บทที่ 3

เทคนิคในการปรับสภาพวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต

3.1 ลักษณะของวัสดุแอสฟัลติกคอนกรีต

วัสดุแอสฟัลท์ติคคอนกรีต ประกอบด้วย หิน กรวด และทรายที่คละขนาดกันอย่างดี เพื่อให้เกิดการอัดแน่นและผสมด้วยยางแอสฟัลท์ ซึ่งใช้เป็นตัวประสานให้หิน กรวดและทราย นั้นยึดเหนี่ยวกัน ยางแอสฟัลท์สามารถแยกส่วนประกอบโดยถือคุณสมบัติทางกายภาพออกได้เป็น 3 ส่วนที่สำคัญ[1] คือ Asphaltanes, asphaltic rasins และ oily constituents โดยที่ asphaltanes และ asphaltic rasins มีสภาพเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ รวมอยู่กับ Oily constituents ซึ่งเป็นของเหลวที่มีความหนืด ความข้นเหลวของยางแอสฟัลท์จึงขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนประกอบทั้ง 3 ส่วนนี้

ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวจราจรแอสฟัลท์ติคคอนกรีต มักจะเกิดเนื่องจากมีอายุการใช้งานเป็นเวลานาน เหตุผลแรกที่เป็นสาเหตุของการเกิดความเสียหายในผิวจราจรคือการเกิดการแข็งตัวของแอสฟัลท์ขึ้นที่เรียกว่า Hardening[3] ในการใช้การปูทับผิวหน้าด้วยแอสฟัลท์ติคคอนกรีตใหม่ (Overlaying) จะยังคงเกิดการ Hardening ในผิวจราจรต่อไป ต่อมาเมื่อได้มีการศึกษาวิธีการปรับสภาพวัสดุแอสฟัลท์ติคคอนกรีตเก่าให้คืนสภาพนำมาใช้งานใหม่ ซึ่งมีประโยชน์ในหลาย ๆ ด้านและยังช่วยปรับปรุงการเกิด Hardening ที่เกิดในวัสดุเก่าได้อีกด้วย

Coons and Wright[11] ได้เก็บตัวอย่างจากผิวจราจรต่าง ๆ ที่มีอายุตั้งแต่ 1-13 ปี ที่ความลึกต่าง ๆ กัน พบว่าอัตราการเกิดการแข็งตัวของแอสฟัลท์ที่ลึกกว่า 3/4 นิ้ว (19 มิลลิเมตร) มีไม่มากนัก ดังนั้นการทำให้ผิวบนของผิวจราจรอ่อนลงได้จะช่วยทำให้ผิวจราจรนั้นมีอายุการใช้งานได้ดีขึ้น

ยางแอสฟัลท์สามารถแบ่งส่วนประกอบโดยพิจารณาลักษณะการไหล (Rheology)[12] ออกได้เป็น 4 ส่วนคือ Saturates, naphthene-aromatics, polar-aromatics และ

asphaltenes ลักษณะโดยทั่วไปของส่วนประกอบทั้งสี่ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 3-1 จะเห็นได้ว่าส่วนของ Saturates และ naphthene-aromatics มีลักษณะเป็นของเหลว สำหรับส่วนของ Polar-aromatics และ asphaltenes มีลักษณะเป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็ง ส่วนประกอบทั้ง 4 ส่วนนี้สามารถแยกออกได้โดยวิธี Clay Gel Analysis (ASTM D-2007) ดังแสดงในรูปที่ 3-1 ส่วนทั้ง 4 ของยางแอสฟัลท์นี้จะแสดงคุณสมบัติของการไหลและความอ่อนแข็งของยางแอสฟัลท์ตามแต่ปริมาณในแต่ละส่วนที่ประกอบกัน[12]

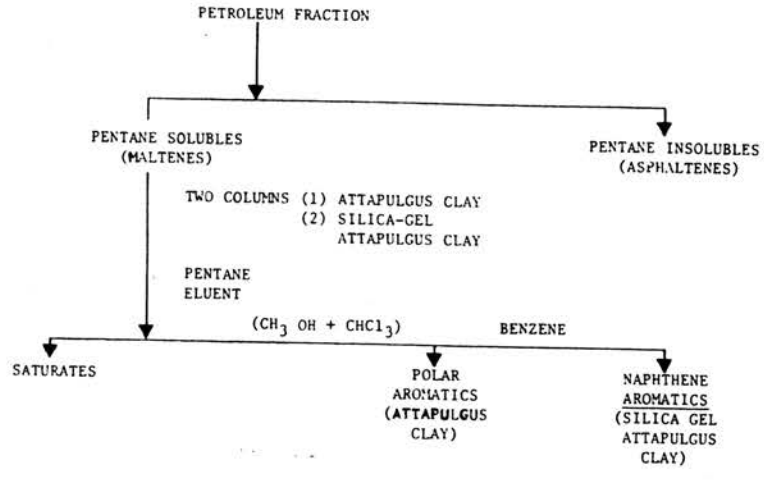
วัสดุผิวจราจรแอสฟัลท์ติคคอนกรีตที่มีอายุการใช้งาน จะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุผิวจราจร[13] ได้แก่

3.1.1 Asphalt Cement

ข้อมูลจาก The Michigan test road[12] แสดงให้เห็นว่า แอสฟัลท์จะมีค่าความหนืด (Viscosity) สูงขึ้นตามอายุ ส่วนประกอบที่พิจารณาจากลักษณะการไหลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยที่ Asphaltenes จะสูงขึ้น และ naphthene-aromatics จะต่ำลง ซึ่งสรุปได้ว่า ส่วนของ Naphthene-aromatic จะเปลี่ยนไปเป็นส่วนของ Polar-aromatics ต่อจาก polar-aromatics จะเปลี่ยนไปเป็นส่วนของ asphaltenes สำหรับ

ตารางที่ 3-1 ลักษณะโดยทั่วไปในแต่ละส่วนของส่วนประกอบทั้ง 4 ตามลักษณะการไหล

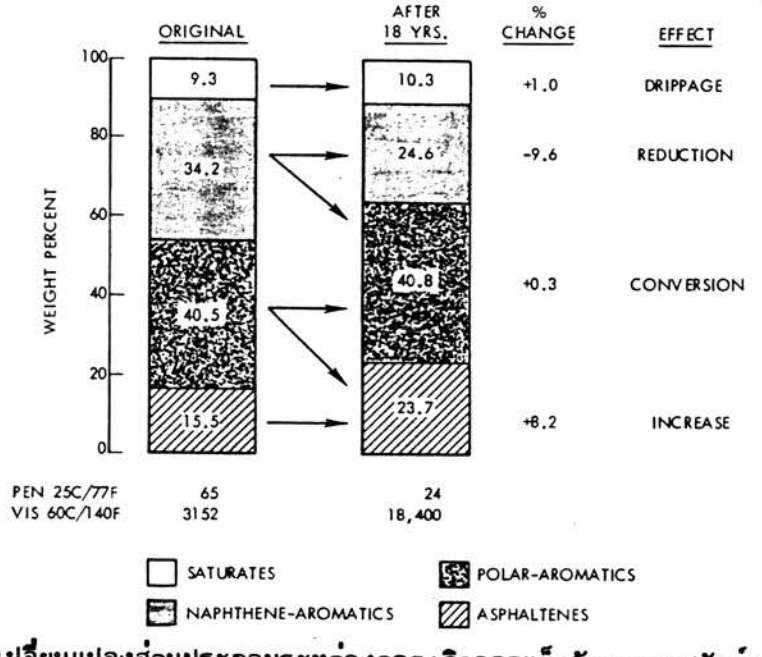
Fraction	Color	Density	Fraction Aromatic	Flow Character
Saturates	Colorless	0.87	0.00	Liquid
Naphthene-Aromatics	Yellow to Red	0.98	0.23	Liquid
Polar-Aromatics	Black	1.07	0.42	Solid
Asphaltenes	Brown to Black	1.15	0.50	Solid



NOTE: Benzene/acetone solvent system has been replaced by chloroform/methanol system in order to comply with present laboratory regulations.

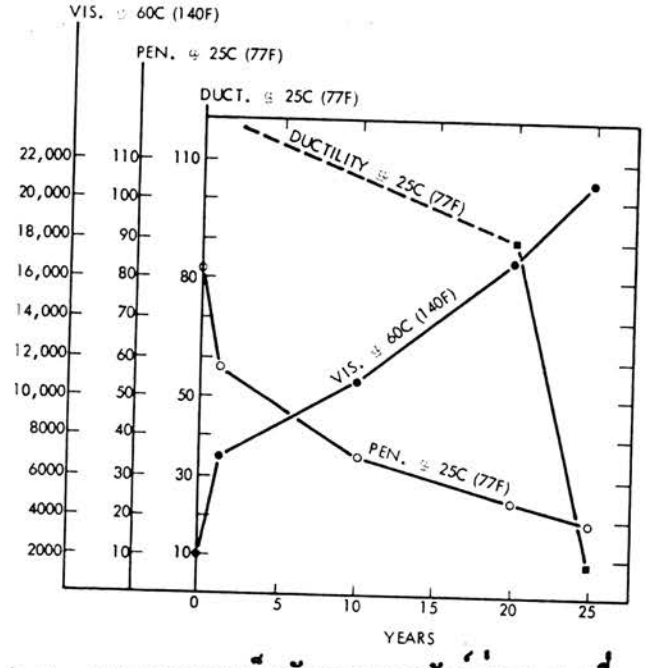
รูปที่ 3-1 แผนภาพแสดงวิธีการแยกส่วนประกอบโดย Clay Gel Analysis

ส่วนของ saturates อาจจะมีเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการหยดของไขและน้ำมันจากยวดยานและสะสมอยู่ในผิวจราจรระหว่างการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 3-2 จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบที่มีลักษณะเป็นของเหลวจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นส่วนที่เป็นของแข็ง การเกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบเช่นนี้จะทำให้แอสฟัลท์มีค่าความหนืดสูงขึ้น ค่าพีนีเตรชั่น (Penetration) ลดลง ขาดการมี Ductility (คุณสมบัติของการไม่แยกตัวจากกันเมื่อ



รูปที่ 3-2 การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบระหว่างการเกิดการแข็งตัวของแอสฟัลท์เป็นค่าเฉลี่ยจากแหล่งน้ำมัน 6 แหล่งทดสอบโดย The Michigan Test Road

เกิดความเครียด (Strain) ขึ้น) การเกิดการแข็งตัวและขาด Ductility จะทำให้ผิวจราจรเกิดการแตกร่าวและ Raveling สารปรับสภาพต่าง ๆ จะช่วยปรับสภาพให้แอสฟัลท์มีคุณสมบัติเหมือนเดิม รูปที่ 3-3 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความข้นเหลวในผิวจราจร (Consistency changes)



รูปที่ 3-3 ผลจากการแข็งตัวของแอสฟัลท์ต่อการเปลี่ยนแปลงความข้นเหลว

3.1.2 The Mineral Aggregate

วัสดุมวลรวมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กลง เนื่องจากการรับน้ำหนักของการจราจรและการบดอัดระหว่างการก่อสร้าง นอกจากนั้นการขูดลอกผิวจราจรด้วยวิธี Planning, milling หรือ crushing จะทำให้ขนาดของวัสดุมวลรวมเล็กลง (Degradation) แม้ว่าจะได้มีการควบคุมอย่างระมัดระวังซึ่งทำให้ผลเหล่านี้ลดลงก็ตาม นอกจากนี้การทำ Seal coats หรือ Slurry seals ก็จะเป็นผลสำคัญที่ทำให้ขนาดที่ใช้ในการผสมเปลี่ยนแปลงไปจากการออกแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปรับสภาพเฉพาะผิวบนที่มีความลึกหนึ่งนิ้ว (25 มิลลิเมตร)

3.1.3 The Various Pavement Layers

อาจทำให้เกิดการรับน้ำหนักเกินขนาด โดยเฉพาะผิวจราจรที่มีปริมาณการจราจรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถนนเหล่านี้ต้องการชั้นของแอสฟัลท์ติคคอนกรีตที่หนาขึ้นเพื่อรองรับการจราจร ซึ่งอาจจำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบส่วนผสมใหม่ เช่นการปรับปรุงค่าความเสถียรภาพ (Stability) โดยการเพิ่มวัสดุมวลรวมหยาบมากขึ้น เปลี่ยนแปลงขนาดผสมใหม่ เปลี่ยนแปลงปริมาณช่องว่าง (Void content) ภายในวัสดุแอสฟัลท์ติคคอนกรีต หรือเปลี่ยนแปลงความข้นเหลว (Consistency) ของแอสฟัลท์ต่าง ๆ กันไป

