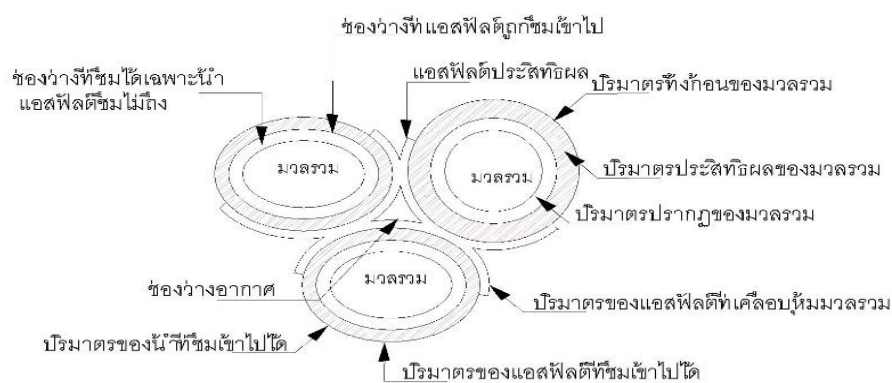


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)

แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) หรือ Hot-Mix Asphalt หมายถึง วัสดุผิวทางที่มีคุณภาพสูง ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวม (Aggregates) ผสมกันขณะร้อนในเครื่องผสม จากนั้นนำไปปูลาดทำเป็นผิวทางของถนนในขณะที่ส่วนผสมยังร้อนอยู่ แล้วบดอัดให้แน่นและเรียบ เป็นถนนลาดยางที่มีคุณภาพดี มีความแข็งแรงปลอดภัย มีเสถียรภาพและทนทานดี สีค่อนข้างดำ สามารถรับปริมาณการจราจรหนาแน่นมากๆ ได้ ทั้งยังเป็นผิวทางชนิดที่มีราคาค่าก่อสร้างต่อหน่วยต่ำกว่าผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นแอสฟัลต์คอนกรีตจึงเป็นที่นิยมใช้ทำผิวทางสำหรับถนนทั่วไป รวมทั้งลานจอดรถและสนามบิน เป็นต้น คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวม ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของส่วนผสมตลอดจนสัดส่วนที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมและกระบวนการผลิตส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีปริมาณสัมพันธ์ระหว่างมวลรวม แอสฟัลต์ และอากาศ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต แอสฟัลต์ที่เคลือบอยู่ที่ผิวของอนุภาคมวลรวมจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานอนุภาคมวลรวมให้เกาะติดกันแน่น เรียกว่า แอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (Effective Asphalt) ที่มีแอสฟัลต์บางส่วนถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของมวลรวม และช่องว่างอากาศ (Air Void) ที่อยู่ระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่มีแอสฟัลต์เคลือบอยู่ ซึ่งปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมนี้จะมีน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของมวลรวมชนิดนั้นได้ประมาณร้อยละ 50 ดังรูปที่ 2.1



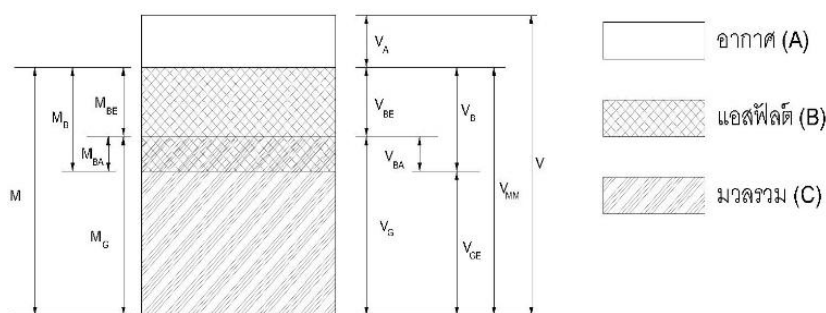
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบทั่วไปของแอสฟัลต์คอนกรีต
(ดัดแปลงจาก วัชรินทร์ วิทยกุล, 2549)

ในการคำนวณหาสัดส่วนของส่วนผสมจึงจำเป็นต้องรวมปริมาณของแอสฟัลต์ ที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของมวลรวมด้วย เพราะว่าปริมาณทั้งหมดในส่วนผสมจะต้อง ทำการชั่งตวงวัดอย่างถูกต้องที่สุด ปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมเข้าไปนี้ สามารถคำนวณได้จากการหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของส่วนผสมแล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากส่วนผสมที่สมมุติว่าไม่มีการดูดซึมแอสฟัลต์เข้าไปในอนุภาคของมวลรวม

2.1.1 ความสัมพันธ์เชิงมวลและปริมาตรของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

ความหมายและสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงความสัมพันธ์เชิงมวล (Mass) และปริมาตร (Volume) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต มีดังต่อไปนี้

M	มวลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ $M_G + M_B$
M_G	มวลของมวลรวม
M_B	มวลของแอสฟัลต์ซึ่งเป็นตัวยึดประสาน (Binder) มีค่าเท่ากับ $M_{BE} + M_{BA}$
M_{BE}	มวลของแอสฟัลต์ประสิทธิผล (Effective Asphalt) ซึ่งเป็นตัวยึดประสานระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Aggregate Particles)
M_{BA}	มวลของแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึม (Absorbed Asphalt) ซึ่งเป็นแอสฟัลต์ส่วนที่ถูกดูดซึมเข้าไปในรูโพรงของมวลรวม (Aggregate Pores) แต่ละอนุภาค
V	ปริมาตรทั้งหมดของส่วนผสมที่ได้รับการบดอัด (Compacted Mix)
V_G	ปริมาตรของมวลรวมซึ่งเป็นปริมาตรทั้งก้อน (Bulk Volume) รวมถึงรูโพรงในอนุภาคของมวลรวมด้วย
V_{BE}	ปริมาตรของแอสฟัลต์ประสิทธิผล
V_{BA}	ปริมาตรของแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึม
V_B	ปริมาตรของแอสฟัลต์มีค่าเท่ากับ $V_{BE} + V_{BA}$
V_A	ปริมาตรของอากาศระหว่างอนุภาคของมวลรวมแต่ละอนุภาคที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์ (Coated Aggregate Particles) ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
V_{GE}	ปริมาตรประสิทธิผล (Effective Volume) ของมวลรวมมีค่าเท่ากับ $V_G - V_{BA}$
V_{MM}	ปริมาตรของส่วนผสมที่ปราศจากช่องว่าง (Voidless Mix) ซึ่งเท่ากับปริมาตรที่ทำให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Mix Volume) ค่าปริมาตรทั้งก้อนของส่วนประกอบมวลรวมของส่วนผสมจะกำหนดด้วยสัญลักษณ์ V_G ในส่วนผสม แทนที่จะใช้ V_B ก็เพื่อป้องกันการสับสนกับสัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับปริมาตรของแอสฟัลต์ที่ใช้ในการยึดประสาน



