

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทนี้กล่าวถึง ยางมะตอย แหล่งกำเนิดของยางมะตอย ส่วนประกอบของยางมะตอย กระบวนการผลิตยางมะตอย ประเภทของยางมะตอย สมบัติของยางมะตอยที่จะใช้ในการทำผิวจราจร สมบัติทั่วไปของยางมะตอยที่จะนำไปใช้งาน สมบัติที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบส่วนผสมยางมะตอย องค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางมะตอย ส่วนประกอบโดยทั่วไปของถนนยางมะตอย ปัญหาของถนนยางมะตอย มาตรฐานและข้อกำหนดสารปรับปรุงคุณภาพจำพวกพอลิเมอร์ ยางมะตอยปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ ยางธรรมชาติ วัสดุผสมรวม พอลิเมอร์เบลนค์ สมบัติเชิงฟิสิกส์และรีโอโลยี นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงผลงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางมะตอย

ยางมะตอยเป็นวัสดุประสาน (Cementing Materials) ซึ่งมนุษย์รู้จักนำมาใช้ในการก่อสร้างถนน ยางมะตอยในช่วงแรกถูกนำมาใช้เป็นเครื่องกันน้ำ (Waterproof) และส่วนประกอบอื่นๆ ของอาคาร ในเวลาต่อมาจึงนำมาใช้ทำถนนและทางเท้าสำหรับเดิน

บิทูเมน (Bitumen) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงหรือกึ่งของแข็ง ที่สามารถละลายได้ในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) องค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็นสารที่ไม่ระเหยและอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน มีสีดำหรือสีน้ำตาล มีคุณสมบัติไม่ขีมน้ำ ส่วนใหญ่จะได้จากยางมะตอยธรรมชาติหรือที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม

ยางมะตอยซีเมนต์ (Asphalt Cement) หมายถึงเนื้อยางมะตอยแท้ๆ มีสีดำ หรือสีน้ำตาลปนดำ ถึงดำ มีสภาพเป็นวัสดุกึ่งแข็ง มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นบิทูเมนที่เกิดในธรรมชาติ หรือที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม หลอมเหลวเมื่อถูกความร้อน มีสมบัติเฉพาะคือ จะเป็นตัวประสานและยึดเกาะวัสดุให้ติดแน่น ในขณะที่ยังเหลวอยู่และจะแข็งตัวเมื่อเย็นลงหรือตัวทำละลายระเหยหมดไป

2.1.1 แหล่งกำเนิดของยางมะตอย

เบอร์มูเดซแอสฟัลต์ (Bermudez Asphalt) เป็นยางมะตอยที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีลักษณะเป็นบั้งอยู่ที่ชายฝั่งด้านเหนือของเวเนซุเอลา

น้ำมันดิบ (Petroleum Crude Oil) ที่ใช้ในการผลิตยางมะตอยน้ำมันดิบที่ใช้กลั่นเอาน้ำมันเชื้อเพลิง กากที่เหลือหลังจากการกลั่นอาจ ไม่ใช่ยางมะตอยก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก และชนิดของน้ำมันดิบนั้นๆ ซึ่งพอจะแยกได้ดังนี้

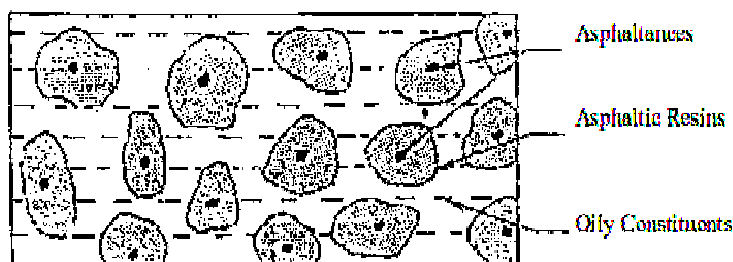
- Paraffin Base Crude เป็นชนิดที่มีส่วนประกอบหลักเป็นพาราฟิน กลั่นแล้วได้พาราฟินเป็นส่วนใหญ่
- Mixed Base Crude เป็นน้ำมันปิโตรเลียมที่กลั่นได้แล้วจะได้กากจากการกลั่นเป็นพาราฟินผสมกับยางมะตอย
- Asphalt Base Crude เป็นชนิดที่มีส่วนประกอบหลักเป็นยางมะตอยกลั่นแล้วได้ยางมะตอยเป็นส่วนใหญ่

2.1.2 ส่วนประกอบของยางมะตอย

เมื่ออุณหภูมิปกติของยางมะตอยจะมีลักษณะแข็งและสามารถทำให้หลอมเหลวได้โดยการให้ความร้อนสูงๆ หากนำตัวอย่างยางมะตอยไปวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าประกอบไปด้วยส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ ไฮโดรเจนกับคาร์บอนและนอกจากนี้ยังมีแก๊สโซลีน ซึ่งระเหยได้ง่ายแต่ไม่มีคุณสมบัติการยึดเกาะอยู่ด้วย นอกจากนี้ยังมีสารเคมีอีกหลายชนิด ซึ่งบางอย่างไม่สามารถตรวจพบได้

จากการวิเคราะห์ทางกายภาพพบว่า ยางมะตอยประกอบไปด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ

- Asphaltances มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลเกือบดำ เมื่อได้รับความร้อนจะไม่ละลาย แต่จะติดไฟได้ถ้าให้ความร้อนสูงพอ
- Asphaltic Resins มีสภาพเป็นของแข็ง เปราะ เปลี่ยนสภาพได้ง่ายมีสีน้ำตาลแก่จะหลอมเหลวเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 200° F
- Oily Constituents มีลักษณะเป็นของหนืด สีน้ำตาลแก่

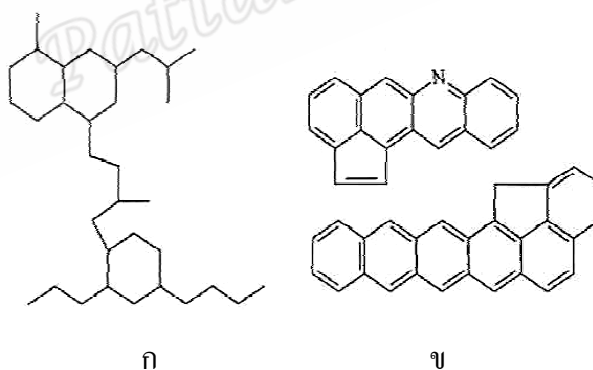


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของยางมะตอย (อัญชลี, 2546)

ยางมะตอยทุกชนิดประกอบด้วยของแข็งสองอย่าง คือ Asphaltances และ Asphaltic Resins Asphaltances จะทำหน้าที่คล้าย Nucleus และห่อหุ้มด้วย Asphaltic Resins ส่วนประกอบทั้งสองนี้แขวนลอยอยู่ใน Oily Constituents

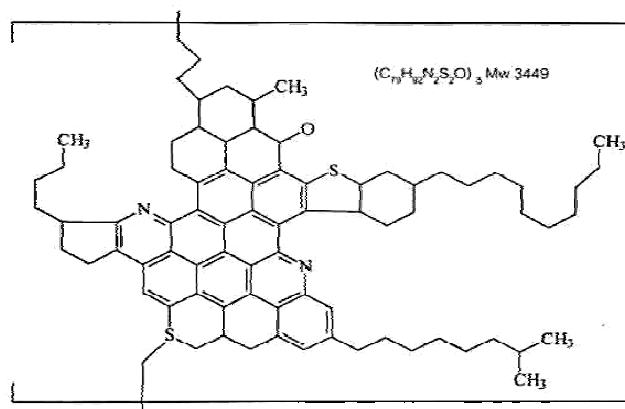
จากการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่ายางมะตอย จะมีส่วนประกอบหลัก คือ สารอิ่มตัว (Saturated) ที่มีโครงสร้างหลักเป็นพาราฟิน (Paraffin) วงแหวนแนฟทานิก (Naphthenic ring) และ ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรงที่มีความยาว (Long straight chain hydrocarbon) มีลักษณะเหนียวคล้ายจารบี

นอกจากนี้ยางมะตอยยังมีส่วนประกอบเป็นสารอะโรมาติก (Aromatics) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) ประมาณ 25 – 30 % และมีออกซิเจนหรือไนโตรเจนอยู่เล็กน้อย มีลักษณะข้นเหนียวเป็นสีดำ

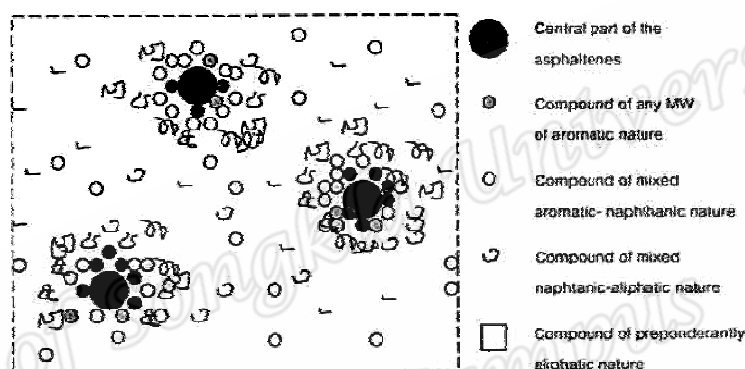


รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุล (ก) สารอิ่มตัว และ (ข) สารอะโรมาติก (ทวีศักดิ์, 2546)

สารอะโรมาติกที่มีขั้ว (Polar aromatics) มีวงแหวนอะโรมาติกเป็นส่วนประกอบประมาณ 35 – 40 % มีออกซิเจนหรือไนโตรเจนมากกว่า 1 % และอาจมีกำมะถันถึง 8 % รวมถึงมีโครงสร้างแสดงความเป็นประจุไฟฟ้า เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) และหมู่เอมิโน (Amino group) เป็นต้น มีลักษณะข้นเหนียวเป็นสีดำ



รูปที่ 2.3 ภาพตัวอย่างโครงสร้างของโมเลกุลของแอสฟัลต์ทีน (ทวีศักดิ์, 2546)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างแบบไมเซลล์ของยางมะตอย (ทวีศักดิ์, 2546)

จากรูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบสำคัญของยางมะตอยคือ แอสฟัลต์ทีน (Asphaltene) ซึ่งประกอบด้วยสารอะโรมาติกขนาดใหญ่ (Multiring aromatic) สารอะโรมาติกขนาดใหญ่ที่มีขั้ว (Multiring polar aromatic) และบริเวณรอบๆ แอสฟัลต์ทีนซึ่งเกิดจากส่วนประกอบโมเลกุลชนิด ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันมากมายที่แสดงความเป็นขั้ว (Vary functionality) ส่วนอะโรมาติกที่ไม่มีขั้ว และส่วนอะลิฟาติก (Aliphatic) ส่วนรอบๆ นี้เองที่ทำให้ยางมะตอยแสดงสมบัติเป็นนิวโตเนียน (Newtonian) และรักษาสภาพแอสฟัลต์ทีนให้อยู่ในรูปสารละลายคอลลอยด์ (Colloidal solution)

