12} เซนติเมตรต่อวินาที นอกจากนี้ยังพบว่าดินที่มีค่าแรงดันน้ำภายในดินสูง มักจะก่อให้เกิดรอยแตกแยกได้มาก และการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดินอาจทำให้เกิดอุโมงค์หรือร่องน้ำขึ้นได้ ดังนั้นในกรณีค่าการซึมผ่านสูง จึงควรจะทำการปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์เข้าช่วย การบดอัดดินไม่ดีพอ อาจเป็นสาเหตุให้มีค่าความซึมผ่านสูงได้ การลดค่าความซึมผ่านอาจกล่าวได้อีกกรณีหนึ่งก็คือ การลดช่องว่างภายในนั่นเอง วิธีการวัดค่าความซึมผ่านกระทำได้ โดยการหาความลึกของระดับน้ำในดิน แล้วเลือกทำให้น้ำไหลเข้า และออกเพื่อดูความสามารถของการซึมผ่านของน้ำในดิน

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว อาจสรุปได้ว่า หากค่าความซึมผ่านในดินสูง อาจทำการลดได้โดยการบดอัดหรือทำการอุดช่องว่าง ทั้งนี้เพื่อป้องกันการไหลเข้าของน้ำในดิน ซึ่งจะส่งผลถึงเสถียรภาพของมวลดิน ฉะนั้นการปรับปรุงดินจึงต้องกระทำทั้งทางกลศาสตร์หรือทางเคมีและวิธีการอื่น ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของดิน และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ประกอบกัน

2.1.1.4 ความทนทาน (Durability)

คุณสมบัติของความทนทาน เกี่ยวข้องต่อการทำลายจากสภาพดินฟ้าอากาศ การกัดเซาะจากน้ำ ตลอดจนสภาพแวดล้อม เช่น การจราจร เป็นต้น หากคุณสมบัติข้อนี้บกพร่องจะก่อให้เกิดการสูญเสียในการบำรุงซ่อมแซมอย่างมาก

การปรับปรุงดินเพื่อให้เกิดคุณสมบัตินี้ อาจกระทำได้หลายวิธี วิธีการที่นิยมคือ การปรับปรุงทางเคมี (Chemical Stabilization) ส่วนการตรวจสอบที่จะช่วยให้คุณสมบัตินี้ดีขึ้น คือ การตรวจสอบขนาดคละของดิน การทดสอบการให้น้ำหนักซ้ำ

016232

(Repeated Load) ซึ่งเป็นการจำลองสภาพการจราจร การทดสอบความทนทานต่อน้ำ การทดสอบการหลุดร่อน ซึ่งสำคัญมาก เนื่องจากเป็นต้นเหตุของการทำลายต่อไป ดังนั้นการปรับปรุงโดยวิธีทางเคมี หรือ การปรับปรุงด้วยวัสดุแอสฟัลต์จึงเหมาะสมมาก เพราะจะช่วยให้การยึดเกาะและความแข็งแรงดีขึ้นด้วย

2.1.2 การปรับปรุงดินโดยใช้ปูนขาว (Lime Stabilization)

ปูนขาวมักจะถูกนำมาปรับปรุงดินที่มีขนาดเล็ก เพื่อลดสภาพ Plasticity เพิ่มความสามารถในการทำงาน เนื่องจากการจับตัวกันเป็นก้อนโตขึ้น และสามารถรับน้ำหนักได้สูงขึ้น ปูนขาวโดยทั่วไปแบ่งได้ 5 ประเภท คือ High Calcium Quick Lime (CaO), Dolomitic Quick Lime ($CaO+MgO$), Hydrated High Calcium Lime ($Ca(OH)_2$), Normal Hydrate Dolomitic Lime ($Ca(OH)_2+MgO$), และ Pressure Hydrate Dolomitic Lime ($Ca(OH)_2+Mg(OH)_2$) จากผลการทดสอบทั่วไปพบว่า ค่าความสามารถรับน้ำหนักในปริมาณที่เท่ากัน ในการปรับปรุงดิน Dolomitic lime จะให้ความสามารถรับน้ำหนักสูงกว่า Calcitic Lime แต่ในการรับแรงเฉือน ความสามารถจะใกล้เคียง แต่ในงานปรับปรุงดินบางกรณีจำเป็นต้องใช้ปูนขาวประเภท Quick lime ทั้งนี้เพราะจะสามารถสร้างความแข็งแรงให้กับดินที่เบียกเร็วกว่าปูนขาวชนิดอื่น สามารถทำให้ดินแห้งได้เร็วขึ้น และใช้ปริมาณที่น้อยกว่าปูนขาวชนิดอื่นด้วย

การเลือกประเภทของดินในการปรับปรุงจำเป็นที่จะต้องขึ้นอยู่กับประเภทของดิน ขนาดคละของดิน และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น Tompson[4] ได้ทำการศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีที่จะส่งผลถึงการปรับปรุงดินด้วยปูนขาว โดยทั่วไปปูนขาวเหมาะที่จะปรับปรุงดินที่มีค่า PH สูงกว่า 7 แต่สามารถที่จะปรับปรุงดินที่มีความเป็นกรดมากสุด ที่ PH 5.7 เพื่อให้เกิดประสิทธิผล และเมื่อศึกษาผลของสารอินทรีย์ที่มีในดิน พบว่าจะต้องมีปริมาณธาตุคาร์บอนไม่เกิน 1 เปอร์เซนต์ และต้องไม่มีธาตุซัลเฟตประกอบอยู่ นอกนี้เขายังได้พบว่าปูนขาวจะทำปฏิกิริยาได้ดีกับดินที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน มีเกิน 7 เปอร์เซนต์ขึ้นไป ทางสมาคม National Lime Association (NLA) เสนอว่าค่า PI ของดินที่เหมาะสมควรมีมากกว่า 12 ขึ้นไป ดังนั้นดินที่เหมาะสำหรับการปรับปรุงด้วยปูนขาว ได้แก่ ดินประเภท Clayey gravel, Silty Clay และ Clay เมื่อทำการแบ่งประเภทตามระบบ Unified Soil ก็คือ GC, GC-GM, SC, SC-SM, CL, ML, CH, MH และเมื่อแบ่งประเภทตามระบบ

AASHTO ดินที่เหมาะสำหรับการปรับปรุงด้วยปูนขาวก็คือ A-2-5, A-2-6, A-2-7, A-5, A-6 และ A-7

การประเมินหาปริมาณของปูนขาวที่เหมาะสมในการปรับปรุงดินแต่ละประเภทเป็นการยาก กลุ่มของสมาคม group of Engineering พบว่าปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมที่สุดส่วนใหญ่จะประมาณ 3 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักดิน จากผลการวิจัยของสถาบัน The Air Force แนะนำว่า ควรจะใช้ปูนขาวประมาณ 2-5 เปอร์เซนต์ สำหรับดินที่มีขนาดของดินที่ร่อนผ่านตะแกรงหมายเลข 200 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 เปอร์เซนต์ ส่วนในดินที่มีปริมาณร่อนผ่านตะแกรงหมายเลข 200 มากกว่า 50 เปอร์เซนต์ จะใช้ปูนขาวมากขึ้น 3-7 เปอร์เซนต์ และตารางที่ 2.1 แสดงถึงผลการหาปริมาณปูนขาวที่เหมาะสมสำหรับดินบางประเภท

วิธีการประเมินหาแนวทางประเมินหาความแข็งแรง มีด้วยกันหลายวิธีดังนี้

ก. Unconfined Compressive Strength

ข. California Bearing Ratio

ค. Flexural Fatigue Strength

ง. Triaxial Compressive Strength

จ. Cohesiometer Value

ตารางที่ 2.2 เป็นการประเมินหาค่าความแข็งแรงของดินที่ผสมปูนขาวเพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน โดยใช้วิธีการทดสอบ Unconfined Compressive Strength

2.1.3 การปรับปรุงดินโดยใช้ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์สามารถที่จะนำมาปรับปรุงดินได้ทุกประเภท แต่เพื่อให้เกิดความเหมาะสมในการปรับปรุงดิน ดังนั้นคุณสมบัติของดินที่ควรคำนึงถึงจึงประกอบด้วยขนาดคละของดิน และค่า PI ของดิน นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ รองลงมา คือ ประเภทของดินเหนียว, ค่า PH ของดิน ปริมาณของสารอินทรีย์ในดิน และปริมาณของสารซัลเฟตในดิน ในการค้นคว้าวิจัยของสถาบัน Portland Cement Association ได้พบว่า หากค่า PH ของดินมีค่าต่ำกว่า 12 มักจะให้ความแข็งลดลง และจากการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟตในดิน พบว่า ดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไม่ควรมีปริมาณซัลเฟตเกินหนึ่งเปอร์เซนต์ และในน้ำที่จะแช่ดิน-ซีเมนต์ ก็จะต้องมีปริมาณซัลเฟตได้ไม่เกิน 0.2 เปอร์เซนต์ นอกจากนั้นทางสมาคมได้ทำการสรุปขนาดคละ

ตารางที่ 2.1 แสดงถึงปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการปรับปรุงดินบางชนิด (U.S. Air Force, 1966)

APPROXIMATE LIME CONTENTS

Soil type	Approximate treatment, percent by soil weight	
	Hydrated Lime	Quicklime
Clayey gravels (GC, GM-CC) (A-2-6, A-2-7)	2-4	2-3
Silty clays (CL) (A-6, A-7-6)	5-10	3-8
Clays (CH) (A-6, A-7-6)	3-8	3-6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 การประเมินความแข็งแรงโดยวิธี.Unconfined Compressive Strength (Thomson, 1968)

TENTATIVE LIME-SOIL MIXTURE COMPRESSIVE STRENGTH REQUIREMENTS

Anticlpated Use	Residual Strength Requirement, psi (a)	Strength Requirements for Various Anticipated Series Conditions (b) Extended (8day) Soaking (psl)	Cyclic Freeze—Thaw (e) 3 Cycles (psl)	7 Cycles (psl)	10 Cycles (psl)
Modifed Subgrade	20	50	50	90 50*	120
Subbase					
Rigid Pavement	20	50	50	90 50*	120
Flexible Pavement					
Thickness of Cover (c)				100	
10 inches	30	60	60	60* 110	130
8 inches	40	70	70	75* 130	140
5 inches	60	90	90	100* 170	160
Base	100(d)	130	130	150*	200

a) Minimum anticipated sternght following first exposure.

b) Stergth required at termination og gield curing (following con struction) to provide adequate residual sternght.

c) Total pavement thickness overlying the subbase. the requirements are based on the boussinesq stess distribution.Rigid pavement requirements apply if cemented materials are used base courses.

d) Flexural strength be considerd in thickness design.

e) Number of freez-thaw cycles expected in the lime-soil layer during the winter of service.

*Note: Freeze-thaw strength losses based on 10 psi/cycle for 7 cycle value indicated by and which were based on a perviously established regression equation.

ของดินที่ให้ประสิทธิภาพสูง ดังตารางที่ 2.3 ค่าของ PI ที่เหมาะสมในการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ ดังตารางที่ 2.4 ซึ่งได้ทำการแยกไว้ตามประเภทของดิน เช่น ดิน Sandy ไม่ควรมีค่า PI เกิน 30 และดินที่มีขนาดเล็ก (Fine grain soil) จะมีค่า PI ได้ไม่เกิน 20 โดยมีปริมาณดินที่ร่อนผ่านตะแกรงหมายเลข 200 ไม่เกิน 35 เปอร์เซนต์ ดังนั้นดินที่เหมาะสำหรับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ จึงประกอบด้วยดินประเภท A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 และ A-7 แบ่งชนิดตามระบบ AASHTO

การเลือกประเภทของปูนซีเมนต์มักจะเลือกปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง เนื่องจากผลการทดลองที่ได้ภายหลังการทดลองของปูนซีเมินต์ประเภทหนึ่ง, สอง, สาม และสี่ ใกล้เคียงกันมาก ส่วนปูนซีเมนต์ประเภทที่ห้า เหมาะสำหรับงานที่ต้องการทำในบริเวณที่มีซัลเฟตสูง อีกทั้งมีราคาแพงกว่าทุกชนิด จากการวิจัยของทางสมาคม Portland Cement Association ได้ประเมินหาปริมาณของปริมาณปูนซีเมนต์สำหรับดินแต่ละชนิดจากปริมาณของดินที่ร่อนผ่านตะแกรงหมายเลข 200, คุณสมบัติความหนาแน่นของดินและปริมาณน้ำในดิน ตารางที่ 2.5 เป็นการสรุปเพื่อประเมินหาปริมาณปูนซีเมนต์เพื่อก่อสร้างชั้นทางของถนน ส่วนตารางที่ 2.6 และ 2.7 เป็นการสรุปหาปริมาณของปูนซีเมนต์จากปริมาณของดินบางขนาดที่กำหนด และจากค่าความหนาแน่นของดินประเภท Sandy และ Silty Clay

วิธีการประเมินหาค่าความแข็งแรงของดิน-ซีเมนต์ ขึ้นกับการทดสอบหลายประเภท วิธีการต่าง ๆ ได้แก่

ก. Unconfined Compressive Strength

ข. Flexural Strength

ค. California Bearing Ratio

ง. Plate Bearing test

จ. "R" Value

ตารางที่ 2.8 เป็นการประเมินหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์ที่ทำการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน และจากภาพที่ 2.3 เป็น Monograph ของการประเมินหาค่า Compressive Strength ที่การบ่ม 7 วัน โดยสมาคมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement Association)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณขนาดคละของดินที่เหมาะสมในการปรับปรุงด้วยปูนซิเมนต์

GRADING LIMITS FOR CEMENT STABILIZATION

OF WELL GRADED GRANULAR MATERIALS

Sieve Size	Limits
Passing No. 4	> 55 Percent
Passing No. 10	> 35 Percent
Passing No. 100	> 25 Percent
retained No. 200	> 25 Percent

(Portland Cement Association, 1966)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 ปริมาณปูนซิเมนต์ที่ปรับปรุงดินบางประเภทเพื่อเป็นชั้นพื้นทาง

CEMENT REQUTREMENTS FOR VARIOUS SOLLS

AASHO Soil Classification	Unified Soil Classification*	Usual Range in cement requirement** percent by vol.	percent by wt.	Estimated cement centent and that used in moisture-density test, percent by weight	Cement contents for wet-dry and freeze-thaw tests, percent by weight
A-1-a	CW,CP,CM,SW, SP,SM	5-7	3-5	5	3-5-7
A-1-B	CM,SM,SP	7-9	5-8	6	4-6-8
A-2	CM,SM,SC	7-10	5-9	7	5-7-9
A-3	SP	M-12	7-11	9	7-9-11
A-4	CL,ML	8-12	7-12	10	8-10-12
A-5	ML,MH,OH	8-12	8-13	10	8-10-12
A-6	CL,CH	10-14	9-15	12	10-12-14
A-7	OH,MH,CH	10-14	10-16	13	11-13-15

*based on corelation presented by air force (2)

**for most A horizon soils the cement should be increased percentage points, if the soil is dark grey to grey, and 6 percentage points if the soil is black.

(Portland Cement Association, 1970)

Material retained on No. 4 sieve, per cent	Material smaller than 0.05 mm., per cent	Cement content, per cent by wt.					
		Maximum density, lb. per cu.ft.					
		105–109	110–114	115–119	120–124	125–129	130 or more
0–14	0–19	10	9	8	7	6	5
	20–39	9	8	7	7	5	5
	40–50	11	10	9	8	6	5
15–29	0–19	10	9	8	6	5	5
	20–39	9	8	7	6	6	5
	40–50	12	10	9	8	7	6
30–45	0–19	10	8	7	6	5	5
	20–39	11	9	8	7	6	5
	40–50	12	11	10	9	8	6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ปรับปรุงดินตามขนาดของดิน Sandy Soils

(Portland Cement Association, 1970)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AASHO group index	Material between 0.05 mm. and 0.005 mm., per cent	Cement content, per cent by wt.						
		Maximum density, lb. per cu.ft.						
		90–94	95–99	100–104	105–109	110–114	115–119	120 or more
0–3	0–19	12	11	10	8	8	7	7
	20–39	12	11	10	9	8	8	7
	40–59	13	12	11	9	9	8	8
	60 or more	—	—	—	—	—	—	—
4–7	0–19	13	12	11	9	8	7	7
	20–39	13	12	11	10	9	8	8
	40–59	14	13	12	10	10	9	8
	60 or more	15	14	12	11	10	9	9
8–11	0–19	14	13	11	10	9	8	8
	20–39	15	14	11	10	9	9	9
	40–59	16	14	12	11	10	10	9
	60 or more	17	15	13	11	10	10	10
12–15	0–19	15	14	13	12	11	9	9
	20–39	16	15	13	12	11	10	10
	40–59	17	16	14	12	12	11	10
	60 or more	18	16	14	13	12	11	11
16–20	0–19	17	16	14	13	12	11	10
	20–39	18	17	15	14	13	11	11
	40–59	19	18	15	14	14	12	12
	60 or more	20	19	16	15	14	13	12

ตารางที่ 2.7 ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ปรับปรุงดินตามขนาดของดิน Clayey Soils (Portland Cement Association, 1970)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

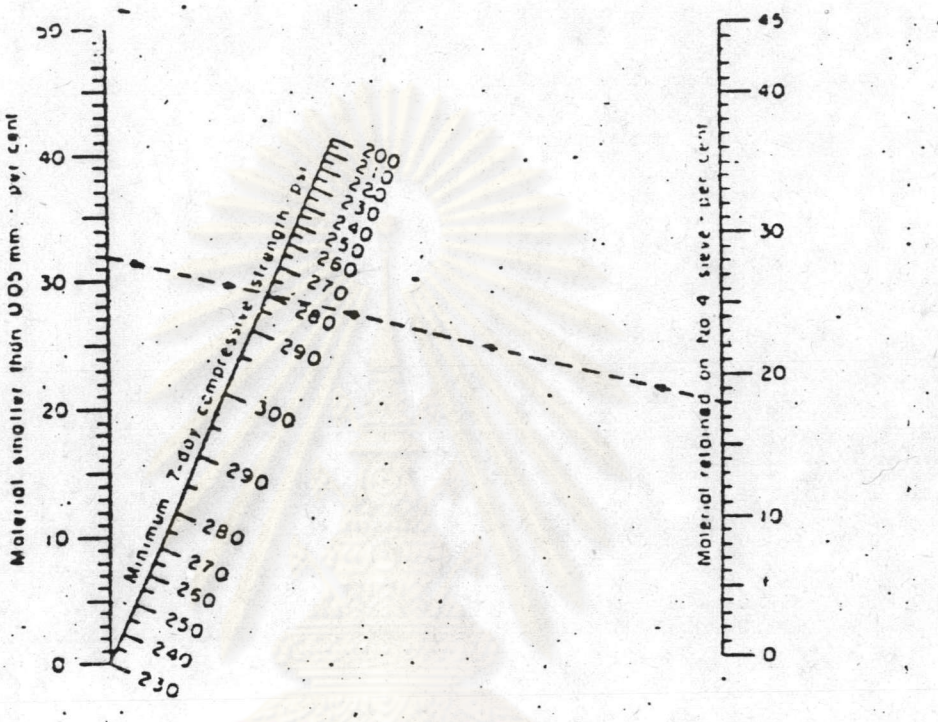
ตารางที่ 2.8 ค่า Unconfined Compressive Strength ของดินซีเมนต์บ่ม 7 วันและ 28 วัน

RANGES OF UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTHS OF SOIL-CEMENT

Soil	Wet Comperessive Strength (psi) 7- Day	28-Day
Sandy and gravelly soils:		
AASHO groups A-1,A-2,A-3		
Un fied groups GW,GC,CP,CF		
SW,SC,SP,SF	300-600	400-1,000
Silty soils:		
AASHO groups A-4 and A-5		
Unified ggroupe ML and CL	250-500	300 - 900
Clayey soils:		
AASHO groups A-6 and CL		
Unified groups MH and CH	200-400	2500-600

*Specimens moist cured 7 or 28 days,then saturated in water prior to strength testing.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Minimum 7-day compressive strengths required for soil-cement mixtures containing material retained on the No. 4 sieve.*

ภาพที่ 2.3 แสดงการประเมินหาค่า Unconfined Compressive Strength ที่บ่มครบ 7 วัน จากปริมาณของดินที่ค้างบนตะแกรงหมายเลข 4 และปริมาณของดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.05 มิลลิเมตร

(Portland Cement Association, 1970)

2.1.4 การปรับปรุงดินโดยใช้แอสฟัลต์ (Asphalt Stabilization)

การปรับปรุงดินด้วยวัสดุแอสฟัลต์ เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นทาง (Base Course) และผิวทาง (Surface Course) ของถนนนับได้ว่าเป็นที่นิยมแพร่หลายกันมาก ที่ถูกนำมาใช้ในงานปรับปรุงดิน มีด้วยกัน 3 ชนิด คือ Asphalt Cement, Cutback Asphalt และ Emulsified Asphalt นอกจากนี้ วัสดุดิน (Soil) หรือมวลรวม (Aggregate) ที่จะนำมาใช้ในงานนี้ เพื่อให้เกิดประสิทธิผลที่ดี จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมขนาดหรือปริมาณให้เพียงพอ Winterkorn[5] ทำการทดลอง และสรุปขนาดของมวลรวมที่เหมาะสมในการนำมาปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์ ดังตารางที่ 2.9 อีกทั้งทางสถาบัน The American Road Builder[6] ได้ทำการสรุปขนาดของดินที่เหมาะสมในการทำการปรับปรุงด้วย Asphalt ดังตารางที่ 2.10 นอกจากนี้ทางสถาบัน The Asphalt Institute[7] ซึ่งทำงานเกี่ยวข้องกับงานวิศวกรรมการทางมาโดยตลอด ได้ทำการรวบรวมข้อมูลของการปรับปรุงดินด้วย Asphalt เพื่อให้ได้ชั้นพื้นทางที่ดี โดยกำหนดคุณสมบัติไว้ว่า

ก. ต้องมีปริมาณของขนาดเม็ดดินที่ลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานหมายเลข 200 ไม่เกินร้อยละ 25 ของน้ำหนักทั้งหมด

ข. ค่า Sand Equivalent ต้องน้อยกว่า 25

ค. ค่า Plasticity Index ต้องไม่เกิน 6

จากผลการทดลองในทำนองเดียวกันของ Inc. of Ockland, California, และ Chevron Asphalt Company ได้ผลการทดลองที่คล้ายคลึงแต่ยังให้ข้อแตกต่างที่ว่าค่า Sand Equivalent อนุญาตให้สูงได้ถึง 30 และค่า liquid Limit ต้องไม่เกิน 35 ด้วย Herrin[8] ได้แสดงผลงานของเขาไว้ ดังตารางที่ 2.11 โดยสรุปข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับที่กล่าวไว้ข้างต้นทั้งหมด

ดังนั้น ดินที่สามารถที่จะนำมาทำการปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์ จึงได้แก่ดินประเภท A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-6, A3, A4 และ low plasticity A6 ตามการแบ่งชนิดดินของ AASHTO และหากจะแบ่งชนิดของดินตามวิธีของ Unified Classification System ได้แก่ SW, SP, SW-SM, SW-SC, SM, SC, SM-SC, GW, GP, GW-GM, GP-GM, GW-GC, GP-GC, GM, GC และ GM-GC โดยค่า Plastic Index และขนาดของเม็ดวัสดุจะเป็นไปตามที่กำหนด

ตารางที่ 2.9 แสดงคุณลักษณะของดินชนิดต่าง ๆ ที่เหมาะสำหรับการปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์

TYPES OF SOIL BITUMEN AND CHARACTERISTICS OF SOILS EMPIRICALLY FOUND SUITABLE FOR MANUFACTURE

มองไม่เห็น	Soil Bitumen.	+ Sand Bitumen.	Waterproofed Granular Stabilization, %		
Passing			A	B	C
1 1/2	...	...	100		
1	...	+–	80-100	100	
3/4 in	...	...	65-85	80-100	100
NO.4	>50	100	40-65	50-75	80-100
NO.10	...	...	25-35	40-60	60-80
NO.40	35-100	...	15-30	20-35	30-35
NO.100	...	...	10-20	13-23	13-30
NO.200	10-50	<12;<25	8-12	10-16	13-30
	Characteristics of Fraction Passing no.40 Sieve				
Liquid limit	<40	...	...	...	...
Plasticity Index	<18	...	10;<15	<10;15	<10;15
Field moisture equiv.		...	<20%	...	...
Linear shrinkage		...	<5%	...	...

- Proper or general.

+- Maximum size not larger than 1/3 of layer thickness; if compacted in several layers, nol larger thickess of one layer.