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์เชิงมวลและปริมาตรในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
(ดัดแปลงมาจาก วัชรินทร์ วิทยกุล, 2549)

2.2 องค์ประกอบที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต

2.2.1 ความแน่น (Density)

ปริมาณมวลของแอสฟัลต์คอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความแน่นมากพอ จะทำให้มีอายุการใช้งานยืนยาวและมีคุณภาพดี อย่างไรก็ตามการบดทับโดยรถบดในสนาม จะให้ความแน่นน้อยกว่าความแน่นที่ออกแบบไว้ซึ่งบดทับด้วยเครื่องมือในห้องทดสอบ ดังนั้น การกำหนดความแน่นต่ำสุดที่บดทับให้ได้ในสนามจะกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแน่นที่ทดสอบได้ในห้องทดสอบ สำหรับกรมทางหลวงกำหนดไว้ว่า ต้องบดทับให้ความแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 ของความแน่นที่ทดสอบได้ในห้องทดสอบ

2.2.2 ช่องว่างอากาศ (Air Voids)

แอสฟัลต์คอนกรีตประกอบด้วย เม็ดวัสดุมวลรวมซึ่งถูกเคลือบด้วยฟิล์มของแอสฟัลต์ ระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์เหล่านี้จะมีช่องว่างเล็ก ๆ เรียกว่าช่องว่างอากาศ ผิวทางแอสฟัลต์ที่บดทับแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องปริมาตรช่องว่างอากาศที่เพียงพอ แต่ไม่มากเกินไปจำนวนหนึ่งทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเปิดการจราจรแล้ว รถที่แล่นบนผิวทางจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแน่นขึ้นจากเดิมทำให้ปริมาณช่องว่างลดลง ถ้าปริมาตรช่องว่างอากาศขณะก่อสร้างเสร็จใหม่มีไม่เพียงพอจะทำให้แอสฟัลต์ทะลักขึ้นมาบนผิวเกิดการเยิ้ม (Bleeding) นอกจากนี้ช่องว่างอากาศยังเป็นที่รองรับแอสฟัลต์ที่ขยายตัวเมื่ออากาศร้อนด้วย สำหรับผิวทางชั้นบนสุดจะออกแบบให้มีปริมาตรช่องว่างอากาศร้อยละ 3 - 5 ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณและน้ำหนักของรถที่แล่นบนผิวทาง ส่วนผิวทางชั้นล่าง ๆ อาจออกแบบให้มีปริมาตรช่องว่างได้มากกว่านี้ เช่น ร้อยละ 4 - 7 เป็นต้น

ปริมาตรช่องว่างอากาศมีผลต่อความคงทน (Durability) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต กล่าวคือปริมาตรช่องว่างอากาศยิ่งน้อยเท่าใด น้ำและอากาศจะซึมผ่านเข้าไปทำลายแอสฟัลต์และการยึดเกาะระหว่างวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์ได้ยากเท่านั้นทำให้ผิวทางมีอายุยืนยาว แต่อย่างไรก็ตามหากปริมาตรช่องว่างอากาศมีน้อยเกินไปแล้วจะทำให้เกิดการเยิ้ม (Bleeding) ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาแล้ว ความแน่นและปริมาตรช่องว่างอากาศมีความสัมพันธ์กันโดยตรง กล่าวคือความแน่นยิ่งมากปริมาตรช่องว่างอากาศจะยิ่งน้อยและเป็นจริงในทางกลับกัน การกำหนดค่าความแน่นต่ำสุดของผิวทางจะต้องคำนึงถึงปริมาตรช่องว่างอากาศด้วย

2.2.3 ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA)

ปริมาตรช่องว่างทั้งหมดที่มีอยู่ระหว่างเม็ดของวัสดุมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดทับแล้ว ซึ่งรวมช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids Filled with Bitumen, VEB) ด้วย โดยที่ VMA คือ ปริมาตรช่องว่างสำหรับปริมาตรของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพซึ่งหมายถึง ปริมาตรแอสฟัลต์ทั้งหมดที่ใส่ลงไปผสมหักด้วยปริมาตรแอสฟัลต์ส่วนที่ถูกดูดซึมเข้าไปในเม็ดวัสดุมวลรวม ปริมาตรช่องว่างที่เหลือจากการแทนที่ของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ คือ ปริมาตรช่องว่างอากาศดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้น หากออกแบบส่วนผสมให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาตรช่องว่างอากาศเท่ากันแล้ว แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่า VMA สูงกว่าจะมีความคงทนต่อการใช้งานนานกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่า VMA ต่ำกว่า อธิบายได้โดยอาศัยหลักความจริงว่า การที่วัสดุมวลรวมมีค่า VMA สูงย่อมหมายถึง มีปริมาตรช่องว่างสำหรับใส่แอสฟัลต์มากทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์ที่ห่อหุ้มผิววัสดุมวลรวมหนาซึ่งทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความคงทนต่ออายุการใช้งานยืนยาว การออกแบบส่วนผสมที่มีค่า VMA น้อยกว่าข้อกำหนด ทำให้ใช้แอสฟัลต์ผสมน้อยซึ่งประหยัดแต่ไม่ควรกระทำเพราะจะทำให้ได้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความคงทนลดลง

2.2.4 ปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt Content)

ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใส่ลงไปผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตมีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นอย่างมาก ดังนั้น ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้จะต้องถูกต้องและแน่นอน ไม่ว่าจะเป็นการผสมในห้องทดสอบหรือที่โรงผสม (Mixing Plant) ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ (Design Criteria) ซึ่งได้แก่ ข้อกำหนดต่าง ๆ เกี่ยวกับคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ต้องการ จะเป็นตัวกำหนดถึงปริมาณแอสฟัลต์ที่ต้องใช้ผสม

ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตจะเป็นเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม ได้แก่ ขนาดคละและคุณสมบัติในการดูดซึมแอสฟัลต์ วัสดุมวลรวมซึ่งมีขนาดคละประกอบด้วยเม็ดขนาดเล็กต้องการแอสฟัลต์สำหรับผสมมากกว่าวัสดุมวลรวมที่ประกอบด้วยเม็ดขนาดใหญ่กว่า เหตุผลก็คือ วัสดุมวลรวมเม็ดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าวัสดุมวลรวมเม็ดใหญ่ (ที่ปริมาตรเท่ากัน) จึงต้องใช้แอสฟัลต์มากกว่าเพื่อเคลือบผิวเม็ดวัสดุมวลรวมและวัสดุมวลรวมที่ดูดซึมแอสฟัลต์มากทำให้ต้องใช้แอสฟัลต์ผสมมากเพื่อชดเชยส่วนที่ถูกดูดซึมเช่นกัน

โดยทั่วไป มวลรวมที่มีรูปร่างและอนุภาคเป็นเม็ดเหลี่ยม ผิวหยาบขรุขระ จะให้ค่าเสถียรภาพสูงมีแรงยึดเกาะมากหากแอสฟัลต์ที่ใช้มีความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่ำ การเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ในส่วนผสมจะทำให้ค่าแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์จนถึงระดับหนึ่งจะทำให้แอสฟัลต์ที่เคลือบอนุภาคของมวลรวมหนาเกินไป เป็นผลให้ความเสียดทานระหว่างอนุภาคของมวลรวมมีค่าลดลง จึงทำให้เสถียรภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตลดลงด้วย ดังนั้น ในการออกแบบส่วนผสมจะต้องออกแบบให้มีค่าเสถียรภาพสูงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักการจราจรได้ อย่างไรก็ตาม ควรคำนึงว่าค่าเสถียรภาพที่สูงมากเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแข็งเกินไปจนขาดความยืดหยุ่น อาจทำให้ผิวทางเกิดความเสียหายได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้แอสฟัลต์คอนกรีตปูลงบนผิวทางเดิมที่มีการแอ่นตัวสูง ปัจจุบันการก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตส่วนใหญ่มักเป็นแบบ Dense Grade Mixture และแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นชนิด AC 60/70 ในสัดส่วนประมาณร้อยละ 3 – 8 โดยน้ำหนักของมวลรวม ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของงาน

2.3 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

ข้อกำหนดสำหรับส่วนผสมของผิวจราจรแบบแอสฟัลต์คอนกรีต จะระบุวิธีการออกแบบส่วนผสมและค่าที่ต้องการในการออกแบบไว้ วิธีการออกส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่นิยมแพร่หลายได้แก่ วิธีมาร์แชล (Marshall Method) วิธีฮวีม (Hveem Method) และวิธีซูเปอร์เพฟ (Superpave Method) เป็นต้น สำหรับกรมทางหลวงนิยมใช้วิธีการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์โดยวิธีมาร์แชล ในงานวิจัยนี้จึงจะกล่าวถึงการออกแบบโดยวิธีมาร์แชลเท่านั้น

แนวคิดพื้นฐานของวิธีมาร์แชลในการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตกำหนดขึ้นโดย บรูซ มาร์แชล (Bruce Marshall) วิศวกรบิทูเมน กรมทางหลวงรัฐมิสซิสซิปปี ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของวิธีการทดสอบแบบอันคอนไฟน์ (Unconfined) ที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย กระทั่งต่อมา The U.S. Corps of Engineers ได้ศึกษาค้นคว้าวิจัยเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงวิธีการ และพัฒนาหลักเกณฑ์การออกแบบส่วนผสม จนกระทั่งการทดสอบได้มาตรฐาน และกำหนดเป็นมาตรฐานการทดสอบ ASTM. D-1559 ซึ่งกรมทางหลวงได้กำหนดเป็นมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท.604/2517

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

รายการ	ชั้นทาง				
	Wearing Course ขนาด 9.5 มม.	Wearing Course ขนาด 12.5 มม.	Binder Course	Base Course	Shoulder
Blows	75	75	75	75	50
Stability N (lb)	8006 (1800)	8006 (1800)	8006 (1800)	7117 (1600)	7117 (1600)
Flown 0.25 mm (0.01 in)	8-16	8-16	8-16	8-16	8-16
Percent Air Voids	3-5	3-5	3-5	3-5	3-5
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) Min	15	14	13	12	14
Stability/Flow Min N/0.25 mm (lb/0.01 in)	712 160	712 160	712 160	645 145	645 145
Percent Strength Index Min	75	75	75	75	75

ที่มา : กรมทางหลวง, (2517)

2.4 วิธีมาร์แชล (Marshall Method)

วิธีมาร์แชลนี้ใช้กับวัสดุผสมลาดยางแบบผสมร้อน ซึ่งประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ และมวลรวมที่มีการจัดขนาดคละให้เหมาะสม มีขนาดโตสุดไม่เกิน 37.5 มิลลิเมตร (1 1/2 นิ้ว) วิธีการนี้ใช้ได้ทั้งการออกแบบในห้องปฏิบัติการทดลองเท่านั้นลักษณะสำคัญของการทดสอบคือการวิเคราะห์ความหนาแน่นกับช่องว่างอากาศ และการทดสอบเสถียรภาพและการไหลของก้อนตัวอย่าง การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต จะต้องเลือกสัดส่วนขนาดคละของมวลรวมชนิดและปริมาณแอสฟัลต์ และเลือกผิวทางที่ใช้ในการออกแบบแล้วจึงเตรียมก้อนตัวอย่างและทำการทดสอบ นำผลที่ได้ไปเขียนกราฟและวิเคราะห์