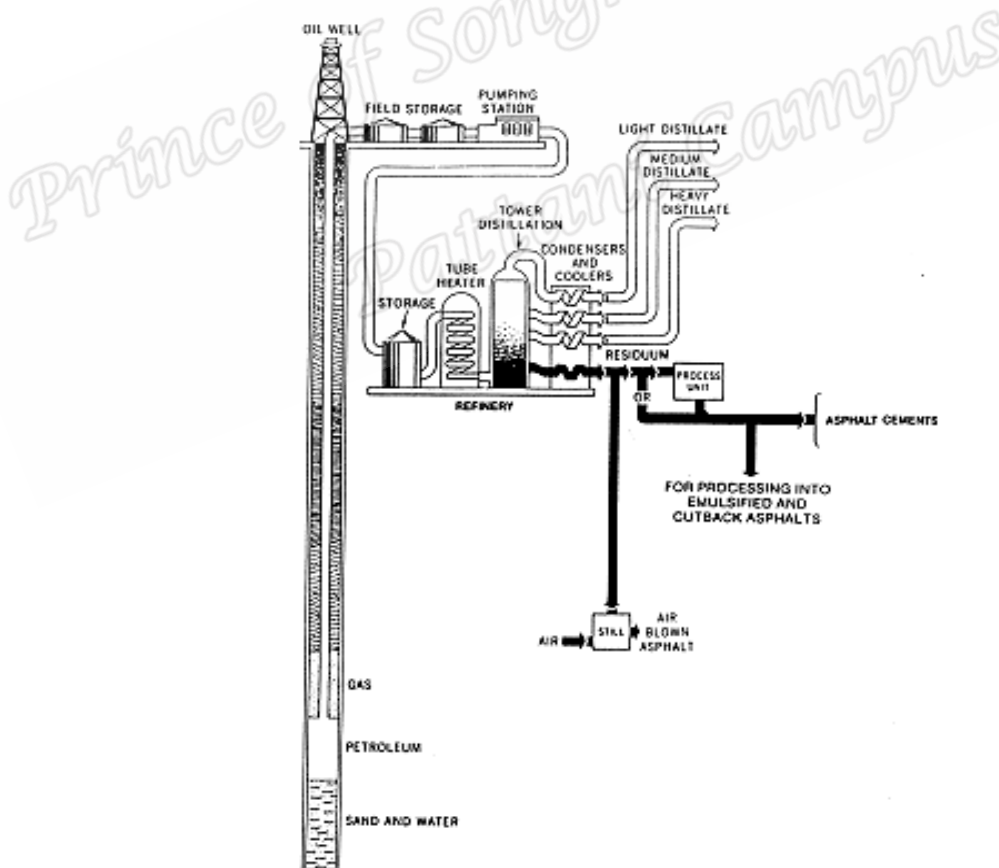
2.1.3 กระบวนการผลิตยางมะตอย

การผลิตหรือการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมจะเป็นไปตามรูปที่ 2.5 และ 2.6 วิธีการผลิตคือ ป้อนน้ำมันดิบจากถังเก็บเข้าไปในท่อที่ให้ความร้อน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของน้ำมันดิบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะไหลผ่านท่อเข้าสู่หอกลั่นและถูกลดความดันลงเป็นสูญญากาศเพื่อ

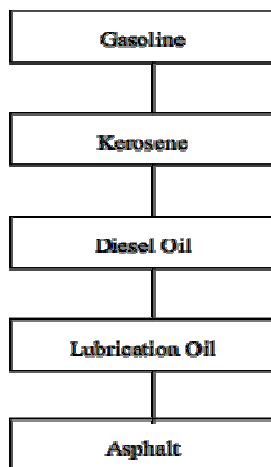
แยกส่วนประกอบที่เบากว่าหรือระเหยง่ายกว่า จะระเหยเป็นไอลอยขึ้นไปเป็นชั้นๆ ตามความหนักเบา และเมื่อถูกกลดอุณหภูมิก็จะกลั่นตัวกลับมาเป็นของเหลวที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ กัน แยกออกเป็นน้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด และผลิตภัณฑ์อื่นๆ สารที่เหลือจากการกลั่นเป็นส่วนที่หนักและชั้นและระเหยยาก เรียกว่า Topped Crude ซึ่งจะมีลักษณะค่อนข้างเหลว เพราะยังมีส่วนที่เป็นน้ำมันปนอยู่พอสมควร เมื่อแยกน้ำมันเหล่านี้ออกไป ส่วนที่เหลือจะนำมาทำการผลิตยางมะตอยซึ่งมีวิธีหลักๆ อยู่ 2 แบบคือ

- กระบวนการผลิตแบบ Vacuum Reduction จากกระบวนการนี้จะให้ยางมะตอยซีเมนต์ที่มีความข้นเหลวตามเกรดต่างๆ ที่กำหนด

- กระบวนการผลิตแบบ Oxidation จากกระบวนการนี้จะทำให้ได้ยางมะตอยที่มีความแข็งแรงขึ้น โดยการนำยางมะตอยซีเมนต์ที่ต้องการบรรจุลงไปในถังรูปทรงกระบอก และให้ความร้อนที่ 500° F ในขณะเดียวกันก็พ่นอากาศเข้าไปทางด้านล่าง ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับน้ำมันให้เปลี่ยนมาเป็นแอสฟัลติกเรซิน และก็เปลี่ยนมาเป็นแอสฟัลทิน ซึ่งเรียกกันว่า Blown Asphalt



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตยางมะตอย (อัญชลี, 2546)



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบน้ำมันดิบในกระบวนการผลิตยางมะตอย (อัญชลี, 2546)

2.1.4 ประเภทของยางมะตอย

ยางมะตอยที่ใช้ในการก่อสร้างผิวทางทั่วไปมีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน และสภาพดินฟ้าอากาศ จึงได้มีการแบ่งยางมะตอยออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ

- ยางมะตอยซีเมนต์ เป็นผลิตภัณฑ์พื้นฐานที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ มีลักษณะครึ่งอ่อนครึ่งแข็งที่อุณหภูมิปกติ มีสีน้ำตาลปนดำ จะหลอมเหลวเมื่อถูกความร้อน การนำไปใช้จะต้องทำให้เหลวที่อุณหภูมิประมาณ $145 \pm 5^{\circ}\text{C}$ หรือ $200 - 300^{\circ}\text{F}$ การแบ่งเกรดจะทำการทดสอบด้วย Penetration Test โดยค่าเพนิเทรชันคือ จำนวนหน่วยของระยะทางที่เข็มมาตรฐาน ซึ่งถูกกดด้วยน้ำหนัก 100 กรัม นาน 5 วินาที ที่อุณหภูมิ 25°C จมลงในยางมะตอย (หนึ่งหน่วยเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร) ซึ่งมีเกรดมาตรฐานอยู่ 5 เกรด คือ 40 - 50, 60 - 70, 80 - 100, 120 - 150 และ 200 - 300 ตัวเลขของเกรดจะแสดงความอ่อนแข็งของยางมะตอยเกรดที่อ่อนที่สุดคือ 200 - 300 จะแข็งพอประมาณที่อุณหภูมิห้อง เอานิ้วมือกดเบาๆ จะเป็นรอยบูน ส่วนเกรดที่แข็งที่สุดคือ 40 - 50 ถ้าเอานิ้วมือกดหนักๆ จะปรากฏแค่รอยนิ้วมือเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ที่อุณหภูมิปกติ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งชนิดหรือเกรดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามการผลิตได้ 3 ชนิดคือ

- เกรดเพนิเทรชัน (Penetration grade) ได้จากการกลั่นน้ำมันโดยตรง ได้แก่ AC 60/70 โดย AC หมายถึงยางมะตอยซีเมนต์และ 60/70 คือค่าเพนิเทรชันอยู่ในช่วง 60 - 70 ซึ่งเป็นตัวเลขที่ใช้บอกความแข็งของยางมะตอยคือ เข็มกดลงไปได้ 6 - 7 มิลลิเมตร

- เกรดเป่า (Blown grade) ได้จากการนำยางมะตอยเกรดเพนิเทรชันไปเป่าด้วยลมร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ $250 - 300^{\circ}\text{C}$ ทำให้ทนความร้อน และมีความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในยางมะตอย การเป่าด้วยลมร้อนทำให้ปริมาณ

แอสฟัลต์ทีนในยางมะตอยสูงขึ้นไป ตัวอย่างของยางมะตอยเกรดเป่าได้แก่ R 85/25, R 85/40, R 115/15, R 135/10 และ R 155/7 เป็นต้น สำหรับยางมะตอยเกรด R 85/25 อักษร R หมายถึงมีลักษณะคล้ายยาง (Rubbery) คือมีสมบัติบางส่วนคล้ายยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ ตัวเลข 85 หมายถึงค่าอุณหภูมิที่จุดอ่อนตัว (Softening point) ของยางมะตอยเป็นองศาเซลเซียส และตัวเลข 25 หมายถึง ค่าเพนิเทรชันเฉลี่ยของยางมะตอย

- เกรดแข็ง (Hard grade) คือการนำยางมะตอยเกรดเพนิเทรชันไปกลั่นภายใต้ระบบสูญญากาศที่อุณหภูมิสูง ทำให้ส่วนที่เบาระเหยออกไปอีก ยางมะตอยที่ได้จะมีความแข็งมากขึ้น ตัวอย่างยางมะตอยชนิดเกรดแข็งได้แก่ H 80/90 โดย H หมายถึงยางมะตอยที่มีความแข็งสูง และ 80/90 คือค่าอุณหภูมิที่จุดอ่อนตัว ค่าความแข็งของยางมะตอยชนิดนี้อยู่ในช่วง 6 - 12 คือ เข้มกดได้ 0.6 - 1.2 มิลลิเมตรเท่านั้น

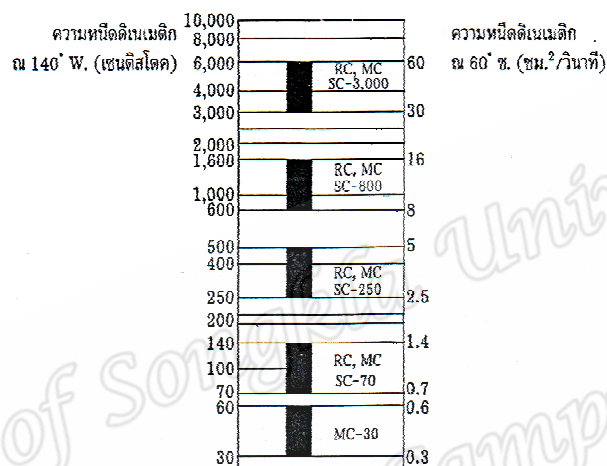
• ยางมะตอยเหลว (Liquid Asphalt) แบ่งได้เป็น คัดแบคยางมะตอย (Cutback asphalt) และยางมะตอยอิมัลชัน (Emulsified asphalt or Asphalt emulsion) คัดแบคยางมะตอยทำได้โดยการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์กับตัวทำละลาย (Solvent) ซึ่งได้แก่น้ำมันชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันก๊าดโซลีน (Gasoline oil) น้ำมันก๊าด (Kerosene oil) และน้ำมันดีเซล (Diesel oil) เป็นต้น นิยมเรียกสารละลายเหล่านี้ว่า คัตเตอร์สต็อก (Cutter stock) ในสภาวะปรกติยางมะตอยชนิดนี้เป็นของเหลว เมื่อนำไปราดผิวจราจรน้ำมันที่ใช้ผสมจะระเหยออกไป คงเหลือแต่ยางมะตอยเท่านั้น ความหนืดของยางมะตอยชนิดนี้ขึ้นกับชนิดของยางมะตอย ชนิดของตัวทำละลาย และปริมาณของตัวทำละลาย โดยหากเตรียมให้เหลวมากอาจไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนก่อนใช้งาน เกรดของยางมะตอยชนิดนี้จะมีตั้งแต่ 0 ถึง 5 เกรด 0 จะแสดงว่ามีความเหลวมาก เพราะมีตัวทำละลายมาก เกรด 5 จะมีความข้นมาก เนื่องจากมีตัวทำละลายน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังมีการแบ่งตามอัตราการระเหยของตัวทำละลายและประเภทของการบ่มตัว มี 3 ชนิดคือ

- ชนิดแข็งตัวเร็วหรือบ่มตัวเร็ว (Rapid Curing, RC) ประกอบด้วยยางมะตอยซีเมนต์กับตัวทำละลายที่ระเหยไว เช่น แนฟทา (Naphtha) ยางมะตอยชนิดนี้จะแข็งตัวเร็วเมื่อนำไปใช้งาน ส่วนมากใช้กับงานปรับสภาพผิว (Surface Treatment) หรือ Macadam สามารถแบ่งย่อยตามเกรดความหนืดได้ 4 เกรด ได้แก่ เกรด RC - 70, RC - 250, RC - 800 และ RC - 3000

- ชนิดแข็งตัวเร็วปานกลางหรือบ่มตัวช้าปานกลาง (Medium Curing, MC) ประกอบด้วยยางมะตอยซีเมนต์กับตัวทำละลายที่ระเหยเร็วปานกลาง ได้แก่ Kerosene จะมีการแข็งตัวช้ากว่า RC การใช้งานต้องใช้เวลาในการบ่ม เช่น ในการทำ Prime Coat, Track Coat