- Lower values for wide and higher values for narrow gradation band of sand. If more than half passes, restrictions are placed as indicated on field moisture equivalem and linear shrinkage.

A certain percentage of-200 or filler material is indirectly requires to pass supplementary stability test.

Values between 10 and 15 permitted in certain cases.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

GRADING AND PLASTICITY REQUIREMENTS

FOR SOIL-BITUMEN MIXTURES

Sieve Size	Percent Passing
No. 40	50 - 100
No. 200	0 - 35
Atterberg Limits	**Maximum Value**
Liquid limit	30
Plasticity index	10 .-

ตารางที่ 2.10 แสดงขนาด และปริมาณของดินพร้อมค่า PI ที่เหมาะสำหรับดินที่ปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์ (American Road Builders Association, 1953)

ENGINEERING PROPERTIES OF MATERIALS

SUITABLE FOR BITUMINOUS STABILIZATION

% Passing Sieve	Sand-Bitumen	Soil-Bitumen	Sand-Gravel-Bitumen
1-1/2"			100
1"	100		
3/4"			60-100
No. 4	50-100	50-100	35-100
10	40-100		
40		35-100	13-50
100			8-35
200	5-12	good - 3-20 fair - 0-3 and 20-30 poor - > 30	0-12
Liquid Limit		good - < 20 fair - 20-30 poor - 30-40 unusable - > 40	
Plasticity Index	< 10	good - 5 fair - 5-9 poor - 9-15 unusable - > 12-15	<10

ตารางที่ 2.11 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินที่เหมาะสมในการปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์ (Herrin, 1960)

บรรทัดฐานในการปรับปรุงดินด้วยแอสฟัลต์ ประกอบด้วย 3 กระบวนการ คือ

ก. การเลือกประเภทของแอสฟัลต์

ข. การหาปริมาณแอสฟัลต์ที่ต้องใช้

ค. การทำการประเมินผลที่ได้จากการปรับปรุงดิน

การเลือกประเภทของแอสฟัลต์มีความสำคัญมาก เนื่องจากจะช่วยให้ความสะดวกและง่ายในการทำงาน นอกจากนั้นยังช่วยให้ราคาถูกลงและเกิดประสิทธิผลในการทำงานด้วย ที่ประเทศสหรัฐอเมริกามีการประเมินผลอย่างคร่าว ๆ ได้ว่า มีอยู่ถึงร้อยละ 71 ของการปรับปรุงดินด้วยแอสฟัลต์ทั้งหมดที่เป็นการปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ การเลือกชนิดของแอสฟัลต์มาใช้งาน มักจะขึ้นอยู่กับชนิดของดินและคุณสมบัติเฉพาะของดินเป็นสำคัญ ดังตัวอย่างการสรุปการจัดขนาดของดิน เพื่อนำมาปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อนำมาทำเป็นวัสดุชั้นพื้นทาง โดยสถาบันของรัฐแคลิฟฟอร์เนีย (California) และเท็กซัส (Texas) ดังตารางที่ 2.12 ส่วนขนาดของเม็ดวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์ประเภท Cutback Asphalt ดังตารางที่ 2.13 สรุปโดย U.S. Navy[๙] และการสรุปคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมวลรวมเพื่อใช้ Emulsified Asphalt ในการปรับปรุง นำมาใช้ทำวัสดุพื้นทาง ดังตารางที่ 2.14 ซึ่งเป็นการรวบรวมโดยสถาบัน The Asphalt Institute และตารางที่ 2.15 เป็นการรวบรวมโดย Chevron Asphalt Company[๑๐] เพื่อหาขนาดคละของดินในการปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์ นอกจากนี้ยังได้แสดงเป็นแผนภาพในการเลือกของ Cutback Asphalt โดยอาศัยคุณสมบัติของเม็ดดินที่ลอดผ่านตะแกรงหมายเลข 200 และอุณหภูมิของดินมาช่วยการพิจารณา ในการใช้แอสฟัลต์ประเภท Emulsified Asphalt ค่อนข้างจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่า การใช้แอสฟัลต์ประเภทอื่นในการปรับปรุงคุณภาพของดิน แต่สามารถที่จะนำมาใช้กับดินที่มีความละเอียดมากได้ด้วย คุณสมบัติของดินที่เกี่ยวข้องถึงการเลือกใช้ Emulsified Asphalt คือ ประจุที่ผิวของเม็ดดิน เพื่อที่จะเลือกใช้ Emulsified Asphalt ประเภท Cation หรือ Anion นอกจากนี้ยังจะต้องคำนึงถึงปริมาณของดินที่ร่อนผ่านตะแกรงหมายเลข 200 และปริมาณของน้ำในดินอีกด้วย สถาบัน Asphalt Institute ได้ทำการสรุปความเหมาะสมในการเลือกใช้ Liquid Asphalt ให้เหมาะสมกับประเภทของดินอย่างคร่าว ๆ ดังตารางที่ 2.16 Herrin ได้ทำการรวบรวม

TYPICAL ASPHALT CEMENT TREATED BASE COURSE REQUIREMENT

Sieve Size	Percent Passing by Weight	
	California	Texas
1 3/4 inch		97-100
1 1/4 inch	100	
1 inch	95-100	
3/4 inch	80-95	
3/8 inch	50-65	
No. 4	35-50	
No. 10		30-55
No. 30	12-25	
No. 200	2-7	

ตารางที่ 2.12 ขนาดคละของที่เหมาะในการปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อเป็นชั้นพื้นทาง (California Division of Highway, 1969)

Sieve Size	Percent passing sieve for soils that are:			
	Poorly-graded sands	Well-graded sands	Silty sands	Semi-processed*
1 1/2"	--	--	--	100
1"	--	--	--	80 - 100
3/4"	--	--	--	--
1/2"	100	100	100	--
#4	75 - 100	75 - 100	75 - 100	25 - 85
#16	--	35 - 75	--	--
#50	--	15 - 30	--	--
#100	--	--	15 - 65	--
#200	0 - 25	5 - 12	12 - 25	3 - 15

*Semi-processed crusher, pit, or bank-run aggregates.

ตารางที่ 2.13 แสดงขนาดของดินทรายประเภทต่าง ๆ ที่เหมาะสำหรับการปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์ (U.S. Army, 1968)

Sieve Size	Percent Passing by Weight		
	2 inch maximum	1-1/2 inch maximum	3/4 inch maximum
2-1/2 inch	100		
2 inch	90-100	100	
1-1/2 inch		90-100	
1 inch			100
3/4 inch	50-80	50-80	80-100
No. 4	25-50	25-50	25-50
No. 200	3-15	3-15	3-15

Other Requirements

a. Plasticity Index 6 maximum
b. Resistance Value 75 minimum
c. Loss in Los Angeles Abrasion Machine 50 percent maximum
d. Product of Plasticity Index and the percent passing the No. 200 sieve shall not exceed 60.

ตารางที่ 2.14 แสดงค่าขนาดคละ PI และค่าการทนต่อการขัดสีของดินที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงด้วยอีมัลชั่น เพื่อใช้ทำวัสดุชั้นพื้นทางของถนน

(The Asphalt Institute, 1958)

TYPICAL AGGREGATES SUITABLE FOR TREATMENT WITH BITUMULS EMULSIFIED ASPHALTS

Category	ASTM Test Method	Processed Dense Graded Aggregates	SANDS			Semi-Processed Crusher, Pit or Bank Run Aggregates
			Poorly Graded	Well Graded	Silty Sands	
Gradation: 1½"		100				100
% Passing 1"		90-100				80-100
¾"		65-90				—
½"		—	100	100	100	—
# 4		30-60	75-100	75-100	75-100	25-85
16	C-136	15-30	—	35-75	—	—
50		7-25	—	15-30	—	—
100		5-18	—	—	15-65	—
200		4-12	0-12	5-12	12-25	3-15
Sand Equivalent, %	D-2419	30 Min.	30 Min.	30 Min.	30 Min.	30 Min.
Plasticity Index	D-424	—	NP	NP	—	—
Untreated Resistance R Value	*	78 Min.	60 Min.	60 Min.	60 Min.	60 Min.
Loss in Los Angeles Rattler (after 500 revolutions)	C-131	50 Max.	—	—	—	60 Max.

*Must have at least 25% Crush Count
*See AASHO T-174, T-175, and T-176

ตารางที่ 2.15 ขนาดคละของดินที่เหมาะกับการปรับปรุงด้วยอีมัลชั่น

(Chevron Asphalt Co. 1969)

ตารางที่ 2.16 ประเภทของคัทแบคและอิมัลชั่นที่เหมาะกับดินบางประเภท

SUITAABLE TYPES OF BITUMEN FOR STABILIZTION

Type of Soils	Cutback Asphalts	Emulsions
Open-graded aggregate	RC-250,RC-800	MS-2
Well-graded aggregate with little or no fine aggregate and material Passing the no. 200 sieve	RC-250,RC-800	MS-2
	MC-250,MC-800	SM-K
	SC-250,SC-800	SS-1,SS-K
Aggregate containing a considerable percentage of fine aggregate and material passing No. 200 sieve		SS-1,SS-1h
		SS-K,SS-Kh
	SC-250,SC-800	MS-2
	SC-250,SC-800	CM-K

(The Asphalt Institute, 1965)

ข้อมูลจากงานวิจัยของเขา อีกทั้งยังได้อ้างอิงถึงผลการทดลองของ The Asphalt Institute และ Illinois Division of Highway และได้สรุปไว้ด้วยตารางที่ 2.17 จากที่ได้กล่าวแล้วว่า จากคุณสมบัติของประจุที่ผิวของเม็ดดินมาเกี่ยวข้องกับการเลือกประเภทของ Emulsified Asphalt องค์ประกอบที่จะทำให้เกิดประจุที่ผิวของเม็ดดินที่สำคัญก็คือ Silica และ Alkaline ดังนั้น Mertins และ Wright[11] จึงได้ทำการสรุปงานวิจัยของเขาทั้งสองเป็นการหาความสัมพันธ์ในการเลือกประเภทของ Emulsified Asphalt จากสัดส่วนโดยน้ำหนักขององค์ประกอบทั้งสอง ดังภาพที่ 2.4 นอกจากนี้ยังได้สรุปถึงอัตราส่วนที่คิดเป็นร้อยละของ ธาตุ Silica และ Alkaline โดยน้ำหนักรวมของธาตุทั้งสองชนิด ในมวลรวมชนิดต่าง ๆ ซึ่งแสดงไว้ดังภาพที่ 2.5 และจากการรวบรวมข้อมูลจากสถาบันต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิศวกรรมการทาง ทำให้สามารถสรุปเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ทั้งสามชนิด ดังตารางที่ 2.18, 2.19 และ 2.20

การหาปริมาณของแอสฟัลต์ที่ใช้ในการปรับปรุงมวลรวม อาจทำได้ด้วยกันหลายวิธีแต่หากจะทำการแบ่งตามกระบวนการทั่ว ๆ ไป จะกระทำได้ถึงสองวิธีด้วยกันคือ

ก. ประเมินหาปริมาณแอสฟัลต์จากวิธีการทดลองที่คำนึงถึงคุณสมบัติของดินเป็นหลัก

จุดประสงค์ของการหาปริมาณแอสฟัลต์วิธีนี้ คำนึงถึงปริมาณแอสฟัลต์ที่จะต้องเคลือบผิวของเม็ดวัสดุ จากการทดลองของ The Asphalt Institute, Oklahoma Depeartment of Highway, Mckesson และ Bird ได้ทำการสรุปสมการหาปริมาณของแอสฟัลต์ได้ดังสมการ

$$A = SA \times t \times r_a \quad \text{.....}$$

โดยที่ A = Percent Asphalt

t = Asphalt film thickness

SA = Surface area of Soil or aggregate

r_a = Unit weight of asphalt

ทาง Oklahoma Department of Highway[12] ยังได้สรุปการหาปริมาณของแอสฟัลต์เป็นกรณีเฉพาะของ Cutback Asphalt ดังสมการ

$$p = k + 0.005\,a + 0.01\,b + 0.06\,c \quad \text{..... 2.2}$$

I10307009X

ตารางที่ 2.17 การเลือกชนิดของแอสฟัลต์ให้เหมาะกับชนิดของมวลรวม (Herrin, 1960)

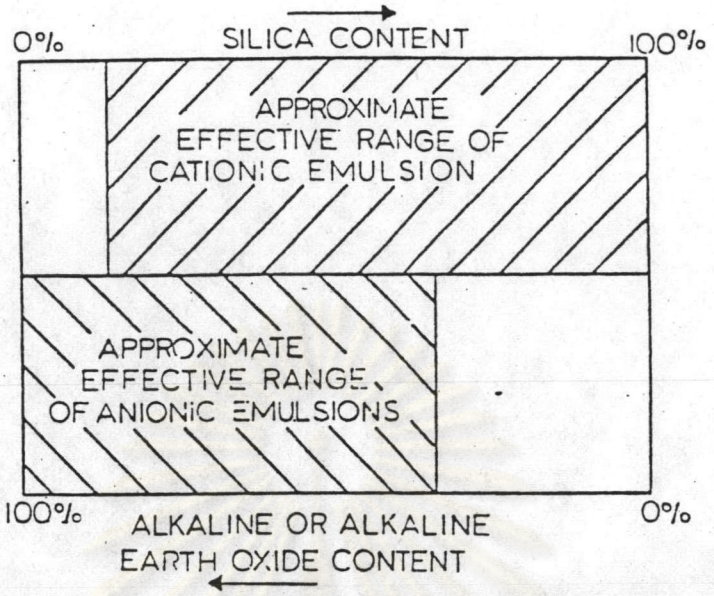
SUITABLE TYPES OF BITUMINOUS MATERIALS

Sand-Bitumen	Soil-Bitumen	Crushed Stones and Sand-Gravel-Bitumen
Hot Mix:	Cold Mix:	Hot Mix:
(a)		(a)
AC-85-100	RC-70,250,800	AC-85-100
100-150		
	(a) (b) MC-70,250,800	
(b)		(b)
85-100		85-100
100-120	SC-70,250,800	100-120
120-150		120-150
Cold Mix:		Cold Mix:
(a) (b) RC-70,250,800		(a) (b) RC-70,250,800
MC-250,800		MC-250,800
Emulsions	Emulsions	Emulsions
(a) (b)	(a) (b)	(a) (b)
SS-1	SS-1	SS-1
		MS-2
(a)	(a)	(a)
SS-LH	SS-LH	CM-K
SS-K	SS-K	
SS-KH	SS-KH	
SM-K	SM-K	

(a) Refers to Institue Nomenclature.

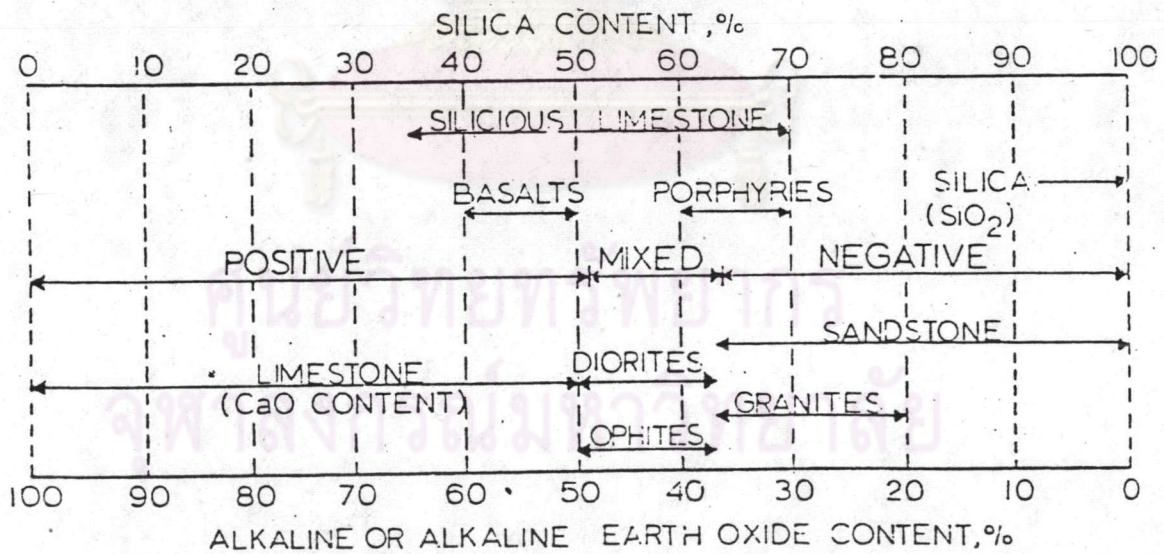
(b) Refers to illinois Division of Highways Nomenclature.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.4 แสดงความเหมาะสมในการเลือกอิมัลชั่นประเภทแคทไอออนหรือแอนไอออน

(Mertens and Wright, 1959)



ภาพที่ 2.5 แสดงปริมาณธาตุซิลิก้า และสารอัลคาไลน์ของมวลรวมชนิดต่าง ๆ

(Mertens and Wright, 1959)

Penetration Grade, Designation	Penetration 50-60 AP-6	60-70 AP-5	70-85 AP-4	85-100 AP-3	100-200 AP-2	120-150 AP-1
Water*	The material shall be free from water					
Specific gravity, 77°/77°F**	------	------	------	------	------	------
Flash point (Cleveland Open Cup) °F	347+	347+	347+	347+	347+	347+
Softening point, °F**	104-140	104-140	104-140	10[illegible] 140	95-131	95-131
Penetration 77°F, 100 gm., 5 sec.	50-60	60-70	70-85	85-100	100-120	120-150
Ductility, 77°F, cm.	40+	40+	40+	-------	-------	-------
Loss on heating, 325°F, 5 hr., Percent	1-	1-	1-	1-	1-	1-
Penetration of residue, 77°F, 100 gm., 5 sec., % of original	60+	60+	60+	60+	60+	60+
Solubility in carbon disulfide, Percent	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+
Insoluble organic matter, Percent	0.2-	0.2-	0.2-	0.2-	0.2-	0.2-
Spot test, standard naptha solvent†	Negative for all grades of petroleum asphalt					
Application Temperature, °F	250-325	250-325	250-325	250-325	250-325	250-325

* General requirement. The material shall be homogeneous, free from water, and shall not foam when heated to 346°F.

** Uniformity. The material furnished under Fed. Spec. SS-A-706b for a given contract, type, and grade shall be uniform in character, and samples from deliveries shall not vary more than + 41°F in softening point, within the limits specified above, nor more than ± 0.010 in specific gravity, from the results of tests on a representative sample furnished by the contractor prior to delivery.

† Not a part of specification SS-A-706b.

ตารางที่ 2.18 แสดงมาตรฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Federal Specification SS-A-706b)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Grades	Rapid Curing RC-0	RC-1	RC-2	RC-3	RC-4	RC-5	Medium Curing MC-0	MC-1	MC-2	MC-3	MC-4	MC-5
Water	The material shall be free from water						The material shall be free from water					
Flash point (Tag. open cup), °F	------	------	80+	80+	80+	80+	100+	100+	150+	150+	150+	150+
Furol viscosity at:												
77°F	75-150	------	------	------	------	------	75-100	------	------	------	------	------
122°F	------	75-150	------	------	------	------	------	75-100	------	------	------	------
140°F	------	------	100-200	250-500	------	------	------	------	100-120	250-500	------	------
180°F	------	------	------	------	125-250	300-600	------	------	------	------	125-250	300-600
Distillation:												
Distillate (% total distillate to 680°F)							------	------	------	------	------	------
To 374°F	15+	10+	------	------	------	------	25-	20-	10-	5-	0	0
To 437°F	55+	50+	40+	25+	8+	------	40-70	25-65	15-55	5-40	30-	20-
To 500°F	75+	70+	65+	55+	40+	25+	75-93	70-90	60-87	55-85	40-80	20-75
To 600°F	90+	88+	87+	83+	80+	70+						
Residue from distillation to 680°F, volume, % of sample, by difference	50+	60+	67+	73+	78+	82+	50+	60+	67+	73+	78+	82+
Tests on residue from distillation:												
Penetration 77°F, 100 gm., 5 sec.	80-120	80-120	80-120	80-120	80-120	80-120	120-300	120-300	120-300	120-300	120-300	120-300
Ductility 77°F, 5 cm. per sec., cm.*	100+	100+	100+	100+	100+	100+	100+	100+	100+	100+	100+	100+
Percent soluble in carbon tetrachloride	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+
Spot test, standard naptha solvent**	Negative for all grades						Negative for all grades					

Grades	Slow Curing SC-0	SC-1	SC-2	SC-3	SC-4	SC-5
Water, %	0.5-	0.5-	0	0	0	0
Flash point (Cleveland open cup), °F	150+	150+	175+	200+	225+	250+
Furol viscosity at:						
77°F	75-150	------	------	------	------	------
122°F	------	75-150	------	------	------	------
140°F	------	------	100-200	250-500	------	------
180°F	------	------	------	------	125-250	300-600
Asphalt residue of 100 penetration, percent	40+	50+	60+	70+	75+	80+
Distillation:						
Total distillate to 680°F, percent by volume	15-40	10-30	5-25	2-15	10	5-
Tests on residue from distillation:						
Float test at 122°F, sec.	15-100	20-100	25-100	50-125	60-150	75-200
Ductility at 77°F, cm.	100+	100+	100+	100+	100+	100+
Percent soluble in carbon tetrachloride***	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+
Application temperatures, °F	50-120	80-125	150-200	175-250	175-250	200-275

* For medium curing cutbacks, if penetration of residue is more than 200 and its ductility at 77°F is less than 100, the material will be acceptable if its ductility at 60°F is 100+.

** Not part of specification

*** If the material fails to meet the requirement for solubility, it will be acceptable if its solubility in CS_2 is 99%+ and the proportion of bitumen soluble in CCl_4 is 99.65%+.