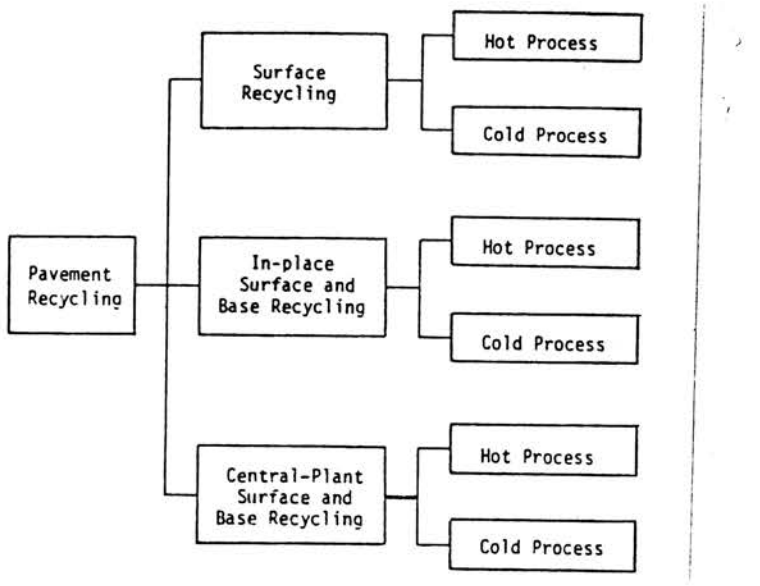
นิยามของการปรับสภาพวัสดุผิวจราจรอยู่บนพื้นฐานของการปรับปรุงคุณภาพของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวประสานที่ใช้งานแล้ว เพื่อที่จะปรับปรุงคุณสมบัติทางกลศาสตร์ (Mechanical) ของส่วนผสม[14] ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อ ๆ ไป วิธีการในการปรับสภาพวัสดุแอสฟัลท์ติคคอนกรีตเก่านำมาใช้งานใหม่ในแต่ละเทคนิคและวิธีการดังได้กล่าวในบทที่แล้ว สามารถแบ่งได้ตามลักษณะของขบวนการผสมได้เป็น 2 ประเภทที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 3-4 ได้แก่

1. การปรับสภาพโดยวิธีการผสมร้อน (Hot-mix recycling)

2. การปรับสภาพโดยวิธีการผสมเย็น (Cold-mix recycling)

3.2 การปรับสภาพโดยวิธีการผสมร้อน (Hot-mix Recycling)

ลักษณะที่สำคัญของวิธีการปรับสภาพโดยวิธีผสมร้อนคือ การนำความร้อนมาใช้ในการผสม ส่วนผสมต่าง ๆ เช่นเดียวกับการผสมร้อนในส่วนผสมแอสฟัลท์ติคคอนกรีตโดยวิธีการปกติ วิธีการขั้นแรกจะทำการศึกษาวัสดุผิวจราจรที่มีความเสียหายเกิดขึ้นและต้องการซ่อมแซมโดยวิธีการปรับสภาพ ขุดลอกวัสดุที่จะนำมาเป็นตัวอย่างจากผิวจราจรเดิมและตัวอย่างนี้สามารถแทนสภาพของวัสดุแอสฟัลท์ติคคอนกรีตบนผิวจราจรนั้นทั้งหมด วัสดุแอสฟัลท์ติคคอนกรีตตัวอย่างจะถูกนำมาแยกแอสฟัลท์และวัสดุมวลรวมออกจากกัน วัสดุมวลรวมจะถูกนำมาทำการทดสอบหาขนาด (Gradation) และการทดสอบด้านอื่น ๆ ถ้าจำเป็นหรือสงสัยว่า วัสดุมวลรวมนั้นจะมีคุณสมบัติไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนดของวัสดุมวลรวมที่นำมาผสมใช้ในงานก่อสร้างผิวจราจร แอสฟัลท์จะถูกนำมาทดสอบหาคุณสมบัติที่สำคัญ ได้แก่ ค่าพีนีเตรชั่น (Penetration) หรือ



รูปที่ 3-4 เทคนิควิธีการของการปรับสภาพวัสดุแบ่งตามขบวนการผสม

ความหนืด (Viscosity) และคุณสมบัติอื่น ๆ ที่สงสัยว่าจะมีคุณสมบัติไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดของแอสฟัลท์ที่นำมาผสมใช้ในงานก่อสร้างผิวจราจร รวมทั้งการหาปริมาณแอสฟัลท์ในวัสดุแอสฟัลท์ติดคอนกรีตเก่านั้นด้วย ต่อจากนั้น ข้อมูลทั้งหมดจะนำมาพิจารณาออกแบบหาปริมาณของส่วนผสมใหม่ จัดหาและแก้ไขขนาดของวัสดุมวลรวมใหม่หรือ เพิ่มวัสดุมวลรวมใหม่เข้าไปในวัสดุผสมเก่าเพื่อที่จะแก้ไขคุณสมบัติที่ไม่ได้มาตรฐานให้ถูกต้องตามที่กำหนด สำหรับการปรับสภาพแอสฟัลท์เก่าจะเลือกใช้แอสฟัลท์ชนิดใหม่ที่มีค่าความข้นเหลวหรือความหนืดอื่น ๆ และหาปริมาณที่เหมาะสม เพื่อที่จะปรับให้แอสฟัลท์เก่าและใหม่ผสมกันให้ได้คุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด ในการปรับสภาพของแอสฟัลท์เก่า อาจจะไม่ใช้แอสฟัลท์ใหม่ก็ได้ โดยใช้สารปรับสภาพต่าง ๆ ที่บริษัทน้ำมันผลิตขึ้น ซึ่งเรียกชื่อต่าง ๆ กันไป แต่นำมาใช้ในการปรับสภาพแอสฟัลท์เก่า ให้มีคุณสมบัติเหมือนแอสฟัลท์ใหม่ มีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลท์ติดคอนกรีตใหม่ดังได้กล่าวมาแล้ว จะทำการทดสอบวัสดุตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ เพื่อที่จะใช้การออกแบบนั้นกับวัสดุผิวจราจรเดิมทั้งหมด เพื่อให้ได้ส่วนผสมแอสฟัลท์ติดคอนกรีตใหม่ ที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับการผสมโดยใช้วัสดุใหม่ทั้งหมด

เมื่อได้ทำการออกแบบแล้ว ต่อไปเป็นการปรับสภาพวัสดุผิวจราจรเก่าทั้งหมด ผิวจราจรเดิมจะถูกขุดลอกออกจากถนนและทำการย่อยขนาดหรือบดอัดให้แตกแยกออกเป็นขนาดเล็ก ๆ ให้มีขนาดที่พอเหมาะ จากผลของโครงการที่ผ่านมา พบว่าขนาดที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงขนาดระหว่าง 1 นิ้ว ถึง 2 นิ้ว[15] ขนาดในช่วงดังกล่าวนี้ ดูเหมือนจะสามารถกระจายได้ดีในส่วนประกอบของแอสฟัลท์และวัสดุมวลรวม เมื่อได้ระดับความร้อนปกติในขบวนการผสมร้อนซึ่งจะทำให้การผสมระหว่างวัสดุเก่าและวัสดุใหม่ได้ผลดี วัสดุเก่าทั้งหมดจะถูกนำมาผสมกับวัสดุใหม่และสารอื่น ๆ ตามปริมาณที่ได้จากการออกแบบขั้นต้น โดยวิธีการผสมร้อน ในการผสมโดยทั่วไป จะกระทำโดยการนำวัสดุมวลรวมใหม่ไปทำการเผาและให้ความร้อนใน Counterflow dryer จัดขนาดโดยการใช้ตะแกรงร่อน (Screen) ผสมกับแอสฟัลท์ที่ร้อนและนำไปผสมกับวัสดุเก่า แต่เนื่องจากการผสมโดยตรงเช่นนี้จะทำให้เกิดควันมากเกินไป เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้แอสฟัลท์ติดคอนกรีตเก่าไหม้ ซึ่งแก้ไขได้โดยการให้ความร้อนในการผสมในถังผสมด้วยวิธีการถ่ายเทความร้อน (Heat-transfer method) วิธีการนี้วัสดุมวลรวมใหม่จะถูกเผา (Superheated) ใน dryer แล้วส่งผ่านไปยังถังผสม แอ๊สฟัลท์ติดคอนกรีตเก่าจะถูกลดขนาดให้เล็กลงและเก็บไว้ในที่ซึ่งมีอุณหภูมิที่พอเหมาะและใช้ระบบสายพานลำเลียงส่งไปยังถังผสม ต่อจากนั้นวัสดุเก่าและใหม่จะผสมกันในถังผสม (Pugmill) และให้ความร้อนโดยวิธีถ่ายเทความร้อนจาก Conduction begins การใช้วิธีถ่ายเทความร้อนจะลดปัญหาอากาศเป็นพิษและสามารถควบคุมปริมาณของวัสดุเก่าและใหม่ได้ดี เมื่อผสมกันได้ส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันดีแล้ว จะนำวัสดุผสมทั้งหมดมาปูลาดผิวจราจรและทำการบดอัดให้แน่นโดยวิธีการเช่นเดียวกับการผสมร้อนโดยทั่วไป

ความนิยมในการใช้วิธีการปรับสภาพผิวจราจรเก่าโดยวิธีผสมร้อนมีมากขึ้นเป็นลำดับ ทำให้เกิดความสนใจในวิธีการออกแบบของการปรับสภาพวัสดุแอสฟัลท์ติดคอนกรีต โดยปกติการออกแบบหาปริมาณของแอสฟัลท์ต่อวัสดุมวลรวม ใช้การทดลองหาปริมาณต่าง ๆ กันหลาย ๆ ค่าในห้องปฏิบัติการและเลือกใช้ปริมาณของแอสฟัลท์ที่เหมาะสมโดยเลือกจากคุณสมบัติของการทดลองเหล่านี้ นิยามของการออกแบบในวิธีการปรับสภาพวัสดุแอสฟัลท์ติดคอนกรีตก็เป็นเช่นเดียวกัน เพียงแต่ว่าวัสดุมวลรวมในผิวจราจรเก่ามีปริมาณของแอสฟัลท์ผสมอยู่ด้วย Duane E. Edge[16]

ได้ออกแบบวิธีการปรับสภาพโดยการหาปริมาณแอสฟัลท์ของส่วนผสม แบ่งออกเป็น 2 วิธี ด้วยกันคือ

1. Method A การแปรปริมาณของแอสฟัลท์ใหม่ที่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสม โดยที่ปริมาณของวัสดุมวลรวมคงที่

2. Method B การแปรปริมาณของวัสดุมวลรวมใหม่ที่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสม โดยที่ปริมาณของแอสฟัลท์คงที่

วิธีการออกแบบทั้ง 2 วิธี ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 3-2 และตารางที่ 3-3 ซึ่งเป็นสูตรในการคำนวณหาปริมาณของวัสดุต่าง ๆ ข้อมูลที่ใช้ในสูตรนี้ได้แก่ การกระจายขนาด (Gradation) และความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของวัสดุมวลรวมทั้งเก่าและใหม่ ค่าความหนืด (Viscosity) หรือค่าพีนีเตรชั่น (Penetration) และความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของแอสฟัลท์ทั้งเก่าและใหม่ เพื่อใช้ในการออกแบบและการหาค่าความหนืดหรือค่าพีนีเตรชั่น และความถ่วงจำเพาะในแอสฟัลท์ผสมและการกระจายขนาดและความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมผสมในส่วนผสมใหม่ ซึ่งจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ Density-voids analysis ของการทดลองหาคุณสมบัติของตัวอย่าง (Specimens)

ในการคำนวณหาค่าพีนีเตรชั่น หรือความหนืดของแอสฟัลท์ผสมของแอสฟัลท์เก่าและแอสฟัลท์ใหม่ที่มีเกรดอ่อนกว่าไม่มีหลักเกณฑ์ที่แน่นอนแท้จริง จากการศึกษาพบว่า ปริมาณของการผสมมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง Logarithms ของค่าพีนีเตรชั่น (Penetration values) ของแอสฟัลท์ใหม่และเก่า เมื่อกำหนดในแผนภาพ Semi-log ดังแสดงในรูปที่ 3-5 การศึกษาอื่น ๆ พบว่า ปริมาณของการผสมมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่า log-log ของความหนืด (Viscosities) ของแอสฟัลท์ใหม่และเก่า เมื่อกำหนดในแผนภาพ Semi-log-log ดังแสดงในรูปที่ 3-6 การคำนวณของ Method A และ B ใช้ความสัมพันธ์เช่นเดียวกันนี้

ตัวอย่างการคำนวณของ Method A แสดงในตารางที่ 3-4 โดยใช้ปริมาณแอสฟัลท์ผสมในส่วนผสมใหม่มีปริมาณ 5.0, 5.5 และ 6.0 เปอร์เซนต์ ของน้ำหนักส่วนผสม โดยที่