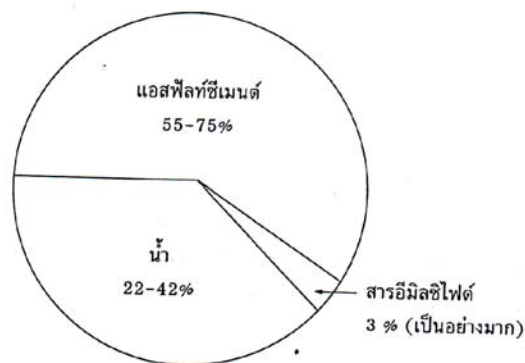
เพื่อที่จะให้มีโอกาสซึมลงไปยังผิวชั้นทางได้ สามารถแบ่งย่อยตามเกรดความหนืดได้ 5 เกรด ได้แก่ เกรด MC - 30, MC - 70, MC - 250, MC - 800 และ MC - 3000

- ชนิดแข็งตัวช้าหรือบ่มตัวช้า (Slow Curing, SC) ประกอบด้วย ยางมะตอยซีเมนต์กับตัวทำละลาย (น้ำมันดีเซล) ที่ระเหยช้าหรืออาจจะได้จากการกลั่นโดยตรง เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Road oils การใช้งานส่วนใหญ่จะทำพวก Road Mix ใช้ในการซ่อม Plant Mix สามารถแบ่งย่อยตามเกรดความหนืดได้ 4 เกรด ได้แก่ เกรด SC - 70, SC - 250, SC - 800 และ SC - 3000



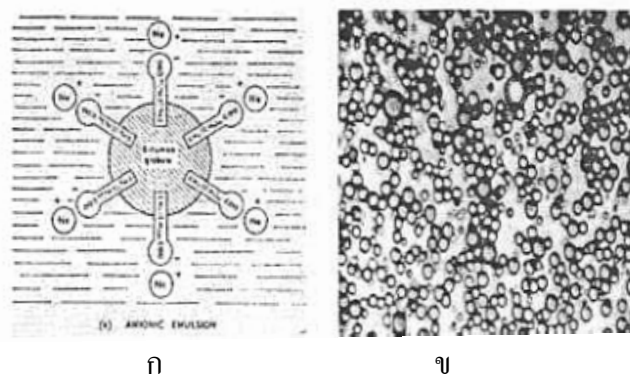
รูปที่ 2.7 เกรดของความหนืดของยางมะตอยเหลว

• ยางมะตอยอิมัลชันคือ ยางมะตอยซีเมนต์ที่ถูกตีให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ หรืออนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particle) กระจายอยู่ในตัวกลางที่มีอิมัลซิไฟเออร์อยู่เล็กน้อย ผลิตได้ โดยผสมยางมะตอยซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 120 ° C กับน้ำที่มีอิมัลซิไฟเออร์ผสมอยู่ 1 – 3 % ที่อุณหภูมิ 77 ° C แล้วตีส่วนผสมที่ได้ด้วยเครื่องคอลลอยด์มิล ทำใหยางมะตอยแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ภายใต้สภาวะที่ควบคุมความเป็นกรด - ด่าง โดยทั่วไปนิยมให้มีปริมาณยางมะตอยอยู่ 55 – 70 %



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของยางมะตอยอิมัลชัน

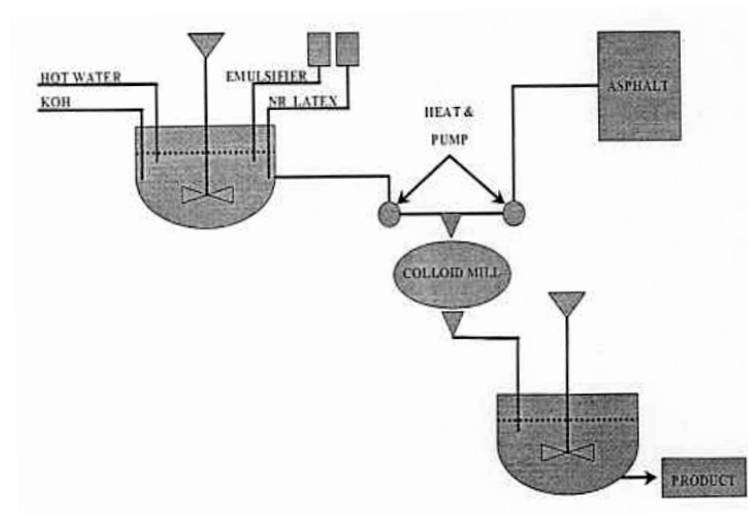
ยางมะตอยอิมัลชันแบ่งตามประจุได้ 3 ประเภทคือ ยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุบวก (Cationic Asphalt Emulsion) คืออนุภาคยางมะตอยที่กระจายอยู่ในน้ำที่มีประจุบวก สามารถแบ่งย่อยตามเกรดความหนืดและใช้เวลาในการก่อตัว 3 เกรด ได้แก่ เกรด CRS (ก่อตัวเร็ว), CMS (ก่อตัวช้าปานกลาง), และ CSS (ก่อตัวช้า) ยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ (Anionic Asphalt Emulsion) คืออนุภาคยางมะตอยที่กระจายอยู่ในน้ำที่มีประจุลบ สามารถแบ่งย่อยตามเกรดความหนืดและใช้เวลาในการก่อตัว 3 เกรด ได้แก่ เกรด RS (ก่อตัวเร็ว), MS (ก่อตัวช้าปานกลาง), SS (ก่อตัวช้า) และยางมะตอยอิมัลชันชนิดไม่มีประจุ (Non-ionic Asphalt Emulsion) คืออนุภาคของยางมะตอยที่กระจายอยู่ในน้ำที่ไม่มีประจุ ตัว Emulsifying Agent เป็นส่วนประกอบที่กำหนดสมบัติของยางมะตอยอิมัลชันซึ่งจะแบ่งเป็น ชนิดที่มีประจุไฟฟ้าบวก ชนิดที่มีประจุไฟฟ้าลบ และชนิดที่เป็นกลาง สำหรับสมบัติของตัว Emulsifying Agent คือ จะช่วยให้อนุภาคแอสฟัลต์ผสมกับน้ำได้โดยการลดแรงตึงผิวระหว่างทั้งสองเฟส จะแตกตัวตามเวลาต้องการ ยางมะตอยอิมัลชันที่ใช้ในงานทางตามปกติจะมีส่วนผสมของ Emulsifier อยู่ 0.5 - 1.0 % ของยางมะตอยซีเมนต์โดยน้ำหนัก



ก

ข

รูปที่ 2.9 แสดงคอลลอยด์ของยางมะตอยอิมัลชัน (ก) อิมัลชันชนิดประจุลบ (ข) ภาพถ่ายลักษณะการกระจายตัวของยางมะตอยอิมัลชัน (ทวิศักดิ์, 2546)



รูปที่ 2.10 การผสมยางมะตอยอิมัลชัน (ทวิศักดิ์, 2546)

2.1.5 สมบัติของยางมะตอยที่จะใช้ในการทำผิวจราจร

• ความข้นเหลว (Consistency) เนื่องจากยางมะตอยซีเมนต์ เป็นวัสดุที่ในอุณหภูมิปกติจะมีสีดำ อยู่ในสภาพกึ่งของแข็ง มีความหนืดสูง แต่เมื่อได้รับความร้อนจะค่อยๆ อ่อนตัวลง และมีลักษณะเหลว จึงจัดเป็นพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ลักษณะเฉพาะของยางมะตอยซีเมนต์นี้ เมื่อถูกความร้อนจะแสดงความข้นเหลวของตัวเองต่างๆ กัน ดังนั้นความข้นเหลวของยางมะตอยซีเมนต์ จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิจึงได้มีการกำหนดความข้นเหลวที่จะทำการแบ่งเกรดของยางมะตอยซีเมนต์ขึ้น วิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบความข้นเหลวมีหลายวิธี ดังนี้

- Penetration Test
- Viscosity Test
- Softening Point Test
- Ductility Test
- Float Test

• ความทนทานหรือต้านทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ เพื่อการประสานที่ดีของยางมะตอยซีเมนต์ที่ใช้ในการทำผิวจราจรต้องมีสมบัติเป็นพลาสติก เมื่อยางมะตอยซีเมนต์ถูกสัมผัสกับดินฟ้าอากาศ จะทำให้เกิดการสูญเสียคุณภาพความเป็นพลาสติก และเกิดการเปราะ เพราะปฏิกิริยาทางเคมีและฟิสิกส์ สภาพดินฟ้าอากาศ ทำใหยางมะตอยซีเมนต์ของผิวจราจรเกิดการแข็งตัวในยางมะตอยคอนกรีต เป็นผลทำให้เกิดรอยแตกร้าวเล็กๆ และจะค่อยๆ ใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนน้ำที่ผิว

ทางสามารถไหลตลอดลงไปได้ทำให้เกิดการอ่อนตัวของชั้นพื้นทาง หรือเข้าไปเกิดความแข็งตัวในชั้นผิวทางจนทำให้ผิวทางแตกออก สาเหตุที่ทำให้ผิวทางเกิดการเสื่อมสภาพ ได้แก่

- ออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นสาเหตุใหญ่ที่ทำให้ยางมะตอย แข็งตัวและเสื่อมสภาพ การเกิด Oxidation ช้าหรือเร็วนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่นสภาพดินฟ้าอากาศ อุณหภูมิและปริมาณออกซิเจน แต่อัตราการเกิดออกซิเดชันจะช้าลงและน้อยลงเมื่อลึกลงไปจากผิวยางมะตอย การเกิด Oxidation จะสูงเมื่อยางมะตอยที่ใช้งานอยู่ในอุณหภูมิสูงและถูกอากาศเต็มที่

- การระเหยของสารละลาย (Volatilization) เป็นขบวนการระเหยของสารละลายที่สามารถระเหยได้ในส่วนผสมของยางมะตอย ขบวนการนี้จะไม่เกิดที่อุณหภูมิปกติแต่จะเกิดเฉพาะที่อุณหภูมิสูงๆ เท่านั้น

- การเสียหายตามธรรมชาติ

- อัตราการแข็งตัว

- การต้านทานต่อปฏิกิริยาของน้ำ ความต้านทานของยางมะตอยในผิวจราจรส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความสามารถของยางมะตอยที่จะทำให้วัสดุมวลรวมยึดกันได้ดี การสูญเสียการยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและยางมะตอยในระยะแรกๆ แสดงว่าผิวจราจรไม่ดีเป็นผลเนื่องมาจากในเวลาทำการผสมมีน้ำปนอยู่ในบางครั้งถ้าหลีกเลี่ยงไม่ได้สามารถใส่สารเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะเข้าด้วย สามารถทดสอบการต้านต่อปฏิกิริยาของน้ำโดยการทดสอบการหลุดลอกในห้องปฏิบัติการ

2.1.6 สมบัติทั่วไปของยางมะตอยที่จะนำไปใช้งาน

- สามารถเกาะติดกับวัสดุมวลรวมได้ในทันทีเมื่อได้รับความร้อน

- สามารถป้องกันน้ำได้ดี

- สามารถทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ

- เป็นสารประเภทเทอร์โมพลาสติก ยึดหยุ่นได้เมื่อนำไปผสมกับมวลรวม

- สามารถต้านทานต่อกรด ด่างเกลือ ได้ดีสามารถทำให้เหลวได้โดยให้ความร้อน หรือตัวทำละลาย

ความร้อน หรือตัวทำละลาย

2.1.7 สมบัติที่ต้องคำนึงในการออกแบบส่วนผสมยางมะตอยคอนกรีต (อัณชลี,

2546)

- เสถียรภาพ (Stability) เสถียรภาพของผิวทางยางมะตอยคอนกรีต คือความสามารถในการรับน้ำหนักการจราจรโดยไม่เกิดร่องล้อ เป็นคลื่น หรือการเปลี่ยนแปลงรูปใน

ลักษณะอื่นๆ เสถียรภาพของยางมะตอยคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่าง คือ ความเสียดทานภายใน ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติของมวลรวม เช่น รูปร่างของเม็ดวัสดุลักษณะความเรียบ หยาบ หรือ ขรุขระของผิว และการยึดเกาะ ระหว่างเม็ดของวัสดุมวลรวม ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติยางมะตอยว่าสามารถยึดเม็ดวัสดุมวลรวมให้ติดกันได้ดีเพียงใด ผลรวมของความเสียดทานภายในและแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกัน เมื่อมีน้ำหนักรถมากระทำโดยปกติแล้ววัสดุมวลรวมที่มีลักษณะเป็นเม็ดเป็นเหลี่ยม ผิวหยาบขรุขระ จะทำให้เสถียรภาพสูง ส่วนแรงยึดเกาะจะมีมากถ้ายางมะตอยที่ใช้มีความหนืดสูง การเพิ่มปริมาณยางมะตอยในส่วนผสมจะทำให้แรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณยางมะตอยจนถึงจุดหนึ่งจะทำให้ยางมะตอยที่เคลือบเม็ดวัสดุมวลรวมหนาเกินไป เป็นผลทำให้ความเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมลดลง ทำให้เสถียรภาพลดลงด้วย