[taken from Federal Specifications SS-A 671a]

ตารางที่ 2.19 แสดงมาตรฐานของคัทแบคแอสฟัลต์ (Federal Specifications SS-A 671a)

Tests	ANIONIC					
	Rapid Setting		Medium Setting		Slow Setting	
	RS-1	RS-2	MS-1	MS-2	SS-1	SS-1h
TESTS ON EMULSION						
Viscosity, Furol, 60 ml., 77°F, sec.	20-100	--	--	100-700	20-100	20-100
Viscosity, Furol, 60 ml., 122°F., sec.	--	75-400	50-500	--	--	--
Residue by distillation, percent	57-62	62-69	60-67	62-69	57-62	57-62
Settlement, 7 day, maximum, difference	3	3	3	3	3	3
Demulsibility:						
50 ml. 0.10 N $CaCl_2$, percent	--	--	--	0-30	--	--
35 ml. 0.02 N $CaCl_2$, percent	60+	60+	--	--	--	--
Sieve test, maximum, percent	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Miscibility with water, hours	--	--	--	2	--	--
Aggregate Coating-Water Resistance test	--	--	Pass	--	--	--
Cement mixing test, maximum percent	--	--	--	--	2.0	2.0
Oil Distillate, percent by volume, max.	--	--	12	--	--	--
TESTS ON RESIDUE FROM DISTILLATION TEST						
Penetration, 77°F., 100 gm., 5 sec.	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	40-90
Soluble in CCl_4, minimum percent	97	97	97	97	97	97
Ash, maximum, percent	2	2	2	2	2	2
Ductility at 77°F, minimum, cm.	40	40	40	40	40	40

Tests	CATIONIC					
	Rapid Setting		Medium Setting		Slow Setting	
	RS-2K	RS-3K	SM-K	CM-K	SS-K	SS-Kh
TESTS ON EMULSION						
Viscosity, Furol, 60 ml., 77°F, sec.	--	--	--	--	20-100	20-100
Viscosity, Furol, 60 ml., 122°F, sec.	20-100	100-400	50-500	50-500	--	--
Residue by distillation, percent	60-65	65-72	60-65	65-72	57-62	57-62
Settlement, 7 day, max.. difference	3	3	3	3	3	3
Sieve test, maximum, percent	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Aggregate Coating-Water Resistance test						
Dry Aggregate (Job), min. pct. coated	--	--	80	80	--	--
Wet Aggregate (Job), min. pct. coated	--	--	60	60	--	--
Cement mixing test, maximum percent	--	--	--	--	2	2
Particle Charge test	Positive	Positive	Positive	Positive	--	--
pH, maximum	--	--	--	--	6.5	6.5
Oil Distillate, percent by volume, max.	5	5	20	12	--	--
TESTS ON RESIDUE FROM DISTILLATION TEST						
Penetration, 77°F., 100 gm., 5 sec.	100-250	100-250	100-250	100-250	100-200	40-90
Soluble in CCl_4, minimum, percent	98	98	98	98	97	97
Ductility at 77°F., minimum, cm.	40	40	40	40	40	40

[taken from Federal Specification SS-A-00674C]

ตารางที่ 2.20 แสดงมาตรฐานของอีมัลชั่น (Federal Specification SS-A-0074c)

โดยที่ p = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของเนื้อวัสดุแอสฟัลต์โดยคิดเทียบน้ำหนักของมวลรวมแห้ง

a = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของ Mineral Aggregate ที่ลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 10

b = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของ Mineral Aggregate ที่ลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 40

c = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของ Mineral Aggregate ที่ลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 200

k = 1.5 เมื่อค่า Plasticity Index < 8 และเท่ากับ 2.0 เมื่อค่า Plasticity Index >b

The Asphalt Institute ได้ทำการแยกสมการการหาปริมาณของแอสฟัลต์เหลวออกได้ 2 สมการ ตามประเภทของ Asphalt โดยที่สมการที่ 2.3 ใช้กับแอสฟัลต์ประเภทคัทแบคแอสฟัลต์ (Cutback Asphalt) และสมการที่ 2.4 จะใช้กับแอสฟัลต์ประเภทอีมัลชั่นแอสฟัลต์ (Emulsion Asphalt)

$$p = 0.02(a)+0.07(b)+0.15(c)+0.20(d) \quad \text{..... 2.3}$$

p = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของเนื้อวัสดุแอสฟัลต์ โดยคิดเทียบน้ำหนักของมวลรวมแห้ง

a = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของ Miner l Aggregate ที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 50

b = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของ Mineral Aggregate ที่ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 50 และค้างบนตะแกรงหมายเลข 100

c = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของ Mineral Aggregate ที่ผ่านบนตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 100 และค้างบนตะแกรงหมายเลข 200

d = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของ Mineral Aiggregate ผ่านตะแกรงมาตราฐานอเมริกา หมายเลข 200

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$p = 0.05(a)+0.1(b)+0.5(c) \quad \text{..... 2.4}$$

โดยที่ p = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของอีมัลชั่นแอสฟัลต์ โดยคิดเทียบน้ำหนักจากมวลรวมแห้ง

a = เปอร์เซนต์ของ Mineral aggregate ที่ค้างตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 8

b = เปอร์เซนต์ของ Mineral aggregate ที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 8 และค้างบนตะแกรงมาตรฐานหมายเลข 200

c = เปอร์เซนต์ของ Mineral aggregate ที่ลอดผ่านตะแกรงมาตรฐาน หมายเลข 200

Mckesson[13] ได้ทำการสรุปการหาปริมาณแอสฟัลต์ ที่คล้ายคลึงกับสมการของ The Asphalt Institute อย่างมาก โดยสรุปไว้ด้วยสมการ

$$p = 0.15\ (0.09A+0.010B+0.50C) \quad \text{..... 2.5}$$

โดยที่ p = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของอีมัลชั่นแอสฟัลต์ โดยน้ำหนักของทรายแห้ง

A = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของทราย ที่ค้างตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 10

B = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของทราย ที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 10 และค้างบนตะแกรงมาตรฐานหมายเลข 200

C = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของทราย ที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 200

Bird[14] ได้ทำการศึกษาถึงการประเมินหาปริมาณของแอสฟัลต์ประเภทอีมัลชั่นที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณดิน เป็นเปอร์เซนต์ที่ลอดผ่านตะแกรงหมายเลข 200 โดยกำหนดถึงสองสมการ ดังสมการที่ 2.6 จะใช้กับดินที่มีปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของเม็ดดินที่ลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 10 ไม่เกิน 50 เปอร์เซนต์ และมีปริมาณเป็นเปอร์เซ็นต์ของดินที่ลอดผ่านตะแกรงมาตรฐาน หมายเลข 200 ไม่เกิน 12 เปอร์เซนต์ แต่ถ้าหากมีปริมาณ

ดินที่ลอดผ่านตะแกรงมาตรฐาน หมายเลข 200 มากกว่า 12 เปอร์เซนต์ จะใช้สมการที่ 2.7 เพื่อหาปริมาณของแอสฟัลต์

$$T = 0.02F+0.1C+4 \quad \text{..... 2.6}$$

$$T = 0.2F+0.1D+4 \quad \text{..... 2.7}$$

T = ปริมาณเป็นปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต ของอีมัลชั่น

F = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของมวลรวมที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 10

C = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของมวลรวมที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน หมายเลข 200

D = ปริมาณความแตกต่างระหว่างค่า 24 กับค่า C

การประเมินหาค่าปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมอีกวิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมมากก็คือ การประเมินจากวิธี The California Centrifuge Kerosene Equivalent (CKE) ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งเป็นแบบมาตรฐานการทดลองที่ Californai Test Method 303

ช. ประเมินหาปริมาณแอสฟัลต์จากวิธีการทดลองที่คำนึงถึงคุณสมบัติของมวลรวมที่ผสมแอสฟัลต์

การประเมินหาปริมาณแอสฟัลต์จากมวลรวมที่ผสมแอสฟัลต์ อาจสรุปได้ถึง 2 วิธีการใหญ่ ๆ จากวิธีการทดลองเพื่อความสะดวกในการประเมินหาปริมาณแอสฟัลต์ สรุปได้ดังนี้

1. ประเมินหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ จากกระบวนวิธีการออกแบบส่วนผสมร้อนของแอสฟัลต์ (Hot-mix asphalt)

2. ประเมินหาปริมาณ Liquid Asphalt (Cutback Asphalt และ Emulsions)

ทางสถาบันวิจัยค้นคว้า Research Board Committee[15] ทำการสรุปเป็นมาตรฐานในการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์ ทั้งโดยวิธีของ marshall, Hveem Method และ Unconfined Compressive Strength ดังตารางที่ 2.21 ทาง

สถาบัน U.S. Air Force ได้ทำการสรุปปริมาณของแอสฟัลต์แต่ละชนิดที่เหมาะสมในการสร้างชั้นพื้นทางและพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีต ดังตารางที่ 2.22 และที่สำคัญ ตารางที่ 2.23 สรุปการออกแบบส่วนผสมร้อนแอสฟัลต์เพื่อใช้ทำชั้นพื้นทาง ตารางนี้เป็นการรวบรวมโดยสถาบัน The Asphalt Institute เพื่อให้เหมาะสมกับปริมาณการจราจรและสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ Warden[16] ยังได้ทำการสรุปบรรทัดฐานของวิธีมาร์แชล (Marshall) ในประเทศเยอรมันตะวันตก สรุปได้ดังตารางที่ 2.24

ส่วนการประเมินหาปริมาณแอสฟัลต์ประเภทคัทแบคแอสฟัลต์ (Cutback) และอีมัลชั่น (Emulsion) จะขึ้นอยู่กับกระบวนวิธีการทดลอง ซึ่งการทดลองมีอยู่หลายวิธีด้วยกันดังนี้

ก. Habbard-Field Test (มาตรฐาน ASTM D 1138-52)

ข. Hveem Stability (มาตรฐาน ASTM D. 1560-65)

ค. Marshall Stability (มาตรฐาน ASTM D. 1559-65)

ง. Florida Bearing Test

จ. Extrution Test (มาตรฐาน ASTM D. 915-61)

ฉ. Unconfined Compression Test

ช. Triaxial Compression Test

ซ. "R" Value Test

ฌ. Elastic Modulus

สิ่งที่ทำการควบคุมการก่อสร้างชั้นพื้นทางถนนจะขึ้นกับ วิธีการผสม (Mixing Methods) สภาพของการบ่ม (Curing Condition) อัตราการให้น้ำหนัก (Rate of loading) และอุณหภูมิ วิธีการนี้นิยมใช้มากที่สุด ในการประเมินหาปริมาณของคัทแบคแอสฟัลต์และอีมัลชั่น ได้แก่ วิธีการของมาร์แชล (Marshall), ฮวีม (Hveem) และการทดลองหาค่า Extrusion ตารางที่ 2.25 และ 2.26 เป็นการสรุปเป็นค่าที่ประเมินไว้ สำหรับการหาปริมาณคัทแบคแอสฟัลต์และอีมัลชั่น โดยวิธีการของมาร์แชล (Marshall) และฮวีม (Hveem) ส่วนในกระบวนวิธีการของ Extrusion Test จะขึ้นกับข้อกำหนดสามชุดด้วยกัน คือ

ก. ค่า Extrusion Value ก่อนที่จะทำการชับน้ำ จะต้องให้ค่า > 1000 ปอนด์

ตารางที่ 2.21 แสดงถึงข้อกำหนด ในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตของชั้นพื้นทางถนน Marshall, Hveem และ Unconfined Copressive Strength.

A. Hveem Method

State	Stabilty	Percent Air Voids	Percent Voids Filled With Asphalt	Cohesiometer
California	35 minimum	4-6		
Colorado	30-45	3-5	80-85	
Hawaii	35 minimum	5-10	75	300 minimum
Nevada	30-37 min.	3-5		
Oklahoma	35 minfmum	8 maximum		
Oregon	30 minimum	10 maximum		150 minimum
Texas	30 minimum			
Washington	20 minimum			50 minimum

B. Marshall Mathod

State	Stability lbs.	Flow Value 0.001 in.	Percent Air Voids	Percent Voids Filled With Asphalt
District of Columbia	750 minimum	8-16	3-8	65-67
Georgia	1800 minimum	8-16	3-6	65-75
Kansas	800-3000	5-15	1-5	70-85
Kentucky	1100-1500	12-15	4-6	
Mississippi	1600	16 maximum	5-7	50-70
New Jersey	1100-1500	6-18	3-7	
N. Carolina	800	7-14	3-8	
N. Dakota	400 minimum	8-18	3-5	
Pennsylvania	700 minimum	6-16		60-85
Rhode Island	750 minimum		3-8	
S. Carolina	1200-3000	6-12		
S. Dakota		8-18	3-5	
Wyoming	100 minimum			

C. Unconfined Compressive Strength

State	Load, psi	Percent Air Voids	Percent Voids Filled With Asphalt
Colorado	200-400	3-5	80-85
Oregon	150 minimum		

(Highway Resersh Board, 1970)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Pavement Temp. Index	Asphalt Pen. Grade	Bitumen Content by Traffic Areas								
		Type A Traffic Areas			Types B and C Traffic Areas			Type D Traffic Areas (2)		
		Light Load Pavements	Intermediate Load Pavements (1)	Heavy Load Pavements	Light Load Pavements	Intermediate Load Pavements	Heavy Load Pavements	Light Load Pavements	Intermediate Load Pavements	Heavy Load Pavements
Negative	120-150	---	Optimum	(3)	Opt. +10%	Opt. +10%	Optimum	---	Opt. +10%	Opt. +10%
0-40	100-120	---	Optimum	(3)	Optimum	Optimum	Opt. -10%	---	Opt. +10%	Opt. +10%
40-100	85-100	---	Opt. -10%	(3)	Optimum	Optimum	Opt. -20%	---	Opt. +10%	Optimum
Above 100	60-70	---	Opt. -20%	(3)	Optimum	Opt. -10%	(3)	---	Optimum	Optimum

(1) Intermediate load pavements, for the purposes of this tabulation, include those for the twin bicycle, twin tricycle, and twin-tandem tricycle gear configurations for which design criteria are included in this manual.
(2) Blast zones within overrun areas are included with type D traffic areas.
(3) Design bitumen content to be furnished by OCE at time of airfield design.

PAVEMENT TEMPERATURE INDEX:

The sum, for a one-year period, of the increments above 75°F of monthly averages of the daily maximum temperatures. Average daily maximum temperatures for the period of record should be used where 10 or more years of record are available. For records of less than 10-year duration the record for the hottest year should be used. A negative index results when no monthly average exceeds 75°F. Negative indices are evaluated merely by subtracting the largest monthly average from 75°F.

ตารางที่ 2.22 แสดงปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับสถาพการจราจรต่าง ๆ (U.S. Air Force, 1966)

ตารางที่ 2.23 แสดงข้อกำหนดของการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับชั้นพื้นของถนน โดยวิธี Marshall, Hveem และ Habbard Field ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพการจราจร

A. Marshall Design Criteria

Trafide Category / Tesp Property	Meavy Min.	Meavy Max.	Medium Min.	Medium Max.	Light Min.	Light Max.
No. of compaction Blows Each End of Specimen	75		50		35	
Stability, all mixture	750	- - -	500	- - -	500	- - -
Flow, all mixture	8	16	8	18	8	20
Percent Air Voids						
Surfacing or leveling	3	5	3	5	3	5
base	3	8	3	8	3	5

B. Hveem Design Criteria

Trafide Category / Test Property	Meavy Min.	Meavy Max.	Medium Min.	Medium Max.	Light Min.	Light Max.
Stability Value	37	- - -	35	- - -	30	- - -
Cohesiometer Value	50	- - -	50	- - -	50	- - -
Swell			Less than 0.030 inch			

C. Hubbard–Field Design Criteria

Trafide Category / Test Property	Heavy Min.	Heavy Max.	Medium and Light Min.	Medium and Light Max.
Stability–pounds	2,000	- - -	1,200	2,000
Percent Air Voids	2%	5%	2%	5%

Hot–mix asphalt bases, which do not meet the above criteria when tested at 140 °F should be satisfactory if they meet the criteria when tested at 100 °F and are placed 4 inches or more below the surface. This recommendation applies only to regions having climatic conditions similar to those prevaling throughout most of the United States. Guidelines for applying for the lower test temperature in regions having more extreme climatic conditions are being studied.

(The Asphalt Institute, 1958)

MARSHALL MIX DESIGN CRITERIA

FOR ASPHALT CEMENT TREATED BASE COURSE

Marshall Requirement at 140°F	Traffic, Vehicles per day			
	Light (less than 1000)	Medium (1000-3000)	Heavy (3000-6000)	Extra Heavy (greater than 6000)
Stability, min.	330	440	550	660
Flow (0.01 in.)	4-20	4-18	4-16	4-14
Percent air voids	2-15	2-15	3-12	3-10

ตารางที่ 2.24 ข้อกำหนดในการออกแบบพื้นทางถนนโดยวิธีมาร์แชล (Warden, 1961)

Marshall Test	Criteria for a Test Temperature of 77°F	
	Minimum	Maximum
Stability, lbs.	750	---
Flow, (0.01 in.)	7	16
Percent air voids	3	5

ตารางที่ 2.25 แสดงข้อกำหนดของการออกแบบชั้นพื้นทางถนน โดยดินที่ปรับปรุงด้วยคัทแบคแอสฟัลต์ และอีมัลชั่น ตามวิธีมาร์แชล (Lefebvre, 1966)

Reference	Criteria		
	Resistance Value		Moisture Pickup
	Before MVS*	After MVS*	During MVS, per cent
Asphalt Institute (19)	70 min.	60 min.	---
Chevron Asphalt Company (20)	---	70**, 78***	5.0 max.
Finn, et al. (57)	---	70**, 73***	5.0 max.

*Moisture Vapor Susceptibility
**Light Traffic
***Heavy Traffic

ตารางที่ 2.26 แสดงข้อกำหนดของการออกแบบชั้นพื้นทางถนน โดยดินที่ถูกปรับปรุงด้วยอีมัลชั่นโดยวิธีอวีม (The Asphalt Institute, 1969)

ข. ค่า Extrusion Value หลังที่จะทำการชับน้ำ จะต้องให้ค่า > 400 ปอนด์

ค. ค่าการขยายตัว (Expansion) ไม่เกิน 5 เปอร์เซนต์

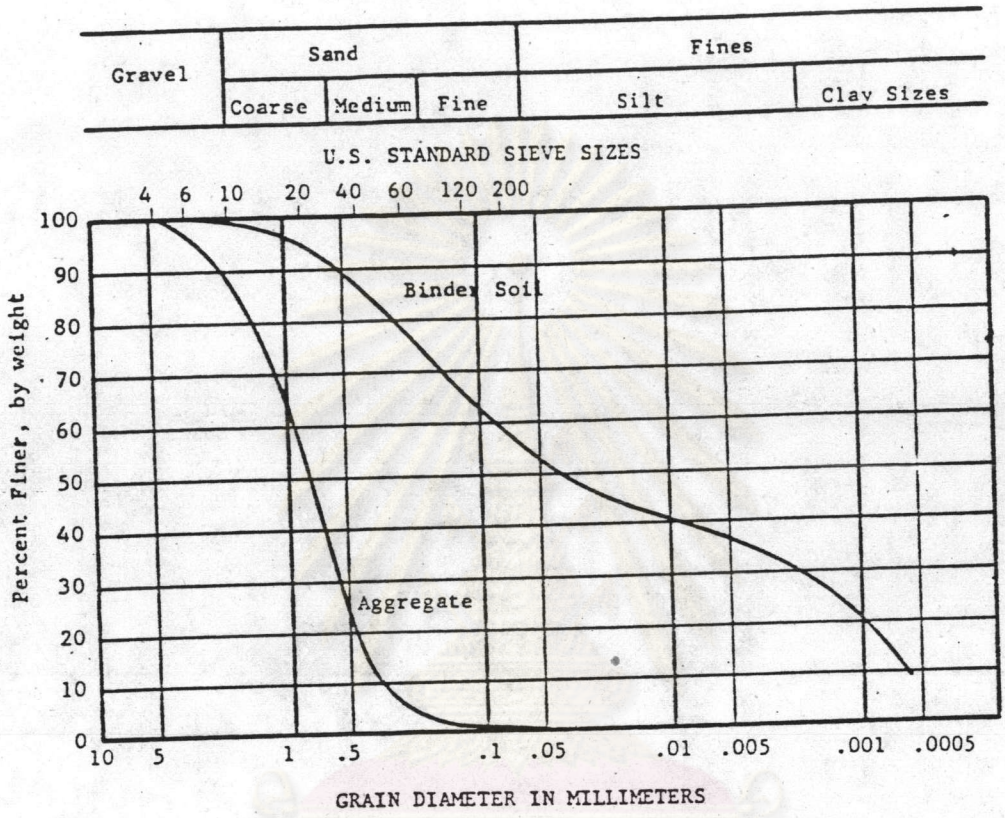
การทดลองที่ดีควรที่จะทำการประเมินประกอบกัน ทั้งการประเมินหาปริมาณแอสพัลต์โดยอาศัยคุณสมบัติของดิน และคุณสมบัติของผสมของแอสพัลต์ วิธีการทำการประสมประสานของทั้งสองกระบวนการ ได้แก่ วิธีการของฮวีม (Hveem Test) ของสถาบัน California ประกอบด้วยการทำการทดลอง Centrifuge Kerosene Equivalent (CKE) และการประเมินหาค่า Relative Stability โดยควบคุมปริมาณของช่องว่างอากาศ (Air Void) ด้วย

2.2 <u>คุณลักษณะของความแข็งแรงของ Soil-Aggregate Mixture</u>

จากความต้องการที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของดินในทางกายภาพ (Physical Properties) ของดิน โดยเฉพาะความต้องการความสามารถในการรับน้ำหนักที่สูงขึ้น วิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เป็นการผสมดินต่างชนิดกัน เพื่อสร้างความแข็งแรงให้สูงขึ้น เป็นวิธีการง่าย ๆ และราคาถูก แต่มีปัญหาที่ว่าสัดส่วนในการผสมผสานนั้นควรจะประมาณสักเท่าใด ดังนั้นทั้ง Eugene A Miller และ George F. Sowers[17] จึงพยายามศึกษาคุณลักษณะที่เกิดขึ้นภายหลังการผสมผสานระหว่าง Course และ Fine Grained Soil ที่สัดส่วนต่าง ๆ

2.2.1 <u>ทฤษฎีการจัดลัดส่วนของส่วนผสม</u>

คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องถึงความแข็งแรงเห็นจะได้แก่ คุณสมบัติความแน่นของดิน (Density) จากผลการทดลองพบว่า ความแข็งแรงของดินจะสูงขึ้น เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการอัดตัวลดลง และช่องว่างภายใน (Void) ลดลงด้วย จากการควบคุมวิธีการบดอัดให้เหมือนเดิม ความแข็งแรงของดินจะใช้ค่าความหนาแน่นเป็นการเปรียบเทียบช่วย วิธีการที่จะทำให้ได้ค่าของความหนาแน่นสูงสุด มีด้วยกันสองวิธี โดยวิธีการแรกคือกระบวนการจัดขนาดคละของวัสดุ ทั้งนี้จะทำการจัดขนาดต่าง ๆ ของวัสดุให้มีปริมาณเพียงพอเพื่อจัดตัวให้เข้ากันได้พอดี และให้มีช่องว่างน้อยที่สุด ผลที่ได้ก็คือ Solid Mass ทั้งนี้หาก



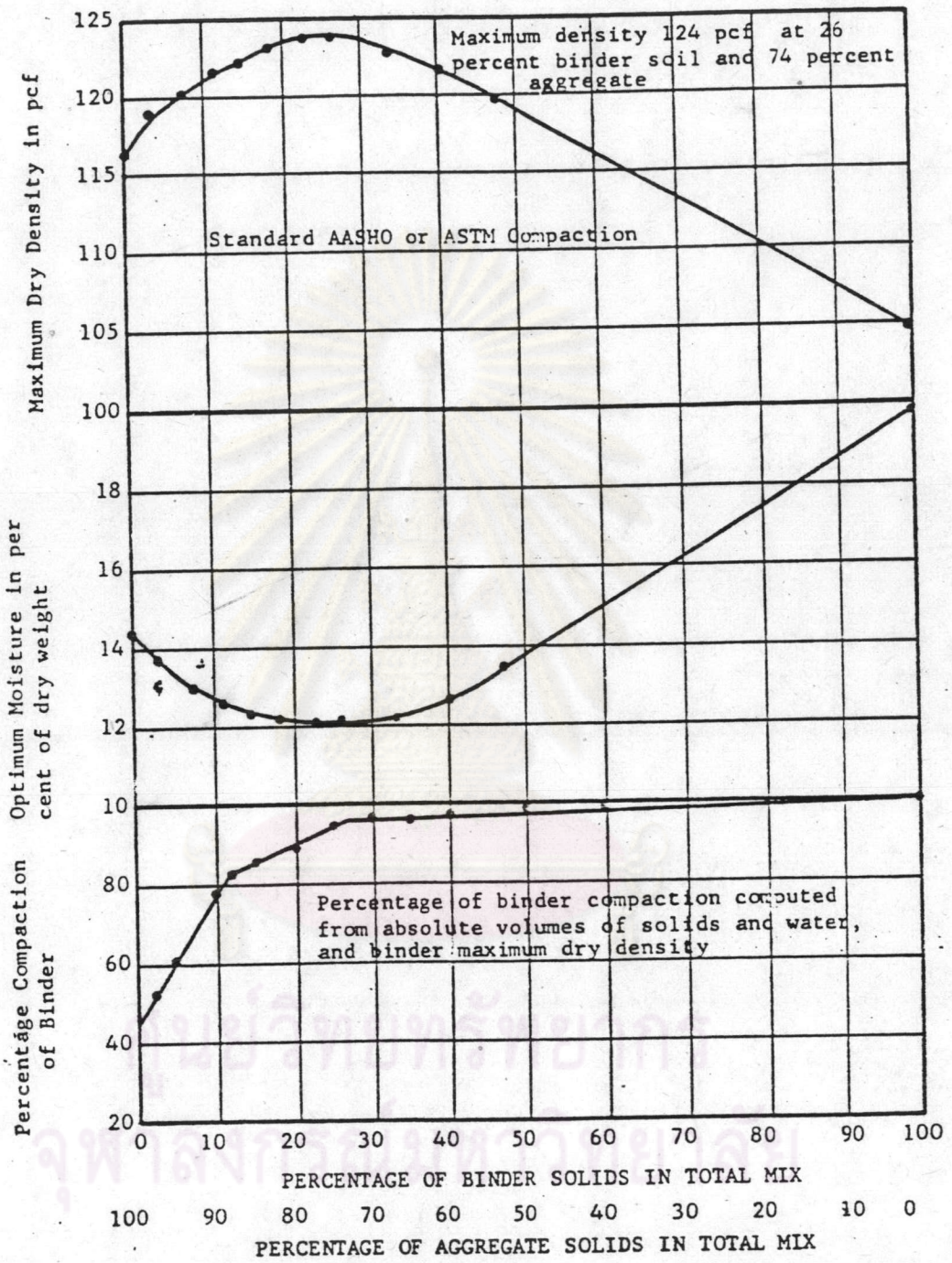
Soil	Liquid Limit	Plasticity Index	Specific Gravity of Solids	Remarks
Aggregate	NP	NP	2.71	Angular to subangular quartz, some mica.
Binder	31	6	2.68	Red inorganic sandy clay