อัตราส่วนของวัสดุมวลรวมใหม่ต่อวัสดุมวลรวมทั้งหมด เท่ากับ 60 เปอร์เซนต์ และในส่วนผสมของวัสดุผิวจราจรเก่ามีแอสฟัลท์อยู่ 4.7 เปอร์เซนต์ ซึ่งการคำนวณจะได้อัตราส่วนของปริมาณแอสฟัลท์ใหม่ต่อปริมาณแอสฟัลท์ผสมทั้งหมด ตารางที่ 3-5 จะเป็นการหาค่าความหนืดของแอสฟัลท์ใหม่ที่จะนำมาผสม เมื่อทราบค่าความหนืดของแอสฟัลท์เก่าและค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมที่ใช้ในการออกแบบ โดยคำนวณจากสูตรในตารางที่ 3-3 สำหรับการคำนวณของ Method B จากตัวอย่างเดียวกันใน Method A เมื่อทราบค่าความหนืดของแอสฟัลท์เก่า ค่าความหนืดของแอสฟัลท์ใหม่และค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมที่ใช้ในการออกแบบ จะสามารถคำนวณหาอัตราส่วนของแอสฟัลท์ใหม่ต่อปริมาณแอสฟัลท์ผสมในส่วนผสมได้จากตารางที่ 3-3 ดังแสดงในตารางที่ 3-6 อัตราส่วนที่ได้นี้ จะนำไปคำนวณหาปริมาณของวัสดุเก่า ปริมาณของแอสฟัลท์ใหม่และปริมาณของวัสดุมวลรวมใหม่ที่ปริมาณของแอสฟัลท์ผสมต่อน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมดต่าง ๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-2 สูตรการหาปริมาณวัสดุผสมต่าง ๆ สำหรับการออกแบบวิธีปรับสภาพโดยการผสมร้อน

Formulas for portioning materials for recycled hot-asphalt mix design

Method	A	B
Combination of aggregates in blend, r	Constant	Varies
Combination of asphalts in blend, R	Varies	Constant
Asphalt Content Expressed as Per Cent by Weight of Total Mix		
Basic Formula	$100 = P_{sm} + P_{nb} + P_{ns}$	
% salvage mix, P_{sm}	$\frac{100(100-r)}{100-P_{sb}} - \frac{(100-r)P_b}{100-P_{sb}}$	$\frac{(100-R)P_b}{P_{sb}}$
% new asphalt, P_{nb}	$\frac{(100^2-P_{sb}r)P_b}{100(100-P_{sb})} - \frac{(100-r)P_{sb}}{100-P_{sb}}$	$\frac{P_bR}{100}$
% new aggregate, P_{ns}	$r - \frac{rP_b}{100}$	$100 - \frac{(100-R}{(P_{sb}} + \frac{R)}{100)}P_b$
% new asphalt to total asphalt content, R	$\frac{100P_{nb}}{P_b}$	See Table 2
Asphalt Content Expressed as Per Cent by Weight of Respective Aggregate		
Basic Formula	$100 + P_b = P_{sm} + P_{nb} + P_{ns}$	
% salvage mix, P_{sm}	$\frac{(100+P_{sb})(100-r)}{100}$	$\frac{(100-R)(100+P_{sb})P_b}{100P_{sb}}$
% new asphalt, P_{nb}	$P_b - \frac{(100-r)P_{sb}}{100}$	$\frac{RP_b}{100}$
% new aggregate, P_{ns}	r	$100 - \frac{(100-R)P_b}{P_{sb}}$
% new asphalt to total asphalt content R	$\frac{100P_{nb}}{P_b}$	See Table 3-3

P_{sm} = Salvaged mix in recycled mix, per cent
P_b = asphalt content of recycled mix, per cent
P_{sb} = asphalt content of salvaged mix, per cent
P_{nb} = new (additional) asphalt in recycled mix, per cent
P_{ns} = new (additional) aggregate in recycled mix; either per cent by weight of total mix, or per cent by weight of total aggregate in recycled mix
r = ratio of new aggregate to total aggregate, per cent
R = ratio of new asphalt to total asphalt content, per cent

ตารางที่ 3-3 สูตรสำหรับการหาปริมาณแอสฟัลท์ใหม่ต่อแอสฟัลท์ผสมทั้งหมด

Formulas for proportioning new asphalt to total asphalt content

A. Proportioning by Penetration Values

$$R = \frac{(B_p - S_p)\,100}{N_p - S_p}$$

$$B_p = S_p + \frac{(N_p - S_p)\,R}{100}$$

$$N_p = S_p + \frac{(B_p - S_p)\,100}{R}$$

where R = ratio of new asphalt to total asphalt content, per cent
S_p = log penetration of salvaged asphalt
N_p = log penetration of new asphalt
B_p = log penetration of blended new and salvaged asphalt

B. Proportioning by Viscosity Values

$$R' = \frac{(S_v - B_v)\,100}{S_v - N_v} = \frac{(1100 - R)\,R}{1000}$$

$$R = 550 - 10\,(3025 - 10R')^{1/2}$$

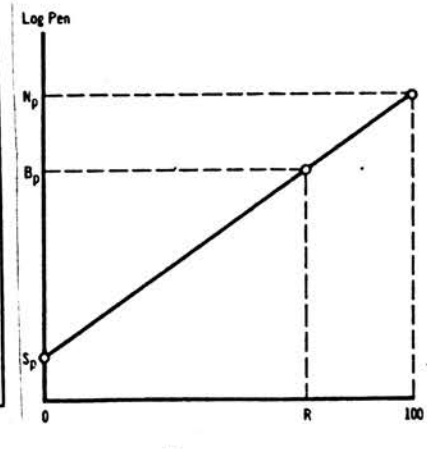
$$B_v = S_v - \frac{(S_v - N_v)\,R'}{100}$$

$$N_v = S_v - \frac{(S_v - B_v)\,100}{R'}$$

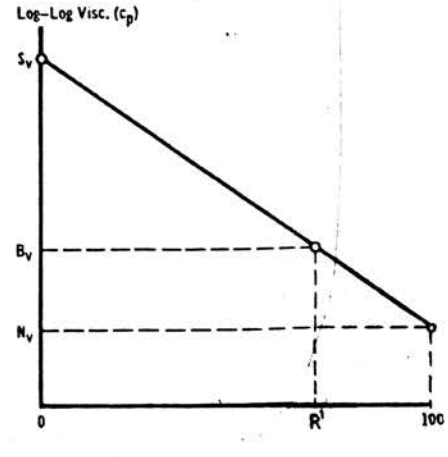
where R′ = psuedo ratio (intermediate step) of new asphalt to total asphalt content, per cent
R = ratio of new asphalt to total asphalt content, per cent
S_v = log-log viscosity of salvaged asphalt, centipoises
N_v = log-log viscosity of new asphalt, centipoises
B_v = log-log viscosity of blended new and salvaged asphalt, centipoises

NOTE: 1 poise = 100 centipoises

R = ratio of new asphalt—total asphalt content, %
N_p = log penetration of new asphalt
B_p = log penetration of blended new and salvaged asphalt
S_p = log penetration of salvaged asphalt
R^1 = pseudo ratio (intermediate step) of new asphalt to total asphalt content
S_v = log-log viscosity of salvaged asphalt centipoises
B_v = log-log viscosity of blended and salvaged asphalt, centipoises
N_v = log-log viscosity of new asphalt centipoises



รูปที่ 3-5



รูปที่ 3-6

รูปที่ 3-5 ความสัมพันธ์ของค่าพีนีเตรชั่น ของแอสฟัลท์ใหม่ เก่าและแอสฟัลท์ผสม

รูปที่ 3-6 ความสัมพันธ์ของค่าความหนืดของแอสฟัลท์ใหม่ เก่าและแอสฟัลท์ผสม

ตารางที่ 3-4 การหาปริมาณของส่วนผสมใน Method A

Illustrative example of proportioning materials for recycled asphalt mix design

(Method A)

P_b	5.0	5.5	6.0
$P_{sm} = \frac{100(100-60)}{100-4.7} - \frac{(100-60)P_b}{100-4.7} = 41.97 - .42P_b$	39.87	39.66	39.45
$P_{nb} = \frac{(100^2-4.7(60))P_b}{100(100-4.7)} - \frac{(100-60)4.7}{100-4.7} = 1.02P_b - 1.97$	3.13	3.64	4.15
$P_{ns} = 60 - \frac{60P_b}{100} = 60 - 0.6P_b$	57.00	56.70	56.40
Total	100.00	100.00	100.00
$R = \frac{100P_{nb}}{P_b}$	63	66	69

ตารางที่ 3-5 การหาเกรดความหนืดของแอสฟัลท์ใหม่ใน Method A

Determining required viscosity grade of new asphalt cement

P_b	5.0	5.5	6.0
R	63	66	69
$R' = \frac{(1100-R)R}{1000}$	65	68	71
S_v = log-log 3,700,000 centipoises B_v = log-log 200,000 centipoises		0.8174 0.7244	
$N_v = 0.8174 - \frac{100(0.8174-0.7244)}{R'} = 0.8174 - \frac{9.30}{R'}$	0.6743	0.6806	0.6864
Viscosity = anti log-log N_v, centipoises poises	53,000 530	62,000 620	72,000 720
Probable selection, AC-5 (500 ± 100 poises)			
Probable viscosity of blended asphalt using AC-5			
N_v = log-log 50,000 centipoises		0.6720	
$B_v = 0.8174 - \frac{(0.8174-0.6720)R'}{100} = 0.8174 - 0.001454R'$	0.7229	0.7185	0.7142
Viscosity = anti log-log B_v, centipoises poises	192,000 1920	170,000 1700	151,000 1510

ตารางที่ 3-6 การหาปริมาณของแอสฟัลท์ใหม่ใน Method B

Determining proportion R of new asphalt for desired blended viscosity

S_V = log-log 3,700,000 centipoises = 0.8174

N_V = log-log 50,000 centipoises = 0.6720

B_V = log-log 200,000 centipoises = 0.7244

$$R = \frac{(0.8174-0.7244)\,100}{0.8174-0.6720} = 64$$

$$R' = 550-10(3025-10(64))^{\frac{1}{2}} = 62$$

ตารางที่ 3-7 การหาปริมาณของวัสดุผสมต่าง ๆ ใน Method B

Determining proportions of materials for constant proportion *R* for new asphalt

(Method B)

P_b	5.0	5.5	6.0
$P_{am} = \frac{(100-62)P_b}{4.7} = 8.09\,P_b$	40.45	44.50	48.54
$P_{nb} = \frac{62P_b}{100} = 0.62P_b$	3.10	3.41	3.72
$P_{na} = 100 - \frac{(100-62}{(4.7} + \frac{62\ )}{100)}P_b = 100 - 8.71P_b$	56.45	52.09	47.74
Total	100.00	100.00	100.00

แม้ว่าการหาปริมาณของแอสฟัลท์ในส่วนผสมที่เหมาะสมจะใช้ขบวนการการทดสอบมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ สูตรในการออกแบบวิธีการปรับสภาพมีส่วนช่วยให้การหาปริมาณวัสดุของส่วนผสมรวดเร็วยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามตัวอย่างของวัสดุผิวจราจรเก่าจะต้องสามารถแทนวัสดุทั้งหมดที่จะนำมาปรับสภาพ เช่น ขบวนการในการขุดลอกผิวจราจรใช้วิธีการใด การเก็บตัวอย่าง เพื่อนำมาทดสอบก่อนการทำการปรับสภาพ ควรได้มาด้วยวิธีเดียวกันด้วย เช่น การขุดลอกวัสดุจะใช้วิธีการ Cold-milling การวิเคราะห์ส่วนผสมของวัสดุเก่าจะต้องทดลองกับตัวอย่างที่เก็บโดยวิธีการ Cold-milling เช่นเดียวกัน

3.3 <u>การปรับสภาพโดยวิธีการผสมเย็น</u> (Cold-mix Recycling)