แอสฟัลต์คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสมของหินย่อยขนาดต่างๆ เช่น Bin 1 หิน 3/8", Bin 2 หิน 1/2", Bin 3 หิน 3/4", Bin 4 หิน 1" ผสมกับยางแอสฟัลต์ซีเมนต์การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือวิธี "มาร์แชล" (Marshall test) ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย U.S. Corps of Engineers โดยประเมินเสถียรภาพ (Stability) การไหล (Flow) ความหนาแน่น (density) ปริมาณอากาศ (air voids) ปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวม (voids In mineral aggregate, VMA) ปริมาณช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยยาง (voids filled with binder or Voids filled with Asphalt cement, VFB or VFA) ตามลำดับ ซึ่งในการประเมินคุณสมบัติเหล่านี้จะกระทำโดยผันแปรปริมาณส่วนผสมของยางหลายๆค่าทั้งนี้เพื่อหาค่าที่เหมาะสม (Optimum) สำหรับเสถียรภาพ ความทนทาน (Durability) ความยืดหยุ่น (Flexibility) ความต้านทานการล้า (Fatigue Resistance) กำลังต้านการแตกร้าว (fracture strength) ความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance) ความทึบน้ำ (Impermeability) และความสามารถในการทำงาน (Workability) เป็นต้น

ลักษณะของการวิบัติของตัวอย่างที่ทดสอบโดยเครื่องมือมาร์แชลค่อนข้างจะซับซ้อนโดยพื้นฐานแล้วอาจจะกล่าวได้ว่าวิธีทดสอบนี้เป็นชนิดหนึ่งของการทดสอบแบบ Unconfined Compression ซึ่งในสภาพความเป็นจริงของผิวจราจรจะถูกกดทับโดยยางรถยนต์หรือน้ำหนักยวดยานพาหนะขึ้นพื้นทางและผิวจราจรรอบข้างดังนั้นการทดสอบโดยวิธีนี้จึงมีความสัมพันธ์กับการเสียรูปของผิวจราจรเพียงระดับหนึ่งเท่านั้นผลทดสอบโดยทั่วไปพบว่าการเพิ่มปริมาณยางจะมีผลทำให้คุณสมบัติในการไหลเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่ค่าเสถียรภาพจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน จนกระทั่งปริมาณยางเพิ่มขึ้นถึงขีดจำกัดระดับหนึ่งเสถียรภาพจะลดลงดังนั้นในการออกแบบส่วนผสมของบางองค์กรเช่น Asphalt Institute จะมีการกำหนดค่าเสถียรภาพต่ำสุดและกำหนดค่าการไหลเป็นช่วงโดยแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น ทำถนนหรือสนามบิน เป็นต้น นอกเหนือจากปริมาณยางที่ใช้ในส่วนผสมแล้วค่าเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตยังขึ้นอยู่กับชนิดของยางชั้นคุณภาพ (Grade) ของมวลรวมรูปร่าง (Shape) ของมวลรวมคุณสมบัติทางธรณีวิทยาของมวลรวม (สำคัญที่สุดคือความพรุน, Porosity) พลังงานในการบดทับและอื่น ๆ

2.5 คุณสมบัติในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

2.5.1 เสถียรภาพ (Stability)

ความสามารถในการรับน้ำหนักการจราจรโดยไม่เกิดร่องล้อ เป็นคลื่น หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ในลักษณะอื่น ๆ และแรงยึดเกาะ (Cohesion) ระหว่างเม็ด

ของวัสดุรวม ความเสียหายเป็นผลมาจากคุณสมบัติของวัสดุรวม ได้แก่ รูปร่างของเม็ดวัสดุ ลักษณะความเรียบ หยาบ หรือขรุขระของผิว ส่วนแรงยึดเกาะเป็นผลมาจากคุณสมบัติของแอสฟัลต์ ว่าสามารถยึดเม็ดวัสดุรวมให้ติดกันได้ดีเพียงใด ผลรวมของความเสียหายและแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวม จะช่วยป้องกันไม่ให้เม็ดวัสดุเกิดการเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันเมื่อมีน้ำหนักกระทำ

โดยปกติแล้ววัสดุรวมที่มีลักษณะเม็ดเป็นเหลี่ยม ผิวหยาบขรุขระ จะให้ค่าเสถียรภาพสูง ส่วนแรงยึดเกาะจะมีมากถ้าแอสฟัลต์ที่ใช้มีความหนืดสูงหรือขณะที่แอสฟัลต์มีอุณหภูมิต่ำ การเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ในส่วนผสมจะทำให้ค่าแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้นแต่เมื่อเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์จนถึงจุดหนึ่ง จะทำให้แอสฟัลต์ที่เคลือบเม็ดวัสดุรวมหนาเกินไปเป็นผลให้ความเสียหายระหว่างเม็ดวัสดุรวมลดลงทำให้ค่าเสถียรภาพลดลงด้วย

ในการออกแบบส่วนผสมจะต้องออกแบบให้ค่าเสถียรภาพสูงพอที่จะรับน้ำหนักการจราจรได้ แต่มีข้อควรคำนึงถึง คือ ค่าเสถียรภาพที่สูงมากเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแข็งเกินไป ขาดความยืดหยุ่น ซึ่งอาจทำให้ผิวทางเสียหายได้ โดยเฉพาะแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปูลงพื้นทางหรือผิวทางเดิมที่มีการแอ่นตัว (Deflection) สูง

2.5.2 ความคงทน (Durability)

ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ ปัจจัยที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตเสื่อมสภาพ อาจเป็นผลมาจากภูมิอากาศ สภาพการจราจรหรือทั้งสองอย่าง ปัจจัยเหล่านี้ทำให้แอสฟัลต์ที่ใช้เสื่อมสภาพเนื่องจากขบวนการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) และออกซิเดชัน (Oxidation) วัสดุรวมเสื่อมสภาพจนเกิดการแตกตัว (Disintegration) และฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบวัสดุรวมหลุดออก (Stripping)

2.5.3 ความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำและอากาศ (Impermeability)