ภาพที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมขนาดใหญ่ (Aggregate) และขนาดเล็ก (Binder Soil) (Miller and Sowers, 1972 : 17)

การจัดขนาดดังกล่าวจำเป็นจะต้องคำนึงถึงรูปร่างประกอบด้วย ในการวิจัยครั้งนี้จะได้กล่าวถึงปริมาณน้ำที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ความหนาแน่นสูงสุด แต่จะเน้นถึงเรื่องสัดส่วนและชนิดของวัสดุเท่านั้น วิธีการที่สอง คือ การผสมผสานระหว่าง Aggregate กับ Binder ซึ่งจะประกอบด้วยดินที่มีเม็ดขนาดใหญ่ และดินเม็ดละเอียด จุดประสงค์ก็เพื่ออุดช่องว่างระหว่างวัสดุดินขนาดใหญ่ให้แน่นพอจับตัวกันเป็นก้อนแข็ง การทดลองนี้กระทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากต้องอาศัยการ Trial and error เข้าช่วย ทำให้การทดลองค่อนข้างยุ่งยาก

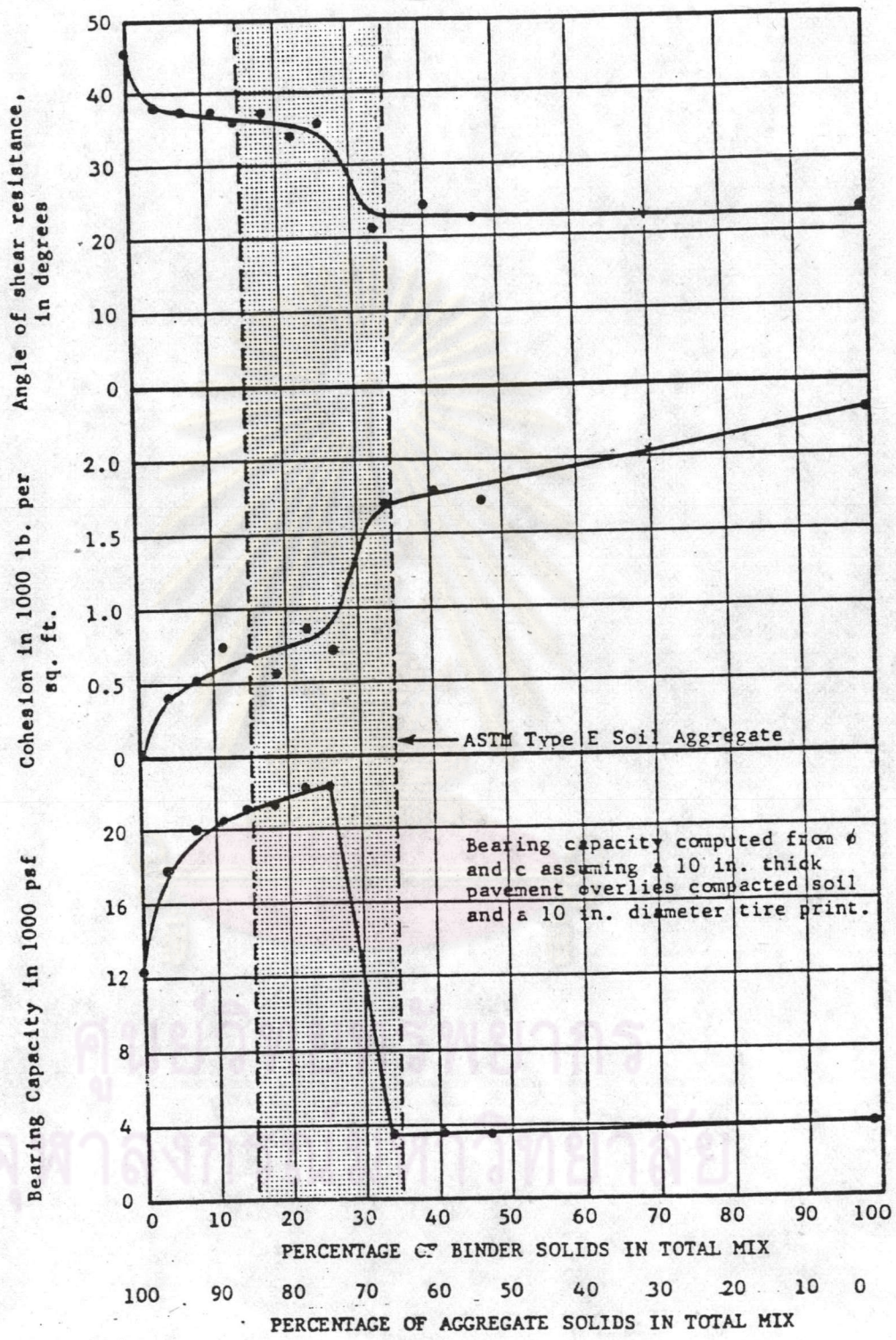
การทดลองหาสัดส่วนผสมของดินขนาดโตและดินเม็ดละเอียด โดย Eugene A. miller กับ George F. Sowers เริ่มโดยการนำดินมาสองชนิด ชนิดแรกนำมาจาก Cartersville รัฐ Georgia เป็นดินทรายครอทซ์ขนาดโต มีแร่ธาตุแบไรต์ (Barrite) และไมก้า (Mica) ผสมอยู่น้อยมาก มีความถ่วงจำเพาะ 2.71 ดินอีกชนิดหนึ่งเป็นดินเหนียวประเภท low plasticity นำมาจาก Atlanta Area มีความถ่วงจำเพาะ 2.68 การบดอัดทำตามวิธี ASTM D. 698-42T การผสมสัดส่วนจะกระทำตั้งแต่ 100 เปอร์เซนต์ Aggregate, 0% เปอร์เซนต์ Binder ไปจนถึง 0 เปอร์เซนต์ Aggregate, 100 เปอร์เซนต์ Binder โดยน้ำหนัก ทั้งนี้จะทำการเตรียมตัวอย่างที่ความแน่นสูงสุดทุกตัวอย่าง เพื่อนำมาทดลอง Triaxial Shear Test ต่อไป พร้อมทั้งประเมินหาค่า Angle of Internal Friction, ค่า Cohesion และค่า Bearing Capacity

ผลการทดลองพบว่า จากภาพที่ 2.7 จะได้ความหนาแน่นสูงสุดที่ 26 เปอร์เซนต์ Binder และ 74 เปอร์เซนต์ Aggregate โดยน้ำหนัก จะได้ค่าประมาณ 148 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต ในช่วง 0-26 เปอร์เซนต์ Binder ค่าความหนาแน่นจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ และจากนั้นก็จะลดต่ำลงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อผสม Binder มากขึ้น Binder มิได้ทำหน้าที่อุดช่องว่างแล้ว กลับจะทำให้ Aggregate ลอยตัวอยู่ใน Binder และจากภาพที่ 2.8 จากช่วง 0-26 เปอร์เซนต์ Binder ค่าของ Angle of Shear Resistant จะลดลง และค่า Cohesion กลับจะสูงขึ้น และที่ 26-33 เปอร์เซนต์ Binder ค่าของ Angle of Shear Resistant จะลดลงอย่างรวดเร็วมาก และค่า Cohesion จะกลับสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอีกเช่นกัน แต่ในช่วง 33 เปอร์เซนต์ Binder ค่า Angle of Shear Resistant ค่อนข้าง จะคงที่ และค่า Cohesion จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ จากภาพที่ 2.9 จะแสดงภาพจำลองการจัดตัวของ สัดส่วนผสมระหว่าง Aggregate กับ Binder ภาพที่ 2.9a แสดงเฉพาะที่มีวัสดุ Aggregate จากภาพที่ 2.9b เป็นช่วง 10-12% Binder ปรากฏว่าจะคงมีช่องว่าง

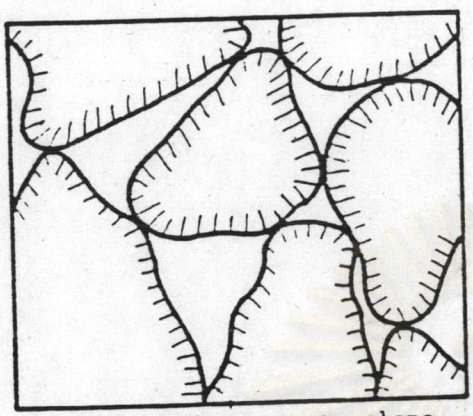


ภาพที่ 2.7 แสดงค่าความหนาแน่นสูงสุด ความชื้นสูงสุด และค่าเปอร์เซนต์การบดอัดของมวลรวมขนาดเล็ก สำหรับแต่ละอัตราส่วนของมวลรวมขนาดใหญ่และเล็ก

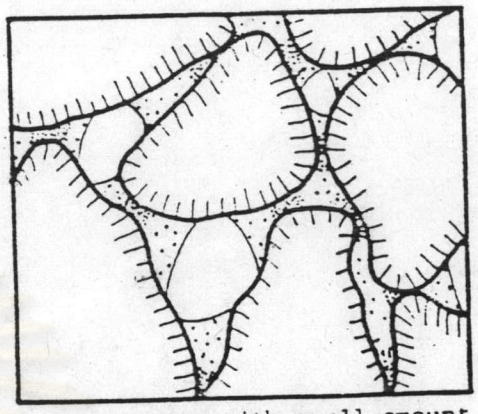
(Miller and Sowers, 1972 : 19)



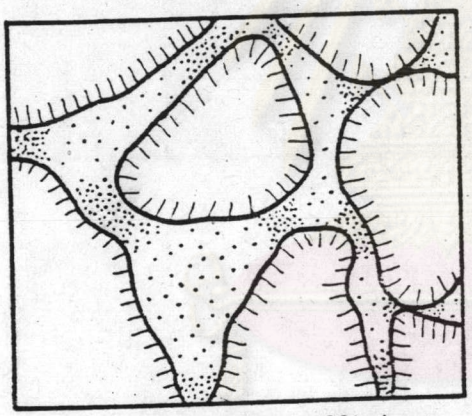
ภาพที่ 2.8 แสดงค่าความแข็งแรงพร้อมประเมินหาค่า Bearing Capacity ของ Soil-Aggregate (Miller and Sowers, 1972 : 22)



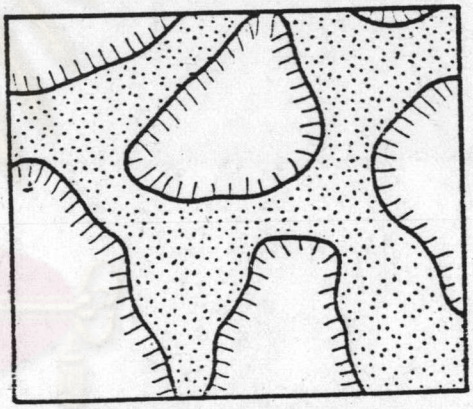
a. Compacted aggregate alone with grain to grain contact and high internal friction.



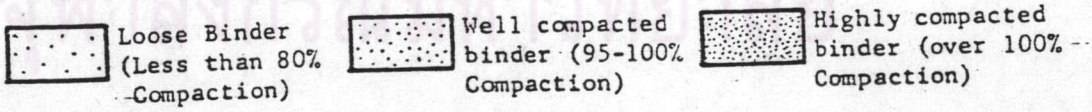
b. Aggregate with small amount of binder. Binder highly compacted between contact points of aggregate, and loose in voids. Some open voids and grain to grain contact persists.



c. Aggregate with sufficient binder to fill voids loosely. Binder highly compacted between contac· points of aggregate, loose in between.



d. Aggregate floating in a matrix of uniformly well compacted binder.



ภาพที่ 2.9 แสดงการจำลองโครงสร้างภายในของ Soil-aggregate ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

(Miller and Sowers, 1972 : 21)

Binder ยังไม่เต็มพอจะจับตัวกันแบบหลวม จะอาศัยค่าของความเสียดทานระหว่างผิวเข้าช่วย การยึดเกาะ ภาพที่ 2.9c เป็นช่วงสัดส่วนผสม 12-26 เปอร์เซนต์ Binder วัสดุจะอัดตัวกันแน่น ช่องว่างจะมีน้อยมาก ภาพที่ 2.9d สัดส่วนผสมจะมีค่า Binder มากกว่า 33 เปอร์เซนต์ขึ้นไป ซึ่ง Aggregrate จะลอยตัวอยู่ใน Binder เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Aggle of Shear Resistance กับค่า Cohesion จะได้ค่าความแข็งแรงที่วัดเป็นค่า Bearing Capacity โดยกำหนดให้น้ำหนักบรรทุกกระจายอย่างสม่ำเสมอ พร้อมกระจายสู่ข้างล่างเป็นรูปสามเหลี่ยมจากกราฟภาพที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกสัดส่วนผสม 0-26 เปอร์เซนต์ Binder ค่า Bearing Capacity จะเพิ่มอย่างรวดเร็วจนถึงสูงสุด และจากนั้นที่สัดส่วนผสม 26-33 เปอร์เซนต์ Binder ค่า Bearing Capacity จะลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลง Angle of Shear Resistance ที่เป็นไปอย่างรวดเร็วช่วงแคบ ๆ วัสดุอัด แทรก (Binder) จับตัวกันได้ดี อัดตัวลงในช่องว่างทำให้สูญเสียการขัดสีระหว่าง Grains ของ Aggregate จากนั้นในช่วงที่มี Binder มากกว่า 33 เปอร์เซนต์ ค่า Bearing Capacity จะค่อย ๆ เริ่มเพิ่มขึ้นทีละน้อยอีกครั้ง

2.3 การปรับปรุงแอสฟัลต์ด้วยสารโพลีเมอร์

เนื่องจากสภาพของแอสฟัลต์แต่ละแห่งมีคุณสมบัติพื้นฐานที่แตกต่างกัน จึงเป็นการยากในการควบคุมคุณสมบัติให้ได้ตามข้อกำหนด ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติแอสฟัลต์ โดยใช้สารบางอย่างเข้าช่วย โดยส่วนใหญ่จะเป็นสารโพลิเมอร์ และเมื่อทำการปรับปรุงแอสฟัลต์โดยผสมสารโพลีเมอร์ ส่วนผสมที่ได้นี้เรียกว่า Bitulastic และหากนำส่วนผสมนี้ไปทำเป็นแอสฟัลต์คอนกรีต จะเรียกส่วนผสมแอสฟัลต์นี้ว่า Compolastic ดังนั้น ในการปรับปรุงแอสฟัลต์จึงพอสรุปองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

1. แหล่งของวัสดุแอสฟัลต์
2. ประเภทของสารโพลีเมอร์
3. ส่วนผสมที่ได้จากการผสม
4. วิธีการทำการผสม

Ralph C.G. HAAS, Elaine Thomson, Frank Meyer และ G.Robert Tessier[18] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับบทบาทของสารผสมเพิ่มในแอสฟัลต์ และได้ให้คำจำกัด

ความของสารผสมเพิ่ม (Additive) คือ วัสดุซึ่งใช้เติมหรือผสมกับแอสฟัลต์ ก่อนกระบวนการทำส่วนผสมร้อนของแอสฟัลต์ หรือระหว่างกระบวนการผสมส่วนผสมร้อน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ ส่วนขยาย (Extender) คือ สารที่จะเปลี่ยนส่วนประกอบทางเคมี เพื่อปรับปรุงพฤติกรรมบางอย่างเพิ่ม รายงานของเขามีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดขอบเขต และลักษณะที่เหมาะสมกับวัสดุและงาน พร้อมประเมินความเหมาะสม และหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งาน ดังนั้นจึงพอจะสรุปวัตถุประสงค์ของรายงานได้ดังนี้

1. รวบรวมข้อมูลที่มีอยู่ทั้งหมด เพื่อนำมาใช้ประโยชน์
2. ชี้ให้เห็นปัญหาที่มักจะเกิดขึ้น
3. แนะนำคุณลักษณะของสารผสมเพิ่ม
4. ประเมินค่าความสามารถที่ได้
5. ประเมินค่าปริมาณของสารที่มีเพียงพอความต้องการหรือไม่
6. เสนอแนะผลการวิจัยใหม่ ๆ

นอกจากนี้ยังได้ทำการสรุปสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 2.27 และตารางที่ 2.28 แสดงการหาแนวทางการแก้ไขปัญหา

การประเมินหาแนวทางการเลือกใช้สารผสมเพิ่ม ดังแผนภาพที่ 2.10 ส่วนความต้องการใช้และปริมาณการใช้สารเหล่านี้ ได้ทำการสรุปแนวทางตามตารางที่ 2.29 และตาราง ที่ 2.30 เป็นการแสดงอัตราการใช้ และปริมาณความต้องการในประเทศคานาดา และสหรัฐอเมริกา

Dallas N. Little[19] ได้ทำการสรุปถึงแนวทางการประเมินคุณภาพของสารผสมเพิ่มไว้ว่า การที่ไปเพิ่มความแข็งให้กับส่วนผสมแอสฟัลต์ ทั้งนี้จะมองในแง่ของการสร้างเสถียรภาพ (Stability) พบว่า หากมีมากเกินไปกลับจะไปทำการลดคุณสมบัติของการยืดหยุ่น และเป็นเหตุให้เพิ่มโอกาสในการแตกร้าวของถนนได้ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงได้ทำการสรุปเป็นพฤติกรรมไว้ว่า

ก. การเพิ่มค่าดัชนีความแข็ง (Stiffness) ที่อุณหภูมิสูงจะเป็นการช่วยลดการเกิดเป็นหลุมหรือร่องล้อบนถนน

ข. การลดค่าดัชนีความแข็ง (Stiffness) ที่อุณหภูมิต่ำจะเป็นการช่วยลดการแตกร้าวของถนนที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 2.27 แสดงปัญหาที่มักจะเกิดขึ้นพร่อมสาเหตุของปัญหาของถนน

ปัญหา	สาเหตุของปัญหา								
	ชนิดของตัวประสาน (Type of Binder)	ชนิดของมวลรวม (Nature of Aggregate)	การออกแบบส่วนผสม (Mix Design)	การควบคุมการทำส่วนผสม (Construction control)	กระบวนการก่อสร้าง (Construction)	สภาพแวดล้อม (Environment)	ปัญหาจากการจราจร (Traffic)	การออกแบบถนน (Pavement Design)	หมายเหตุ
การหลุดลอก (Stripping)	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
การแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking)	✓					✓			
การเกิดร่องล้อ (Rutting)	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
การแข็งตัวของแอสฟัลต์ (Hardening of Binder)	✓		✓	✓	✓	✓			
การเยิ้ม (Flushing)			✓	✓	✓	✓	✓		
การแยกตัวของมวลรวม (Segregation)				✓	✓				

ตารางที่ 2.27 (ต่อ)

ปัญหา	สาเหตุของปัญหา								
	ชนิดของตัวประสาน (Type of Binder)	ชนิดของมวลรวม (Nature of Aggregate)	การออกแบบส่วนผสม (Mix Design)	การควบคุมการทำส่วนผสม (Construction	กระบวนการก่อสร้าง (Construction control)	สภาพแวดล้อม (Environment)	ปัญหาจากการจราจร (Traffic)	การออกแบบถนน (Pavement Design)	หมายเหตุ
การแตกร้าวเพราะบูผิวทางใหม่บนผิวทางเดิม (Reflection Crockg)						✓		✓	
การนำแอสฟัลต์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้อีก (Recycled Mixed)	✓		✓	✓					

ตารางที่ 2.28 แสดงถึงปัญหาของถนนและแนวทางแก้ไข

ปัญหา	ควรที่จะใช้ส่วนผสมเพิ่มหรือส่วนเพิ่มขยาย จริงหรือไม่	การปรับปรุงหรือแก้ไขที่ควรกระทำ
การหลุดลอก (Stripping)	ควรใช้สารประเภท Anti-strip agents	ทำการควบคุมช่องว่างอากาศให้ดีขึ้น ให้เป็นไปตามข้อกำหนด
การแตกร้าวเนื่องจากความร้อน(Thermal cracking)	ควรใช้สารประเภทซัลเฟอร์ หรือแอสฟัลต์ชนิดอ่อน	ทำการเลือกสารเชื่อมประสานที่อ่อนตัวกว่า
การเกิดร่องล้อ (Rutting)	ควรใช้สารประเภทซัลเฟอร์	การเลือกวัสดุและการออกส่วนผสมให้เป็นไปตามข้อกำหนด
การแข็งตัวของแอสฟัลต์ (Hardening of Binder)	ควรใช้สารประเภทแอนตี้-ออกซิแด้นท์	เพิ่มการควบคุมช่องว่างอากาศให้ดี รวมถึงการควบคุมการผสมให้ทั่วถึง
การเยิ้ม (Flushing)	ไม่เกี่ยวข้องโดยตรง	ควรทำการออกแบบเลือกส่วนผสมให้เหมาะสม
การแยกตัวของมวลรวม (Segregation)	ยังไม่มีข้อมูล	ควบคุมการทำงานเครื่องผสมให้ดี
การแตกร้าวเพราะการปูผิวทางใหม่บนผิวทางเดิม (Reflection Grades)	ควรใช้สารประเภทยางผสมขี้เถ้าและสารโพลีเมอร์	ทำการทดลองและสร้างความชำนาญ
การนำแอสฟัลต์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้อีก (Recycled Mixed)	การใช้สารประเภท Rejuverating Agent	เลือกแอสฟัลต์ชนิดอ่อนและเพิ่มมวลรวมใหม่เข้าผสมช่วย

ตารางที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการใช้และปริมาณการใช้สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่ม	การประเมิน
แอนตี้ออกซิแด้นท์ Finti-oxidants	คาดว่าปริมาณการใช้เพียงพอต่อความต้องการ
แอนตี้สตริปปิ้ง Anti-stripping Agent	สารประเภทนี้มีหลายประเภทและมีผู้นิยมใช้อยู่มาก ไม่มีปัญหาในการขาดแคลน ปริมาณการใช้ยังไม่มีแนวโน้มที่จะเพิ่ม
Foam suppressive โพลีเมอร์ Polymers	ผลิตภัณฑ์เริ่มมีปริมาณการใช้สูงขึ้น ยังไม่ปรากฏปัญหาในการใช้ ปริมาณใช้มีจำนวนมากสุด อีกทั้งปริมาณการใช้สูงขึ้นเรื่อย ๆ ความต้องการสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อุตสาหกรรมผลิตสารนี้ต้องเพิ่มขึ้น
Racycling agents	ถูกนำมาจากแหล่งผลิตน้ำมันดิบโดยทั่วไป จึงไม่มีปัญหาการขาดแคลน
ซัลเฟอร์ Sulphur	คาดว่าจะมีปริมาณเพียงพอแก่การใช้จนถึงปี ค.ศ.1990

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.30 สรุปการประเมินอัตราการใช้สารผสมเพิ่ม พร้อมทั้งปริมาณความต้องการของประเทศแคนาดา และ สหรัฐอเมริกา

สารผสมเพิ่ม	อัตราการใช้	ปริมาณความต้องการ (ตันต่อปี)	หมายเหตุ
แอนตี้ออกซิแด้นท์ Anti-oxidants	-	-	ความต้องการใช้น้อยมาก
แอนตี้สตริปปิ้ง Anti-stripping Agent	0.1-1.0% โดยน้ำหนัก	11,250-112,500	
Foam suppressive	1/5000 ส่วนของแอสพัลต์	2,500	
โพลีเมอร์ Polymers	3% โดยน้ำหนักของแอสพัลต์	6,750,000	
Recycling agents	3% โดยน้ำหนักของแอสพัลต์	9,000,000	รวมการทำส่วนผสมร้อนทั้งหมด
ซัลเฟอร์ Sulphur	2.5%โดยน้ำหนักของส่วนผสม	1,875,000	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.31 แสดงคุณลักษณะในด้านต่าง ๆ ของสารโพลีเมอร์แต่ละชนิด