การปรับสภาพโดยวิธีการผสมเย็น ได้เริ่มนำมาใช้ครั้งแรกในตอนต้นระหว่างปี ค.ศ. 1940-1949[8] โดยการนำวัสดุบิทูเมน (Bitumen) และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) ผสมกับผิวจราจรเก่าที่ขุดลอกโดยการใช้เครื่องมือธรรมดาและผสมกับวัสดุมวลรวมใหม่เพื่อปรับปรุงคุณภาพผิวจราจรให้ดีขึ้น ลักษณะที่สำคัญของวิธีการนี้คือการไม่ต้องนำความร้อนเข้ามาใช้ในการผสมส่วนผสมของวัสดุต่าง ๆ ซึ่งเป็นสิ่งที่แน่นอนว่าจะลดการใช้พลังงานให้น้อยลง และไม่ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษ วิธีการนี้จะเก็บตัวอย่างวัสดุผิวจราจรแอสฟัลท์ติคคอนกรีตเก่าที่ต้องการปรับสภาพนำมาใช้งานใหม่ นำไปทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมและแอสฟัลท์ เช่นเดียวกันกับการปรับสภาพโดยวิธีการผสมร้อน แต่ด้วยวิธีการผสมเย็น ตัวประสานใหม่ที่ใช้เพื่อการปรับสภาพวัสดุจะเลือกใช้แอสฟัลท์เหลว (Liquid asphalts) ปูนขาว (Lime) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) หรือสารปรับสภาพที่ใช้ในการผสมเย็น ซึ่งบริษัทน้ำมันต่าง ๆ ผลิตขึ้นเช่นเดียวกันกับการปรับสภาพโดยวิธีการผสมร้อน แต่เป็นสารที่ใช้กับวิธีการผสมเย็นโดยเฉพาะ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะถูกทดสอบเพื่อหาปริมาณของแอสฟัลท์และวัสดุมวลรวม และนำมาออกแบบเพื่อหาปริมาณของตัวประสานใหม่ที่จะใช้ ให้มีความเหมาะสม และมีเสถียรภาพมากที่สุด ตัวประสานแต่ละชนิดที่นำมาใช้ หากใช้ได้อย่างเหมาะสมก็จะสามารถออกแบบตามความต้องการได้อย่างเหมาะสมด้วย เมื่อได้ทำการออกแบบเรียบร้อย ก็จะทำการขุด เจาะ ลอกเอาผิวจราจรเก่าและทำการบดวัสดุแอสฟัลท์ติคคอนกรีตบนผิวจราจรเดิมให้มีขนาดเล็กลง โดยให้มีขนาดใหญ่ที่สุดไม่เกินกว่า 1.5 นิ้ว[8] หลังจากนั้นจะนำมาผสมกับตัวประสานและวัสดุมวลรวมใหม่ตามปริมาณที่ได้ออกแบบไว้ แล้วจึงนำกลับไปปูลาดผิวจราจรและทำการบดอัดให้แน่นเหมือนเช่นวิธีการผสมเย็นโดยทั่วไป

การเลือกชนิดและปริมาณของตัวประสานที่ถูกต้อง ก็เป็นส่วนที่สำคัญมากซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพการณ์ ความต้องการ การได้มาของวัสดุ ข้อกำหนดพิจารณาและราคาด้วย ตัวประสานบิทูมินัส (Bituminous binders) เป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุด[8] เนื่องจากข้อดีในหลาย ๆ ด้าน เช่น การมีแรงยึดเหนี่ยว (Particle bond) ที่ยอมรับ กำลังยึดหยุ่นและการลดการซึมผ่าน

ยิ่งไปกว่านั้น ตัวประสานที่มีอยู่ในผิวจราจรเก่าจะมีความแข็งและเปราะสามารถปรับได้ด้วยการใช้บิทูมินัสใหม่ที่เพิ่มเป็นพิเศษจะช่วยให้ส่วนผสมใหม่มีผลลัพธ์ที่น่าพอใจ อีมัลชั่น (Emulsions) มักจะเป็นตัวประสานที่เหมาะที่สุดของแอสพัลท์เหลว (Liquid asphalts)[8] ส่วนมากจะใช้ชนิด MS และ SS (Medium-setting และ slow-setting) เพื่อให้เกิดการยึดเกาะ (Adhesion) ที่เพียงพอ การเลือกใช้ชนิดของ Cationic หรือ Anionic ก็ควรเลือกให้เหมาะสมเช่นกัน

ส่วนหนึ่งของโครงการศึกษาของ Purdue University ในหัวข้อเรื่อง "Recycling of Bituminous Pavements" โดยการสนับสนุนของ Indiana State Highway Commission และ The Federal Highway Administration ได้ทำการศึกษาหาอิทธิพลของผลต่าง ๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของส่วนผสมวัสดุผิวจราจรที่ปรับสภาพโดยวิธีการผสมเย็น ผลต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่ จำนวนตัวประสานที่เพิ่มขึ้นใหม่ จำนวนความชื้นที่เพิ่มขึ้นใหม่ วัสดุมวลรวมที่เพิ่มขึ้นใหม่ การบดอัดและเวลาที่ใช้ในการบ่ม (Curing time) โดยการใช้อีมัลชั่นเป็นตัวประสานที่เพิ่มขึ้นใหม่ การศึกษาพบว่า ผลสำคัญที่มีต่อการทำงาน (Performance) ของส่วนผสมวัสดุผิวจราจรที่ปรับสภาพโดยวิธีการผสมเย็นคือ ปริมาณของตัวประสานทั้งหมดในส่วนผสม การมีปริมาณของตัวประสานสูงจะให้การต้านทานการซึมผ่านน้ำได้ดีและพบว่า

1. การเพิ่มขึ้นของน้ำช่วยให้ขบวนการผสมดีขึ้นและไม่มีผลต่อความเสถียรภาพมากนัก
2. วัสดุมวลรวมที่เพิ่มขึ้นใหม่ สามารถทำได้เพื่อการปรับสภาพวัสดุให้มีส่วนผสมที่มีความเสถียรภาพที่ใช้ได้
3. ความเสถียรภาพของวัสดุเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการบ่ม
4. ผลจากน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดปริมาณของตัวประสานและเวลาที่ใช้ในการบ่ม
5. ปริมาณตัวประสานที่มากจนเกินไปจะทำให้วัสดุมีเสถียรภาพลดลง

ปูนขาว (Lime) และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) ใช้ได้ดีกับลักษณะของวัสดุที่มีมวลละเอียด (Fine-grained หรือ plastic material) ในชั้นของพื้นทางและรองพื้นทาง ปูนขาวใช้ได้ดีกับดินที่มีสภาพพลาสติคสูง (Highly plastic clays) ในการใช้ซีเมนต์จะต้องทดสอบหาปริมาณของสารอินทรีย์ (Organic matter) และซัลเฟต (Sulphates) ว่าเหมาะสมหรือไม่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ให้ผลดีที่ทำให้มีกำลังสูง แต่จากผลงานที่ผ่านมา ทั้งปูนขาวและซีเมนต์ต่างแสดงถึงการไม่ได้ใช้ประโยชน์ต่อตัวประสานที่มีอยู่ในวัสดุผิวจราจรเดิม ซึ่งผิดความมุ่งหมายในการปรับสภาพผิวจราจร

ในปี ค.ศ. 1976 Portland Cement Association (PCA) ได้ให้แนวทางในการปรับสภาพโดยผสมเย็นด้วยซีเมนต์ในหัวข้อเรื่อง "Recycling Failed Flexible Pavements with Cement" สำหรับเป็นแนวทางในการปรับสภาพผิวจราจรแอสฟัลท์ติคคอนกรีตด้วยซีเมนต์ ผลที่เป็นส่วนสำคัญในการปรับสภาพด้วยซีเมนต์ได้แก่ การบดหรือย่อยขนาดวัสดุให้เพียงพอ ปริมาณซีเมนต์ที่พอเหมาะ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ความหนาแน่นที่พอเพียงและการบ่มที่พอเพียง ในการปรับสภาพด้วยซีเมนต์ เริ่มด้วยการขุดลอกผิวจราจรให้แตกออกและปรับสภาพวัสดุมวลรวมโดยผสมวัสดุที่เพิ่มขึ้นใหม่ บนผิวจราจรเดิมจะจัดรูปถนนให้มีความลาดเอียงและระดับที่เหมาะสม วัสดุต่าง ๆ จะนำมาผสมกับซีเมนต์และให้ปริมาณน้ำที่พอเหมาะ ต่อจากนั้นจะทำการปูวัสดุบนผิวจราจรเดิม บดอัดให้แน่นและตกแต่งผิวหน้าและทิ้งเวลาในการบ่มคอนกรีต

Vladis Servas[8] ได้แบ่งการปรับสภาพโดยวิธีการผสมเย็นในสนาม (Cold-mix in-place recycling) ออกเป็น 2 ขบวนการด้วยกันคือ

1. Reclaimix เป็นวิธีการที่ใช้สำหรับการปรับปรุงผิวจราจรแอสฟัลท์ติคคอนกรีตเก่าโดยการบดขนาดของผิวจราจรและทำการปรับสภาพแอสฟัลท์เก่าให้อ่อนลงด้วยการใช้สารปรับสภาพ (Softener) ซึ่งเป็นส่วนของน้ำมันที่มีส่วนของ Aromatic สูง การกระทำด้วยวิธีนี้มีขึ้นครั้งแรกในปี 1950 บนทางหลวงใน California ซึ่งเป็น ผลสำเร็จพอสมควรและยังคงใช้ส่วนผสมใหม่นั้นเป็นชั้นผิวทาง

2. Retread วิธีการนี้นิยมใช้ในประเทศอังกฤษในการปรับปรุงผิวจราจรบนถนนที่มีการจราจรไม่สูงนัก ขบวนการนี้ได้กำหนดเป็นมาตรฐานใน British Standard 434 (B.S. 434) และใช้กันมานานถึง 30 ปี ขบวนการนี้เป็นประโยชน์ทางเศรษฐกิจในการปรับปรุงสภาพของผิวจราจรที่เกิดการทรุดตัว การแตกร้าวหรือกับผิวจราจรที่มีพื้นฐานอ่อน ผิวจราจรนี้จะถูกขุดลึกประมาณ 80 มิลลิเมตร และทำให้แตกออกโดยมีขนาดที่น้อยกว่า 75 มิลลิเมตร โดยการใช้รถบดที่มีน้ำหนัก 8-10 ตัน วัสดุมวลรวมใหม่สามารถเพิ่มเข้าไปเพื่อแก้ไขปริมาณของส่วนผสมหรือปรับระดับแนวถนน ต่อจากนั้นจะใช้อีมัลชั่น (Emulsion) ฉีดกระจายในอัตรา 5.5 ถึง 6.5 ลิตรต่อตารางเมตร ประมาณ 2 ถึง 3 ครั้ง ขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุและการกระจายของอีมัลชั่นให้เพียงพอต่อความต้องการ ผิวจราจรจะถูกปรับแนวและอัดแน่นด้วยรถบดขนาด 8-10 ตัน การเพิ่มความต้านทานการลื่นไถลและป้องกันการซึมผ่านของน้ำกระทำโดยการปูหินขนาด 14 มิลลิเมตร และผสมกัน 62 เปอร์เซนต์ของอีมัลชั่นในอัตรา 1-1.4 ลิตรต่อตารางเมตร และปูด้วยหินขนาด 6 มิลลิเมตร ก่อนทำการบดอัดครั้งสุดท้าย

วิธีการในการปรับสภาพโดยการผสมเย็น ยังได้มีการศึกษาอื่น ๆ อีกมาก ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการใช้วิธีการผสมเย็นได้แก่ การเลือกใช้ชนิดและปริมาณของตัวประสานหรือสารปรับสภาพที่ถูกต้อง ความเข้าใจในลักษณะโครงสร้างของผิวจราจรเดิม ความต้องการแก้ไขโครงสร้างผิวจราจรและการเพิ่มวัสดุมวลรวมใหม่ ควรมีการทดสอบคุณสมบัติที่เหมาะสมการใช้ขบวนการหรือโรงงานในการผสมที่ถูกต้องและการประเมินประโยชน์ทางเศรษฐกิจ ผลสำคัญอีก 2 ประการคือ การมีราคาของวัสดุที่ถูกกว่าและความสามารถในการใช้เครื่องมือทั่วไปในการผสมและปรับปรุงคุณภาพวัสดุผิวจราจร

แม้ว่าการปรับสภาพโดยวิธีการผสมเย็นจะช่วยในการลดการใช้พลังงานลง โดยไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่วัสดุมวลรวมและตัวประสานในการผสม แต่ข้อเสียของวิธีการนี้ก็มีอยู่มาก เช่น การกระจายขนาดของวัสดุมวลรวมไม่ทั่วถึงกัน ไม่สามารถผสมวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous material) อย่างสมบูรณ์เหมือนเช่นการผสมร้อน และแอสฟัลท์ใหม่และเก่าไม่สามารถละลายและไหลให้เข้ากันได้ดี ดังนั้นการปรับสภาพด้วยวิธีการผสมเย็นจึงไม่แข็งแรงเท่ากับการปรับสภาพด้วยวิธีการผสมร้อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงมักใช้วัสดุที่ทำการปรับสภาพด้วยวิธีการผสมเย็นกับถนนที่มีการจราจรต่ำ เพราะมีราคาที่ถูกและประหยัดกว่า