- ความคงทน (Durability) หมายถึงความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ ปัจจัยที่ทำให้ยางมะตอยคอนกรีตเสื่อมสภาพ อาจเป็นผลมาจากภูมิอากาศ สภาพการจราจร เนื่องจากขบวนการโพลิเมอร์ไรเซชัน และออกซิเดชัน วัสดุมวลรวมเสื่อมคุณภาพจนเกิดการแตกตัวและฟิล์มที่เคลือบวัสดุมวลรวมหลุดลอก

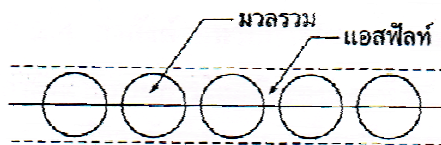
- การซึมผ่านไม่ได้ (Impermeability) หมายถึงความสามารถของผิวทางยางมะตอยคอนกรีตในการต้านทานการซึมผ่านของอากาศและน้ำเข้าไปในโครงสร้างของถนน ปริมาณโพรงอากาศเป็นเครื่องชี้ถึงความไวของวัสดุผสมที่ให้อากาศหรือน้ำซึมผ่านได้ซึ่งเป็นผลอย่างยิ่งในแง่ของความทนทาน

- ความสามารถในการทำงานได้ (Workability) ยางมะตอยคอนกรีตที่ปูและบดอัดยากอาจมีผลต่อความหนาแน่น ซึ่งจะกลายเป็นสาเหตุของความเสียหายต่างๆ ได้อาจแก้ไขโดยการออกแบบใหม่หรือเปลี่ยนวัสดุมวลรวมใหม่และ/หรือเปลี่ยนขนาดกะของวัสดุมวลรวมใหม่

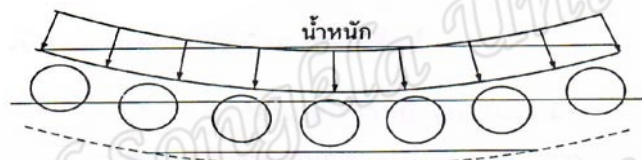
- ความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance) คือความสามารถในการต้านทานต่อการตัดโค้งซ้ำซาก ของผิวทางยางมะตอยคอนกรีต ที่เกิดจากน้ำหนักล้อกระทำ ปริมาตรช่องอากาศ และความหนืดของยางมะตอยมีผลต่อความต้านทานการล้า คือ ยางมะตอยที่มีปริมาณช่องอากาศมาก ไม่ว่าจะเป็นผลมาจากการออกแบบหรือการบดอัดเพียงพอ จะทำให้ความต้านทานต่อการล้าลดลง

- ความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid Resistance) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวทาง เช่น วัสดุมวลรวมถูกขัดสีจนเรียบ หรือยางมะตอยที่มีความหนืดต่ำจะมีผลให้เกิดการไหลเยิ้ม ขึ้นที่ ค้านบนได้เมื่ออุณหภูมิของผิวทางสูง

- ความยืดหยุ่น (Elasticity or Flexibility) หมายถึงผิวทางยางมะตอยคอนกรีตที่สามารถทรุดตัวแอ่นตัวหรือการแอ่นตัวโดยปราศจากการแตกร้าว การยืดหยุ่นตัวในยางมะตอยคอนกรีตเกิดขึ้นเมื่อมีน้ำหนักการจราจรที่เคลื่อนที่ไปตามถนน ผิวทางจะถูกกดลงไปชั่วขณะหนึ่ง เกิดแรงอัดที่ผิวด้านบนและเกิดแรงดึงที่ผิวด้านล่าง ซึ่งความเค้นดึง จะมีค่ามากกว่าความเค้นอัด ทำให้เกิดการเสีรูปร่างของผิวทางได้ถ้าความยืดหยุ่นตัวของผิวทางไม่ดีพอ



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของยางมะตอยกับวัสดุมวลรวม ยังไม่ได้รับน้ำหนักบรรทุก (Non-Loaded)



รูปที่ 2.12 แสดงการรับน้ำหนักบรรทุก (Loaded) เกิดการยืดหยุ่นตัวของยางมะตอย

2.1.8 องค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางมะตอยคอนกรีต (อัษฎลี, 2546)

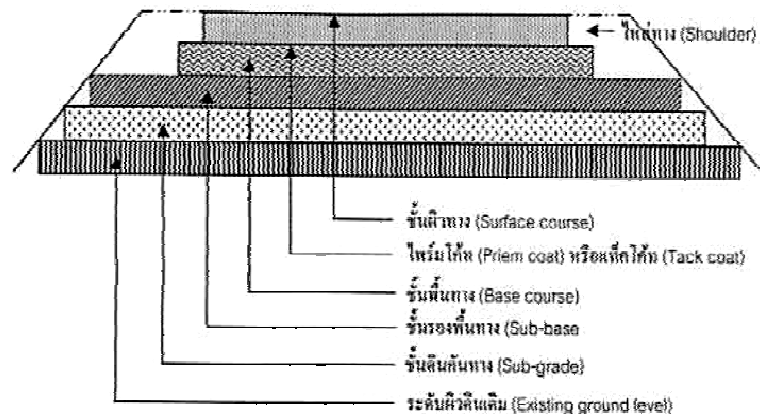
- ความหนาแน่น (Density) ผิวทางยางมะตอยคอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากพอจะทำให้อายุการใช้งานยืดยาว แต่อย่างไรก็ตาม การบดอัดโดยรถบดในสนามนั้นไม่สามารถจะบดอัดให้แน่นเท่ากับการบดอัดในห้องปฏิบัติการทดลอง ดังนั้นกรมทางหลวงจึงกำหนดค่าบดอัดในสนามให้มีความหนาแน่นไม่น้อยกว่า 98 % ของความหนาแน่นที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ

- ช่องว่างในอากาศ (Air Voids) ในผิวคอนกรีตที่บดอัดแล้วที่จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมียุทธศาสตร์ช่องอากาศที่เพียงพอ แต่ไม่มากเกินไป ทั้งนี้เมื่อเปิดการจราจรแล้วรถที่แล่นบนผิวทางจะทำให้ยางมะตอยคอนกรีตแน่นขึ้นจากเดิม ทำให้ปริมาตรช่องว่างอากาศลดลงช่องว่างอากาศเหล่านี้ ยังเป็นพื้นที่สำหรับรองรับการขยายตัวของยางมะตอยเมื่ออากาศร้อนอีกด้วย แต่ทั้งนี้ช่องว่างในอากาศก็มีผลกระทบต่อความคงทน ของผิวทางยางมะตอยคอนกรีตด้วย คือ ปริมาตรช่องว่างอากาศยิ่งน้อยเท่าใด น้ำและอากาศก็จะซึมผ่านเข้าไปทำลายยางมะตอยและยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับยางมะตอยได้ยากมากขึ้น

- ช่องว่างในวัสดุมวลรวม (Voids in the Mineral Aggregate; VMA) คือ ปริมาตรช่องว่างทั้งหมดที่มีอยู่ระหว่างเม็ดของวัสดุมวลรวมในยางมะตอยคอนกรีตที่บดอัดแล้ว ซึ่งรวมช่องว่างส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยยางมะตอยหรือ VMA คือ ปริมาตรช่องว่างสำหรับรับปริมาตรของยางมะตอยประสิทธิภาพรวมกับช่องว่างของอากาศ ถ้าหากออกแบบส่วนผสมในยางมะตอยคอนกรีตมีปริมาตรช่องว่างอากาศเท่ากันแล้ว ยางมะตอยคอนกรีตที่มีค่า VMA สูง จึงหมายถึงยางมะตอยคอนกรีตนั้นมีปริมาตรช่องว่างสำหรับใส่ยางมะตอยได้มาก ทำให้ได้ฟิล์มของยางมะตอยที่ห่อหุ้มผิววัสดุมวลรวมหนา ทำให้ยางมะตอยคอนกรีตมีความคงทน อายุการใช้งานยืดยาว (วัชรินทร์, 2544)

2.1.9 ส่วนประกอบโดยทั่วไปของถนนยางมะตอย

- ชั้นผิวทาง (Surface dressing) คือชั้นบนสุดของทางที่เป็นผิวจราจร วัสดุที่นิยมเลือกใช้มีอยู่ 3 แบบ คือ แบบแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete) แบบมีการปรับปรุงพื้นผิว (Surface treatment) และแบบชนิดหินโรย (Penetration macadam)
- ไพรม์โค้ท (Prime coat) คือส่วนของยางมะตอยเหลวราดบนผิวทางเพื่อยึดเชื่อมผิวทางให้ติดกับโครงสร้างอื่นๆ
- ชั้นพื้นทาง (Base course) คือชั้นของวัสดุที่มีสมบัติดี เช่น หิน โม่หรือกรวด โม่ซึ่งมีขนาดคละกันตั้งแต่ใหญ่มาถึงเล็กหรือใช้แอสฟัลต์คอนกรีตแบบเดียวกับที่ผิวทาง
- ชั้นรองพื้นทาง (Sub-base course) คือส่วนวัสดุรองใต้พื้นทาง นิยมใช้ลูกรังหรือดินที่มีสมบัติดี บดอัดแน่นบนคันทาง
- ไหล่ทาง (Shoulder) คือส่วนที่เสริมด้านท้ายริมสุดของผิวทาง และพื้นทางทั้งสองข้างให้แน่นได้ระดับเท่ากับผิวทาง วัสดุที่ใช้เหมือนชั้นรองพื้นทาง
- ชั้นดินคันทาง (Sub-grade course) เป็นวัสดุเกรดดี บดอัดแน่นบนผิวดินเดิม



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบทั่วไปของถนนยางมะตอย (ทวิศักดิ์, 2546)

2.1.10 ขั้นตอนการสร้างถนน

- ถนนลาดยาง นั้นเป็นวิธีการสร้างถนนแบบเก่าใช้มา ตั้งแต่สมัยรัชกาลที่ 5 มีกรรมวิธีโดยย่อ คือ หลังจากถมดินทำฐานราก ปล่อยให้ทรุดตัวปรับระดับดีแล้ว ก็จะใช้หินใหญ่เรียงลงบนฐาน แล้วใช้ หินย่อยขนาดรองๆลงมาแซมในช่องว่าง บดทับให้แน่น จากนั้นจึงใช้ยางมะตอยเป็นตัวประสานยึดระหว่างก้อนหิน เพื่อให้ยางมะตอยเป็นตัวประสานยึดระหว่างก้อนหิน จากนั้นจึงโรยหินเล็กบดทับอีกชั้นหนึ่ง ชั้นสุดท้ายก็ใช้ทรายโรย ลักษณะถนนก็จะเป็นถนนซึ่งมีหินปูอัดแน่น มียางมะตอยเป็นตัวยึดหินให้ติดกัน ผิวเป็นยางมะตอยบางๆ มีทรายผสมอยู่

- ถนนลาดยาง นั้นเป็นถนนที่ทำกันมากในปัจจุบันมีกรรมวิธีโดยย่อ คือ หลังจากถมดินปรับฐานรากดีแล้ว โดยมีการถมดิน บดทับเป็นชั้นๆจนแน่น ก็เอายางมะตอยเคลือบผสมกับทราย และหิน ตามสัดส่วนที่คำนวณไว้ เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วจึงนำมาลาด หรือเพื่อให้เข้าใจง่าย คือ ปูลาดลงบนฐานดินที่บดทับจนแน่นข้างต้นแล้วบดทับอีกครั้งหนึ่งก็สำเร็จเป็นถนน ลักษณะถนนจะเป็นถนนดิน ที่มีผิวเป็นแผ่นยางมะตอยที่ผสมทรายและหินเหมือนพรมปูอยู่บนพื้น กรรมวิธีสร้างถนนทั้ง 2 วิธี ในขณะนี้ยังใช้กันอยู่ แต่ความนิยมในปัจจุบันจะใช้วิธีลาดยางมากกว่า ลาดยาง เพราะทำได้รวดเร็วและแข็งแรงกว่า