ปริมาตรช่องว่างอากาศเป็นตัวบ่งชี้ถึงความยากง่ายต่อการซึมผ่านของน้ำและอากาศ แต่ที่สำคัญยิ่งกว่าปริมาตรช่องว่างก็คือ ลักษณะของช่องว่าง ได้แก่ ขนาดของช่องว่าง (แต่ละช่อง) ช่องว่างทะลุติดต่อกันหรือไม่ และช่องว่างทะลุถึงผิวนอกของแอสฟัลต์คอนกรีตหรือไม่ ถึงแม้ว่าความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำและอากาศจะเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความคงทน แต่ในความเป็นจริงแล้วแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมดน้ำและอากาศจะสามารถซึมผ่านได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งหากมีค่าไม่เกินเกณฑ์กำหนดแล้วก็ถือว่าใช้ได้

2.5.4 ความง่ายในการปูและการบดอัด (Workability)

ความสามารถในการปูและบดอัด (Workability) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในการทำผิวทางของถนน แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปูและบดอัดยาก อาจแก้ไขให้ปูและบด อัดง่ายขึ้นได้โดยการออกแบบใหม่ หรือเปลี่ยนชนิดของมวลรวม หรือเปลี่ยนขนาดคละของมวลรวม

2.5.5 ความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance)

ความสามารถในการต้านทานการตัดโค้งแบบซ้ำซาก (Repeated Bending) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดจากน้ำหนักล้อกระทำ ปริมาตรช่องว่างอากาศจะเกี่ยวข้องกับปริมาณแอสฟัลต์และความหนืดของแอสฟัลต์มีผลต่อความต้านทานต่อการล้า กล่าวคือ แอสฟัลต์คอนกรีตที่มี

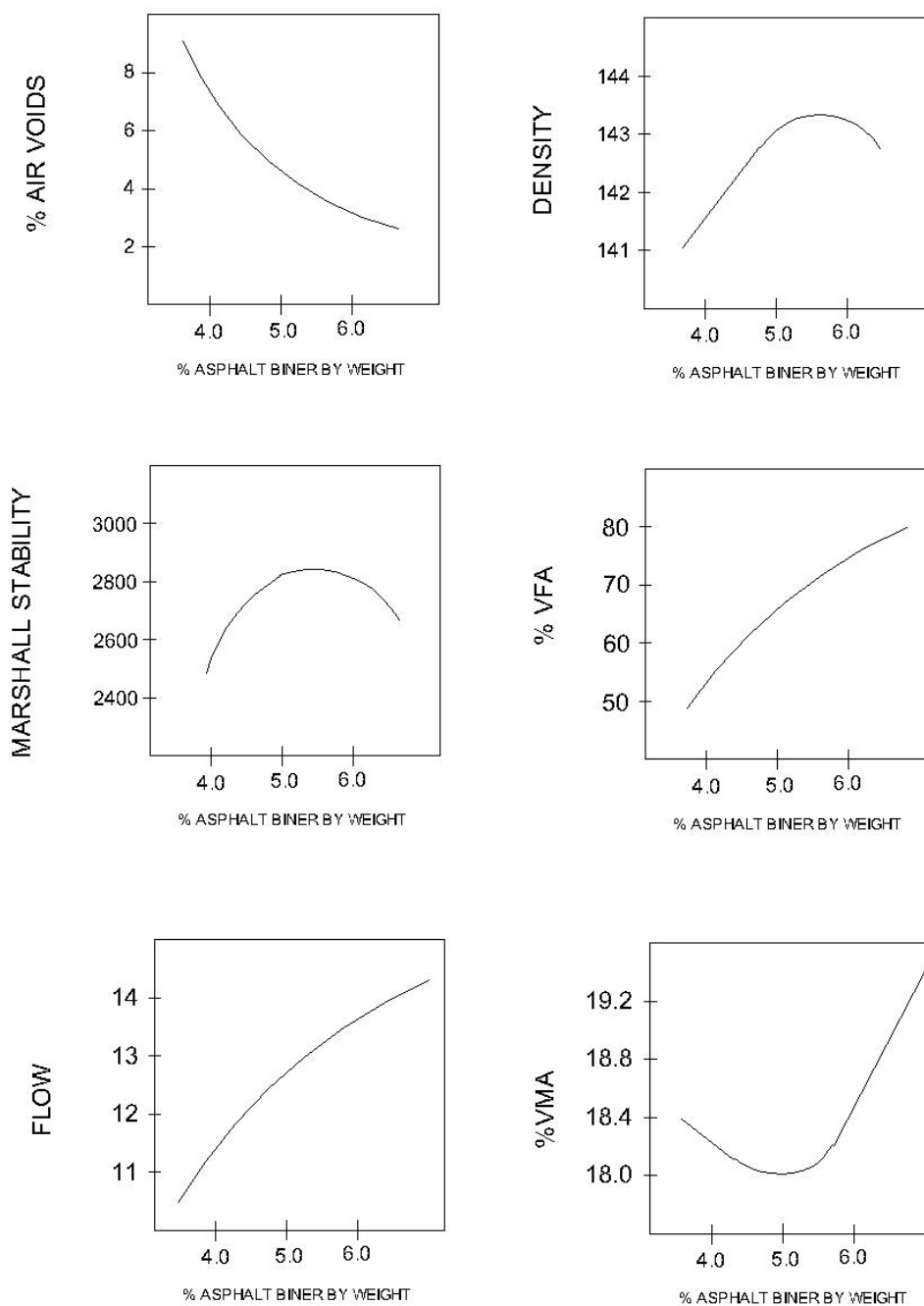
ปริมาตรช่องว่างอากาศมาก ไม่ว่าจะเป็นผลจากการออกแบบหรือจากการบดทับไม่เพียงพอจะทำให้ความต้านทานต่อการล้าลดลง ในทำนองเดียวกันการใช้แอสฟัลต์ที่เสื่อมสภาพและแข็งตัวได้ง่ายจะทำให้ความต้านทานต่อการล้าลดลงเช่นกัน นอกจากนั้นความหนา และความแข็งแรงของชั้นผิวทางตลอดจนความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างที่รองรับผิวทางก็มีผลต่ออายุ และความสามารถรับน้ำหนักของผิวทางโดยไม่เกิดรอยแตก กล่าวคือ ผิวทางที่หนารวมทั้งชั้นโครงสร้างที่รองรับผิวทางแข็งแรง จะทำให้ไม่เกิดการแอ่นตัวมาก จึงมีอายุรับน้ำหนักล้อซึ่งกระทำซ้ำได้นานกว่า