3.4 สารปรับสภาพแอสฟัลท์ (Recycling Modifiers)

สารต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลท์ที่บริษัทจำหน่ายผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเลียมผลิตขึ้นนั้น อาจเรียกชื่อต่าง ๆ กันไปเช่น Softening agents, rejuvenators, reclaiming agents, modifiers, recycling agents, extender oils, fluxing oils และ aromatic oils สารปรับสภาพเหล่านี้ต่างมีผลใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลท์เก่า ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเปลี่ยนแปลงไปจากคุณสมบัติของแอสฟัลท์ใหม่ สารปรับสภาพเหล่านี้อาจใช้ตามลำพังหรือใช้รวมกับยางแอสฟัลท์โดยทั่วไป สารปรับสภาพถูกนำมาใช้เป็นเวลานานแล้ว โดยมีการใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1961[11] และได้มีการศึกษาปรับปรุงให้สารปรับสภาพเหล่านี้ใช้งานได้ดีขึ้น สารแต่ละชนิดจะนำมาใช้ในสภาพต่าง ๆ กันออกไป ผลของสารปรับสภาพชนิดหนึ่งในแอสฟัลท์ต่าง ๆ กัน ก็จะให้ผลที่แตกต่างกันเช่นเดียวกัน แอสฟัลท์ชนิดหนึ่งจะให้ผลที่ต่างกันไปกับการใช้สารปรับสภาพชนิดต่าง ๆ กันด้วย ดังนั้นจึงไม่มีความสัมพันธ์ที่แน่นอนสำหรับการใช้ได้โดยทั่วไป จำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติทั้งของสารปรับสภาพและแอสฟัลท์เก่าที่ต้องการปรับสภาพเสียก่อน สารปรับสภาพที่บริษัทผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเลียมมีชื่อต่าง ๆ กันออกไป ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-8[6, 17]

สารปรับสภาพเหล่านี้ได้มีการปรับปรุงให้ดีขึ้นและมีมากขึ้นหลายชนิด จากผลิตภัณฑ์ของบริษัทผู้ผลิตน้ำมัน รายงานจาก ASTM Subcommittee D4.37 (Modifier Agents for Bitumen in Pavements and Paving Mixtures) กำหนดเรียกสารปรับสภาพเหล่านี้ว่า "Modifier" คำนิยามโดยทั่วไปของสารปรับสภาพคือ วัสดุชนิดหนึ่งเมื่อเพิ่มลงในแอสฟัลท์ซีเมนต์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวประสาน นิยามเฉพาะที่ถูกกำหนดขึ้นครั้งแรกโดย The 13th Pacific Coast (USA) User-Producer Conference on Asphalt Specifications[6] ได้ร่วมกันเพื่อกำหนดมาตรฐานและข้อกำหนดสำหรับสารปรับสภาพเหล่านี้ และให้นิยามของสารเหล่านี้ว่าเป็นผลิตผลของไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพที่ได้คัดเลือก เพื่อทำให้บิทูเมนเก่ามีคุณสมบัติเปลี่ยนกลับเหมือนเช่นข้อกำหนดของแอสฟัลท์ (A hydrocarbon product with physical characteristics selected to restore aged bitumen to the requirements of current

ตารางที่ 3-8 ส่วนหนึ่งของสารปรับสภาพต่าง ๆ ของบริษัทผู้ผลิตน้ำมัน

Petroleum or Oil Company	Modifier
Arizona Refining Company	Light Aromatic Oil
Ashland Petroleum Company	Medium Aromatic Oil
	Slurry Oil
	AshlandPlasticizer Oil (APO)
	Nuflex 100
	Nuflex 330
Cenex	Dust Oil
Chevron USA, Inc.	Chevron X109
	Chevron X90
Koppers Company, USA, Inc.	BPR
Tosco Corporation-Lion Oil Division	Smackover Flux Asphalt
	Rejuvenator Oil
Mobil Oil Corporation	XMTY-125B
	Mobilsol 30
Pax International	Pasole
	Petroset
Phillips Petroleum Company	10 Extract
	20 Extract
	250 Extract
Saunders Petroleum Company	SA-1
Shell Oil Company	RJ 2
	RJ 3
	Dutrex
Satchem	Tar rejuvenator
Sun Petroleum Products	Sundex 840T
	Sundex 790T
Union Oil Company	Rejuv-Acote-Bax
Witco Chemical Corporation-Golden	Reclamite
Bear Division	Cyclogen
	Cutback Asphalt
	Emulsified Asphalt
	Califlux GP
Numerous Companies	Soft Asphalt Cement
	Reclaimed Oil

asphalt specifications)

วัตถุประสงค์ของสารปรับสภาพในผิวจราจรแอสฟัลท์ติคคอนกรีตได้แก่[6]

1. เพื่อทำให้แอสฟัลท์เก่าที่นำมาปรับสภาพมีระดับความข้นเหลว (Consistency) เหมาะสมกับสภาพที่ใช้ในการก่อสร้าง

2. เพื่อทำให้แอสฟัลท์เก่ามีลักษณะทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับความคงทน (Durability)

3. เพื่อเพิ่มตัวประสานให้เพียงพอที่จะยึดวัสดุมวลรวมใหม่ที่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมที่นำมาปรับสภาพ

4. เพื่อเพิ่มตัวประสานให้เพียงพอต่อส่วนผสมตามความต้องการในการออกแบบ

คุณสมบัติของสารปรับสภาพที่สำคัญเพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้สำหรับการปรับสภาพได้แก่[6]

1. ง่ายต่อการกระจายในส่วนผสมเพื่อปรับสภาพ

2. เปลี่ยนแปลงความหนืดของแอสฟัลท์เก่าให้ได้ระดับที่ต้องการ

3. ผสมเข้ากับแอสฟัลท์เก่าได้ดี

4. สามารถที่จะทำให้ Asphaltenes ในแอสฟัลท์เก่ากระจายในส่วนผสมแอสฟัลท์

5. ปรับปรุงอายุการใช้งานของส่วนผสมของแอสฟัลท์ที่เกิดขึ้นใหม่

6. มีความสม่ำเสมอในส่วนผสม

7. ต้านทานการเกิดควันหรือติดไฟในขบวนการผสมร้อน

คุณสมบัติเหล่านี้ได้ถูกนำมาพิจารณา เพื่อกำหนดชนิดของสารปรับสภาพ เหล่านี้โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตารางที่ 3-9 แสดงถึงคุณสมบัติและวิธีการทดสอบในการพิจารณากำหนดชนิดของสารปรับสภาพ[18] และการทดสอบ 6 ชนิดใช้ในการกำหนดมาตรฐานของสารปรับสภาพ

ตารางที่ 3-9 การทดสอบคุณสมบัติของสารปรับสภาพ

Functional Reason	Test Evaluated
Grade Designation and Product	Viscosity at 140F (60C), CST.*
Consistency	Viscosity at 275F (135C)
Handling and Shipping	Flash Point, 00C*
	Fire Point
Volatility	Rolling Thin Film (RTF-C) Oven Weight Change*
	Smoke Point
	ASTM D 1160 Distillation
Compatibility and Solvency	Saturates, Weight Percent*
	Aniline and Mixed-Aniline Point
	Refractive Index
	Compositional Analysis
Durability	Viscosity Ratio*
Accounting	Specific Gravity 60/60F*

* ใช้ในการพิจารณาในการกำหนดชนิดของสารปรับสภาพ

การทดสอบ 6 ชนิดในการพิจารณาในการกำหนดชนิดของสารปรับสภาพได้แก่

1. Viscosity เป็นวิธีการทดสอบโดยทั่วไปเพื่อใช้ในการกำหนดเกรด มักจะใช้ความหนืดที่ 140F (60C) และ 275F (135C) สารปรับสภาพที่มีค่าความหนืดที่ 140F (60C) น้อยกว่า 200 CST. จะมี Viscosity ratio สูงมากเกินไป (RTF-C Oven Weight Change สูง) และ Ductilities ของ RTF-C residues ไม่ได้ตามที่กำหนดของแอสฟัลท์ สำหรับสารปรับสภาพที่มีค่าความหนืดที่ 140F (60C) สูงกว่า 200 CST. จะได้คุณสมบัติตามข้อกำหนดของแอสฟัลท์ ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าของความหนืดที่ 140F (60C) ไม่ต่ำกว่า 200 CST.

สารปรับสภาพสามารถแบ่งช่วงของความหนืดออกได้เป็น 5 เกรดดังตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3-10 การแบ่งเกรดของสารปรับสภาพโดยช่วงของความหนืด

GRADE	Viscosity @ 140F (60C) CST	
	MIN	MAX
RA-5	200	800
RA-25	1000	4000
RA-75	5000	10000
RA-250	15000	35000
RA-500	40000	60000

สารปรับสภาพเกรด RA-5 และ RA-25 เป็นที่นิยมใช้กันมากเมื่อใช้ส่วนของผิวจราจรเก่ามาก ๆ สำหรับสารปรับสภาพที่มีค่าความหนืดสูง จะใช้กับการผสมเมื่อผสมกับผิวจราจรเก่าต่ำกว่า 65 เปอร์เซนต์ สำหรับการทดสอบความหนืดที่ 135C (275F) ใช้ในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสารปรับสภาพ (Temperature Susceptibility)[13]

2. Flash Point เป็นวิธีการที่สำคัญสำหรับความปลอดภัยในการลำเลียงขนส่งและการผสม การที่สารปรับสภาพมีจุดวาบไฟต่ำ แสดงว่าสารนั้นมีวัสดุอินทรีย์หรือสิ่งอื่นเจือปนที่ระเหยได้ง่าย ในระหว่างการผสมร้อน สารปรับสภาพอาจจะได้รับอุณหภูมิของวัสดุมวลรวมซึ่งสูงกว่า 300F (149C) AASHTO ได้กำหนดจุดวาบไฟต่ำสุดสำหรับแอสฟัลท์ที่ 400F (204C) ดังนั้นสารปรับสภาพในแต่ละเกรด จึงกำหนดค่าต่ำสุดของจุดวาบไฟของ COC ดังตารางที่ 3-11

ตารางที่ 3-11 ค่าต่ำสุดของจุดวาบไฟของสารปรับสภาพ

GRADE	MINIMUM FLASH POINT, F (c)
RA-5	400 (204)
RA-25	425 (218)
RA-75	450 (232)
RA-250	450 (232)
RA-500	450 (232)

3. Oven Weight Change เป็นวิธีการที่จะวัดการเกิดควันและการสูญเสียเนื่องจากการระเหยในขณะทำการผสมร้อน และเป็นข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลท์ที่ใช้ในงานผิวทาง สารปรับสภาพที่มีค่า RTF-C Oven Weight Changes สูงจะมีค่าความหนืดและจุดวาบไฟต่ำ ตารางที่ 3-12 แสดงถึงข้อกำหนดของ RTF-C Oven Weight Changes ของสารปรับสภาพ

ตารางที่ 3-12 ค่าสูงสุดของ RTF-C Oven Weight Changes ของสารปรับสภาพ

GRADE	WEIGHT CHANGE, PERCENT MAXIMUM
RA-5	4
RA-25	3
RA-75	2
RA-250	2
RA-500	2

ในการทดสอบอื่น ๆ ของการวัดการระเหยได้แก่ การวัดการเกิดควัน (Smoke Point) ซึ่งไม่เป็นประโยชน์นัก จากการทดสอบที่ผ่านมาพบว่า Smoke point ที่ต่ำกว่า 210F (99C) จะมีค่า Oven weight losses มากกว่า 7 เปอร์เซนต์และจุดวาบไฟต่ำกว่า 400F (204C) สำหรับค่า Smoke point ที่สูงกว่า 250F (121C) จะมีค่า Oven weight losses น้อยกว่า 2 เปอร์เซนต์และจุดวาบไฟสูงกว่า 450F (232C)

4. Saturates เป็นวิธีการหาส่วนที่เป็นของเหลว (Solvency and aromaticity) ของสารปรับสภาพ ซึ่งกำหนดให้มีได้มากที่สุดไม่เกิน 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

5. Viscosity Ratio เป็นวิธีการเปรียบเทียบคุณสมบัติก่อนและหลังขบวนการให้ความร้อน ซึ่งจะแสดงถึงการมีวัสดุที่ระเหยง่าย ผู้เชี่ยวชาญทางแอสฟัลท์เชื่อว่าเป็นเครื่องชี้ถึงความคงทน (Durability)[18] สารปรับสภาพจึงถูกกำหนดให้มีค่า Viscosity Ratio ไม่มากกว่า 3