2.1.11 ปัญหาของถนนยางมะตอย (อิทธิพลและไกรศรี, 2547)

ปัจจุบันผิวถนนยางมะตอยเกิดความเสียหายมากมายและมีอายุการใช้งานสั้น เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่นปริมาณการจราจรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว รถบรรทุกน้ำหนักเกินกฎหมาย กำหนดและการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของดินฟ้าอากาศ อุณหภูมิสูง – ต่ำอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ถนนยางมะตอยเสียหายในหลายลักษณะ เช่น

- ผิวทางแตกร้าว คือปรากฏการณ์ที่เกิดรอยร้าวขึ้นที่ผิวหน้าของมะตอย เกิดจากผิวทางมีสภาพแข็งเปราะ ขาดความยืดหยุ่น เมื่อมีน้ำหนักกระทำซ้ำๆ หรืออยู่ภายใต้การใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน จึงเกิดรอยแตกร้าวที่ผิวทาง
- ผิวทางเยิ้ม คือปรากฏการณ์ที่ยางมะตอยซึมขึ้นมารวมกันที่ผิวทางเมื่อได้รับความร้อนเกิดจากยางมะตอยที่ใช้มีความหนืดและความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำ
- ผิวทางเกิดร่องล้อ คือปรากฏการณ์ที่ผิวของมะตอยยุบตัวเป็นร่องตามแนวล้อที่แล่นทับ ส่วนมากมักเกิดหลักจากผิวทางมียางเยิ้ม เกิดจากผิวทางไม่แข็งแรง และขาดสมบัติการยืดหยุ่นทำให้เกิดการยุบตัวแบบถาวรเมื่อได้รับแรง
- ผิวหน้าทางหลุดร่อน คือปรากฏการณ์ที่ผิวทางสึกกร่อนหลุดร่อน ออกเป็นเม็ดเล็กๆ เนื่องจากวัสดุส่วนที่ผิวหน้าของยางมะตอยถูกแรงเฉือน จากล้อรถตะกุกหลุดออก ทำให้ผิวทางมีลักษณะขรุขระ

2.2 มาตรฐานและข้อกำหนด

2.2.1 กรมทางหลวง

- ทล.-ม. 408/2532: มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตของกรมทางหลวง
- ทล.-ม. 409/2549: มาตรฐานมอดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต
- ทล.-ม. 201/2544: มาตรฐานพื้นทางหินคลุก
- ทล.-ม. 301/2532: มาตรฐานการผสมตัวอย่างคอนกรีตสดใน
ห้องทดลอง
- ทล.-ม. 304/2532: มาตรฐานการหล่อแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก
- ทล.-ม. 407/2542: วัสดุมวลรวมผสมเย็นด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน
- ทล.-ม. 410/2542: Asphalt Hot-Mix Recycling
- ทล.-ก. 201/2544: ข้อกำหนดมวลรวมละเอียดสำหรับผสมคอนกรีต
- ทล.-ก. 202/2544: ข้อกำหนดมวลรวมหยาบสำหรับผสมคอนกรีต
- ทล.-ท. 403/2518: กองวิเคราะห์และวิจัย วิธีการทดลองหาค่า
Penetration ของวัสดุแอสฟัลต์ (เทียบเท่า AASHTO T. 49)
- ทล.-ท. 405/2519: กองวิเคราะห์และวิจัย วิธีการทดลองหาค่า Ductility
ของวัสดุแอสฟัลต์ (เทียบเท่า AASHTO T. -51)

- ทล.-ท. 410/2522: กองวิเคราะห์และวิจัย วิธีการทดลองหาปริมาณน้ำในแอสฟัลต์อิมัลชัน (เทียบเท่า AASHTO T. -59)

- ทล.-ท. 412/2522: กองวิเคราะห์และวิจัย วิธีการทดลองหาค่าความหนืดของแอสฟัลต์อิมัลชัน (เทียบเท่า AASHTO T. 59)

- ทล.-ท. 413/2544: วิธีการทดลองหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength index) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

- ทล.-ท. 415/2548: วิธีการทดลองหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดึง

- ทล.-ท. 416/2548: วิธีการทดลองหาความเหนียวและเทนซิตีของวัสดุแอสฟัลต์

2.2.2 กรมทางหลวงชนบท

- มทช.234-2545: มาตรฐานวัสดุโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงาน โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต

- มทช.230-2545: มาตรฐานงานแอสฟัลต์คอนกรีต

- มทช.236-2545: มาตรฐานงานผิวจราจรแบบโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต

- มทช.237-2545: มาตรฐานงานผิวจราจรแบบพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต

2.2.3 สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

- มอก. 2157/2547: โมดิฟายด์แอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับงานทาง

- มอก. 2156/2547: โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง

- มอก. 851/2542: แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง

2.2.4 กรมโยธาธิการและผังเมือง

- มยช. 230-2536: มาตรฐานงานผิวจราจรแบบ แอสฟัลต์ติกคอนกรีต (Asphaltic Concrete)

- มยช. 236-2540: มาตรฐานงานผิวจราจรแบบโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต

- มยช. 234-2540: มาตรฐานวัสดุโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงาน โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต
- มยช. 235-2540: มาตรฐานวัสดุ โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงาน พอร์ตแอสฟัลต์คอนกรีต
- มยช. 236-2545: มาตรฐานงานผิวจราจรแบบโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต (Polymer Modified Asphalt Concrete)
- มยช.237-2540: มาตรฐานงานผิวจราจรแบบ พอร์ตแอสฟัลต์คอนกรีต

2.3 สารปรับปรุงคุณภาพจำพวกพอลิเมอร์

พอลิเมอร์เป็นสารประเภทไฮโดรคาร์บอน ประกอบด้วยโมเลกุลของโมโนเมอร์หลายๆ โมเลกุลมาต่อกันเป็นโซ่ที่มีความยาวมากโดยทั่วไปแล้ว พอลิเมอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

- Thermoplastic polymers เป็นพอลิเมอร์สายตรงหรือกึ่ง ไม่มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลขยับตัวง่ายเมื่อได้รับแรงหรือความร้อน สามารถหลอมและไหลได้เมื่อได้รับความร้อน เป็นส่วนประกอบหลักในพลาสติกอ่อน เช่น Polyethylene ในถุงพลาสติก
- Elastomers เป็นพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลเล็กน้อย ซึ่งทำหน้าที่ดึงสายโซ่โมเลกุลกลับมาให้อยู่ในสภาพเดิม เมื่อปล่อยแรงกระทำ
- Thermosetting polymers เป็นพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลอย่างหนาแน่น ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลขยับตัวยากเมื่อได้รับแรงหรือความร้อน วัสดุที่มีพอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นองค์ประกอบหลัก จึงรับแรงได้ดี และไม่หลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน อย่างไรก็ตาม เมื่อความร้อนสูงถึงอุณหภูมิสลายตัว (Degradation temperature) วัสดุจะสลายตัวไปเนื่องจากพันธะเคมีแตกหัก พอลิเมอร์ชนิดนี้ เป็นส่วนประกอบหลักในพลาสติกแข็ง เช่น ถ้วยชามเมลามีน หลังกาไฟเบอร์ (Thermosets เสริมใยแก้ว)

2.4 ยางมะตอยปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ (Polymer modified asphalt, PMA)

เมื่อนำพอลิเมอร์โมดิฟายด์ยางมะตอยมาผสมเป็นผิวทาง จะให้สมบัติที่เหนือกว่าผิวทางยางมะตอยคอนกรีตทั่วไป ดังนี้ (ทวีศักดิ์, 2546)

- มีความต้านทานต่อการล้า (Fatigue) ที่ดีกว่า

- มีความต้านทานสูงต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร มีความยืดหยุ่นสูงที่อุณหภูมิต่ำมาก หรือสูงมาก
- มีความต้านทานต่อการบิดตัว ระหว่างวัสดุมวลรวม กับวัสดุเชื่อมประสาน มีความต้านทานต่อการหลุดลอกที่ดีกว่า
- ไม่มีการไหลเยิ้มของวัสดุเชื่อมประสาน

การใช้พอลิเมอร์เป็นสารเติมแต่งในยางมะตอย โดยพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับปรับปรุงยางมะตอย ซึ่งสามารถจะแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

ตารางที่ 2.1 การแบ่งกลุ่มและชนิดของพอลิเมอร์สำหรับการปรับปรุงยางมะตอย

กลุ่ม	ชนิด
เทอร์โมพลาสติก	PE, PP, EVA, EMA, PVC
ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์	NR, BR, IR, IIR, CR, SBR, ยางรถยนต์บด
เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	SBS, SIS, EPDM
เทอร์โมเซต	อีพอกซี เรซิน

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติยางมะตอย

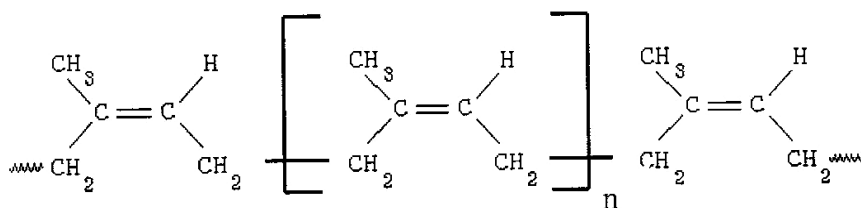
ชนิดพอลิเมอร์	ข้อดี	ข้อเสีย	การใช้งาน
PVC	- ลดการแตก	- ทำเป็นสารตัวเติม	- ไม่ใช้ในเชิงการค้า
EPDM	- ปรับปรุงสมบัติการยึดหยุ่น กระจายตัวดี	- ทำให้เข้ากันได้ยาก	- งานมุงหลังคา
PP	- ไม่เพิ่มความหนืดแม้ว่าผสมในปริมาณมาก - เพนนิเทรชันต่ำ - ช่วงพลาสติกซีตีกว้างและปรับปรุงเชื่อมโยงในการต้านการถูกกระทำ	- แยกเฟส - ไม่ปรับปรุงการยึดหยุ่นและสมบัติเชิงกล	- ชนิดอะแทกติกใช้สำหรับงานมุงหลังคา - ชนิดไอโซแทกติกไม่ใช้ในเชิงการค้า

ชนิดพอลิเมอร์	ข้อดี	ข้อเสีย	การใช้งาน
EVA, EMA	<ul style="list-style-type: none"> - มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อย - มีความเสถียรต่ออุณหภูมิของการผสม - เพิ่มความเกาะติด 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่ปรับปรุงสมบัติการคืนรูป 	<ul style="list-style-type: none"> - ลาดถนนและงานมุงหลังคา
EP	<ul style="list-style-type: none"> - ด้านทานเชิงเคมี - ไม่ว่องไวต่ออุณหภูมิ - มีความยืดหยุ่นสูง - ด้านทานการแตกร้าว - มีการยึดเกาะดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาแพง - แสดงพฤติกรรมของเทอร์โมเซตในการผสม 	<ul style="list-style-type: none"> - งานปูพื้นทำอากาศยานและพื้นผิวสะพาน
SBR, SBS, SIS	<ul style="list-style-type: none"> - มีความยืดหยุ่นสูงที่อุณหภูมิต่ำ - ด้านทานการเปลี่ยนรูปและการไหลที่อุณหภูมิสูง - ด้านทานการเปลี่ยนรูปแบบร่องล้อ - มีการยึดเกาะกันของยางมะตอยและวัสดุมวลรวมดีซัน 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาแพง - ด้านทานต่อการลดเพนนิเทรชัน - ความหนืดสูง - ด้านทานต่อความร้อนและการออกซิเดชัน 	<ul style="list-style-type: none"> - งานลาดถนนและงานมุงหลังคา
NR	<ul style="list-style-type: none"> - ด้านทานการเปลี่ยนรูปแบบร่องล้อได้ - มีความดึงยืดสูง - มีความยืดหยุ่นสูงและสมบัติภายใต้การถูกระทำซ้ำๆ 	<ul style="list-style-type: none"> - ว่องไวต่อปฏิกิริยากับออกซิเจน - น้ำหนักโมเลกุลสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - ลาดถนน