ชนิดของสารเคมี	กระบวนวิธีการ	ตัวอย่างชื่อเฉพาะ		วิธีการปรับปรุง	ผลจากการใช้งาน	เครื่องมือที่ต้องการ	ข้อควรคำนึง	ประเทศที่นิยมใช้
		ผลิตภัณฑ์	กระบวนการ					
Natural Latex	Ckip seals Slurry seals	- -	Neoflex Ralumac scalgum	-ปรับปรุงยางอีมัลชั่น (Aaphalf-latex) -ปรับปรุงยางอีมัลชั่น (Asphalf-latex)	-มวลรวมหลุดร่อนยากขึ้น -เพิ่มการยึดเกาะของส่วนผสม -ทนต่อสภาพอุณหภูมิต่ำ -แข็งตัวเร็ว	- เครื่องเก็บเอกสาร latex-cmulsion -เครื่องเก็บเอกสาร latex-cmulsion	- -ใช้เครื่องเฉพาะของงาน Surry Scal	ฝรั่งเศส,แคนาดา สหรัฐอเมริกา, ยุโรป
Polychloropreme	-Ctrip scals -แคสฟัลต์คอนกรีต	Neoprene	-	-ปรับปรุงยางอีมัลชั่นได้ทั้งก่อนและหลังกระบวนการ Emulsification -การทำส่วนผสมร้อน (Hot mixtures) ทำการผสมเมื่อถึงอุณหภูมิกำหนด	-ช่วยเพิ่มค่าการยืดหยุ่นและค่าการยึดเหนี่ยว -ลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	เครื่องผสมและเก็บสาร Latex cmulsion	-	สหรัฐอเมริกา
Styrene-butadiene rubber (SBR)	-Chip scals -แอสฟัลต์คอนกรีต	-Downright -Polysar -Texcrete -Ultrappave	- - - -	-ปรับปรุงยางอีมัลชั่น -ทำส่วนผสมร้อน ผสมเมื่อถึงอุณหภูมิกำหนด	-ปรับปรุงสภานการยืดหยุ่นและค่าการยึดเหนี่ยว -ทนต่อสภาพอุณหภูมิต่ำ	เครื่องผสมและเก็บสาร Latex Emulsion	-	สหรัฐอเมริกา

ตารางที่ 2.31 (ต่อ)

ชนิดของสารเคมี	กระบวนวิธีการ	ตัวอย่างชื่อเฉพาะ		วิธีการปรับปรุง	ผลจากการใช้งาน	เครื่องมือที่ต้องการ	ข้อควรคำนึง	ประเทศที่นิยมใช้
		ผลิตภัณฑ์	กระบวนการ					
Styrene-butadiene-Styrene (SBS)	-Chip scals -แอสฟัลต์คอนกรีต -แอสฟัลต์คอนกรีต จาก opeu-Crode	-Cariflex -Europrene -Firaprene -Kraton	-Bitulastic -Caribit -Styrelf	โพลีเมอร์จะผสมในแอสฟัลต์โดยการคนเข้าช่วย	-ปรับปรุงสภาพการยืดหยุ่น -ปรับปรุงด้านการเสียรูปร่าง -ทนต่อสภาพอุณหภูมิต่ำ	เครื่องผสม	-	ยุโรป, สหรัฐอเมริกา
โพลีเอททีลีน Polyethylene โพลีโพรพิลีน (โพลิเมอร์)	แอสฟัลต์คอนกรีต	-	Novophalt	ทำการผสมโดยการคนเข้าช่วย หรือเพิ่มแรงเฉือน	-เพิ่มค่าเสถียรภาพ -เพิ่มดัชนีความแข็ง (Stifness index) -เพิ่มความต้านทานการเสียรูปร่าง	เครื่องผสมสารชนิดพิเศษ	อุณหภูมิของการบดอัดจะต้องสูงกว่าของแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา	ยุโรป
เอททีลีนไวนีลอะซิเทค Ethylene-Vinyl acctate (EVA) (โพลิเมอร์)	-แอลฟัลต์คอนกรีต Oper-graded friction ceurse	EVA Elvax	-	ผสมโพลิเมอร์ลงในแอสฟัลต์	-ปรับปรุงความต้านทานการเสียรูปร่าง -ปรับปรุงค่าความเครียดและความเค้น	-เครื่องผสมสารโพลิเมอร์กับแอสฟัลต์	-	ยุโรป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.31 (ต่อ)

ชนิดของสารเคมี	กระบวนวิธีการ	ตัวอย่างชื่อเฉพาะ		วิธีการปรับปรุง	ผลจากการใช้งาน	เครื่องมือที่ต้องการ	ข้อควรคำนึง	ประเทศที่นิยมใช้
		ผลิตภัณฑ์	กระบวนการ					
เอททีทีนโพรพิลีน Ethylene-propylene rubbers (EFOM) (โพลิเมอร์)	แอสฟัลต์คอนกรีต	-	Olexobit	ผสมโพลิเมอร์ลงในแอสฟัลต์	-ปรับปรุงความต้านทานการเสียรูปร่าง -ทนต่อสภาพอุณหภูมิต่ำ	-	-	ยุโรป
Asbestos (Fibers)	-แอสฟัลต์คอนกรีตของ Overlays	-	-	ผสมสารไฟเบอร์ขณะทำการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต	-เพิ่มความต้านทานรอยแตก -ทนต่อการโค้งงอ	-	-	ยุโรป
โพลีเอสเตอร์ (Pelyester)	-แอสฟัลต์คอนกรีตของ Overlays	Bonifiber	-	ผสมสารไฟเบอร์ขณะทำการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต	-เพิ่มความต้านทานรอยแตก -ทนต่อการโค้งงอ	-	ผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 280 องศาฟาเรน-ไฮต์	สหรัฐอเมริกา
โพลีโพรพีลีน	-แอสฟัลต์คอนกรีตของ Overlays	Fiberpave	-	ผสมสารไฟเบอร์ขณะทำการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต	-เพิ่มความต้านทานรอยแตก -ทนต่อการโค้งงอ	เครื่องมือชนิดพิเศษ	ผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 280 องศาฟาเรน-ไฮต์	สหรัฐอเมริกา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.31 (ต่อ)

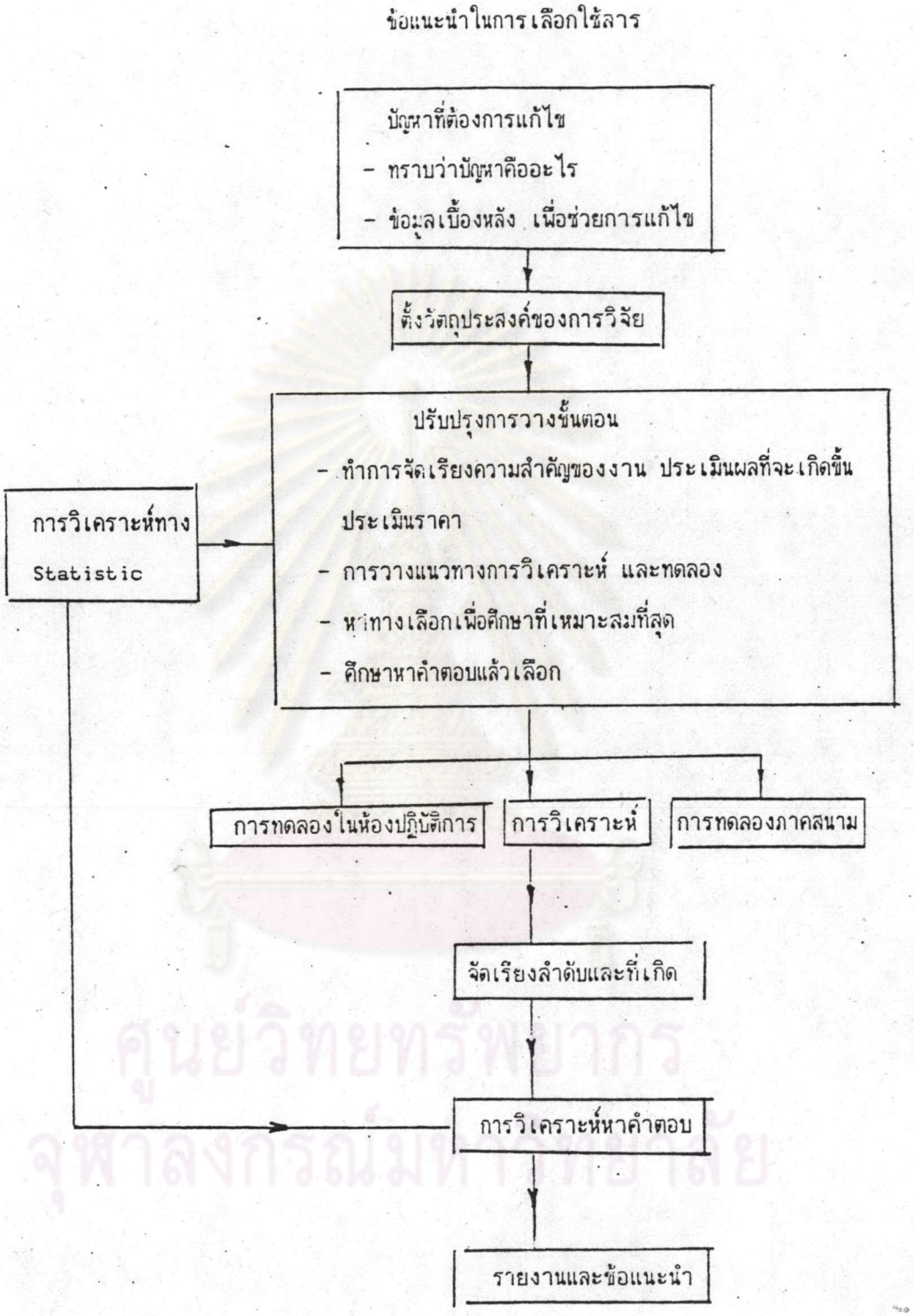
ชนิดของสารเคมี	กระบวนวิธีการ	ตัวอย่างชื่อเฉพาะ		วิธีการปรับปรุง	ผลจากการใช้งาน	เครื่องมือที่ต้องการ	ข้อควรคำนึง	ประเทศที่นิยมใช้
		ผลิตภัณฑ์	กระบวนการ					
Rockwool (ไฟเบอร์)	Open-graded friction course	Inorphil	-	ผสมสารไฟเบอร์ขณะทำการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต	-เพิ่มความต้านทานรอยแตก -เพิ่มความต้านทานเกิด Ravelling	เครื่องมือชนิดพิเศษ	ผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 280 องศาฟาเรนไฮต์	เยอรมันนี, ฝรั่งเศส
Steel fiber (ไฟเบอร์)	แอสฟัลต์คอนกรีต Oveslays	-	-	ผสมสารไฟเบอร์ขณะทำการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต	เพิ่มค่าเสถียรภาพและความเครียด แรงดึง	เครื่องมือชนิดพิเศษ	ผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 280 องศาฟาเรนไฮต์	ยุโรป
Complex of Metal and organic compounds	-แอสฟัลต์คอนกรีต -Bane conrse -Cold mixes -Chip seats	Chemerete	-	ให้ละลายในแอสฟัลต์ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงความแข็งให้	-เพิ่มค่าเสถียรภาพ, ดัชนีความแข็งและค่าโมดูลัส -เพิ่มความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ -เพิ่มอายุการใช้ภายหลังการบ่ม	อุปกรณ์ลำเลียงวัสดุลงเครื่องผสม	-ส่วนผสมจะต้องทำงานได้ง่าย -การบ่มจะต้องขึ้นกับปริมาณช่องว่างภายในส่วนผสม	สหรัฐอเมริกา, ยุโรป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.31 (ต่อ)

ชนิดของสารเคมี	กระบวนวิธีการ	ตัวอย่างชื่อเฉพาะ		วิธีการปรับปรุง	ผลจากการใช้งาน	เครื่องมือที่ต้องการ	ข้อควรคำนึง	ประเทศที่นิยมใช้
		ผลิตภัณฑ์	กระบวนการ					
Mettal –amines complex	–แอสฟัลต์คอนกรีต	Carstab Ba–Zooo	– –	ผสมลงในแอสฟัลต์เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของมวลรวมกับแอสฟัลต์	–ลดผลกระทบจากความชื้น –ปรับปรุงอายุการใช้งานสูงขึ้น	อุปกรณ์ลำเลียงวัสดุลงเครื่องผสม	–ส่วนผสมจะต้องทำงานได้ง่าย –การบ่มจะต้องขึ้นกับปริมาณช่องว่างภายในส่วนผสม	สหรัฐอเมริกา
Natural Latex	–Chip Seals	–	Neoflex	ปรับปรุงยางอีมัลชั่น (Asphalt–Latex)	การหลุดของมวลรวมยากขึ้น			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.10 แผนผังแนวทางการเลือกใช้สาร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค. การลดค่าดัชนีความแข็ง (Stiffness) ช่วยให้การทำงานสะดวกและง่ายขึ้น

ง. การปรับปรุงดัชนีความแข็ง (Stiffness) ให้พอเหมาะ เป็นการช่วยการยึดเกาะของแอสพัลต์ดีขึ้น ป้องกันการซึมเข้าของน้ำได้ดี

J.A. Epps[20] ได้ทำการสรุปแนวทางของการทำ Modified Asphalt ว่าขึ้นกับประเภทของแอสพัลต์ หากแอสพัลต์มีการจับตัวในลักษณะ Aromaticity มาก จะทำให้การผสมให้เข้ากันมากขึ้นด้วย การทดสอบที่มักจะกระทำเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของ Modified Asphalt คือ

ก. ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physic)

ข. ตรวจสอบคุณสมบัติทางความข้นเหลว (Consistency)

นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบด้วยวิธีพิเศษอื่น ๆ ได้แก่ การทดสอบผ่านเครื่อง Rheometrics Mechanical Spectrometer และการทดสอบผ่านเครื่อง Nuclear Magnetic Resonance เป็นต้น

กระบวนการการปรับปรุงแอสพัลต์ (Modified Asphalt) R.L. Terrel และ J.C. Walter ได้สรุปเป็นสูตรไว้ว่า

Modified Binder + Quality Aggregate + Quality Construction = Modified Process

จากการศึกษาของเขาทั้งสอง ทำให้สรุปมาเป็นคุณลักษณะของการปรับปรุงแอสพัลต์ด้วยสารชนิดต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.31

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Joe W. Botton, Sallas N. Little, Yonngsoo Kim, และ Jamil Ahmed[21] ได้ร่วมกันทำการศึกษาหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพการใช้วัสดุในการทำถนน พร้อมทั้งหาแนวทางการปรับปรุงคุณสมบัติการไหล (Rheological), คุณสมบัติการยึดเกาะ (Adhesive) ลดการแตกร้าวในแอสฟัลต์คอนกรีต การทดสอบที่มักจะเกี่ยวข้องจึงประกอบด้วย การหาค่าเสถียรภาพ (Stability), การบดอัด (Compactibility), การกระทำของน้ำ (Water susceptibility), ดัชนีความแข็ง (Stiffness), กำลังในการรับแรงดึง (Tensile Strength) และการทดสอบการล้า (Creep) แอสฟัลต์ที่ทำการทดลองนำมาจากแหล่งผลิตสองแห่ง คือ โรงกลั่นน้ำมันที่ชายฝั่ง รัฐเท็กซัส และโรงกลั่นน้ำมัน แคลลิฟ-ฟอร์เนีย โดยนำน้ำมันดิบมาจากซานโจควิน วอลเวลย์ ตารางที่ 2.32 แสดงองค์ประกอบของแอสฟัลต์ทั้งสองแหล่ง นอกจากนี้ยังทำการทดสอบ รวบรวมคุณสมบัติพื้นฐานแอสฟัลต์ และแอสฟัลต์ที่ผสมเพิ่มไว้ สารผสมเพิ่มที่นำมาทดสอบมีด้วยกัน 5 ชนิด คือ Latex (emulsified Styrene-butadiene rubber), Blockcopolymer rubber (Styrene-butadiene-styrene), EVA (Ethylene Vinylacetate), โพลีเอททีลีน (Polyethylene) และ Carbon black ผลการทดลองได้สรุปไว้ดังตาราง ที่ 2.33 และ 2.34 และได้ทำการทดสอบการดึงยืดของแอสฟัลต์เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความเครียดและความเค้น ปรากฏผลดังภาพที่ 2.11 การทดสอบจะกระทำกับสารผสมเพิ่ม Kraton ซึ่งเป็นสารประเภท SBS และสาร Novophalt เป็นชื่อเรียกของสารผสมระหว่างแอสฟัลต์กับ Polyethylene ภาพที่ 2.12 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า Resilient Modulus กับอุณหภูมิ

ทางสถาบันวิจัยงานวิศวกรรมของประเทศฝรั่งเศส ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์ เพื่อหาการประเมินค่าของอัตราการสร้างรอยแตกแยกในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีสูตรดังนี้

$$\log da/dN = \log A^* + n^* \log J^* \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.8$$

J^* ส.ป.ส. ของ Interpretation ของ Fatigue fracture

A^* ค่าที่ได้จากการลากตัดแกนราบ

n^* ค่าความชันของกราฟ

da/dN ค่าอัตราการเพิ่มของรอยแตก

Property	Texas Coastal Asphalts AC-5	AC-10	AC-20	San Joaquin Valley Asphalts AR-1000	AR-2000	AR-4000
Corbett Analysis[a]						
Asphaltenes, %	14.6	-	14.8	5.0	-	6.0
Saturates, %	13.4	-	10.1	13.7	-	10.0
Napthene Aromatics, %	41.5	-	30.3	36.1	-	33.5
Polar Aromatics, %	30.5	-	44.8	45.1	-	50.6
Rostler Analysis[b]						
Asphaltenes, %	19.1	22.4	-	9.2	10.3	-
Nitrogen Bases, %	21.0	18.6	-	37.7	42.0	-
First Acidaffins, %	22.0	14.1	-	16.8	9.0	-
Second Acidaffins, %	25.0	33.5	-	22.2	28.3	-
Paraffins, %	12.9	11.4	-	14.1	10.4	-
Refractive Index of Paraffins, n_D^{25}	1.4812	1.4820	-	1.4862	1.4907	-
Durability Rating[c]						
$(N+A_1)/(P+A_2)$	1.13	0.73	-	1.50	1.32	-
Sulphur, %	-	5.08	-	-	1.34	-

[a]ASTM D4124 (Precipitates asphaltenes using n-heptane)

[b]ASTM D2006 (Discontinued) (Precipitates asphaltenes using n-pentane)

[c]Durability decreases with increasing parameter value; 0.4 - 1.0 = Group I, "superior" durability; 1.0 - 1.2 = Group II, "good" durability; 1.2 - 1.5 = Group III; "satisfactory" durability (3)

ตารางที่ 2.32 แสดงถึงองค์ประกอบของแอสพัลต์ซีเมนต์จากเท็กซัส (Texas) และซานโจควินวอลเล่ย์ (San Joaquin Valley)

Test Value	AC-20	AC-5	AC-5 + 15% Microfil-8	AC-5 + 5% Dow Latex	AC-5 + 3% Dow Latex	AC-5 + 5% Kraton	AC-5 + 5% Elvax 150	AC-5 + 5% Polyethylene
Penetration@25°C(77°F) 100g, 5 sec[1]	75	194	152	114	140	103	176	105
Penetration@4°C(39°F) 100g, 5 sec	8	20	21	14	15	14	17	13
Penetration@4°C(39°F) 200g, 60 sec	28	63	66	54	57	49	54	49
Viscosity@60°C(140°F)[2]	2040	506	1850	5480	1960	6720	1160	2200
Viscosity@135°C(275°F)[3]	398	224	740	2780	1020	870	618	840
R&B Soft Point°C(°F)[4]	-	41(107)	-	63(145)	52(125)	59(138)	49(120)	52(126)
Ductility 4°C/25°C[5]	-	150+/150+	-/11	150+/150+	150+/150+	69/98	24/45	-/35
Viscosity Temp. Suscep.[6] (60°C-135°C)	3.52	3.42	2.99	3.52	2.78	2.44	2.94	2.98
Pen-Vis Number (PVN)[7]	0.6	-0.3	1.4	3.0	1.8	1.0	1.3	1.0
Pen Index[8]	-0.9	-1.0	-0.2	-0.5	-0.9	-0.2	1.2	-0.5
Penetration Ratio[9]	37	32	43	47	41	48	31	47

[1]AASHTO T53.

[2]AASHTO T202.

[3]AASHTO T201.

[4]AASHTO T49.

[5]AASHTO T51, 5cm/min.

[6]Temperature susceptibility = $(\log\log \eta_2 - \log\log \eta_1)/(\log T_2 - \log T_1)$, where η = viscosity in cP, T = absolute temperature.

[7]Determined from penetration at 77°F and viscosity at 275°F (McLeod, 1976).

[8]P.I. = $(20 - 500\alpha)/(1 + 50\alpha)$: $\alpha = [\log(pen_2) - \log(pen_1)]/(T_2 - T_1)$ or $[\log 800 - \log (pen_{25°C})]/T_{SP} - 25)$, where T = temperature, °C.

[9]100(Pen 39.2°F, 200 g, 60 s)/(Pen 77°F, 100 g, 5 s).

ตารางที่ 2.33 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของแอสพัลต์ซีเมนต์จากเท็กซัสทั้งที่ปรับปรุงด้วยสารผสมและไม่ได้ปรับปรุง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Test Value	AR-4000	AR-1000	AR-1000+15% Microfil-8	AR-1000+5% Dow Latex	AR-1000+3% Dow Latex	AR-1000+5% Kraton	AR-1000+5% Elvax 150	AR-1000+5% Polyethylene
Penetration@25°C(77°F) 100g, 5 sec[1]	57	146	109	72	83	134	161	98
Penetration@4°C(39°F) 100g, 5 sec	4	10	10	6	6	11	12	8
Penetration@4°C(39°F) 200g, 60 sec	16	46	43	29	28	43	50	41
Viscosity@60°C(140°F)[2]	2170	498	1640	10,100	4020	1720	1180	1295
Viscosity@135°C(275°F)[3]	256	128	398	3600	1190	431	434	399
R&B Soft Point°C(°F)[4]	-	41(106)	-	67(152)	54(130)	52/(126)	45(113)	47(117)
Ductility 4°C/25°C[5]	-	150+/130+	-/7	150+/144	36/131	141/83	-	-/26
Viscosity Temp. Suscep.(60-135°C)[6]	3.92	3.94	3.43	2.58	2.96	3.38	3.22	3.33
Pen-Vis Number[7]	-1.4	-1.6	-0.1	2.5	1.2	0.3	0.5	-0.2
Pen Index[8]	-2.0	-2.0	-1.4	-1.6	-1.9	-1.6	-1.9	-1.6
Penetration Ratio[9]	28	32	39	40	34	32	31	37

[1] AASHTO T53.

[2] AASHTO T202.

[3] AASHTO T201.

[4] AASHTO T49.

[5] AASHTO T51, 5 cm/min.

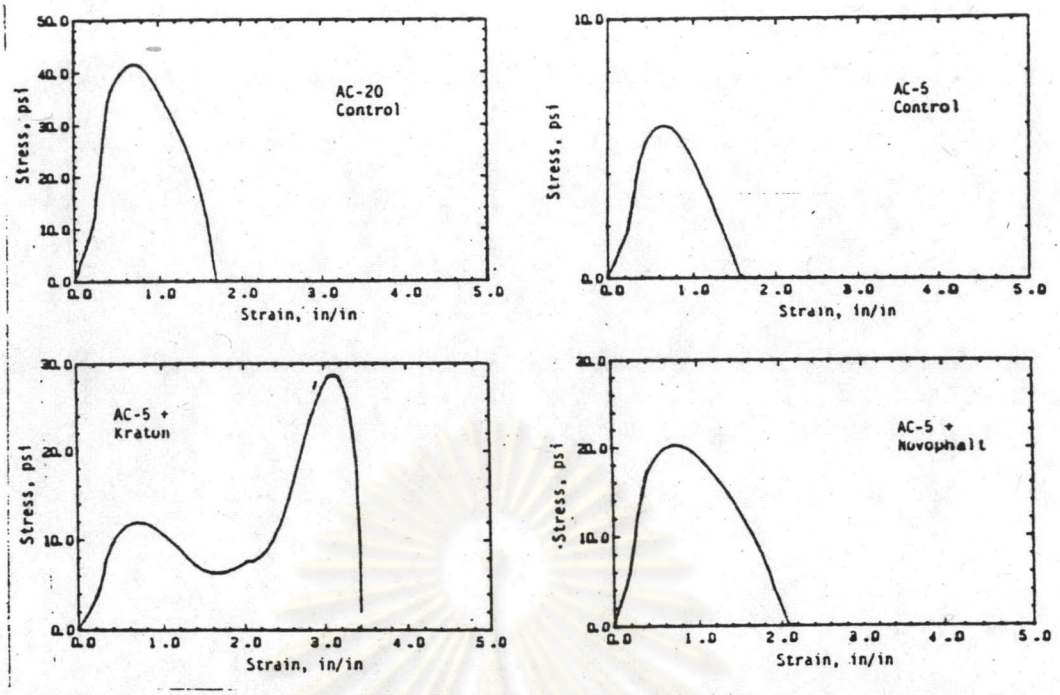
[6] Temperature susceptibility = (log log η_2 - log log η_1)/(log T_2 - log T_1), where η = viscosity in cP, T = absolute temperature.