6. Specific Gravity เป็นค่าที่ใช้สำหรับการวัดน้ำหนักและการขนส่งเชิงพาณิชย์สำหรับวัดปริมาณของสารปรับสภาพ

ข้อกำหนดและมาตรฐานในการแบ่งชนิดของสารปรับสภาพได้ถูกเสนอโดยหน่วยงานต่าง ๆ เช่น Chevron, Pacific Coast User-Producer Group และ Witco Chemical ดังแสดงในตารางที่ 3-13, 3-14 และ 3-15 ซึ่งแบ่งสารปรับสภาพออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามคุณสมบัติดังที่กล่าวมาแล้ว สำหรับตารางที่ 3-16 เป็นสารปรับสภาพชนิด Emulsified Modifier[6]

ตารางที่ 3-13 ข้อกำหนดของสารปรับสภาพที่มีจุดวาบไฟสูง

PROPOSED SPECIFICATIONS FOR HIGH FLASH RECYCLING AGENTS

TEST	AASHTO TEST METHOD	GRADE H-1	H-2.5	H-5
TEST ON ORIGINAL MATERIAL				
Viscosity, 60°C(140°F), poise	T-202	50-200	200-300	400-600
Viscosity, 135°C(275°F), cs, min.	T-201	50	80	110
Flash Point, COC, °F, min.	T-48	450	450	450
TESTS ON RESIDUE FROM RTFC PROCEDURE AASHTO T-240*				
Weight Loss, % max.	T-240	1.0	1.0	1.0
Aging Index, ** max.	--	3.0	3.0	3.0

* TFO may be used but RTFC shall be the referee method

**Aging Index = $\frac{\text{RTFC viscosity at 60°C (140°F)}}{\text{Original viscosity @ 60°C (140°F)}}$

°C = 5/9 (°F -32)
CS = 0.001 Pa.s

ตารางที่ 3-14 ข้อกำหนดของสารปรับสภาพที่ใช้สำหรับการผสมร้อน

PROPOSED SPECIFICATIONS FOR HOT MIX RECYCLING AGENTS[1]

TEST	ASTM TEST METHOD	RA 5 min.	RA 5 max.	RA 25 min.	RA 25 max.	RA 75 min.	RA 75 max.	RA 250 min.	RA 250 max.	RA 500 min.	RA 500 max.
Viscosity @140°F, cSt	D2170 or 2171	200	800	1000	4000	5000	10000	15000	35000	40000	60000
Flash Point COC, °F	D92	400	-	425	-	450	-	450	-	450	-
Saturates, wt. %	D2007	-	30	-	30	-	30	-	30	-	30
Residue from RTF-C Oven Test @325°F	D2872[2]										
Viscosity Ratio[3]	-	-	3	-	3	-	3	-	3	-	3
RTF-C Oven Weight Change, ±, %	D2872[2]	-	4	-	4	-	2	-	2	-	2
Specific Gravity	D 70 or D1298	Report		Report		Report		Report		Report	

1. The final acceptance of recycling agents meeting this specification is subject to the compliance of the reconstituted asphalt blends with current asphalt specifications.

2. The use of ASTM D1754 has not been studied in the context of this specification, however, it may be applicable. In cases of dispute the reference method shall be ASTM D2872.

3. Viscosity Ratio = $\frac{\text{RTF-C Viscosity at 140°F, cSt}}{\text{Original Viscosity at 140°F, cSt}}$

°C = 5/9 (°F -32)
1 cST = 0.001 Pa.s

ตารางที่ 3-15 ข้อกำหนดสำหรับสารปรับสภาพเสนอโดย Witco Chemical

SPECIFICATIONS FOR RECLAIMING AGENTS

Property	Function & Purpose	Test Method	Cyclogen L*	Cyclogen M*	Cyclogen H*
Viscosity @ 140°F, cSt	Asphalt viscosity adjustment in recycled mix	ASTM D 2170-74	80-500	1000-4000	5000-10000
Flash Point, COC, F	Handling precaution	ASTM D 92-72	350 min.	350 min.	350 min.
Volatility, I BP, F 2%, F 5%, F	Avoidance of air pollution and hardening by evaporation	ASTM D 1160-61, 10 mm	300 min. 375 min. 410 min.	300 min. 375 min. 410 min.	300 min. 375 min. 410 min.
Compatibility, N/P	Avoidance of syneresis	ASTM D 2006-70	0.5 min.	0.5 min.	0.5 min.
Chemical Composition, $(N + A_1)/(P+A_2)$	Durability of asphalt in recycled mix	ASTM D 2006-70	0.2-1.2	0.2-1.2	0.2-1.2
Specific Gravity	Calculations	ASTM D 70-72	Report	Report	Report

*Suitable pumping temperatures are the following: L=115 F, M = 190 F, and H = 200 F.

°C = 5/9 (°F -32)
1 cST = 0.001 Pa.s

ตารางที่ 3-16 ข้อกำหนดของ Emulsified Modifiers

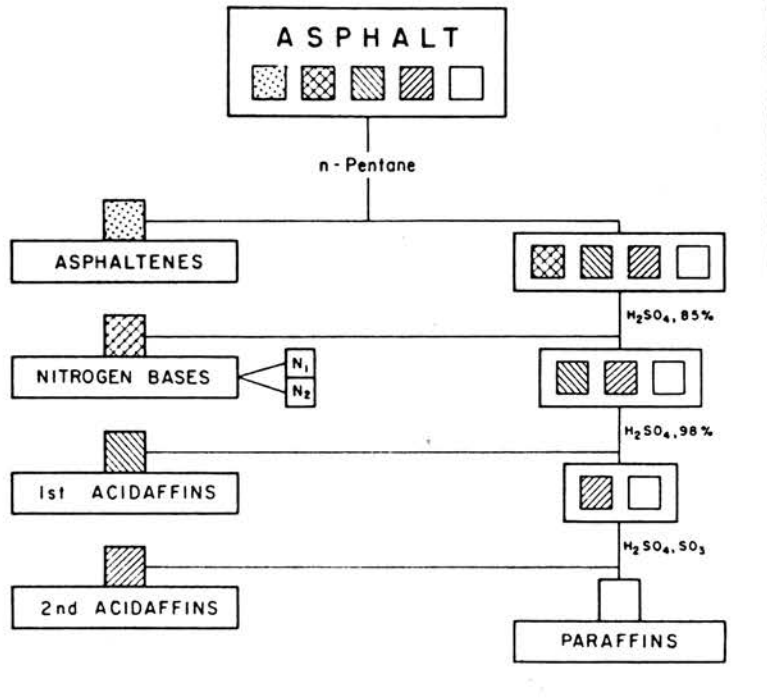
INTERIM SPECIFICATIONS FOR EMULSIFIED MODIFIERS

PROPERTY	FUNCTION & PURPOSE	TEST METHOD	SPECIFICATIONS
Viscosity @ 77°F, SFS	Ease of handling	ASTM D 244-76	15-85
Pumping Stability	Prevention of premature breaking	G.B. Method(2)	Pass
Emulsion Coarseness, percent	Optimal distribution	Sieve Test, ASTM D 244-76(MOD)(3)	0.1 max.
Sensitivity to Fines, percent	Adequate mixing life	Cement Mixing, ASTM D 244-76	2.0 max.
Particle Charge	Preferential affinity to asphalt	ASTM D 244-76	Positive
Concentration of Oil Phase, percent	Assurance of oil content and for calculations	ASTM D 244-76(MOD)(4)	60 min.

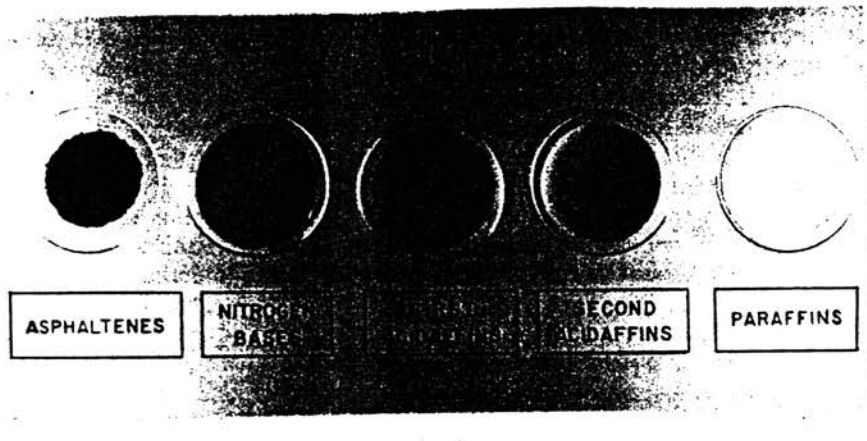
(1) Oils used for emulsions must meet specifications listed in Table 3-14
(2) Pumping stability is determined by charging 450 ml of emulsion into a one-liter beaker and circulating the emulsion through a gear pump (Roper 29.B22621) having 1/4" inlet and outlet. The emulsion passes if there is no significant oil separation after circulating ten minutes.
(3) Test procedure identical with ASTM D 244 except that distilled water shall be used in place of two percent sodium oleate solution.
(4) ASTM D 244 Evaporation Test for percent of residue is modified by heating 50 gram sample to 300°F until foaming ceases, then cooling immediately and calculating results.

นอกจากคุณสมบัติต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังได้มีการศึกษาถึงผลทางด้านเคมีของส่วนประกอบของแอสฟัลท์และสารปรับสภาพ ซึ่งมีผลต่อการใช้งาน (Performance) และความคงทน (Durability) ในรูปของปฏิกริยาเคมี (Chemical reactivity) ของส่วนประกอบทางเคมีของมัน[19] Golden Bear approach จัดแบ่งส่วนประกอบเคมีของแอสฟัลท์ออกได้เป็น 5 ส่วน[19] คือ asphaltenes (A) nitrogen bases (N) first acidaffins (A_1) second acidaffins (A_2) และ paraffins (P) การแยกส่วนประกอบทั้ง 5 ส่วนสามารถแยกโดยวิธี Rostler Analysis วิธีการแยกส่วนประกอบเหล่านี้แสดงดังแผนภาพรูปที่ 3-7 ภาพถ่ายแสดงส่วนประกอบทั้ง 5 ส่วนแสดงในรูปที่ 3-8 และลักษณะพื้นฐานของส่วนประกอบทั้ง 5 ส่วน แสดงในตารางที่ 3-17

Rostler and White[3] ได้ศึกษาถึงส่วนประกอบทั้ง 5 ของแอสฟัลท์ว่ามีผลต่อการใช้งาน (Performance) และความคงทน (Durability) จากการคำนวณหาค่าของ Durability index โดยให้ค่าของ Durability ratio เป็นอัตราส่วนของส่วนที่แสดงปฏิกริยา (Reactive components) ต่อส่วนที่ไม่แสดงปฏิกริยา (Non-reactive components) ดังนั้น Durability ratio จากการวิเคราะห์โดย Rostler Analysis จะได้สมการดังนี้คือ



รูปที่ 3-7 แผนภาพแสดงวิธี Rostler Analysis



รูปที่ 3-8 ภาพถ่ายแสดงส่วนประกอบเคมีทั้ง 5 ของแอสฟัลท์

$$\frac{\text{Nitrogen Bases} + \text{1st Acidaffins}}{\text{Paraffins} + \text{2nd Acidaffins}} = \frac{N+A_1}{P+A_2}$$

ค่าของ Durability ratio นี้ Rostler and White[3] พบว่า ถ้าอัตราส่วนอยู่ในช่วง 0.4-1.0 แอสฟัลท์นั้นจะดีมาก (Superior) ถ้าอัตราส่วนอยู่ในช่วง 1.0-1.2 แอสฟัลท์นั้นจะดี (Good) และถ้าอัตราส่วนอยู่ในช่วง 1.2-1.5 แสดงว่าแอสฟัลท์นั้นมีคุณภาพพอใช้ (Satisfactory)

ตารางที่ 3-17 ลักษณะพื้นฐานของส่วนประกอบทางเคมีของแอสฟัลท์

Fraction	General Description	Analytical Definition[1]	Chemical Reactivity	Significant Function
A Asphaltenes	Higher molecular weight condensation products[1]	Insoluble in n-pentane	Low	Bodying agent[2]
N Nitrogen bases	Maltenes fraction containing all nitrogen compounds	Precipitates with 85% sulfuric acid	High	Peptizer for asphaltenes[3]
A_1 First acidaffins	Unsaturated resinous hydrocarbons	Precipitates with 98% sulfuric acid	High	Solvent for peptized asphaltenes
A_2 Seccnd acidaffins	Slightly unsaturated hydrocarbons	Precipitates with fuming sulfuric acid (30% SO_3)	Low	Solvent for peptized asphaltenes
P Paraffins	Saturated hydrocarbons[4]	Nonreactive with fuming sulfuric acid[5]	Low	Gelling agent for asphaltenes

[1] Average molecular weight decreases in aging due to formation of low molecular weight asphaltenes from maltenes