ชนิดพอลิเมอร์	ข้อดี	ข้อเสีย	การใช้งาน
BR, IR	- มีการกระจายตัวง่าย - มีสมบัติการยืดหยุ่นที่ชัดเจนกว่าเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่น	- มีพันธะคู่ในสายโซ่ซึ่งทำให้พอลิเมอร์เสื่อมคุณภาพเมื่อโดนความร้อนและออกซิเจน	- ลาดถนนและมุงหลังคา
ระบบผสม(ในระบบผสมประกอบด้วย SBS และPE)	- เป็นการแก้ไขข้อเสียหลายด้านในการปรับปรุงครั้งเดียว	- ปัญหาเรื่องความเข้ากันได้	- ลาดถนน
ยางรีเคลม (reclaimed tire rubber)	- ช่วยในการจัดการกับยางและราคาถูก - ปรับปรุงการต้านทานการล้า ร่องล้อ ลวดการแตก และมี ความคงทน	- สมบัติเชิงกลต่ำ - ใช้เวลาและอุณหภูมิสูงในการกระจายตัว	- ลาดถนน

2.5 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติที่ได้จากยางพาราพันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียสซิส (Hevea brasiliensis) เป็นพอลิเมอร์ที่มีไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 94 โดยน้ำหนัก ส่วนประกอบที่เหลือเป็นโปรตีน ไขมัน และเกลืออนินทรีย์อื่นๆ เช่น จีแล็ก และอนุมูลของโลหะ เป็นต้น มีหน่วยที่ซ้ำๆ กันเป็น ไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นโมเลกุลยาวเรียกว่า พอลิไอโซพรีน ($(C_5H_8)_n$) โดย n มีค่าตั้งแต่ 5,000 – 15,000 ยางธรรมชาติประกอบด้วยโมเลกุลที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 50,000 – 3,000,000 และประมาณร้อยละ 60 ของโมเลกุลเหล่านี้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1,300,000 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นไอโซเมอร์ชนิด cis-isomer มากกว่า 99.99 % และมี trans-isomer ปริมาณน้อยมาก ดังนั้นจึงมักเรียกกยางธรรมชาติว่า cis-1,4-polyisoprene ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูป



รูปที่ 2.14 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ยางมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.934 ที่ 20 องศาเซลเซียส และมีครรชนหักเหแสงเท่ากับ 1.5215 – 1.5238 ที่ 20 องศาเซลเซียส

2.5.1 โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยางคือ

- โมเลกุลเป็นไฮโดรคาร์บอนล้วน ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันพืช แต่จะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
- พันธะคู่ที่ว่องไวในปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจน และ โอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมของยาง
- สายโซ่ที่ต่อจากพันธะคู่ จะอ่อนมากกว่าปกติทำให้โมเลกุลเคลื่อนไหวได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ
- การมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอสามารถทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติตกผลึกได้เมื่อทำการยืด ทำให้มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงมากและทำให้มีค่า green strength สูง และ tack ดี
- ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะต้องนำไปบดก่อนที่จะนำไปใช้งาน

2.6 วัสดุมวลรวม (aggregate)

หิน คือ มวลของแข็งที่ประกอบไปด้วยแร่ชนิดเดียวกัน หรือหลายชนิดรวมตัวกันอยู่ตามธรรมชาติ เนื่องจากองค์ประกอบของเปลือกโลกส่วนใหญ่เป็นสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ดังนั้นเปลือกโลกส่วนใหญ่จึงเป็นแร่ตระกูล ซิลิเกต นอกจากนั้นยังมีแร่ตระกูลคาร์บอเนต เนื่องจากบรรยากาศโลกในอดีตส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำฝนได้ละลายคาร์บอนไดออกไซด์บนบรรยากาศลงมาสะสมบนพื้นดินและมหาสมุทร จึงมีชีวิตอาศัยคาร์บอนสร้างธาตุอาหารและร่างกาย แพลงตอนบางชนิดอาศัยซิลิกาสร้างเปลือก เมื่อตายลงทับถมกันเป็นตะกอน หินส่วนใหญ่บนเปลือกโลกจึงประกอบด้วยแร่ต่างๆ

หินปูน (อังกฤษ: limestone) เป็นหินในกลุ่มหินตะกอน มีชื่อวิทยาศาสตร์ที่รู้จักกันในหมู่นักธรณีว่า แร่แคลไซต์ (Calcite) (CaCO_3) เป็นหินตะกอนคาร์บอเนต เกิดจากการทับถมของตะกอนคาร์บอเนตในท้องทะเล ทั้งจากสารอนินทรีย์ และซากสิ่งมีชีวิต เช่น ปะการัง และกระดูกของสัตว์ทะเล ซึ่งทับถมกันภายใต้ความกดดันและตกผลึกใหม่เป็นแร่แคลไซต์จึงทำปฏิกิริยากับกรด เนื้อแน่นละเอียดหยาบ มีสีออกขาว เทา ชมพู หรือสีดำ อาจมีซากดึกดำบรรพ์ในหินได้ เช่น ซากหอย ปะการัง ภูเขาหินปูนมักมีรอยค้ำแหลมเป็นหน้าผา และเป็นหินที่ละลายน้ำได้ดี

- บริเวณที่พบ จังหวัดสระบุรี เพชรบุรี กระบี่ นครศรีธรรมราช พังงา

- ประโยชน์ ใช้ในอุตสาหกรรมการทาง ทำถนน ทางรถไฟ เสาทำปูนซีเมนต์ ปูนขาว หรือปูนกินหมาก ทำแคลเซียมคาร์ไบด์ ทำวัสดุทนไฟ ทำปุ๋ย และทำสี

หินคลุก เป็นหินปูนที่ย่อยจนมีเกรดเดชั่น ที่เรียกว่า Well grade โดยเป็นหินที่มีขนาดแตกต่างกันมาปนกัน ไม่สามารถนำไปเป็นหินก่อสร้าง หรือนำไปบดเป็นปูนซีเมนต์ได้ เพราะไม่ได้ขนาดหรือแร่ธาตุตามที่ต้องการ โดยส่วนมากใช้สำหรับเป็น ชั้นพื้นทางในงานถนน

สำหรับการกระจายของหินสามารถแบ่งแยกประเภทดังนี้ คือ

- หินที่มีขนาดคละกันดี (Well Graded หรือ Dense Graded) คือ หินที่มีขนาดต่างๆ คละกันอย่างเหมาะสม ตั้งแต่ขนาดใหญ่ไปจนถึงขนาดเล็ก

- หินที่มีขนาดคละกันไม่ดี (Poorly Graded) แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ดังนี้
 - หินที่มีขนาดหินสม่ำเสมอ (Uniform Grade หรือ Open Graded) คือหินที่มีขนาดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่

- หินที่มีขนาดหินขาดช่วง (Skip หรือ Gap Grade) คือหินที่มีแต่ขนาดเม็ดใหญ่และขนาดเม็ดเล็ก ขาดขนาดปานกลางไป หรือขาดขนาดใดขนาดหนึ่งไป

2.7 พอลิเมอร์เบลนด์

พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับประเภทของการใช้งานและรูปแบบของผลิตภัณฑ์ ในการทำพอลิเมอร์เบลนด์อาจจะมีสารเคมีมาเป็นตัวช่วยในการปรับปรุงสมบัติ ดังนั้นในการเบลนด์จะเป็นการพัฒนาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์โดยไม่จำเป็นต้องสังเคราะห์พอลิเมอร์ขึ้นมาใหม่

การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ต้องคำนึงถึงการเข้ากันได้ (Compatibility) ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ ถ้าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่เข้ากัน จะเกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน การแยกเฟสจะทำให้แต่ละเฟสมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ จึงทำให้สมบัติเชิงกลลดลง ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการเข้ากันได้คือ

• ความสามารถในการเข้ากันได้ (Miscibility) ในระดับโมเลกุล จัดเป็น มโนทัศน์ทางทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ กล่าวคือเมื่อสารสองชนิดมาเบลนดกันจะทำให้เกิดระบบ วัฏภาคเดี่ยวเนื้อเดียว (Homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด องค์ประกอบที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถในการเข้ากันได้ของโมเลกุล (Molecular miscibility) ได้แก่

- น้ำหนักโมเลกุล
- ไม่เป็นผลึก
- สภาพความมีขั้วคล้ายกัน
- พันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

• การเบลนดเข้ากันได้ จัดเป็นสมบัติของพอลิเมอร์เบลนดบางชนิดซึ่ง ละลายได้ในระดับโมเลกุล อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์เบลนดส่วนใหญ่เป็นระบบที่ไม่ละลายในระดับ โมเลกุล และแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (Multiphase system) ในขณะที่ระบบหลายวัฏภาคนี้ เกิดนานขึ้น จะมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวมากขึ้น (Strong interfacial adhesion) ทำให้สามารถรวม สมบัติที่ดีที่สุดของแต่ละวัฏภาคและเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จาก สมบัติของพอลิเมอร์บริสุทธิ์โดยลำพัง โดยผลของความเข้ากันได้ในการศึกษาเชิงเทอร์โมไดนา มิกส์ของพอลิเมอร์เบลนด ต้องมีความสมดุลกันของเอนทัลปีและการกระจายเอนโทรปีของ สมการพลังงานอิสระของการผสม โมเลกุลขนาดเล็กมีเอนโทรปีสูงพอจะทำให้เกิดการเข้ากันได้ สำหรับเอนโทรปีพอลิเมอร์ที่มีค่าเกือบจะเป็นศูนย์ ทำให้เอนทัลปีเป็นตัววัดความเข้ากันได้ พลังงานอิสระของการผสมเขียนได้ดังสมการ และสำหรับการผสม ΔG จะมีค่าเป็นลบ ดังนั้น $\Delta H - T\Delta S < 0$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

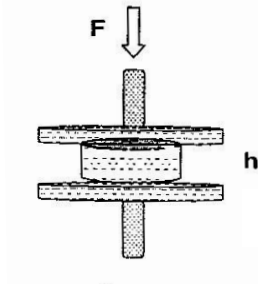
1

เมื่อ ΔG คือ พลังงานอิสระของการผสม
 ΔH คือ ผลต่างของเอนทัลปี
 ΔS คือ ผลต่างของเอนโทรปี
 T คือ อุณหภูมิ

2.8 สมบัติเชิงฟิสิกส์และรีโอโลยี

2.8.1 สมบัติการเปลี่ยนรูปตามยาวแบบกด (สมบัติ, 2547)

การเปลี่ยนรูปตามยาวแบบกด โดยหลักแล้วสมการส่วนมากจะคล้ายกับสมการการเปลี่ยนความยาวแบบดึง แต่ก็มีบางส่วนแตกต่างกัน คือ เมื่อพิจารณารูปของการกดประกอบ (รูปที่ 2.15) ซึ่งตัวอย่างทดสอบมีรูปร่างทรงกระบอกถูกกดอยู่ระหว่างจานระนาบแบนและบรรจุไม่เต็ม



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างทดสอบมีรูปร่างทรงกระบอกถูกกดอยู่ระหว่างจานระนาบแบนและบรรจุไม่เต็ม

โดยมีความสูงเริ่มต้นเป็น h_0 และความสูงที่เวลา t เป็น $h(t)$ การเปลี่ยนรูปมีทั้งแนวกดและแนวรัศมี จากที่นิยามไว้ของการเปลี่ยนรูปแบบเฮนกีในแนวของการกด คือ

$$\varepsilon_H = \ln \frac{h(t)}{h_0} = \ln \lambda \quad 2$$

และการเปลี่ยนรูปที่นิยามไว้ในทางวิศวกรรมเรียกว่า การเปลี่ยนรูปนอมินอล ε คือ

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h(t) - h_0}{h_0} = \lambda - 1 \quad 3$$

จากการเปลี่ยนรูปทั้ง 2 แบบสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$\varepsilon_H = \ln \lambda = \ln(\varepsilon + 1) \quad 4$$