2.5.6 ความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid Resistance)

ความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid Resistance) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของถนนลาดยาง เพราะช่วยป้องกันการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน

โดยสาเหตุที่ทำให้ผิวทางลื่นไถล

- 1) ปริมาณแอสฟัลต์มากเกินไป ทำให้เกิดการเยิ้มทำให้ผิวทางลื่น
- 2) ขนาดคละและลักษณะผิวของวัสดุผสมรวมไม่เหมาะสม ทำให้ผิวทางมีลักษณะเรียบเกินไป น้ำมีโอกาสท่วมเมื่อวัสดุผสมรวมทำให้ลื่น
- 3) เม็ดวัสดุผสมรวมถูกขัดสีให้ลื่นได้ง่าย



รูปที่ 2.3 คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตจากการออกแบบโดยวิธีมาร์แชล
(ที่มา : กรมทางหลวง, 2517)

2.6 วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)

ตาม ทล.ม.408/2532 ระบุว่า วัสดุที่จะนำมาใช้ทำแอสฟัลต์คอนกรีต ประกอบด้วย วัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์

2.6.1 วัสดุมวลรวม

ประกอบด้วย วัสดุมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) วัสดุมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) กรณีที่มวลละเอียดที่มีส่วนละเอียดไม่เพียงพอหรือต้องการปรับปรุงคุณภาพ รวมถึงความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีต อาจต้องเพิ่มวัสดุประสมแทรก (Mineral Filler) ด้วยก็ได้ ขนาดคละ (Gradation) ของมวลรวมให้เป็นไปตาม ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้

ขนาดที่ใช้เรียก มิลลิเมตร (นิ้ว)	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25.0 (1)
สำหรับชั้นทาง	Wearing Course	Wearing Course	Binder Course	Base Course
ความหนา มิลลิเมตร	25-35	40-70	40-80	70-100
ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร (นิ้ว)	ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล			
37.5 (1 1/2)				100
25.0 (1)			100	90-100
19.0 (3/4)		100	90-100	-
12.5 (1/2)	100	80-100	-	56-80
4.75 (เบอร์ 4)	90-100	-	56-80	-
2.36 (เบอร์ 8)	55-85	44-74	35-65	29-59
1.18 (เบอร์ 16)	-	-	-	-
0.600 (เบอร์ 30)	-	-	-	-
0.300 (เบอร์ 50)	7-23	5-21	5-19	5-17
0.150 (เบอร์ 100)	-	-	-	-
0.075 (เบอร์ 200)	2-10	2-10	2-8	1-7
ปริมาณแอสฟัลต์ ร้อยละโดยมวลของมวลรวม	4.0-8.0	3.0-7.0	3.0-6.5	3.0-6.0

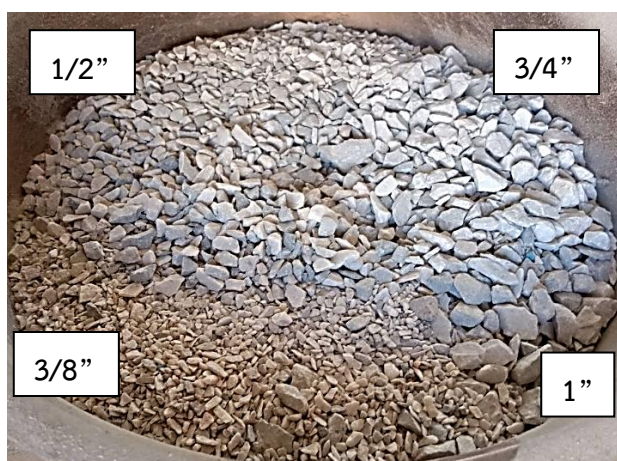
ที่มา : กรมทางหลวง, (2532)

2.6.1.1 วัสดุมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

วัสดุมวลรวมที่มีค้ำบนตะแกรงร่อนเบอร์ 4 ซึ่งมีวัสดุมวลรวมละเอียดปนอยู่บ้าง ปกติวัสดุมวลรวมหยาบจะใช้หินไม่ตั้งแต่ 2 ขนาดขึ้นไปผสมกัน เช่น ใช้หินขนาดโตสุด 19.0 มิลลิเมตร ผสมกับหินขนาดโตสุด 9.5 มิลลิเมตร เป็นต้น หินแต่ละขนาดที่ใช้จะมีลักษณะค่อนข้าง

เป็นขนาดเดียว (Single Size) ทั้งนี้เพื่อลดการแยกตัว (Segregation) ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง วัสดุมวลรวมหยาบจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) สะอาดปราศจากสิ่งสกปรก ดินเหนียว ตะกอนหรืออินทรีย์วัตถุ ผสมหรือปนและจะต้องไม่มีปฏิกิริยากับแอสฟัลต์ซึ่งทำให้คุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตเสื่อมสภาพ
- 2) เมื่อทดสอบหาการสึกหรอของวัสดุมวลรวมหยาบโดยใช้เครื่อง Los Angeles (Abrasion of Coarse Aggregate by Los Angeles Machine) เมื่อทดสอบตามวิธี ASTM C 131 และ C 535 การสึกหรอ ต้องไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์
- 3) เมื่อทดสอบความคงทนของวัสดุมวลรวมโดยใช้โซเดียมซัลเฟตหรือแมกนีเซียมซัลเฟต (Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate) เมื่อทดสอบตามวิธี ASTM C 88 ทล.-ท 213/2531 ส่วนที่ไม่คงทน (Loss) ต้องไม่เกิน 9 เปอร์เซ็นต์
- 4) เมื่อทดสอบการเคลือบและการหลุดออกของวัสดุผสมแอสฟัลต์ (Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixtures ตามวิธี AASHTO T 182-84 ผิวของวัสดุมวลรวมหยาบต้องมีแอสฟัลต์เคลือบไม่น้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์
- 5) เมื่อทดสอบดัชนีความแบน (Flakiness Index) และดัชนีความยาว (Elongation Index) เมื่อทดสอบตามวิธี BS 812 ไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์
- 6) ผิวต้องถูกไม่แตกอย่างน้อยหนึ่งหน้า ไม่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.4 วัสดุมวลรวมหยาบ