[2] Amount in asphalt depends on viscosity of maltenes

[3] Minimum amount required depends on N/P ratio

[4] Includes solid wax, determined by chilling fraction P

[5] In alternate procedure (ASTM D2006) is desorbed from silica gel

จาก Durability ratio ซึ่งเป็นอัตราส่วนของส่วนที่แสดงปฏิกริยาต่อส่วนที่ไม่แสดงปฏิกริยาเมื่อใช้ส่วนประกอบทั้ง 4 โดยวิธีของ Clay-Gel Analysis จะได้ค่า Durability ratio เป็น

$$\frac{\text{Polars}}{\text{Saturates + Aromatics}} = \text{durability ratio}$$

จะเห็นได้ว่าการแยกส่วนประกอบทั้ง 2 วิธี ปริมาณของ asphaltenes จะไม่นำมาพิจารณาในการคำนวณค่า Durability ratio และค่าของ durability ratio ที่น้อยลง แสดงถึงการมีความคงทนมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การทดสอบหาค่าของ Asphaltene settling rate มีส่วนในการทำนายการใช้งาน (Performance) โดยที่ค่าของ Asphaltene settling ที่มากขึ้น แสดงถึงการมีความคงทนมากขึ้นด้วย[3]

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สารปรับสภาพที่ดีจึงควรมีส่วนประกอบทางเคมี ซึ่งสามารถผสมรวมเข้ากันได้กับแอสฟัลท์เก่า โดยที่สารปรับสภาพจะต้องมีปริมาณของ nitrogen bases เพียงพอที่จะไปกระตุ้น (Peptize) asphaltenes และจะต้องไม่มากกว่าปริมาณมากที่สุดของ paraffins ซึ่งเป็น gelling agent ของ asphaltenes ถ้าปริมาณของส่วนประกอบไม่ได้ตามที่กล่าวมานี้ จะเกิดการ syneresis (การแยกตัวของ paraffins จากน้ำมัน) การเกิด syneresis สามารถทราบได้จากอัตราส่วนของ nitrogen bases/paraffins (N/P) แต่เนื่องจาก N/P มีค่าแตกต่างกันในแอสฟัลท์ต่างชนิดกัน อย่างไรก็ตาม สารปรับสภาพควรที่จะมี N/P ไม่น้อยกว่า 0.5 หรือควรที่จะมากกว่า 1.0 และเพื่อความแน่นอน สารปรับสภาพควรที่จะมีค่าของ Durability ratio มากกว่า 0.4 (โดยปกติสารปรับสภาพจะมี durability ratio ระหว่าง 0.2 และ 1.2)[4,10]

ในการเลือกชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของสารปรับสภาพที่นำมาผสมกับวัสดุผิวจราจรเก่าเป็นสิ่งที่สำคัญมาก สารปรับสภาพที่ผสมเข้ากับวัสดุผิวจราจรเก่า จะค่อย ๆ กระจายไปอย่างช้า ๆ ผ่านฟิลม์ที่มีความหนืดสูง (Highly viscous film) ของแอสฟัลท์เก่าที่คลุมวัสดุมวลรวมอยู่ เวลาในการเกิดปฏิกริยาของการกระจายนี้ จะแปรไปตามลักษณะและองค์ประกอบของแอสฟัลท์เก่าและสารปรับสภาพที่ใช้[14] ได้มีหน่วยงานและองค์การจำนวนมาก เช่น Arizona, Chevron, Dunning, Navy, Pacific Coast User Producer Group และ Witco[6] ได้พยายามหาปริมาณและชนิดของสารปรับสภาพที่จะปรับให้ส่วนผสมใหม่ของแอสฟัลท์มีค่าความข้นเหลวตามต้องการในการออกแบบ ขบวนการเหล่านี้มีพื้นฐานอยู่ที่การทดสอบหลาย ๆ ครั้ง (Trial and error) และต่างเป็นวิธีเดียวกันซึ่งใช้วิธีการผสมของแอสฟัลท์ที่มีความหนืดต่างกันและสามารถแยกออกได้ดังสมการต่อไปนี้คือ

$$\log (v) = a + b\rho \qquad (3.1)$$

$$\log - \log (v) = a + b\rho \qquad (3.2)$$

$$\log - \log (v) = a + b (\log \rho) \qquad (3.3)$$

โดยที่ v = ความหนืดของส่วนผสมที่ต้องการ (ปกติวัดที่ 140F (60C) มีหน่วยเป็น centistokes)

ρ = ปริมาณเป็นเปอร์เซนต์ของสารปรับสภาพ

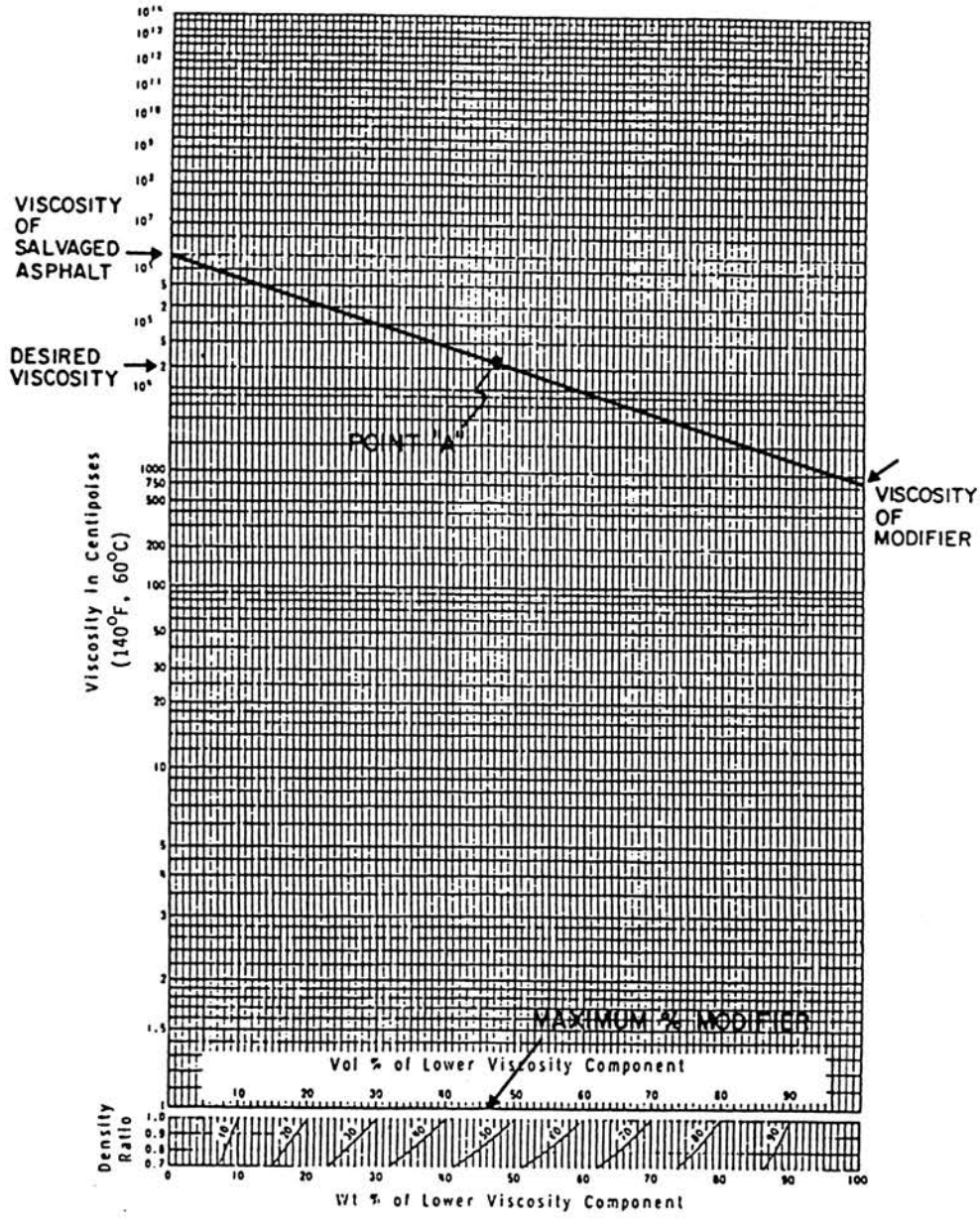
a,b เป็นค่าคงที่

ในการแทนค่าในสมการโดยเมื่อสารปรับสภาพไม่ถูกใช้ ค่าความหนืดจะเท่ากับความหนืดของแอสฟัลท์เก่า และถ้าสารปรับสภาพถูกนำมาใช้ 100 เปอร์เซนต์ ค่าความหนืดจะเท่ากับความหนืดของสารปรับสภาพนั้น ดังนั้นค่าคงที่ a และ b จะสามารถหาได้สำหรับการผสมสารปรับสภาพและแอสฟัลท์เก่าแต่ละชนิด

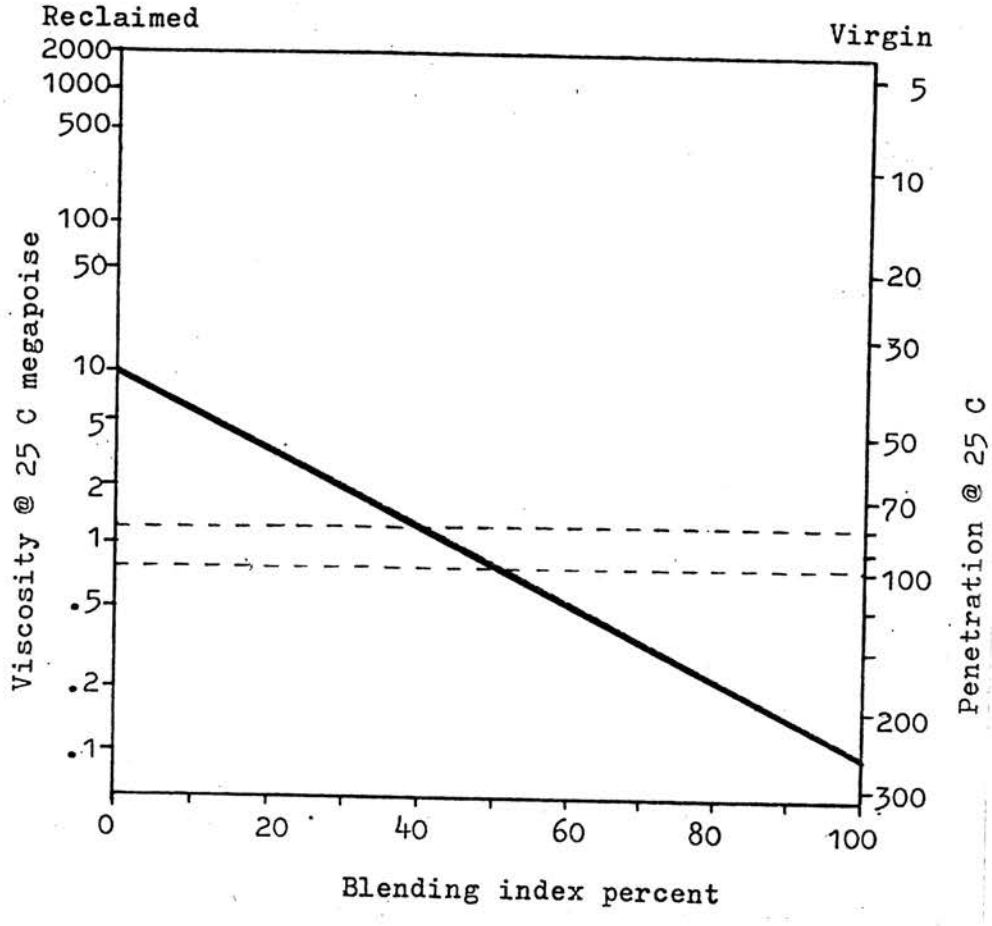
วิธีการเหล่านี้ หน่วยงานต่าง ๆ ได้คิดค้นแผนภาพต่าง ๆ เพื่อความสะดวกในการที่จะหาชนิดและปริมาณของสารปรับสภาพที่จะใช้ผสมกับแอสฟัลท์เก่า ตัวอย่างของแผนภาพเหล่านี้ได้แก่ รูปที่ 3-9 แสดงถึงแผนภาพของ West Coast User Producer Group[6] รูปที่ 3-10 แสดงถึงแผนภาพของ Michigan Department of Transportation สร้างขึ้นโดย Heppe[17]