โดยความเค้นในการทำให้เปลี่ยนรูปคือ ความเค้นตั้งฉากต่างสองแนว คือ $\sigma_{xx} - \sigma_{rr}$ ดังนั้นความเค้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปสำหรับการกดของจานระนาบแบนและบรรจุไม่เต็มแสดงได้ดังสมการที่ 5

$$\sigma_{rr} - \sigma_{xx} = \frac{F}{\pi r^2(t)} \quad 5$$

จากนิยามความเค้นและการเปลี่ยนรูปแบบโกชี ซึ่งหาได้จากกลศาสตร์สถิติของโซ่พอลิเมอร์ได้ว่า

$$\Delta S = -\frac{1}{2} Nk(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad 6$$

และจากพลังงานอิสระของเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz free energy) $A = U - TS$ ได้ว่าการเปลี่ยนรูปทำให้เอนโทรปีของโซ่พอลิเมอร์เปลี่ยนไป และมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในน้อยมาก (U) ขณะปริมาตรคงที่ทำให้เขียนสมการอิสระของเฮล์มโฮลทซ์ต่อปริมาตรได้

$$A = -T\Delta S = \frac{1}{2} NkT(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad 7$$

และพลังงานอิสระของเฮล์มโฮลทซ์ต่อปริมาตรคืองานสำหรับการเปลี่ยนรูปต่อปริมาตรแบบย้อนกลับ (W)

$$W = \frac{1}{2} NkT(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad 8$$

และแสดงในอีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$W = \frac{1}{2} G(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad 9$$

เมื่อ $G = NkT$

เมื่อพอลิเมอร์ถูกความเค้นกระทำแล้วปริมาตรคงที่จะได้ว่า $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$ และเมื่อมีความเค้นกระทำในแนวแกนเดียว กำหนดได้ว่า $\lambda_2 \lambda_3 = \frac{1}{\lambda}$ และ $\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\lambda^{\frac{1}{2}}}$ จะได้ว่า

$$W = \frac{1}{2} G\left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3\right) \quad 10$$

จากนิยามความเค้นนอมินอล σ_n คือ $\sigma_n = \frac{f}{A_0}$ และในอีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$\sigma_n = \frac{dW}{d\lambda} = G(\lambda - \lambda^{-2}) = \frac{F(t)}{A_0} \quad 11$$

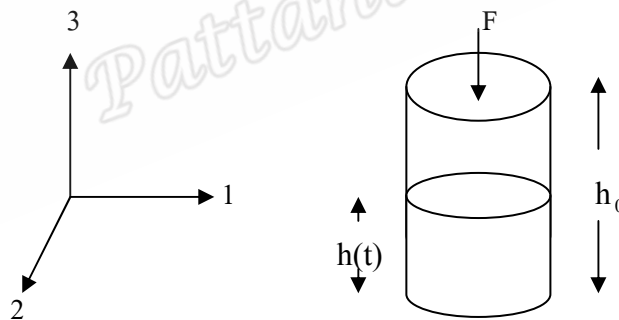
และจากความสัมพันธ์ของความเค้น σ_n กับ $\sigma(t)$ คือ $\sigma_n \lambda = \sigma = \sigma(t)$ จะได้ว่า

$$\sigma(t) = G\left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda}\right) \quad 12$$

และสามารถเขียนในเทอมของมอดูลัสการกด $D(t)$ ได้

$$D(t) = \frac{\sigma(t)}{-\left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda}\right)} \quad 13$$

สมบัติการกดของพอลิเมอร์จะพบเสมอในกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลง h ระหว่างถูกกด

จากเทนเซอร์การกดอย่างง่าย ก็จะมีแต่ความเค้นบนแกนหลัก คือ

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{Unicompression}) \quad 14$$

$$\text{ความเค้นตั้งฉากต่างอันดับหนึ่ง } N_1 = \sigma_{33} - \sigma_{22} \quad 15$$

$$= G(t)(\lambda^2 - \lambda^{-1}) + \int_0^t m(t-t')[\lambda^2(t,t') - \lambda^{-1}(t,t')]dt' \quad 16$$

ติดตามความสูงของหินตัวอย่าง จากการกดด้วยความเร็วคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความสูงเดิม

$$h(t) = h_0 - Vt \quad 17$$

เมื่อ $V = v \times \frac{h_0}{100}$ ความเร็วคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความสูงเดิม

$$h(t) = h_0 - \frac{vh_0}{100} t \quad 18$$

$$\lambda = \frac{h(t)}{h_0} = 1 - \frac{v}{100} t \quad 19$$

เพราะนั่นจะได้

$$\lambda(t,t') = \frac{\lambda(t)}{\lambda(t')} \quad 20$$

$$\lambda^2(t,t') = \frac{(100 - vt)^2}{(100 - vt')^2} \quad 21$$

และ

$$\frac{1}{\lambda(t,t')} = \frac{(100 - vt')}{(100 - vt)} \quad 22$$

นำแทนในสมการ (16) หา $N_1(t)$

2.8.2 สมบัติเชิงรีโอโลยี (สมบัติ, 2547)

รีโอโลยี คือ ศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลและการเปลี่ยนรูปร่างใดๆ เช่น ของพอลิเมอร์เหลวหรือสารอื่นๆ ซึ่งมีสมบัติในการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน เมื่อถูกแรงกระทำด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นแตกต่างกันของสารแต่ละชนิด ซึ่งนำไปสู่การวัดสมบัติเฉพาะของสารได้ การเปลี่ยนรูป (Deformation) คือการเปลี่ยนรูปร่างจากรูปร่างเดิม

ซึ่งการเปลี่ยนรูปมีหลายอย่างเช่น การเปลี่ยนรูปแบบทันทีทันใด การเปลี่ยนรูปแบบหมุน และการเปลี่ยนรูปแบบถาวร ในทางคณิตศาสตร์ การเปลี่ยนรูปคือการกระจัดสัมพัทธ์ระหว่าง t' และ t ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปของอนุพันธ์ย่อยของทั้งเชิงมุมและตามยาว ซึ่งมีทั้งหมด 9 องค์ประกอบ คือ

$$F^{-1}(t, t') \equiv \frac{\partial r}{\partial r'} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial r'_1} & \frac{\partial r_2}{\partial r'_1} & \frac{\partial r_3}{\partial r'_1} \\ \frac{\partial r_1}{\partial r'_2} & \frac{\partial r_2}{\partial r'_2} & \frac{\partial r_3}{\partial r'_2} \\ \frac{\partial r_1}{\partial r'_3} & \frac{\partial r_2}{\partial r'_3} & \frac{\partial r_3}{\partial r'_3} \end{bmatrix} \quad 23$$

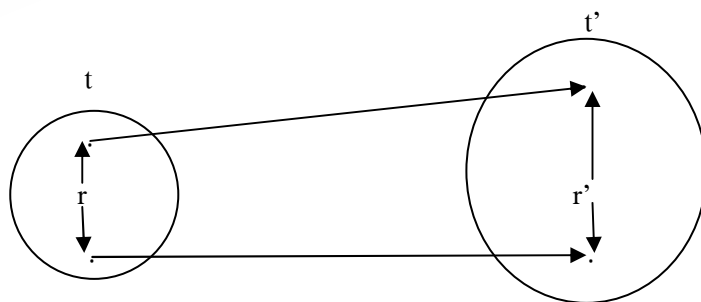
เมื่อ $F^{-1}(t, t')$ คือ เทนเซอร์ของการเปลี่ยนรูปใน 3 มิติ

r' คือ เวกเตอร์ก่อนการเปลี่ยนรูป เมื่อเวลา t'

r คือ เวกเตอร์หลังการเปลี่ยนรูป เมื่อเวลา t

และตัวอย่างของลักษณะวัตถุใน 3 มิติ ทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนรูป ดังรูป 2.17 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนรูปของวัตถุที่มีการเปลี่ยนพิกัดของเวกเตอร์ในแต่ละตำแหน่ง

$$F^{-1} \equiv \frac{\partial r}{\partial r'}$$



รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนรูปของวัตถุใน 3 มิติ

2.8.3 พฤติกรรมวิสโคอิลาสติกแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น (สมบัติ, 2547)

เมื่อมีการเปลี่ยนรูป ความเร็วในการเปลี่ยนรูปของระบบมีค่าน้อยพอ ฟังก์ชันต่างๆ ทางรีโอโลยีจะไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนรูปหรือความเร็วในการเปลี่ยนรูปจะเรียกสมบัติในช่วงนี้ว่า สมบัติวิสโคอิลาสติกแบบเชิงเส้น จะสอดคล้องกับ $G(t) = \frac{\tau(t)}{\gamma}$ ซึ่งความเครียดน้อยๆ สำหรับ พอลิเมอร์เหลว คือ $\gamma < \gamma_c \cong 0.5$ และมีรูปแบบสมการวิสโคอิลาสติกเชิงเส้นทั่วไปคือ $\tau = \int_{-\infty}^t G(t-t')\dot{\gamma}(t')dt'$ ในส่วนของสมการอิลาสติกแบบไม่เชิงเส้นนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อ พอลิเมอร์ถูก ทำให้เปลี่ยนรูปด้วยความเร็วสูงหรือขนาดการเปลี่ยนรูปมีค่ามาก ดังนั้นในการศึกษาและพัฒนา สมการวิสโคอิลาสติกแบบไม่เชิงเส้นนั้นเริ่มต้นได้จากหลายรูปแบบ เช่น สมการของการซ้อนทับ กันของโบลต์มันน์ จากสมการในช่วงของอิลาสติกแบบเชิงเส้นและปรากฏการณ์วิสโคอิลาสติก แบบไม่เชิงเส้น เช่น พฤติกรรมความเค้นตั้งฉาก ความหนืดเลื่อนลดลงและการเพิ่มขึ้นของความ หนืด

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 เหตุผลที่ทำให้ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพยางมะตอย

ยางมะตอยโดยทั่วไปมีข้อจำกัดบางประการต่อสภาพการใช้งาน เช่น เมื่ออุณหภูมิ เพิ่มขึ้นจะมีลักษณะอ่อนและไหล และเมื่ออุณหภูมิลดลงจะมีลักษณะแข็งและยึดเกาะมวลรวมไว้ด้วยกัน เมื่อถูกกดทับจะทำให้เกิดปัญหาขึ้น เช่น การเกิดร่องล้อ การแตกของผิวถนน โดย Uddin (2003) ได้ศึกษาถึงปัญหาที่ทำให้ถนนยางมะตอยมีสภาพที่เคี้ยวขึ้นซึ่งปัญหาดังกล่าวทำให้ ถนนมีสภาพที่แย่ง และการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรหรือการเกิดร่องล้อ ซึ่งเป็นปัญหาหนึ่งที่บอกระดับ ความยืดหยุ่นของถนนยางมะตอย (Liscane *et al.*, 2009)

2.9.2 การปรับปรุงคุณภาพยางมะตอยด้วยยาง

การปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยสำหรับงานสร้างผิวทางด้วยยางนั้น นอกจากจะ ช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของถนนยางมะตอย เช่น การเพิ่มสมบัติความยืดหยุ่น การลดการ แตกกร้าว และการเพิ่มอายุการใช้งาน ยังเป็นการเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศได้ อีกทางหนึ่งด้วย จึงได้มีการศึกษาของหลายหลากชนิดมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพยางมะตอย เช่น ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ได้แก่ ยางรถยนต์ที่ใช้งานแล้ว (ชนาพร, 2544; Navarro *et al.*, 2002; Ruan *et al.*, 2003; Chiu and Lu, 2006) น้ำยางดิบธรรมชาติ (อัญชลี, 2545; ชยชันว และคณะ, 2553; Miriam, 2009) น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex, NRL) ในรูปแบบน้ำยางข้น แบ่ง

ออกเป็นน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia NRL) น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia NRL) และน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (Prevulcanized NRL) (ทวิศักดิ์, 2546) ยางธรรมชาติ น้ำหนักโมเลกุล 1,412,000 กรัมต่อโมล, 616,000 กรัมต่อโมล และ 418,000 กรัมต่อโมล (นิวัฒน์, 2552) ยาง SBR (Guian *et al.*, 2001) โคพอลิเมอร์แบบ diblock ของสไตรีนกับบิวทาไดอีน (poly(styrene-b-butadiene)) โคพอลิเมอร์แบบ triblock ของสไตรีนกับบิวทาไดอีน (poly(styrene-b-butadiene-b-styrene)) (Ruan *et al.*, 2003; Wekumbura *et al.*, 2005; Navarro *et al.*, 2002; Vlachovicova *et al.*, 2007) ethylene-vinyl acetate copolymer (Wekumbura *et al.*, 2005) styrene-ethylene-co-butylene-styrene block copolymer (Polacco *et al.*, 2006) นอกจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ก็ได้มีการนำเอาพลาสติกมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพยางมะตอย เช่น LDPE และ PP (Korhonen and Kellomaki, 1996)