[7] Determined from penetration at 77°F and viscosity at 275°F (McLeod, 1976).

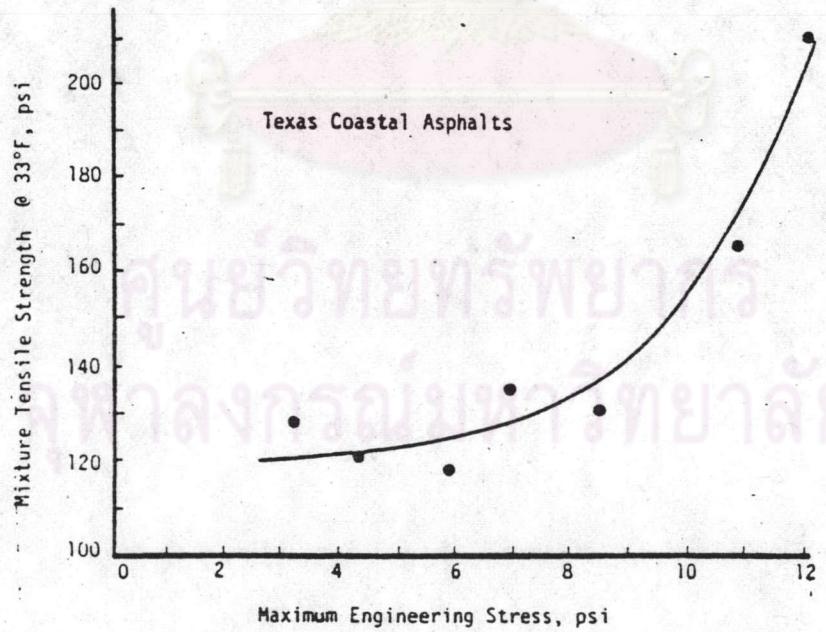
[8] P.I. = (20 - 500α)/(1 + 50α): α = [log(pen$_2$) - log(pen$_1$)]/(T_2 - T_1) or [log 800 - log (pen$_{25°C}$)] /T_{SP} - 25), where T = temperature, °C.

[9] 100(Pen 39.2°F, 200 g, 60 s)/(Pen 77°F, 100 g, 5 s).

ตารางที่ 2.34 แสดงถึงคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์จากซานโจควิน (San Joaquin) ทั้งที่ปรับปรุงด้วยสารผสมเพิ่มและไม่ได้ปรับปรุง



ภาพที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้น จากการทดลองการยืดตัว (Ductility) ที่อุณหภูมิ 30.2 องศาฟาเรนไฮต์ ความเร็วการดึง 5 เซนติเมตรต่อนาที ของแอสฟัลต์ซีเมนต์จากเท็กซัส (Texas) ทั้งที่ไม่ได้ปรับปรุง และที่ถูกปรับปรุงด้วยสาร Kraton และ Novophalt



ภาพที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Resilient Modulus กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา และที่ถูกปรับปรุงด้วยสารโพลีเมอร์ (Botton, and others, 1987 : 67)

กราฟที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ คือ กราฟระหว่างน้ำหนักที่ดึงกับระยะการยืดตัว จากตารางที่ 2.35 เป็นการสรุปค่าของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของการทดลอง Fatigue จะเห็นได้ว่าในการทดลองชุดแรก ค่าของผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือ แอสพัลต์ที่ผสม Latex และในชุดที่สอง ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือแอสพัลต์ที่ผสม Elvax ที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส การทดลองชุดแรกยังได้ผลการทดลองคล้ายเดิม แต่ในชุดที่สอง ปรากฏทั้งสารผสมประเภท Elvax, Kraton และ Latex ต่างให้ผลการทดลองที่ดี คือ จำนวนรอบของการกระทำให้เกิดความเสียหายมากกว่า 2000 รอบ

Little et al[22] ได้ทำการศึกษาจากผลการทดลอง Fatigue เพื่อที่จะหาปริมาณพลังงานในการที่จะสร้างรอยแตกในแอสพัลต์คอนกรีต จากช่วงเวลาการให้น้ำหนักกระทำ ปรากฏผลสรุปดังสมการ

$$U = C^{h \log t} \quad \text{..... 2.9}$$

U = พลังงานที่ให้เพิ่มขึ้น ในช่วงที่ทำการเพิ่มรอบแต่ละรอบ

t = ช่วงเวลาการให้พลังงาน

h = ค่าคงที่ 0.45

Kofalt และ Sandvic[23] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของแอสพัลต์ต่อค่าเสถียรภาพของแอสพัลต์คอนกรีต พบว่าอุณหภูมิในการผสมและการบดอัดขึ้นอยู่กับค่าความหนืดของแอสพัลต์ เพราะความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนืดเป็นเส้นตรง ดังแสดงในภาพ 2.13 และได้แนะนำว่าความหนืดที่เหมาะสมในการผสมและการบดอัด ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 150-300 เซ็นติสโตรก

Ton และ Chritz[24] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของแอสพัลต์ (Penetration) กับค่าความหนืด (Viscosity) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สรุปได้ดังสมการ

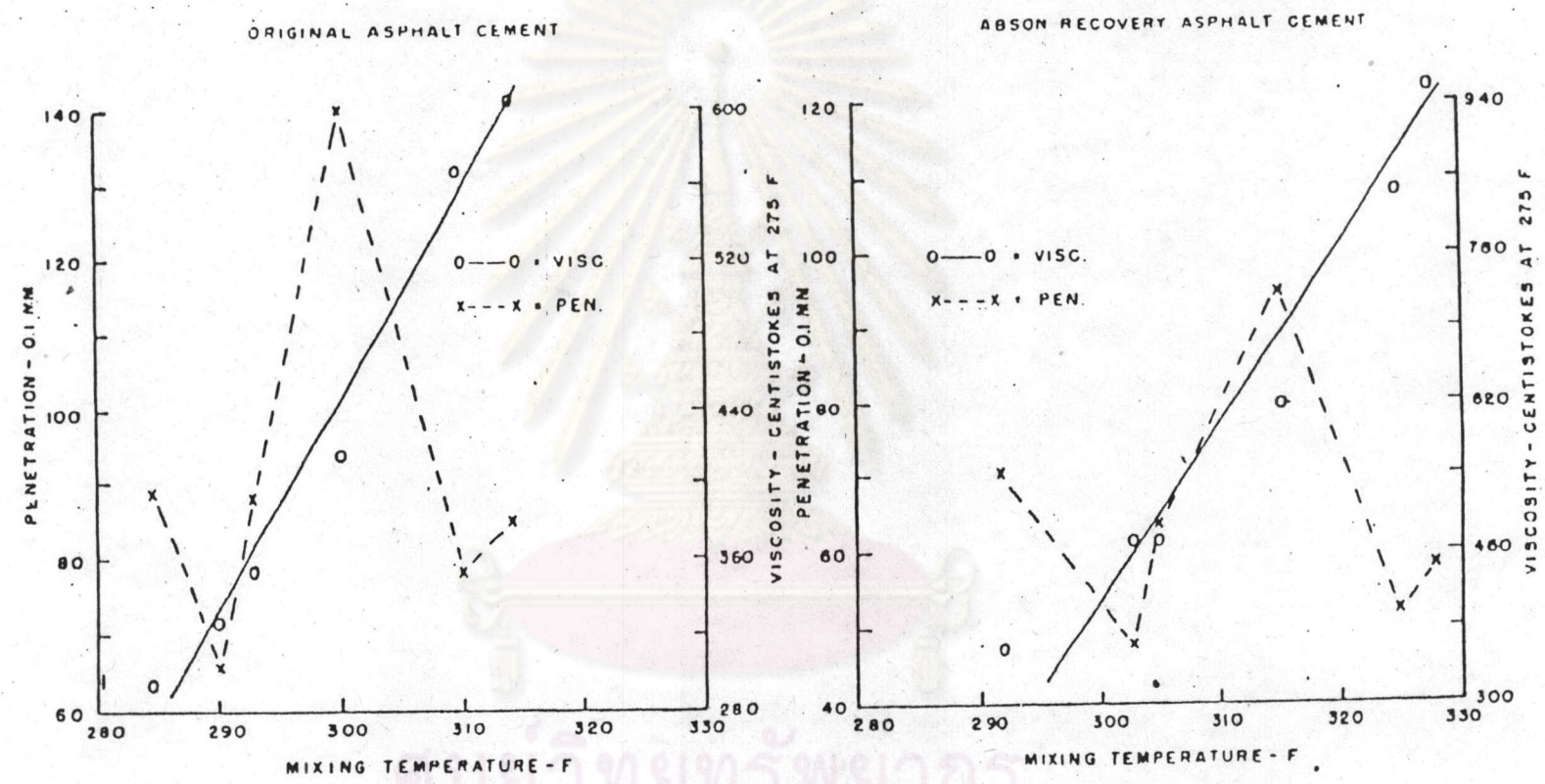
$$Y = \frac{6.322 \times 10^{1}}{X^{1.926}} \quad \text{..... 2.10}$$

Base Asphalt	Mixture Type	1°C (33°F) Air Voids, Percent	1°C (33°F) No. Cycles to Failure	25°C (77°F) Air Voids, Percent	25°C (77°F) No. Cycles to Failure
Texas Coastal	AC-20	5.9	6	5.9	250
	AC-5 + Car. Blk.	7.0	590	6.7	530
	AC-5 + Elvax	5.9	390	6.0	7[b]
	AC-5 + Kraton	5.6	860	5.8	350
	AC-5 + Latex	6.0	1190	6.2	740
	AC-5 + Novophalt	6.0	1230[b]	6.5	190
San Joaquin Valley	AR-4000	6.3	1	6.0	110
	AR-1000 + Car. Blk.	7.1	250[b]	6.5	490
	AR-1000 + Elvax	6.9	740	6.5	>2000
	AR-1000 + Kraton	6.3	370	6.8	>2000
	AR-1000 + Latex	6.5	90	6.6	>2000
	AR-1000 + Novophalt	6.7	180	6.4	782

[a]Each value represents an average of at least two values.

[b]These values represent an average of three values.

ตารางที่ 2.35 แสดงค่าของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากการทดลอง Fatigue ที่อุณหภูมิ 1 เซลเซียส และ 25 องศาเซลเซียส ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา และที่ถูกปรับปรุงด้วยสารโพลีเมอร์ (Botton, and others, 1987 : 75)



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด และเพนนิเตรชั่น กับอุณหภูมิผสม

(Sandvic & Kofalt, 1968)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Y = ค่าความหนืด (Viscosity, poise)

x = ค่าความแข็ง (Penetration)

เนื่องจากสารผสมเพิ่ม มีมากมายหลายชนิด R.L. Terrel และ J.C. Walter[25] จึงได้ทำการรวบรวมและจัดแยกสารผสมเพิ่มออกได้ถึง 10 กลุ่ม ตามคุณสมบัติทางเคมีดังต่อไปนี้

1. ผุ่นหรือผงละเอียด (Mineral Filler) เช่น ผุ่นหิน, ปูนขาว, ปูนซีเมนต์, คาร์บอนแบลค (Carbon black) และซัลเฟอร์ (Sulfur)

2. สารเอ็กซ์เทนเดอร์ (Extender) เช่น ซัลเฟอร์ (Sulfur) และลิกนิน (lignin)

3. ยาง (Rubbers) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ คือ

3.1 ยางธรรมชาติ

3.2 ยางสังเคราะห์ (Synthetic Latex) เช่น SBR (Stylene-Butadiene Rubber)

3.3 Black Copolymer เช่น SBS (Stylene-butadiene-Stylene)

3.4 Reclaimed Rubber

4. สารพลาสติค เช่น โพลีเอททีลีน (Polyethylene), โพลีโพรพีลีน (Polypropylene), เอททีลีนไวนิลอาซีเตค (E.V.A. -Ethylene-Vinyl-Acetate) และโพลีไวนีลคลอไรด์ (PVC-Polyvinylchloride)

5. สารโพลีเมอร์ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวจับตัวกันของสารในข้อ 2, 3, 4

6. เส้นใย (Fibers) เช่น โพลีโพรพีลีน (Polypropylene) และสารโพลี-เอสเทอร์ (Polyester)

7. สารออกซิแด้น (Oxidants) เช่น แมงกานีส (Manganese) และเกลือที่เกิดจากธาตุของโลหะต่าง ๆ

8. สารแอนตี้ออกซิแด้น (Antioxidarts) เช่น สารที่มีธาตุตะกั่วประกอบ (Lead Compound), คาร์บอน, และเกลือของแคลเซี่ยม (Calcium Salts)

9. ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbons) เช่น สารที่ได้จากกากการกลั่นน้ำมัน

10. สารแอนติ้สตริป (Antistrip Materials) เช่น อะมีน (Amine) และปูนขาว (Lime)

Dallas N. Little[26] ได้สรุปสารผสมเพิ่มของแอสฟัลต์ที่สามารถส่งผลต้านทานต่อการเกิดร่องล้อ หรือการเกิดรอยแตกแยก ซึ่งมีด้วยกันถึง 5 ประเภท

1. Carbon black microfiller
2. SBR. (Stylene-butadiene rubber)
3. Thermoplastic block copolymer Rubber
4. สาร Polyethylene ที่ทำการผสมในแอสฟัลต์ มีชื่อเรียกว่า สาร Novophalt
5. สารอีวีเอ โคโพลีเมอร์ (EVA)

สาร Microfiller 8 เป็นสารเคมีที่ผลิตขึ้นโดยบริษัท Cabot Corporation มีส่วนของ Carbon block อยู่ถึง 92 เปอร์เซนต์ และมีน้ำมัน (Oil) 8 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งน้ำมันจะเป็นตัวช่วยให้เกิดความนุ่ม สาร Stylene-butadiene Rubber มีอยู่ด้วยกันหลายเกรด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของโมโนเมอร์ (Monomer), น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) และสารอิมัลซิไฟด์ (emulsifier) ตัวอย่างเช่น Latex XUS 40052.0 ผลิตขึ้นโดยบริษัท Dow Chemical USA และสาร Ultra Pave 70 ผลิตขึ้นโดยบริษัท Rubber and Chemical Co. เป็นต้น สาร Thermoplastic Block Copolymer Rubber ที่สำคัญมีด้วยกันสองชนิด คือ ชนิดแห้งมีชื่อเรียกว่า Kraton TR 60-8774 และชนิดเหลวมีชื่อเรียกว่า Dutrex 739 ทั้งสองชนิดถูกผลิตขึ้นโดยบริษัท Shell Development Company สารประเภท Novophalt มักจะเป็นสารที่มี Polyethylene ประกอบอยู่ ที่พบเห็นมีอยู่ด้วยกันถึงหกชนิด มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน คือ ความหนาแน่น, ค่าน้ำหนักโมเลกุล และค่าดัชนีการหลอมตัว (Melt Index) สาร Novophalt ทั้งหกชนิดได้แก่ Rexene PE 109, Dow 526, Dow 527, Dowlex 880, Dowlex 2045 และ Dow 69065P. ส่วนสาร EVA มีอยู่หลายเกรดและหลายชนิด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แก่ โมโนเมอร์ (Monomer), ค่าการละลาย (Solubility), ค่าจุดอ่อนตัว (Softening Point), ค่าดัชนีการหลอมตัว (Melt Index) และค่าน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) สารประเภทนี้ผู้ผลิตรายใหญ่เห็นจะได้แก่บริษัท E.I. du Pont de

Nemours & Co., Inc. ได้ทำการสรุปเป็นแผนภาพแสดงเกรดและชนิดของ อีวีเอ (EVA) ภายใต้ชื่อการค้า Elvax ดังภาพที่ 2.14 สารอีวีเอโคโพลิเมอร์เกรดมักจะพบเห็นคือ Elvax 40 w, Elvax 250 และที่นิยมใช้ในวิศวกรรมงานทางมากที่สุดคือ Elvax 150 ตัวอย่างสารอีวีเอชนิดสุดท้ายคือ Ex 042 ผลิตขึ้นโดยบริษัท Exxon Chemical Amcrica

บริษัท Du Pont Company ได้ทำการสรุปเป็นรายงานเพื่อเผยแพร่ผลิตภัณฑ์ โดยได้ทำการกล่าวถึงสารประเภทอีวีเอโคโพลิเมอร์ (EVA-Ethylene Vinyle Acetate) ภายใต้ชื่อการค้า Elvax สารนี้ประกอบด้วยสามส่วนที่เป็นองค์ประกอบสำคัญ คือ เอททีลีน (Ethrylene), ไวนิล (Vinyle) และกรดอินทรีย์ (An Organic Acid) เป็นสารพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก สามารถรวมตัวกับแอสพัลต์ได้ดี โดยเฉพาะ Elvax 150 สามารถปรับปรุงคุณสมบัติความข้นเหลวและเพิ่มความแข็งแรงได้มากขึ้น และได้สรุปคุณสมบัติในการปรับปรุงไว้ดังนี้

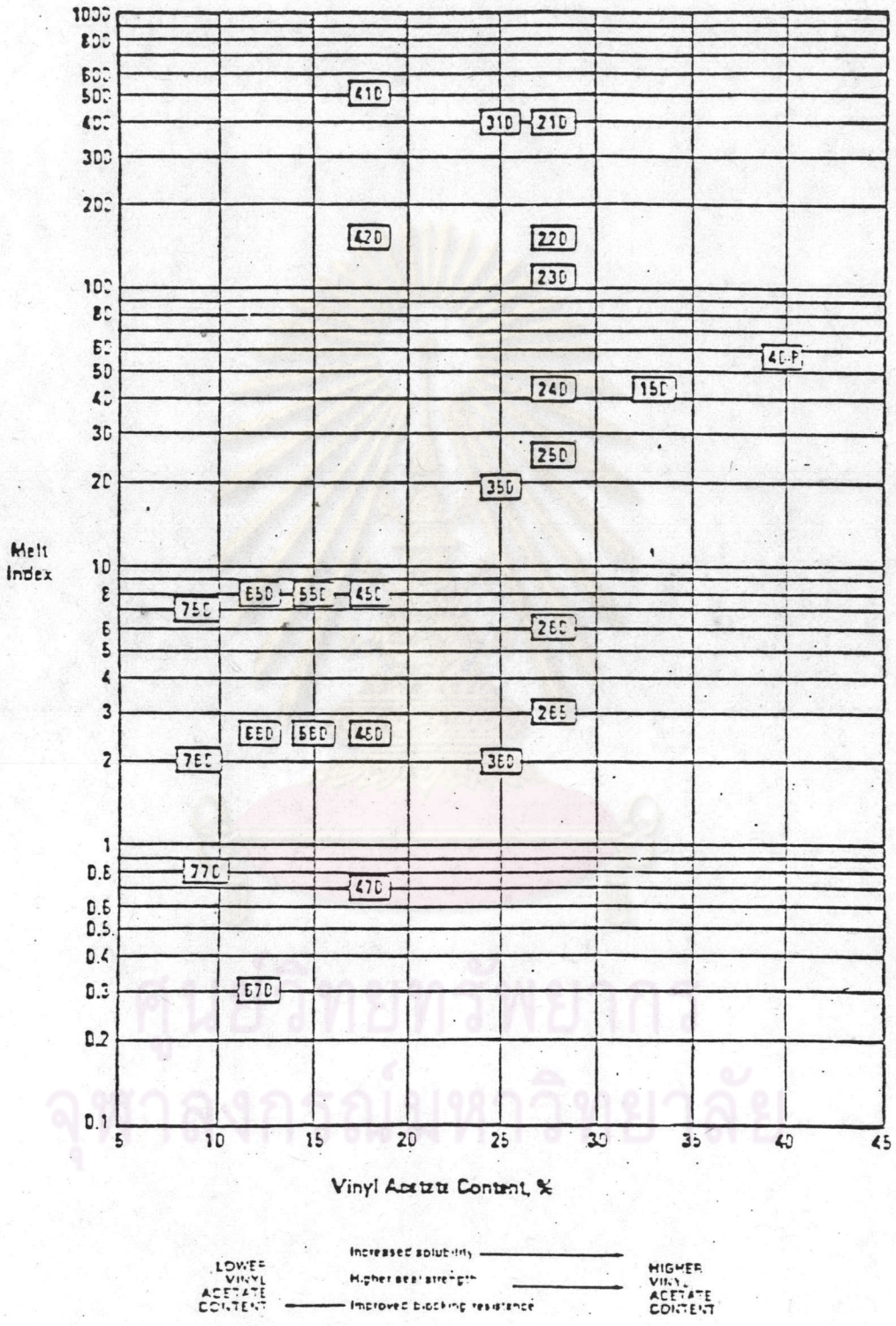
1. การเพิ่มคุณสมบัติความแข็งและความคงทน (Toughness and Tenacity)
2. การเพิ่มคุณสมบัติการยืดเกาะและความยืดหยุ่น
3. เพิ่มความต้านทานการลึกกร่อนที่อุณหภูมิต่ำ
4. เพิ่มความต้านทานการเลียรูปร่างที่อุณหภูมิสูง

สารประเภทนี้สามารถที่จะผสมเข้ากับแอสพัลต์ได้ แต่ทั้งนี้จะต้องจัดให้มีการกระจายโมเลกุลของโคโพลีเมอร์ออกเป็นโมเลกุลย่อย แล้วจึงจะทำการแทรกตัวเข้าจับกับโมเลกุลของแอสพัลต์ การที่จะผสมให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว จำเป็นต้องขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิในการผสม รวมถึงการคนเพื่อช่วยการแตกตัว โดยทั่วไปจะทำการผสมสารทั้งสองที่อุณหภูมิประมาณ 275-300 องศาฟาเรนไฮต์ (135-149 องศาเซลเซียส) และทำการคนให้เข้ากันประมาณ 20 นาที และปริมาณของสารอีวีเอเหมาะสมประมาณ 2-3 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนักของแอสพัลต์ ตารางที่ 2.36 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานและการนำไปใช้ ตารางที่ 2.37 แสดงคุณสมบัติ ทางกายภาพของสาร Elvax

คุณสมบัติที่สารอีวีเอโคโพลิเมอร์สามารถเข้าไปปรับปรุงให้กับแอสพัลต์ มีด้วยกันหลายอย่าง เช่น

GRADE SELECTOR CHART FOR ELVAX* RESINS

Ethylene-Vinyl Acetate Copolymers



รูปที่ 2.14 แสดงเกรดต่าง ๆ ของสาร Elvax

(E.I. du Pont de Nemous & Co.(Inc), 1981)

ELVAX RESIN GRADES

ตารางที่ 2.36 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานและการนำไปใช้ สำหรับสาร Elvax
(E.I. du Pont de Nemous & Co.(Inc), 1981)

Thylene/Vinyl Acetate Copolymers

	Shipping Specifications		
Grade	Melt Index	% Vinyl Acetate	Principal Properties and Uses
Elvax" 40-W[c]	48-66	39.0-42.0	Soluble in many organic solvents Compatible with many resins; limited compatibility with waxes Improves flexibity and adhesion of lacquers and inks Used in pressure-sensitive and specialty hot melts
Elvax"150-W	38.0-48.0	32.0-34.0	Excellent adhesion to aluminum foil and other nonporous surfaces more solvents than resins of lower viny acetate content Used in solvent applied coatings and hot melt adhesives
Elvas"170	0.6-1.0	35.0-37.5	Fractional melt index high vinyl acetate segmented copolymer useful a hot melt pressure sensitive adhesives
Elvax"210-W[c]	365-440	27.2-28.8	Lowest molecular weight and melt viscosity of the Elvax 200-series resins is less flexible in blends with wax than other 200-series grades but superior in gloss retention and equal in grease resistance
Elvax" 220-W[c]	134-168	27.2-28.8	
Elvax" 230-W[c]	100-120	27.2-28.8	Similar to "Elvax" 210 Used in paraffin wax systems where viscosity limitations a:

ตารางที่ 2.36 (ต่อ)

Grade	Shipping Specifications Melt Index	% Vinyl Acetate	Principal Properties and Uses
Elvax" 230-W[c]	100-120	27.2-28.8	less stringent or where higher viscosities are required
Elvax" 240-W[c]	38.0-48.0	27.2-28.8	
Elvax" 250-W[c]	22.0-28.0	27.2-28.8	
Elvax"260	5.3-6.7	27.2-28.8	High viscosity resins providing excellent toughness. flexibility adheson and bamer properties for many coating and adhesive applications
Elvax"265	2.6-3.4	27.2-28.8	Highest molecular weight of "Elvax" 200-series imparting maximum toughness flexibility and seal strength. Provides excellent "hot-tack" and high viscosity in wax blends.
Elvax"310	365-440	24.3-25.7	Lowest molecular weight and melt viscosity of the 300-series. Gives less flexible blends with wax than other 300-series grades at the same concentration, but imparts superior gloss retention and equal grease resistance.
Elvax"350	17.3-20.9	24.3-25.7	High molecular weight, high melt viscosity
Elvax"360	1.7-2.3	24.3-25.7	resins in the 300-series Used with microwa for maximum toughness Where greater specif adhesion is required use "Elvax" 365, 260 4260