3.5 การศึกษาพลังงานและค่าใช้จ่าย

ในการก่อสร้างและซ่อมแซมผิวจราจร สิ่งสำคัญที่จะต้องทำการศึกษาควบคู่กันไปเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อไป คือการศึกษาถึงการใช้พลังงาน การทำตารางในการใช้พลังงานทั้งในด้านการก่อสร้างวัสดุ เครื่องมือ นอกจากนี้ยังมีผลต่อการประเมินทางเศรษฐกิจอีกด้วย ในทางปฏิบัติ มีปัจจัยหลายด้านที่จะต้องนำมาวิเคราะห์การซ่อมแซมโดยใช้วิธีการปรับสภาพวัสดุเก่านำมาใช้งานใหม่ซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละโครงการ เพื่อที่จะพยายามหาปริมาณของพลังงานที่สามารถจะสงวนรักษาไว้ได้ ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่[22]



รูปที่ 3-9 แผนภาพการผสมสารปรับสภาพและแอสฟัลท์เก่าของ West Coast User Producer Group



รูปที่ 3-10 แผนภาพการผสมแอสฟัลท์เก่าและสารปรับสภาพของ Michigan Dept. of Transport

1. วิธีการเคลื่อนย้ายวัสดุผิวจราจร
2. วิธีการในการย่อยขนาดของวัสดุผิวจราจร
3. ระยะทางที่ทำการขนย้ายเพื่อนำวัสดุเก่าไปปรับสภาพ
4. ระยะทางที่ทำการขนย้ายวัสดุเพื่อทำการก่อสร้าง
5. ชนิดของเครื่องมือและวิธีการในการปรับสภาพ
6. ปริมาณความชื้นในวัสดุผิวจราจรเก่า
7. ปริมาณความชื้นในวัสดุมวลรวมใหม่
8. ปริมาณของตัวประสานใหม่

ในการเปรียบเทียบการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในการทำการปรับสภาพวัสดุเก่านำมาใช้งานใหม่นั้น ไม่สามารถนำเอาผลต่าง ๆ เข้ามาพิจารณาได้ทั้งหมด เนื่องจากราคาและค่าจ้างแรงงานอาจเปลี่ยนแปลงไปตามวิธีการ อย่างไรก็ตาม การพิจารณาในด้านการสงวนรักษาทรัพยากรทางธรรมชาติเป็นหลักการสำคัญในการปรับสภาพวัสดุผิวจราจรเก่า แต่เมื่อคำนึงทางด้านเศรษฐกิจ ถ้าวิธีการปรับสภาพวัสดุผิวจราจรเก่าสามารถให้ผลงานที่ดีและลดค่าใช้จ่ายลงแล้ว ก็จะเป็นวิธีการที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างเต็มที่ ปัจจัยสำคัญที่มีความสำคัญต่อราคาได้แก่[22]

1. ราคาของวัสดุใหม่และการมีแหล่งของวัสดุมวลรวมและน้ำมันที่ใกล้จะหมดลง

2. การมีเครื่องมือและขบวนการในการปรับสภาพในโรงงานผสมแอสฟัลท์ติคคอนกรีตและการมีการแข่งขันของบริษัทต่าง ๆ

3. ความจำเป็นในการลงทุนหาเครื่องมือพิเศษหรือการปรับปรุงโรงงานที่มีอยู่

4. ขนาดของงานที่จะมีต่อไปไว้ในอนาคต

นอกจากนี้การปรับสภาพภายในโรงงาน ยังต้องพิจารณาถึงการมีวัสดุ การขนส่งวัสดุ ซึ่งถ้าสามารถใช้วิธีการปรับสภาพในสนาม ก็จะสามารถลดค่าขนส่งลงได้อีก แต่ถ้าหากจะต้องเพิ่มความต้านทานในการลื่นไถลก็จะต้องมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นจึงไม่มีค่าที่แน่นอนและต่างกันไปตามแต่วิธีการต่าง ๆ ของการปรับสภาพวัสดุผิวจราจรเก่า

ในการเลือกวิธีการซ่อมแซมถนน อาจพิจารณาถึงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างวิธีการปรับสภาพวัสดุผิวจราจรเก่ากับวิธีการใช้วัสดุแอสฟัลท์ติคคอนกรีตใหม่ทั้งหมด ตารางที่ 3-18 และ 3-19 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างวิธีการปรับสภาพวัสดุเก่ากับค่าใช้จ่ายสมมติฐานของการใช้วัสดุแอสฟัลท์ติคคอนกรีตใหม่[22] ตารางที่ 3-18 แสดงถึงการประหยัด 4.8 เปอร์เซนต์ในการปรับปรุงถนนโดยวิธีการปรับสภาพบนถนน Conway Avenue ในเมือง Maplewood ตารางที่ 3-19 แสดงถึงการประหยัด 20 เปอร์เซนต์ในการปรับปรุงถนนชนบทโดยทำการปรับสภาพวัสดุผิวทางหนา 2 นิ้ว และวัสดุมวลรวมบนไหล่ทางหนา 2 นิ้ว ให้เป็นชั้นของวัสดุผิวจราจรหนา 4 นิ้ว จากตารางทั้ง 2 นี้จะเห็นได้ว่า ค่าใช้จ่ายที่เท่ากันได้แก่

ตารางที่ 3-18 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างวิธีการปรับสภาพและวิธีการใช้วัสดุใหม่ของถนนในเมือง

Item	Unit	Unit Price	Recycled Quantity	Recycled Amount	Conventional Quantity	Conventional Amount
		$		$		$
Mobilisation	Lump Sum	35000	1	35000	1	35000
Salv.and Dispose of Inplace Bit. Mixture	Ton	2.80	-	-	9709	27185
Salv.Bit.Mixture	Ton	2.80	9709	27185	-	-
Salv.and Dispose of Inplace Agg.	Ton	2.40	-	-	9112	21869
Salv.Agg.	Ton	2.40	9112	21869	-	-
Bit.Material for Mixture	Ton	65.00	784	50960	885	57525
Binder Course Mixture Conv.	Ton	7.80	622	4852	4472	34882
Binder Course Mixture Recy.	Ton	6.95	3850	26758	-	-
Base Course Mixture Conv.	Ton	7.80	1779	13876	15193	118505
Base Course Mixture Recy.	Ton	6.95	13414	93227	-	-
Bit.Material for Wear Mixture	Ton	65.00	165	10725	165	10725
Bit.Wear Course	Ton	13.95	2359	32908	2359	32908
Plant Modification	Lump Sum	5000	1	5000	-	-
TOTALS				322360		338599

ตารางที่ 3-19 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างวิธีการปรับสภาพและวิธีการใช้วัสดุใหม่ของถนนชนบท

Item	Unit	Unit Price	Recycled Quantity	Recycled Amount	Conventional Quantity	Conventional Amount
		$		$		$
Mobilisation	Lump Sum	70450	1	70450	1	70450
Field Laboratory	Each	1000	1	1000	1	1000
Salv.and Dispose of Inplace Bit.	Ton	1.95	-	-	32889	64134
Salv.Bit.Mixture (stockpile)	Ton	1.95	32839	64134	-	-
Salv.and Dispose of Inplace Shoulder Agg.	Ton	1.65	-	-	12835	21178
Salv.Agg.(in stockpile)	Ton	1.65	12835	21178	-	-
Shoulder Preparation	Road Sta.	10.00	2044	20440	2044	20440
Common Labourers	Hr.	10.00	871	8710	290	2900
Bit.Material for Mixture	Ton	75.00	1368	102600	2699	202425
Recycled Bit.Base	Ton	5.20	26837	139552	-	-
Conv.Bit.Base	Ton	6.50	658	4277	27495	178718
Recycled Bit. Shoulder Wear	Ton	5.20	22864	118893	-	-
Conv.Bit.Shoulder Wear	Ton	6.50	2044	13286	24908	161902
Bit.Material for Tack	Gal.	0.20	5431	1086	5431	1086
Stockpile Agg.for Bit. Mixture	Ton	1.77	7430	13151	-	-
Traffic Control	Lump Sum	20000	1	20000	1	20000
TOTALS				598757		744233

การทำงานของเครื่องจักรกล (Mobilisation) การทดสอบในสนามก่อนทำการซ่อมแซม การควบคุมการจราจรและการขุดลอกวัสดุเก่าบนผิวจราจรเดิม ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นของวิธีการปรับสภาพได้แก่ การเก็บรักษาวัสดุเก่า การเปลี่ยนแปลงขบวนการในการผสม (Plant modification) ค่าแรงงานที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าวัสดุที่ใช้ในวิธีการปรับสภาพจะถูกกว่าวิธีการใช้วัสดุใหม่ทั้งหมด ซึ่งเป็นผลให้เกิดการประหยัดและลดค่าใช้จ่ายลง

ค่าใช้จ่ายในเรื่องต่าง ๆ ดังได้กล่าวมาแล้ว อาจเป็นเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น ซึ่งค่าใช้จ่ายบางอย่างเช่น ราคาวัสดุ ค่าขนส่ง รวมถึงราคาและชนิดของสารปรับสภาพที่ใช้อาจแตกต่างกันไปในแต่ละวิธีของการปรับสภาพวัสดุ จำเป็นต้องนำมาเปรียบเทียบ เพื่อ

พิจารณาเลือกวิธีการซ่อมแซมที่เหมาะสม การประเมินค่าใช้จ่ายและงบประมาณที่มีอยู่

3.6 การศึกษาผลงานที่ผ่านมา

การปรับสภาพวัสดุผิวจราจรเก่านำมาใช้งานใหม่ ได้มีการทำมานานแล้ว แต่ในประเทศไทยยังไม่ได้มีการศึกษาและทดลองนำมาใช้ การซ่อมแซมผิวจราจรส่วนใหญ่จะนำเอาวัสดุแอสฟัลท์ และวัสดุมวลรวมใหม่มาซ่อมแซมทั้งหมด การประเมินโครงสร้างของผิวจราจรจากส่วนผสมที่ได้ทำการปรับสภาพ ทำการประเมินได้เป็น 2 ทาง[6] คือ

1. การประเมินหาสัมประสิทธิ์ของชั้นโครงสร้างตามวิธีของ AASHTO (AASHTO structural coefficient)

2. การประเมินในสนาม (Thickness Equivalency ratios)

การประเมินโครงสร้างตามวิธีของ AASHTO คือการหาค่าของ Resilient moduli values และนำไปเทียบกับมาตรฐานของวัสดุผิวจราจรโดย AASHO Road Test การเปรียบเทียบนี้กระทำโดยใช้การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นโครงสร้างที่ใช้วัสดุที่ได้จากการปรับสภาพ เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นโครงสร้างมาตรฐาน ส่วนหนึ่งของการศึกษาโดย NCHRP Study 1-17 ได้ทดสอบตัวอย่างของวัสดุที่ทำการปรับสภาพ 30 ตัวอย่าง ได้ผลของ AASHTO Structural coefficients ดังตารางที่ 3-20 จะเห็นได้ว่าค่าของสัมประสิทธิ์ของชั้นโครงสร้างสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้[5]

ตารางที่ 3-20 ค่า AASHTO Structural Coefficient ของวัสดุที่ทำการปรับสภาพ

Type of Recycled Material	Layer Used As	Range of a_i Computed	Average Computed a_i	a_i for Corresponding Layer and Material at AASHTO Road Test
Central Plant Recycled Asphalt Concrete	Surface	0.37-0.59	0.48	0.44
In-Place Recycled Asphalt Concrete Stabilized with Asphalt and/or an Asphalt Modifier	Base	0.22-0.49	0.39	0.35
In-Place Recycled Asphalt Concrete and Existing Base Material Stabilized with Cement	Base	0.23-0.43	0.33	0.15-0.23
In-Place Recycled Asphalt Concrete and Existing Base Material Stabilized with Lime	Base	0.40	0.40	0.15-0.30

การประเมินในสนาม เป็นวิธีการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ทำการปรับสภาพกับวัสดุใหม่ที่ทำการก่อสร้างด้วยวิธีปกติ โดยการใช้ Dynaflect (Thickness equivalency ratio) เพื่อหาอัตราส่วนของความหนาประสิทธิผลของชั้นวัสดุที่ทำการปรับสภาพต่อชั้นวัสดุแอสฟัลท์ติคคอนกรีต พบว่ามีค่าของ Equivalent stiffness ใกล้เคียงกัน[8]

Little and Epps พบว่าไม่มีความแตกต่างที่สำคัญระหว่างคุณสมบัติของส่วนผสมที่ได้จากการปรับสภาพและส่วนผสมแอสฟัลท์ติคคอนกรีตใหม่ทั่วไป[20] นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุในห้องปฏิบัติการ เช่น Hveem and Marshall stabilities, indirect tensile strengths, moisture susceptibility และ resilient moduli แสดงให้เห็นว่า วัสดุที่ทำการปรับสภาพสามารถใช้แทนแอสฟัลท์ติคคอนกรีตทั่วไปด้วยผลของลักษณะทางโครงสร้างเป็นที่พอใจ[21]