การผสมยางมะตอยคอนกรีตกับวัสดุมวลรวมและสารตัวเติม เช่น ยางหรือพลาสติก สามารถที่จะกระทำได้ 2 วิธี คือการผสมแบบเปียกและแบบแห้ง ซึ่งการผสมแบบเปียกจะเป็นการใส่สารตัวเติมหรือสารปรับปรุงคุณภาพผสมกับยางมะตอยคอนกรีตก่อน แล้วจึงผสมกับมวลรวมร้อน และวิธีการผสมแบบแห้งจะเป็นการใส่สารตัวเติมหรือสารปรับปรุงคุณภาพผสมกับมวลรวมร้อนก่อน แล้วจึงผสมกับยางมะตอยคอนกรีต โดย ธนาพร (2544) ได้ศึกษาวิธีการเตรียมยางมะตอย เริ่มจากการผสมแบบเปียก เป็นการใส่ผงยางล้อรถที่ใช้งานแล้วผสมกับยางมะตอยคอนกรีตก่อน แล้วจึงผสมกับวัสดุมวลรวมร้อน และวิธีการผสมแบบแห้งจะเป็นการใส่ผงยางล้อรถที่ใช้งานแล้วผสมกับมวลรวมร้อนก่อน แล้วจึงผสมกับยางมะตอยคอนกรีต ซึ่งการผสมที่นิยมนี้ส่วนใหญ่จะเป็นวิธีการผสมแบบเปียก ซึ่ง อัญชลี (2545) ได้นำเอาน้ำยางดิบธรรมชาติ ผสมลงไป ในยางมะตอยคอนกรีตเกรด 60/70 ต่อมา ทวิศักดิ์ (2546) ได้ศึกษาการปรับปรุงยางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบ ด้วยน้ำยางธรรมชาติ โดยวิธีการผสมแบบเปียกในรูปน้ำยางชั้น แล้วศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อยางมะตอยอิมัลชันคือ ชนิดและปริมาณน้ำยางธรรมชาติซึ่งได้แก่ น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำ และน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ ที่ปริมาณ 3.5-10.0 % DRC (Dry rubber content) ชนิดและปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ได้แก่ แลคติกเคซีน (Lactic casein) โพแทสเซียมโอเลต (Potassium oleate) และวินโซลเรซิน (Vinsol resin) จากนั้นนิวัฒน์ (2552) ได้นำเอายางธรรมชาติมาบดเพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลของยางจนได้ยางที่มีน้ำหนักโมเลกุล 1,412,000 กรัมต่อโมล, 616,000 กรัมต่อโมล และ 418,000 กรัมต่อโมล ไปแช่ในน้ำมันเบนซินก่อน จึงผสมกับยางมะตอยเกรด AC 60/70 แล้วผสมกับทรายและเขม่าดำ การผสมตัวอย่าง ใช้ชุดกวนที่มีความเร็ว 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ Navarro *et al.* (2002) ได้

ศึกษาขางมะตอยที่ปรับปรุงด้วยผงขางรถยนต์บด ใช้ขางมะตอยเกรดเพนิเทรชัน 60/70 ผสมผงขางรถยนต์บดและขางมะตอยผสม SBS

นอกจากนี้การผสมขางธรรมชาติหรือขางพาราในรูปของน้ำขางชั้นเป็นสารผสมเพื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสมของน้ำขางชั้นในการผสมกับขางมะตอยคอนกรีต โดยใช้วัสดุเชื่อมประสาน 3 ชนิด ได้แก่ ขางมะตอยคอนกรีตธรรมดาชนิดเกรด 60/70 วัสดุ Natural Rubber Asphalt (NRA) ที่ได้จากการนำขางมะตอยคอนกรีตธรรมดาชนิดเกรด 60/70 ผสมกับน้ำขางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง และวัสดุ Polymer Modified Asphalt (PMA) จากนั้นนำวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิดไปผสมกับวัสดุมวลรวมประเภทหินปูนเป็นส่วนผสมขางมะตอยคอนกรีต (ชยชันวี และคณะ, 2553) และ Chiu and Lu (2006) ได้นำผงขางรถยนต์ผสมกับขางมะตอยและstone matrix asphalt (SMA)

2.9.3 การศึกษาถึงความเข้ากันได้และการเกาะติดของพอลิเมอร์ในขางมะตอย

ปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การปรับปรุงคุณภาพของขางมะตอยให้ดีขึ้น คือ ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ความสามารถในการเข้ากันได้ยังขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของพอลิเมอร์ที่อยู่ในขางมะตอยว่ามากน้อยเพียงใด จึงได้มีการนำเอาน้ำมันมาเป็นตัวช่วย ซึ่ง Korhonen and Kellomaki (1996) ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ในขางมะตอยและน้ำมัน ภายใต้เงื่อนไขในการผสมที่แตกต่างกัน ซึ่งมีวิธีการผสม 2 แบบ คือการผสมกันโดยตรงระหว่างขางมะตอยกับพอลิเมอร์และอีกวิธีคือ การนำพอลิเมอร์ไปผสมกับน้ำมัน ซึ่งเป็นสารช่วยในการกระจายตัว แล้วจึงผสมกับขางมะตอย โดยพอลิเมอร์ที่ใช้คือ LDPE และ PP พบว่าการนำพอลิเมอร์ที่ผสมกับสารช่วยในการกระจายตัว เป็นวิธีที่ดีกว่าการผสมกันโดยตรงระหว่างขางมะตอยกับพอลิเมอร์

2.9.4 ผลที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพขางมะตอย

ขางมะตอยคอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยผงขางบดจากขางล้อที่ใช้งานแล้วจะมีสมบัติที่ดีกว่าขางมะตอยคอนกรีตธรรมดา (ชนาพร, 2544) และเมื่อใช้น้ำขางดิบธรรมชาติแทนขางล้อ ค่าความต้านทานแรงดึง เพิ่มมากขึ้น แสดงว่าความสามารถในการต้านทานต่อการหลุดลอกและต้านทานต่อแรงดึงได้ดี (อัญชลิ, 2545)

การใช้น้ำขางธรรมชาติสามารถปรับปรุงสมบัติของขางมะตอยอิมัลชันชนิดประจุลบได้ เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมขางธรรมชาติ พบว่าความหนืด เพนิเทรชัน จุดอ่อนตัว และการคืนตัว

เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณยางมากเกินไป (เช่นมากกว่า 10 % DRC) ทำให้สมบัติบางประการ เช่นความเหนียว และความสามารถในการรักษารูปร่างลดลง (ทวิศักดิ์, 2546)

สมบัติของยางธรรมชาติเบลนด์กับยางมะตอยและทราย เขม่าดำ พบว่า ความเค้นมอดูลัส และเวลาของการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้นตามปริมาณของทรายและเขม่าดำ ซึ่งแสดงถึงการมีความแข็งแรงและการต้านการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้น (นิวัฒน์, 2552)

วัสดุ NRA มีสมบัติทางวิศวกรรมดีกว่ายางมะตอยคอนกรีตธรรมดา โดยวัสดุ NRA สามารถช่วยเพิ่มค่าเสถียรภาพ ค่าแรงดึง ค่ามอดูลัสของการคืนตัวที่อุณหภูมิสูง และลดการหลุดลอก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ PMA แล้ว วัสดุ PMA ยังคงแสดงคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุ NRA อย่างไรก็ตาม การใช้ยางธรรมชาติซึ่งเป็นทรัพยากรภายในประเทศเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อใช้ในงานทางก็ยังคงมีความเหมาะสมอยู่ เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถช่วยปรับปรุงให้ผิวทางยางมะตอยคอนกรีตมีความยืดหยุ่นและมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ทำให้อายุการใช้งานนานขึ้น อีกทั้งยังใช้ปริมาณในการผสมยางมะตอยคอนกรีตที่น้อยกว่า ทำให้ช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างและการบำรุงรักษาผิวทางได้ในระยะยาว (ชยธันว์ และคณะ, 2553)

ปริมาณ SBS และปริมาณกำมะถัน มีผลต่อสมบัติเชิงรีโอโลยีของยางมะตอย และช่วยปรับปรุงสมบัติความเป็นอีลาสติกของยางมะตอยเพิ่มขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของการปรับปรุงยางมะตอยโดยการใช้ยาง SBS ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน 3 ค่า พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง SBS มีผลต่อการเข้ากันได้และความสามารถในการรักษาความเสถียรของยาง SBS ผสมยางมะตอย (Guian *et al.*, 2001)

ผลที่ได้จากการศึกษาลักษณะเชิงรีโอโลยีของยางมะตอย ที่ปรับปรุงด้วยผงยางรถยนต์บด โดยผลของการเปรียบเทียบยางมะตอยเกรดเพนิเทรชัน 60/70 ที่ไม่ปรับปรุงคุณสมบัติกับยางมะตอยผสมผงยางรถยนต์บดและยางมะตอยผสม SBS ได้ว่ายางมะตอยที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยยาง แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงลักษณะเชิงวิสโคอีลาสติกและมีความหนืดสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ได้ปรับปรุง จึงทำให้มีความต้านทานของการเปลี่ยนรูปสูงขึ้นและการแตกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำได้ (Navarro *et al.*, 2002)

ยางมะตอยไม่ปรับปรุงคุณภาพเกิดร่องล้อบนถนนมากกว่าเมื่อเทียบกับยางมะตอยที่มีการปรับปรุงด้วยพอลิเมอร์ (Uddin, 2003)

พอลิเมอร์ที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพ ส่งผลให้เกิดมอดูลัสเชิงซ้อนในยางมะตอยเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูง และมอดูลัสเชิงซ้อนของยางมะตอยจะลดลงที่อุณหภูมิต่ำ แสดงให้เห็นช่วงการขยายของการผ่อนคลายและความเหนียวที่ดีขึ้น โดยปฏิกิริยาการบ่มเร่งส่งผลให้ยางมะตอยมีความไวต่ออุณหภูมิลดลง และเป็นการทำลายการเชื่อมกันของโซ่พอลิเมอร์ในยางมะตอย (Ruan *et al.*, 2003)

ยางมะตอยผสมกับพอลิเมอร์ที่มีการเสีรูปน้อยๆ (ช้า) จะประพฤติตัวแบบวิสโคอิลาสติกเชิงเส้น และยางมะตอยผสมกับพอลิเมอร์มีการเสีรูปมาก (เร็ว) ก็จะประพฤติตัวเป็นแบบไม่เชิงเส้น (Wekumbura *et al.*, 2005)

จากการทดสอบ Track wheel แสดงให้เห็นถึงความต้านทานการเกิดร่องล้อของ Asphalt Rubber - stone matrix asphalt (SMA) ที่ดีกว่าการผสม stone matrix asphalt (SMA) กับยางมะตอยแบบธรรมดา (Chiu and Lu, 2006) และยางมะตอยที่ผสมผงยางบดจากยางรถยนต์มีความต้านทานการเกิดร่องล้อค่อนข้างดี ความต้านทานที่เพิ่มขึ้น และการกระจายตัวของหินแบบ gap-graded aggregate gradation กับแบบ dense gap-graded aggregate gradation ผลการทดสอบจากการกระจายตัวของหินทั้งสองแบบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Liseane *et al.*, 2009)

ผลจากลักษณะพื้นฐานวิทยาและรีโอโลยี ของพอลิเมอร์ปรับปรุงยางมะตอย โดยการเพิ่ม styrene-(ethylene-co-butylene)-styrene block copolymer ในยางมะตอย พบว่า การผสมพอลิเมอร์ปริมาณประมาณ 4 % โดยน้ำหนัก กับยางมะตอย แสดงให้เห็นถึงจากการกระจายของพอลิเมอร์ในยางมะตอย ความเข้ากันและการเกาะติดที่ไม่ดี ทั้งพอลิเมอร์และยางมะตอยก็จะแยกเฟสออกจากกัน ถึงแม้ไม่มีวัตถุประสงค์การทำที่อุณหภูมิสูง (Polacco *et al.*, 2006)