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.36 (ต่อ)

Grade	Shipping Specifications Melt Index	% Vinyl Acetate	Principal Properties and Uses
Elvax" 410	445-550	17.5-18.5	Prefened grade where low melt viscosity is important Improves hardness grease and block resistance gives optimum gloss retenton with wax "Elvax" 210 310, or 4310 should be tried for greater flexibility and seal strength
Elvax" 420	136-165	17.5-18.5	Gives properties closer to "Elvax" 410 than 460 higher melt viscosity than 410 Imparts greater flexibility and seal strength in hot melt coatings as well as good gloss haldness and block resistance
Elvax" 450	6.7-9.3	17.0-19.0	Lower melt viscosity than "Elvax" 460 similar in properties to other grades to other grades in 400-series
Elvax" 460	2.2-2.8	17.5-18.5	High molecular weight and high melt viscosity resin for hard, scuff resistant, flexible wax coatings Used in heat-sealable coatings and higher softening point hot melt adhesives For more flexibility and seal strength try "Elvax" 260
Elvax" 470	0.6-0.8	17.0-19.0	Possesses properties of other 400-series resins and is suggested for use where higher melt viscosity is required than supplied by "Elvax" 460

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.36 (ต่อ)

Grade	Shipping Specifications Melt Index	% Vinyl Acetate	Principal Properties and Uses
Elvax" 550	6.7-9.3	14.0-16.0	High molecular weight and high melt viscosity resins used in paper roll wrap and carpet seaming tape
Elvax" 560	2.1-2.9	14.0-16.0	
Elvax" 650	6.7-9.3	11.0-13.0	
Elvax" 660	2.1-2.9	11.0-13.0	High molecular weight and high melt viscosity resins used in adhesive formulations where higher temperature per for mance is required
Elvax" 670	0.2-0.4	11.0-13.0	
Elvax" 750	6.3-7.7	8.0-10.0	
Elvax" 760	1.8-2.2	8.8-9.8	High molecular weight and high melt viscosity resins used in adhesive formulation where higher temperature performance
Elvax" 770	0.6-1.0	8.5-10.5	

grades contain 200-800 ppm butylated hydroxy toluene

(ASTM D 1238. modified)

The "W" postscript denotes grades containing an anti-blocking additive

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES[c]

Density @ 23°C kg/m³ (g/cm³) ASTM D 1505	Tensile Strength MPa (psi) ASTM D 1708[a]	Elongation at Break, % ASTM D 1708[a]	Elastic (Tens.) Modulus, MPa (psi) ASTM D 1708[a]	Hardness, Shore A-2 Durometer, 10 sec ASTM D 2240	Softening Point, Ring and Ball, °C (°F), ASTM E 28	Cloud Point in Paraffin Wax, °C (°F)	Grade
965 (0.965)	4.8-6.2 (750-900)	1 000-1 300	3.0 (450)	40	104 (220)	154 (310) [20%]	"Elvax" 40-
957 (0.957)	6.9-8.3 (1 000-1 200)	900-1 100	10.0 (1 400)	65	110 (230)	102 (215)	"Elvax" 150
962 (0.962)	11 (1600)	1400	2.8 (400)	63	220 (428)	IC[illegible]	"Elvax" 170
951 (0.951)	2.8 (400)		12 (1 700)	62	82 (180)	66 (150)	"Elvax" 210
951 (0.951)	5.5 (800)		16 (2 300)	69	88 (190)	66 (150)	"Elvax" 220
950 (0.950)	5.9 (850)		16 (2 300)	70	96 (205)	66 (150)	"Elvax" 230
951 (0.951)	9.7 (1 400)	800-1 000	18 (2 600)	73	110 (230)	66 (150)	"Elvax" 240
951 (0.951)	11 (1 600)		19 (2 800)	75	127 (260)	66 (150)	"Elvax" 250
955 (0.955)	24 (3 500)		26 (3 800)	80	154 (310)	66 (150)	"Elvax" 260
955 (0.955)	29 (4 200)		28 (4 100)	83	171 (340)	66 (150)	"Elvax" 265
948 (0.948)	3.3 (475)		16 (2 300)	70	88 (190)	66 (150)	"Elvax" 310
948 (0.948)	14 (2 000)	800-1 000	25 (3 600)	80	132 (270)	66 (150)	"Elvax" 350
(950) (0.950)	26 (3 800)		35 (5 100)	85	188 (370)	66 (150)	"Elvax" 360
934 (0.934)	4.7 (675)		33 (4 800)	80	88 (190)	66 (150)	"Elvax" 410
937 (0.937)	8.6 (1 250)		42 (6 100)	84	99 (210)	66 (150)	"Elvax" 420
940 (0.940)	18 (2 550)	600-900	51 (7 400)	90	150 (302)	66 (150)	"Elvax" 450
941 (0.941)	23 (3 300)		52 (7 500)	90	199 (390)	66 (150)	"Elvax" 460
940 (0.940)	26 (3 800)		63 (9 100)	92	223 (434)	84 (184)	"Elvax" 470
935 (0.935)	18 (2 500)	800-900	64 (9 300)	93	150 (302)	71 (160)	"Elvax" 550
940 (0.940)	22 (3 200)		73 (10 700)	93	188 (370)	71 (160)	"Elvax" 560
933 (0.933)	17 (2 500)		85 (12 300)	94	150 (302)	78 (172)	"Elvax" 650
940 (0.940)	21 (3 000)	750-850	91 (13 200)	94	193 (380)	78 (172)	"Elvax" 660
940 (0.940)	26 (3 800)		100 (14 500)	94	233 (452)	79 (174)	"Elvax" 670
930 (0.930)	15 (2 200)		110 (16 000)	95	153 (307)	86 (186)	"Elvax" 750
930 (0.930)	21 (3 000)	600-750	140 (20 000)	96	167 (332)	86 (186)	"Elvax" 760
930 (0.930)	22 (3 200)		160 (23 200)	96	227 (110)	84 (133)	"Elvax" 770

ตารางที่ 2.37 คุณสมบัติทางกายภาพของสาร Elvax

คุณสมบัติเกี่ยวกับการไหล (Flow Characteristics) เนื่องจากแอสฟัลต์จัดเป็นสารที่ไม่จับตัวกันเป็นผลึก จุดหลอมตัวไม่สูงนัก ค่าความหนืด (Viscosity) จะลดลงเรื่อย อย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะเดียวกันค่าความแข็งแรงจะลดลง พร้อมกับความสามารถในการยึดเกาะจะลดลงด้วย ดังนั้นเมื่อผสมสารอีวีเอเข้าไปผสมแล้ว กลับจะไปช่วยรักษาสภาพความข้นเหลวให้ลดอย่างช้าลงได้ อีกทั้งพยายามรักษาความข้นเหลวไว้

คุณสมบัติความแข็งแรง เมื่อทดสอบตามวิธีของมาร์แชล (Marshall) จากการทดสอบพบว่า ค่าของเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยสารอีวีเอ เมื่อทำการทดสอบภายหลังการแช่น้ำที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 วัน ค่าเสถียรภาพจะลดลงถึง 35 เปอร์เซนต์ แต่สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยอีวีเอ ค่าเสถียรภาพจะลดลงประมาณ 10 เปอร์เซนต์เท่านั้น

คุณสมบัติความข้นเหลวโดยการทดสอบการจมเข็มมาตรฐาน (Penetration) เป็นการควบคุมคุณสมบัติความหนืด ซึ่งถ้าแข็งมากจะเปราะและถ้าอ่อนมากจะไม่จับยึดวัสดุ การปรับปรุงด้วยอีวีเอ จะช่วยให้ค่าการแข็งตัวไม่มากนักทั้งที่สามารถยืดหยุ่นตัวได้ดี เหมาะสำหรับอุณหภูมิที่ต่ำด้วย

จากการศึกษาของ TRRL โดย J.H. Danning และ J. Carswell[26] ได้ทำการวิจัยถึงการใช้สารโพลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงสภาพการยืดเหนี่ยวของแอสฟัลต์ โดยเฉพาะสารอีวีเอ (EVA) ที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติ Dynamic Stiffness อีกทั้งช่วยให้อายุการใช้งานสูงขึ้น บทบาทของสารผสมเพิ่มจะขึ้นอยู่กับสภาพของพฤติกรรม Visco-elastic ทั้งนี้ก็เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการหลุดลอก และการเกิดร่องล้อ อีกทั้งได้อธิบายถึงสารโพลิเมอร์มีสองประเภท คือ สารโพลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติ้งโพลิเมอร์ (Thermosetting Polymers) ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก คือ Resin และ Hardener เป็นตัวสร้างความยืดหยุ่นและความแข็งเป็นการสร้างพันธะถาวรทางเคมี ส่วนสารอีกชนิดคือสารเทอร์โมพลาสติคโพลิเมอร์ (Thermoplastic polymers) มีลักษณะการสร้างพันธะ Secondary Valence forces ซึ่งจะช่วยเพิ่มการยืดเหนี่ยว อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนสภาพพันธะได้ง่ายพร้อมกลับสู่สภาพเดิมได้ เมื่อทำการทดสอบ คุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ที่ผสมสารอีวีเอ จึงสรุปได้ว่าสารนี้สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการยืดเหนี่ยว ช่วยลดความเสียหายจากการเสียรูปร่าง การแข็งตัวได้ดี ช่วยให้สภาพการทำงานดีขึ้น นอกจากนี้ยังทนต่อสภาพการแตกเปราะที่อุณหภูมิต่ำได้ด้วย

Gayle N. King, Harold W. Muncy และ Jean B. Prudhomme[27]
กล่าวไว้ว่าผลที่เกิดจากการใช้สารผสมเพิ่มในแอสฟัลต์ จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของโครงสร้างพันธะ ซึ่งจะส่งอิทธิพลถึงคุณสมบัติที่จะมีขึ้นได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี และเกี่ยวข้องถึงคุณสมบัติของการยึดเกาะรวมถึงคุณสมบัติการยืดหยุ่น ตัวอย่างของโพลีเมอร์ที่มักจะพบเห็นก็คือ SBR, SBS,นิวพรีน (Neoprene), โพลีเอททีลีน (Polyethylene) และ อีวีเอ (EVA) ซึ่งต่างก็จะมีทั้งคุณสมบัติที่คล้ายคลึงและแตกต่างกัน ตามองค์ประกอบทางเคมี เช่น SBR (Styrene-butadiene Rubber) และ Neoprene เมื่อผสมในส่วนผสมแอสฟัลต์จะมีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นดีขึ้น แต่จะไม่สามารถเพิ่มค่าเสถียรภาพให้สูงขึ้นได้ ต่างกับสารอีวีเอโคโพลีเมอร์ (EVA -Ethylene Vinyl Acetate) และ โพลีเอททีลีน (Polyethylene) นอกจากจะปรับปรุงให้การยืดและหดตัวมากขึ้น ยังมีแนวโน้มที่จะทำให้ส่วนผสมของแอลฟัลต์มีความแข็งแรงสูงขึ้นด้วย

โพลีเมอร์ที่ได้จากการผสมในแอสฟัลต์ จะมีลักษณะแตกต่างจากแอสฟัลต์หรือของเหลวนิวโตเนียน (Newtonian fluid) เนื่องจากมีลักษณะคล้ายพลาสติค มีความสามารถต้านทานการไหลและเพิ่มค่าความแข็งแรงสูงขึ้น ดังนั้น King, Muncy และ Prudhomme ได้ทำการสรุปผลการทดลองเปรียบเทียบการทดลองระหว่าง แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 85-100 กับแอสฟัลต์ที่ผสมสาร ดังตารางที่ 2.38 พบว่าเมื่อทำการผสมโพลีเมอร์แล้ว โดยทั่วไปค่าการจมของเข็มมาตรฐาน (Penetration) จะลดลง 10-20 เปอร์เซนต์ ในขณะที่ค่าความหนืดจะเพิ่มจากมาก-ขึ้นถึง 200-400 เปอร์เซนต์ เป็นผลทำให้ค่าการยืดตัว (Ductility) เพิ่มขึ้นด้วย ตารางที่ 2.39 แสดงผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 กับเกรด 85-100 ที่ทำการปรับปรุงด้วยสารโพลีเมอร์ SBR ซึ่งได้แสดงถึงคุณสมบัติของจุดอ่อนตัว (Softening Point) และค่า Fraass Point และคุณสมบัติอื่น ๆ Fraass point ได้คิดค้นขึ้นโดย Fraass เป็นการเปรียบเทียบความสามารถต้านการแข็งเปราะและแตก ทำโดยการเคลือบผิวของแผ่นเหล็กให้ได้ความหนาตามกำหนด จากนั้นจะลดอุณหภูมิลงเพื่อหาจุดที่เกิดรอยแตกร้าวที่ผิว อุณหภูมิที่ได้นี้เรียกว่า Fraass Point ตารางที่ 2.40 เป็นการสรุปการเปลี่ยนแปลงของค่าการจมของเข็มมาตรฐานในแอสฟัลต์ (Penetration) และค่าความหนืด (Viscosity) เมื่อผสมสารโพลีเมอร์ ค่าของการยืดหยุ่นจะขึ้นกับค่าความเครียด (Stress) ในช่วงของความเค้นยืดหยุ่น (Elastic Strain) สามารถรับน้ำหนักได้ดี และหดคืนสู่สภาพเดิมได้ดีด้วย และหากความเค้นเพิ่มขึ้นถึงจุดที่ให้ค่าความเครียดสูงสุดแล้ว หากมี

Asphalt	Penetration 25 C	Viscosity 60 C, poise	Viscosity 135 C, cSt	Ductility 4 C,	Tensile Stress 20 C, kg/cm2
E					
AC	98	1060	253	8.75	.00
PAC	72	2790	593	27.50	1.15
M					
AC	7:	1760	352	7.25	0.00
PAC	64	5320	702	24.80	0.49
N					
AC	87	1080	293	4.00	0.00
PAC	69	2400	529	20.00	0.88
S					
AC	93	1110	262	6.00	0.00
PAC	74	4300	656	14.50	0.70
T					
AC	74	1470	327	7.50	0.00
PAC	63	5430	679	24.00	0.53

ตารางที่ 2.38 แสดงผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติ เพนนิเตรชั่น, ความหนืด ค่าการยืดตัว และความเครียดแรงดึงของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยสารโพลีเมอร์ (King, and others, 1986 : 522)

	PAC (From 85/100 AC)	60/70 AC
Penetration, 25 C, 1/10 mm	60	70
Softening Point, Ring & Ball, deg C	55	48
Fraas Point, deg C	-20	-14
Viscosity, 160 C, mm^2/sec	380	250
Viscosity, 135 C, mm^2/sec	1200	600
After RTFO:		
Viscosity, 135 C, mm2/sec	1350	900
Aging Index	1.125	1.5

ตารางที่ 2.39 แสดงผลการเปรียบเทียบของคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 80/100 ที่ปรับปรุงด้วยสารโพลีเมอร์ กับ แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70 (King, and others, 1986 : 524)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

. Aging Test Results for an 85/100 Penetration Asphalt
Before and After Polymer Modification

	AC	PAC
Penetration, 25 C, (1/10 mm)	98	72
Penetration after RTFO, 25 C, (1/10 mm)	62	51
Penetration Retention	63.3%	70.8%
Absolute Viscosity, 60 C, poise	1060	2790
Viscosity after RTFO, 60 C, poise	2020	4840
Viscosity Ratio	1.91	1.73
PVN	-0.95	-0.02

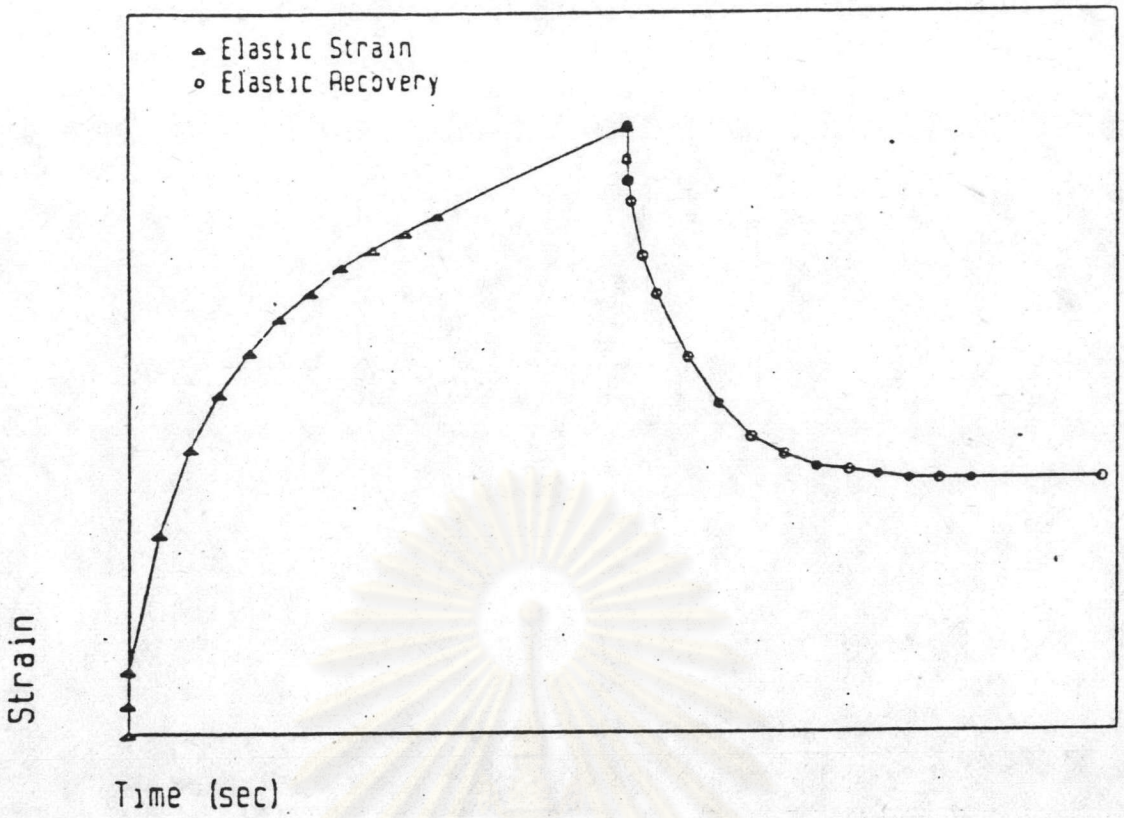
ตารางที่ 2.40 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าเพนนิเตรชั่น และ ความหนืด เมื่อผสมสาร โพลิเมอร์ที่ 5% (King, and others, 1986 : 525)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การยืดออกต่อไปจะทำให้ไม่สามารถคืนตัวสู่สภาพเดิมได้ ภาพที่ 2.15 แสดงตัวอย่างรูปแบบของความล้า (Creep) สำหรับแอสฟัลต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยโพลีเมอร์ พร้อมแสดงความสามารถคืนตัวภายหลังการรับน้ำหนักแอสฟัลต์มักจะให้ค่าความเครียดของการยืดตัวสูงในช่วงแรก เช่น การทดสอบค่าการยืดตัว (Ductility) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ขณะที่แอสฟัลต์เริ่มยืดตัวได้เร็วขึ้น ค่าความเครียดจะเริ่มลดลงเรื่อย ๆ ดังนั้นจึงเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของสารโพลีเมอร์ที่นำมาปรับปรุงแอสฟัลต์ด้วย หากมีลักษณะพันธะที่ยาวก็จะแข็งแรงกว่า ข้อมูลเหล่านี้อาจหาจากการทดลองหาค่าความเครียดของการดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM. D. 412-90 หรือการทดลองหาค่าความคงทนและความเหนียว (Toughness and Tenacity) ดังภาพที่ 2.16 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของการดึง (อาจแทนด้วยแรงดึง) และเปอร์เซนต์การยืดตัว (อาจแทนด้วยระยะการยืดตัว) คุณสมบัติอีกอย่างที่ควรคำนึงก็คือ คุณสมบัติการคืนตัวหลังการให้น้ำหนัก (Recovery Elastically) ซึ่งได้ถูกปรับปรุงวิธีการขึ้นโดยบริษัท Shell Development Company

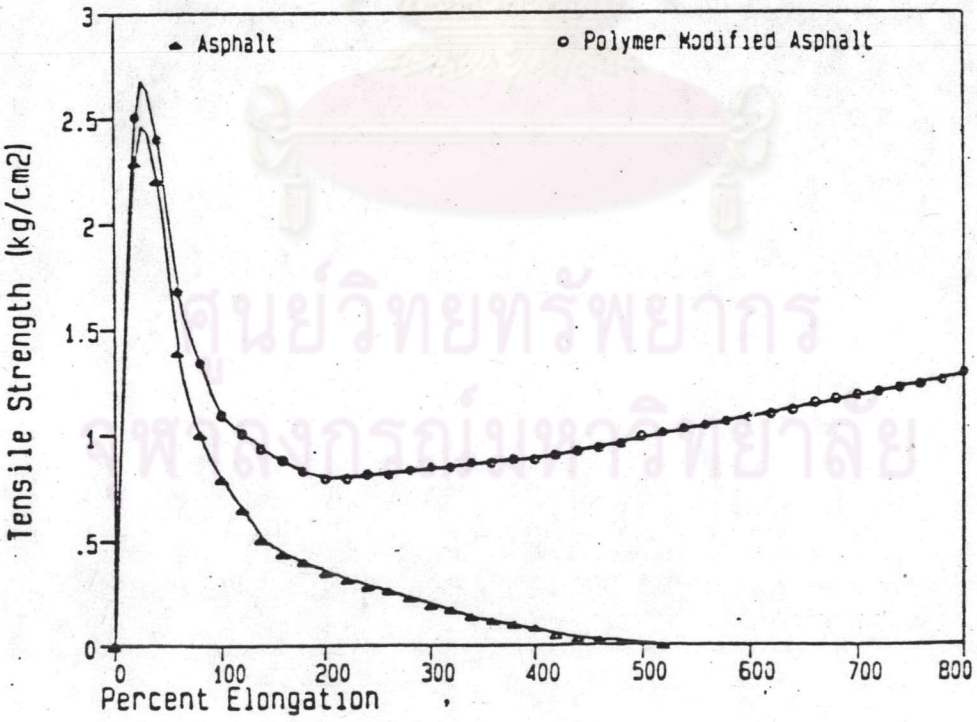
P. Jew และ R.T Woodhams[22] ได้ทำการวิจัยและรวบรวมข้อมูลของการนำสารโพลีเมอร์ประเภทโพลีเอททีลีน (Polyethylene) เข้าปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ และได้ทำการสรุปไว้ว่า การเกิดสภาพแตกร้าวของผิวถนน มักที่จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสาเหตุอื่น ๆ ได้แก่ การทำลายของธรรมชาติ, การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน, การแข็งตัวของน้ำภายในดิน และปริมาณการจราจรที่มากเกินไป เป็นต้น ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นรวมทั้งหาทางป้องกันจึงกระทำได้โดยการปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของแอสฟัลต์เพื่อต้านทานความเสียหายที่จะเกิดขึ้น ทางมหาวิทยาลัยโตรอนโต โดยการช่วยเหลือของสถาบัน Ontario Ministry of Transportation and Comunication (MTC) ได้ทำการทดลองวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงแอสฟัลต์ด้วยยางธรรมชาติ โดยหน่วยวิจัย Metro Toronto Department of Road and Traffic ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ที่ทำให้แอสฟัลต์ที่ผสมยางธรรมชาติ กับสารประเภทต่าง ๆ ที่ผสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงกับแอสฟัลต์ ซึ่งปรากฏว่าสารที่ให้ประสิทธิผลดีที่สุดก็คือ สารโพลีเมอร์

สารโพลีเอททีลีนมีปริมาณการใช้โดยเฉลี่ยประมาณ 20 ล้านตันต่อปี หรือ 25 เปอร์เซนต์ ของสารพลาสติคทั้งหมดในสหรัฐอเมริกา ทั้งนี้อาจอยู่ในรูปของสารโพลิเมอร์ชนิดเดียวกัน หรือประกอบเป็นสารโคโพลีเมอร์อื่น ๆ ก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งเกรดของ



ภาพที่ 2.15 แสดงรูปแบบของความล้าสำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์

(King, and others, 1986 : 525)



ภาพที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของการดึงกับเปอร์เซนต์การยืด

(King, and others, 1986 : 525)

ความข้นเหลวได้ตามขนาดของน้ำหนักโมเลกุล องค์ประกอบพื้นฐานของสารโพลีเอททีลีนทางเคมี ก็คือ - (CH_2CH_2) - เป็นหน่วยของเอททีลีน สารที่อาจจับเป็นโพลีเมอร์ด้วย ได้แก่ โพรพิลีน (Propylene), บิวทีน (Butene), เฮกเซน (Hexane) และไวนิลอะซีเทค (Vinyl Acetate) โดยปกติสารเหล่านี้จะหลอมตัวที่ 100-130 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มค่าความคงทน (toughness) และค่าการยืดตัว (Ductility)

ในปี ค.ศ. 1980 มีปริมาณการใช้โพลีเอททีลีนประมาณ 3 แสนตัน และมีปริมาณที่ใช้และปรับปรุงแอสฟัลต์ถึง 6 ล้านตันในสหรัฐอเมริกา ตัวอย่างของสารโพลีเอททีลีน ได้แก่ Toughned nylon 60 และสาร Polycarbonate thermoplastic เรารู้จักในนามของ ABS

การที่จะลดการแตกเปราะของผิวทาง จะขึ้นกับสภาพของพฤติกรรมของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่ำ โดยจะต้องมีการแผ่กระจายของอนุภาค ระยะห่างของโมเลกุลเพียงพอ ความหนาแน่นของสารผสมเพิ่มในแอสฟัลต์จะต้องมากเพียงพอ และโครงสร้างภายในที่จับกันเป็นโมเลกุลแข็งแรงพอ สารโพลีเมอร์ที่มักจะนำมาใช้ปรับปรุงแอสฟัลต์ก็คือ สารโพลีเอททีลีน มีลักษณะการจับกันของโมเลกุลคล้ายผลึก จึงมีลักษณะที่แข็งต้านการล้าได้ดี มีการยึดเกาะที่ดี ทนต่อการหลุดลอก การทำส่วนผสมร้อนของแอสฟัลต์เพื่อทำแอสฟัลต์คอนกรีต การเลือกแอสฟัลต์จะพยายามเลือกแอสฟัลต์ประเภทค่าการจมของเข็มมาตรฐาน (Penetration) ต่ำ และค่าความหนืดต่ำ โดยเฉพาะเมื่อผสมสารผสมเพิ่มก็เพื่อสร้างคุณสมบัติดังกล่าว การบดอัดจะกระทำที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารผสมเพิ่ม ภายหลังการบดทับจะแข็งตัว ค่าการยืดตัวจะมีได้มาก พร้อมทั้งค่าความคงทน (Tonghness) จะต้องสูงด้วย

จากการรวบรวมการทดลองของ Ontario Ministry of Transportation and Communication in Toronto ซึ่งทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากโรงกลั่นน้ำมันที่อ่าวคลาดสัน รัฐออนตาริโอของสหรัฐอเมริกา และจากโรงกลั่นน้ำมันบรอนเตประเทศอังกฤษ ทั้งที่ผสมสารโพลีเอททีลีน และที่ไม่ผสมสารดังกล่าว ซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ดังตารางที่ 2.41 และคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีเอททีลีน (Polyethylene) ดังตารางที่ 2.42 ประกอบด้วยสาร Exxon Escorene LPX-1 ซึ่งเป็นประเภท LLDPE (Linear low density polyethylene) และสารโพลีเอททีลีนทั้งสามเกรด ของบริษัท

	GULF (Clarkson)		BRITISH PETROLEUM (Bronte)	
	Unaged	Aged*	Unaged	Aged*
Viscosity, Pa.s, 60°C	142	363	113	259
Penetration, 25°C	97	52	103	62
Ductility, 4°C	150+	-	107	-
25°C	150+	150+	150+	150+
Flash Point, °C	306	-	316	-
Specific Density, 15.6°C	1.031	-	1.029	-

*Thin Film Oven Test

ตารางที่ 2.41 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของแอสพัลต์ซีเมนต์ จากอ่าวคลาคสัน ประเทศสหรัฐอเมริกา และเมืองบรอนเต ประเทศอังกฤษ

	MELT FLOW INDEX (g/10 min)	DENSITY (g/cm^3)	MOLECULAR WEIGHT DISTRIBUTION
Escorene LPX-1 (Exxon LLDPE)	1.0	0.918	-
Du Pont 11D-1	0.6	0.919	narrow
Du Pont 11H	1.2	0.919	narrow
Du Pont 19D	4.6	0.960	medium
Dupont 2107	5.1	0.924	narrow
Du Pont 2111	20	0.924	narrow
Evatane 18-150 (CIL)	150	0.93	broad
Evatane 28-150 (CIL)	150	0.94	broad
Evatane 33-25 (CIL)	25	0.95	broad
Scrap (National Pro Industries)	2.0	0.93	broad

ตารางที่ 2.42 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของสารโพลีเอททีลีนชนิดต่าง ๆ

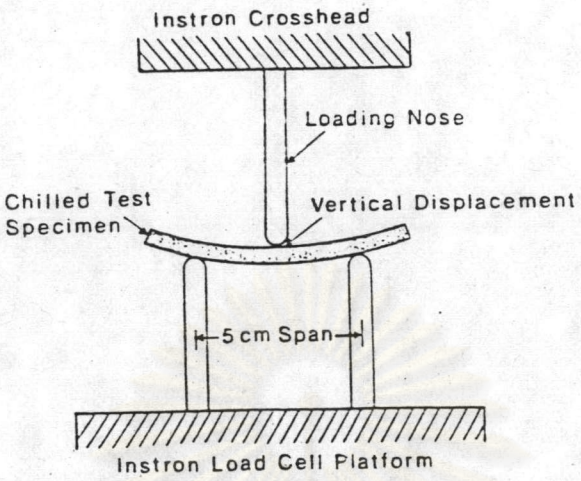
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดูปองก์ นอกจากนี้ยังมีสารของบริษัท CIL มีชื่อเรียกว่า Evatane poly (Ethylene-co-vinyl acetate) การทำการผสมสารต่าง ๆ นี้จะต้องทำการผสมโดยทำการเตรียมสารแอสพัลต์ซีเมนต์ ที่อุณหภูมิประมาณ 140 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเติมสารผสมแล้วคนให้เข้ากันจนทั่ว

การทดลอง Flexular Testing โดยภายหลังจากผสมตัวอย่างให้เข้ากัน จากนั้นจะทำการเตรียมสารผสมชุดนี้ในแบบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 80 x 25 x 3.2 มิลลิเมตร จากนั้นจะนำไปทำให้เย็นในถังน้ำแข็ง แล้วนำไปทำการควบคุมอุณหภูมิที่ -20 องศาเซลเซียส และนำไปทดสอบที่เครื่องกด โดยทำการติดตั้งดังภาพที่ 2.17 และทำการเดินเครื่องให้หัวกดกดลงด้วยความเร็ว 1.27 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการบันทึกน้ำหนักที่กด พร้อมวัดระยะที่ถูกกดลงให้งอโค้ง ภาพที่ 2.18 เป็นการแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้กด และระยะงอโค้งที่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างแอสพัลต์ซีเมนต์ที่ผสม LLDPE 8 เปอร์เซนต์กับแอสพัลต์ซีเมนต์ที่ควบคุม นอกจากนี้ยังทำการผสมสาร Kraton G เป็นสารประเภท SBS เข้าไปผสมเพิ่มในสาร LLDPE ก่อนผสมแอสพัลต์ ภาพที่ 2.19 เป็นผลการทดลองการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและปริมาณการผสมสาร LLDPE ในแอสพัลต์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่ 120-170 องศาเซลเซียส ซึ่งปรากฏว่าที่ 5 เปอร์เซนต์มักที่จะให้ค่าความหนืดที่สูงมาก และปริมาณอัตราการเปลี่ยนแปลงมากสุด และภาพที่ 2.20 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับอุณหภูมิสมบูรณ์ของแอสพัลต์ซีเมนต์ ทั้งที่ผสมสาร LLDPE และไม่ผสมสารนี้ และตารางที่ 2.43 ก็ได้สรุปค่าความหนืดของสารโพลีเอททีลีนชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ

Asphalt Concrete Mix Design โดย Disher และ Ferrand จากภาพที่ 2.21, 2.22 และ 2.23 เป็นการรวบรวมผลการทดสอบโดยวิธีมาร์แชล (Marshell) และตารางที่ 2.44 เป็นสรุปสูตรของ Disher-Ferrand เกี่ยวกับวัสดุมวลรวม โดยจะเป็นวัสดุประเภทหินปูน (Crushed limestone) และทราย (Sand) ตามภาพที่ 2.24 และได้แสดงถึงข้อกำหนดของมาร์แชลในการออกแบบ โดยสถาบันค้นคว้าวิจัยงานแอสพัลต์ (the Asphalt Institute) แสดงไว้เป็นลักษณะเส้นประ ผลการสรุปผลของมาร์แชล ได้เลือกใช้การผสมโพลีเอททีลีน 8 เปอร์เซนต์ในแอสพัลต์ เนื่องจากที่การผสม 8 เปอร์เซนต์ จะทำได้ไม่ยากเกินไป และเลือกประเภทของมวลรวมตามวิธีของ Disher และ Ferrand โดย

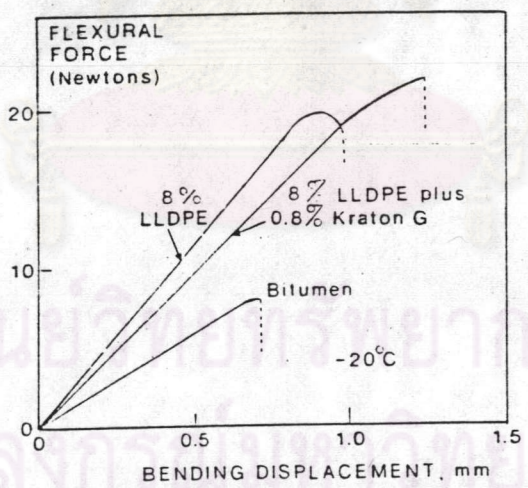
POLYETHYLENE-MODIFIED



All Flexural Stress-Strain Tests Were Compared at a Constant Crosshead Speed of 1.27 mm/min.

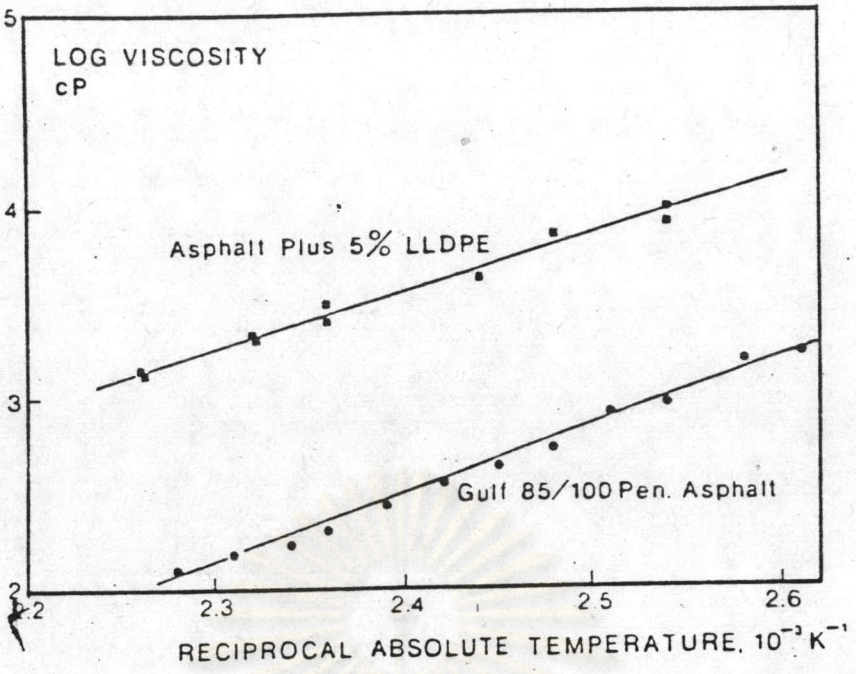
ภาพที่ 2.17 การทดลอง Flexural Stress-Strain

(Jew and Woodhams, 1986 : 548)

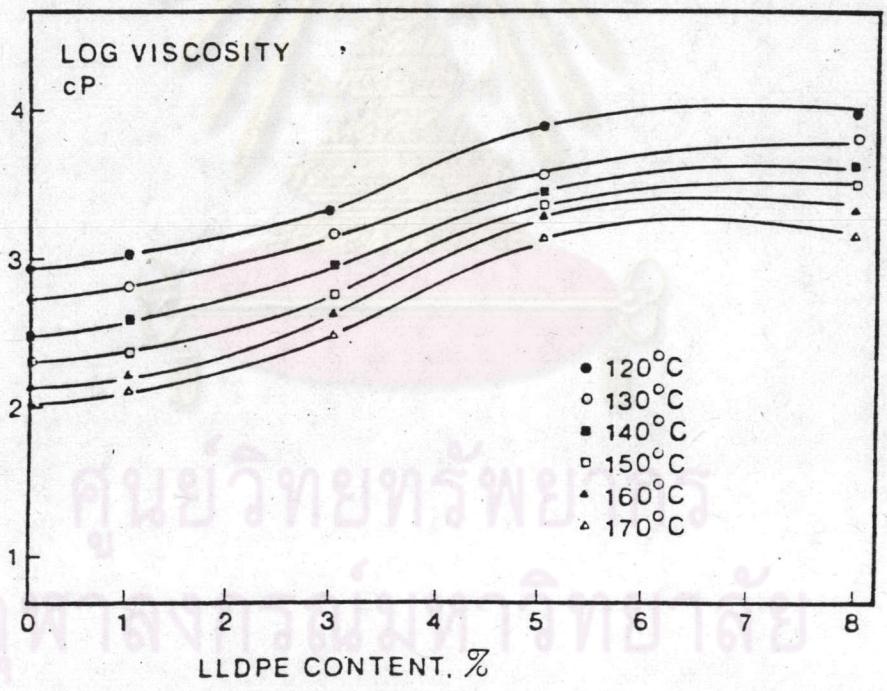


Typical Bending Force versus Displacement for the Test Beams Clearly Reveal the Influence of Polyethylene on the Stress-Strain Behavior of Bitumen at Low Temperatures. Ultimate Strength, Flexural Modulus, Elongation and Energy to Fracture Have All Been Increased by the Addition of 8 Percent Polyethylene.

ภาพที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับระยะงอโค้งที่เปลี่ยนแปลง ของการทดลอง Flexural Stress-Strain



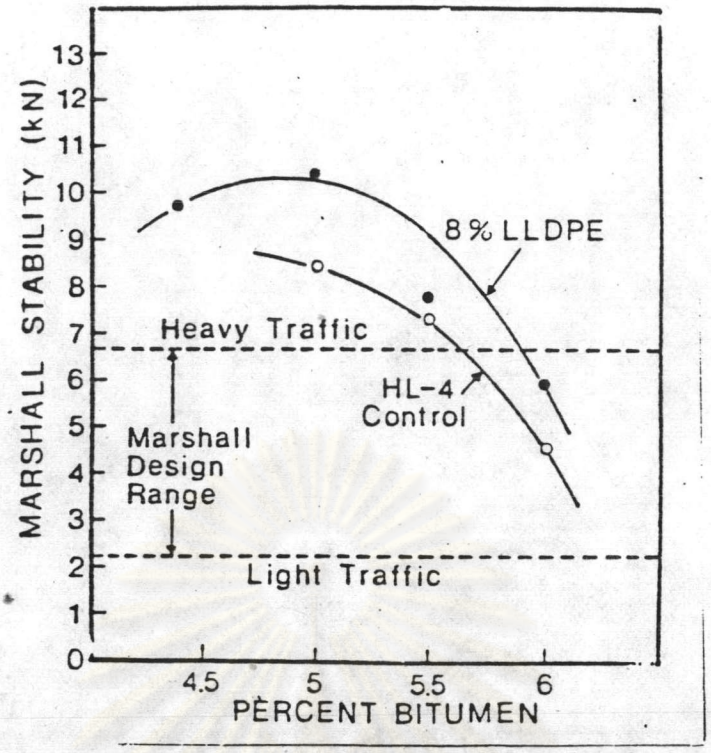
ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง เปรียบเทียบระหว่างแอสฟัลต์ที่ผสม LLPDE 5% และที่ไม่ผสม



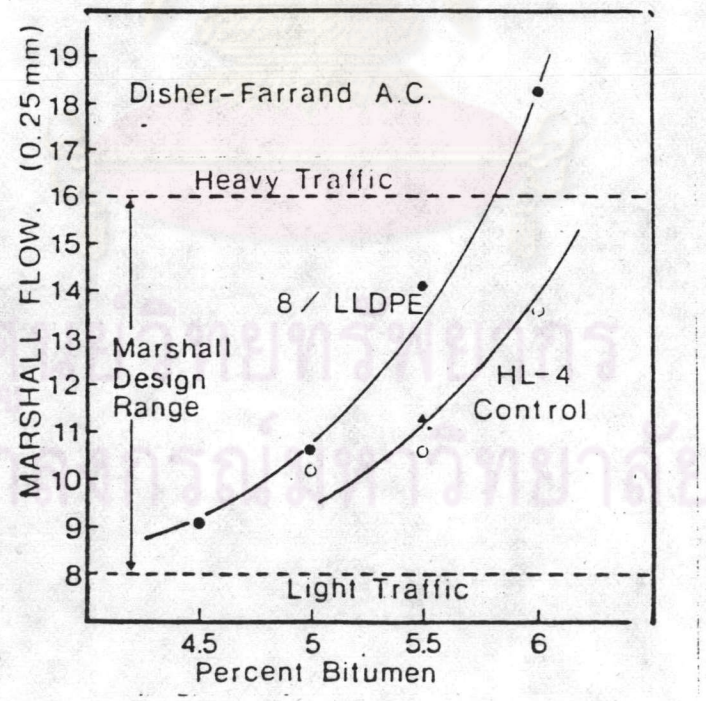
The Brookfield Viscosity Values Form a Consistent Pattern in the Temperature Range from 120 to 170 C for Gulf (Clarkson) Bitumen Containing Linear Low Density Polyethylene (Du Pont Sclair 2107).

ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด กับปริมาณสาร LLDPE ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

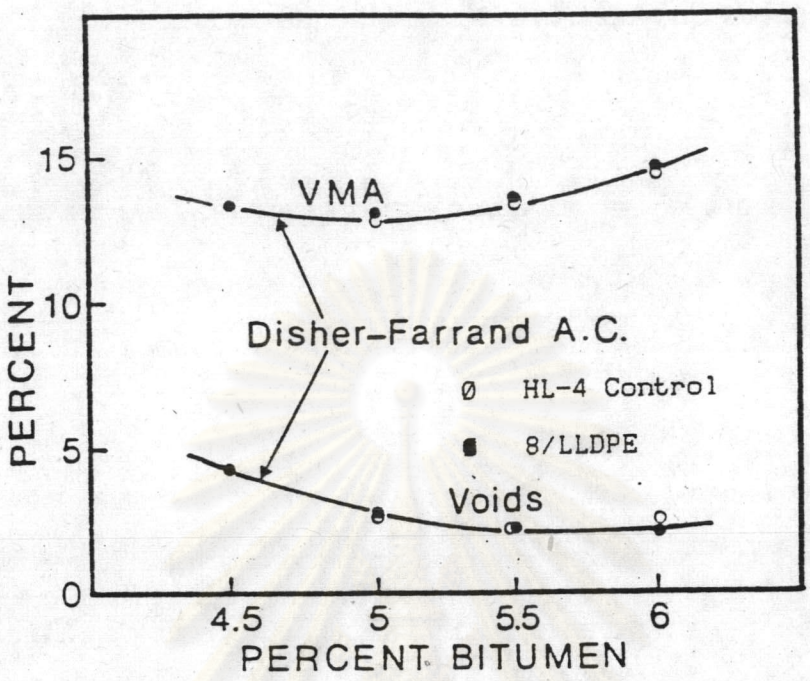
(Jew and Woodhams, 1986 : 547)



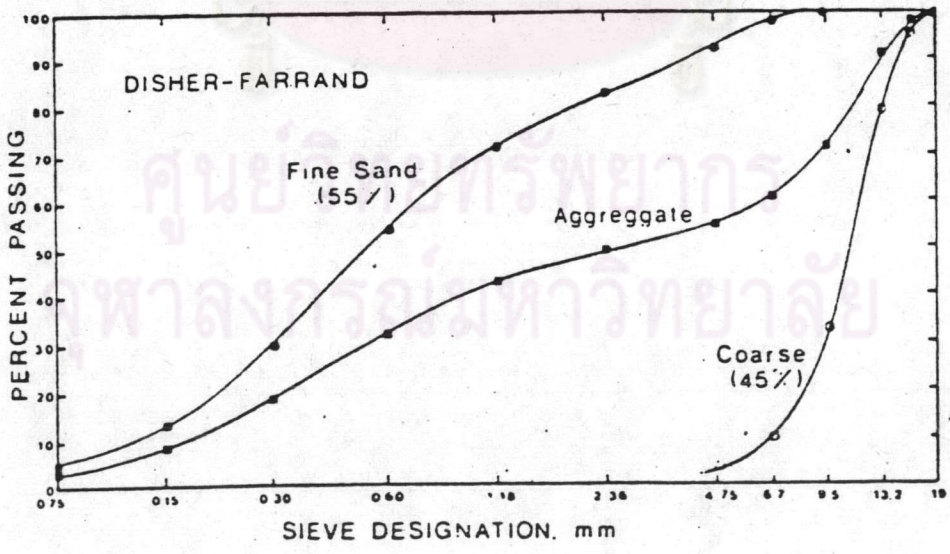
ภาพที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพของมาร์แชล กับปริมาณของแอสฟัลต์ทั้งที่ปรับปรุงด้วย LLDPE และที่ไม่ได้ปรับปรุง โดยใช้วัสดุมวลรวมที่จัดเกรดตามวิธีของ Disher-Ferrand (HL-4) (Jew and Woodhams, 1926 : 552)



ภาพที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Marshall Flow กับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วย LLDPE และไม่ได้ปรับปรุง โดยใช้วัสดุมวลรวมที่จัดเกรดตามวิธีของ Disher-Ferrand (HL-4)



ภาพที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณช่องว่างที่บดอัดได้กับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยใช้วัสดุมวลรวมที่จัดเกรดตามวิธีของ Disher-Ferrand



ภาพที่ 2.24 แสดงผลการจัดขนาดคละของ Disher และ Ferrand

ใช้เป็นแบบมาตรฐาน HL-4 ของสถาบันค้นคว้าวิจัยของ The Asphalt Institete ผลการทดลองเปรียบเทียบสรุปได้ว่า จากการควบคุมการบดอัดและช่องว่างระหว่างอากาศ ดังตารางที่ 2.44 ผลปรากฏว่าจะให้ค่าของเสถียรภาพและการไหล (Flow) ที่ดีขึ้นมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POLYETHYLENE	MELT FLOW INDEX (g/10 min)	BROOKFIELD VISCOSITY (cP) 3 Percent PE (150°C)	5 Percent PE (140°C)
Du Pont 11D-1	0.6	600	2840
Du Pont 11H	1.2	762	7930
Du Pont 190D	4.6	405	1320
Du Pont 2107	5.1	430	1080
Du Pont 2111	20	399	1010
Evatane 18-150 (CIL)	150	263	880
Evatane 28-150 (CIL)	150	242	920
Evatane 33-25 (CIL)	25	293	820

ตารางที่ 2.43 แสดงผลการทดลองความหนืดของสารโพลีเอทธีลีนที่ปรับปรุงแอสฟัลต์ซีเมนต์

	HL-4 Control Mix (parts)	PE-Modified (parts)
Coarse Aggregate (Disher-Farrand)	51	51
Fine Aggregate (sand)	49	49
Bitumen (PP 85/100 Pen)	5.3	5.3
Polyethylene (Escorene LPX-1)	-	0.42
Marshall Flow (0.25 mm)	9.8	11.2
Marshall Stability (N)	10,800	13,400
Air Voids (volume percent)	4.6	5.4
Marshall Water Immersion Test (percentage retention)	61.7	67.3

ตารางที่ 2.44 แสดงผลการทดสอบการออกแบบส่วนผสมร้อนของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมสาร

(Sew and Woodhams, 1986 : 545)