2.6.1.2 วัสดุมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

วัสดุมวลรวมที่มีลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) ต้องเป็นหินฝุ่นหรือทราย
- 2) สะอาดปราศจากสิ่งสกปรก ดินเหนียว ตะกอนหรืออินทรีย์วัตถุผสมที่ปะปนอยู่และจะต้องไม่มีปฏิกิริยากับแอสฟัลต์ ซึ่งทำให้คุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตเสื่อมสภาพ

3) เมื่อทดสอบค่ามวลผสมเทียบเป็นทราย (Sand Equivalent) เมื่อทดสอบตามวิธี ASTM D 2419-74 มากกว่า 50 เปอร์เซนต์ โดยปกติถ้าไม่จำเป็นไม่ควรใช้ทราย จะใช้เมื่อจำเป็น เช่น ต้องการปรับปรุงขนาดผลของวัสดุมวลรวมหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดของวัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้ผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (ASHTO M29)

ขนาดตะแกรง	ปริมาณร้อยละที่มีขนาดละเอียดกว่าตะแกรงโดยน้ำหนัก			
	เกรดเบอร์ 1	เกรดเบอร์ 2	เกรดเบอร์ 3	เกรดเบอร์ 4
3/4 นิ้ว (9.5 mm)	100	-	-	100
เบอร์ 4 (4.75 mm)	95 - 100	100	100	80 - 100
เบอร์ 8 (2.36 mm)	70 - 100	75 - 100	85 - 100	65 - 100
เบอร์ 16 (1.18 mm)	40 - 80	50 - 74	85 - 100	40 - 80
เบอร์ 30 (600 μ m)	20 - 65	28 - 52	65 - 90	20 - 65
เบอร์ 50 (300 μ m)	7 - 40	8 - 30	30 - 60	7 - 40
เบอร์ 100 (150 μ m)	2 - 20	0 - 12	5 - 25	2 - 20
เบอร์ 200 (75 μ m)	0 - 10	0 - 5	0 - 5	0 - 10



รูปที่ 2.5 วัสดุมวลรวมละเอียด

2.6.2 วัสดุผสมแทรก (Mineral Filler)

วัสดุมวลรวมที่มีความละเอียดสำหรับใช้ผสมกับวัสดุมวลรวมละเอียดเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะ ในกรณีเมื่อผสมวัสดุมวลรวมหยาบและวัสดุมวลรวมละเอียดเป็นวัสดุมวลรวมละเอียดแล้ว ส่วนละเอียดมีไม่เพียงพอตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงวัสดุผสมแทรก ได้แก่ ฝุ่นหิน (Stone

Dust) ปูนซีเมนต์ (Portland Cement) ปูนขาว (Hydrate Lime) ด้านทานการหลุดออก (Anti-Stripping) ของฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบหิน ปูนซีเมนต์ซิลิกา (Silica Cement) หรือวัสดุพวก Non-Plastic ซึ่งกรมทางหลวงเห็นชอบให้ใช้ได้และจะต้องแห้งไม่จับกันเป็นก้อน เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่าง ต้องมีขนาดคละดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.4 ขนาดคละของวัสดุผสมแตรก

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ปริมาณผ่านตะแกรง (ร้อยละโดยมวล)
0.600 (เบอร์ 30)	100
0.300 (เบอร์ 50)	75 - 100
0.75 (เบอร์ 200)	55 - 100

2.6.3 แอสฟัลต์ (Asphalt)

แอสฟัลต์ (Asphalt) หรือ ยางมะตอย ตามที่ ASTM (American Society for Testing and Material) ให้คำจำกัดความว่า เป็นวัสดุสีน้ำตาลหรือสีดำ เหนียวเชื่อมยึดติดผิวได้ มีสภาพเป็นของแข็ง (Solid) กึ่งแข็ง (Semi Solid) หรือเหลว (Liquid) ได้ มีส่วนประกอบสำคัญคือ บิทูเมน (Bitumen) เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ (Native Asphalt) หรืออาจได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม (Petroleum Asphaltic Material) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทหนัก ตกค้าง โดยแอสฟัลต์ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท

2.6.3.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement, AC)

เป็นแอสฟัลต์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม (Petroleum Asphaltic Material) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทหนักตกค้าง โดยแบ่งเกรดตามมาตรฐานความข้นเหลวโดยการทดสอบหาค่า เพนิเทรชั่น

2.6.3.2 คัทแบคแอสฟัลต์ (Cutback Asphalt)

เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับสารละลาย ทำให้อ่อนตัวลง โดยสามารถแบ่งตามชนิดของตัวทำละลาย

- 1) ชนิดระเหยไว (Rapid curing) RC เกิดจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับน้ำมันประเภทระเหยเร็ว เช่น แก๊สโซลีน เป็นต้น
- 2) ชนิดระเหยปานกลาง (Medium curing) MC เกิดจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับน้ำมันประเภทระเหยปานกลาง เช่น เพโตรซินหรือน้ำมันก๊าด เป็นต้น
- 3) ชนิดระเหยช้า (Slow curing) SC เกิดจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับน้ำมันประเภทระเหยช้า เช่น น้ำมันดีเซล เป็นต้น

2.6.3.3 แอสฟัลต์อิมัลชัน (Asphalt Emulsion)

เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมน้ำโดยใช้สารอิมัลซิไฟเออร์ผสมเพิ่มทำให้แอสฟัลต์เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กและมีเยื่อบางๆห่อหุ้มไม่ให้แอสฟัลต์เกิดการรวมตัวกัน โดยมีสถานะเป็นของเหลว ทั้งนี้แอสฟัลต์อิมัลชันจะสามารถแบ่งตามชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ

- 1) แอนไอออนิกอิมัลชัน Anlonic Emulsion (ประจุไฟฟ้าเป็นลบ) สามารถแบ่งย่อยได้เป็นชนิดก่ตัวเร็ว (Rapid Setting) RS, ชนิดก่ตัวปานกลาง (Medium Setting) MS, ชนิดก่ตัวช้า (Slow Setting) SS
- 2) แคทไอออนิกอิมัลชัน Catlonic Emulsion (ประจุไฟฟ้าเป็นบวก) สามารถแบ่งย่อยได้เป็นชนิดก่ตัวเร็ว (Rapid Setting) CRS, ชนิดก่ตัวปานกลาง (Medium Setting) CMS, ชนิดก่ตัวช้า (Slow Setting) CSS

2.6.4 วัสดุอื่น ๆ

อาจใช้วัสดุอื่น ๆ นอกจากวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามที่กล่าวมาแล้วด้วยก็ได้ วัสดุเหล่านี้ เช่น สารผสมเพิ่มแอสฟัลต์ (Asphalt Additive) ชนิดต่าง ๆ ใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตให้มีลักษณะเด่นเฉพาะอย่าง เช่น สามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าปกติ เป็นต้น

2.7 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม

2.7.1 ค่าเทียบเท่าทราย (Sand Equivalent)

ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.203/2515 วิธีการทดสอบหาค่าเทียบเท่าทรายวัสดุมวลรวมที่ใช้ทำผิวจราจรจะต้องสะอาด ปราศจากฝุ่นหรือวัสดุแปลกปลอม มีได้ในจำนวนที่จำกัด วัสดุที่ไม่พึงปรารถนามีจำพวกวัชพืช เม็ดวัสดุอ่อน จำนวนที่เคลือบเม็ดวัสดุมวลรวม เป็นการดูความสะอาดหรือความสกปรก อาจพิจารณาได้ด้วยตาเปล่าโดยการล้างน้ำแล้วจึงร่อนผ่านตะแกรง การทดสอบที่ได้ผลอีกแบบหนึ่ง คือ Sand Equatent Test เป็นการหาปริมาณฝุ่นหรือดินที่ผสมอยู่ในวัสดุมวลรวม ตัวอย่างการทดสอบมีดังนี้ ใส่วัสดุตัวอย่างลงในหลอดแก้วที่มีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride) กลีเซอริน (Glycerin) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ผสมกับน้ำกลั่นเขย่าตัวอย่างและสารละลายให้เข้ากันตามวิธีที่กำหนดปล่อยสารละลายจากขวดบรรจุสารละลาย ผ่านทางสายยางลงสู่กระบอกตวงโดยมีความดันช่วย เพื่อชะล้างและดันตะกอนให้แยกออกจากตัวอย่างและลอยขึ้นมาเหนือวัสดุเม็ด วางกระบอกตวงไม่ให้มีการรบกวน 20 นาที ในขณะที่รอเวลาสารแขวนลอย จำพวกดินโคลนจะลอยตัวแยกเป็นชั้นอยู่ข้างบน อ่านค่าระดับชั้นบนสุด (h.) ใช้ชาถ่วง (Weighted Fool) ทำด้วยโลหะ หย่อนลงในกระบอกตวงจนกระทั่งปลายของชาถ่วงวางอยู่บนชั้นทรายสะอาดที่แยกตัวอยู่ข้างล่างชั้นวัสดุดินเหนียวนั้นอ่านค่าระดับที่ปลายล่างสุดของชาถ่วง (h.) ค่า Sand Equivalent คือ อัตราส่วนของความสูงของทราย (h.) ต่อความสูงจุดบนสุดของสารแขวนลอย (h.) คูณด้วย 100

2.7.2 ความสึกหรอ (Abrasion)

ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.202/2515 วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของ Coarse Aggregate โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion วัสดุมวลรวมที่ใช้ทำผิวจราจรจะถูกขัดสีจาก

กระบวนการผลิต ขณะที่ยังสถานที่ผ่านกระบวนการบดทับ เมื่อถนนได้เปิดใช้งานแล้วได้รับการขัดสีจากล้อรถ ดังนั้น วัสดุมวลรวมจะต้องมีความทนทานต่อการขัดสีได้และวัสดุมวลรวมที่สัมผัสกับล้อรถโดยตรงทนทานสูงกว่าส่วนที่ไม่ได้สัมผัสกับล้อรถโดยตรง การทดสอบความคงทนทดสอบโดยใช้เครื่อง Los Angeles การทดสอบมีดังนี้

- 1) ใส่วัสดุมวลรวมที่ได้มีการจัดขนาดละเอียดตามข้อกำหนดลงในดรัม (Drum)
- 2) ใส่ลูกเหล็กมาตรฐานตามจำนวนที่กำหนดลงในดรัม
- 3) หมุนเครื่องด้วยความเร็วในอัตราที่กำหนดจำนวน 500 รอบ หลังจากนั้นนำวัสดุออกมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 12
- 4) เปอร์เซ็นต์ที่ฝุ่นเล็ก ๆ ผ่านตะแกรงไปเป็นเปอร์เซ็นต์การสึกหรอของวัสดุมวลรวมถ้าเปอร์เซ็นต์การสึกหรอน้อยกว่าหรือมีค่าตามที่กำหนดไว้แสดงว่า วัสดุมวลรวมมีความคงทนเหมาะที่จะนำมาก่อสร้างผิวจราจรสวนที่สัมผัสกับล้อรถ

2.7.3 ขนาดละเอียดของมวลรวม (Gradation)

ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล. ม.205/2517 วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง ซึ่งมวลของตะแกรงเปล่าจากตะแกรงขนาดใหญ่ไปยังตะแกรงขนาดเล็กพร้อมถาด บันทึกมวลของตะแกรงและถาดประกอบชุดทดสอบด้านล่างด้วยถาดและเรียงลำดับของตะแกรงขนาดละเอียดไปหาขนาดหยาบ เทตัวอย่างลงในตะแกรงบนสุดปิดฝาด้านบนเทตัวอย่างลงในตะแกรงบนสุดนำตัวอย่างไปเขย่าในตะแกรงขนาดต่าง ๆ ตามต้องการ การเขย่านี้ต้องให้ตะแกรงเคลื่อนที่ทั้งแนวราบและแนวตั้งทั้งมีแรงกระแทกขณะเขย่าด้วย เขย่านานจนกระทั่งตัวอย่างผ่านตะแกรงแต่ละขนาดใน 1 นาที ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างในตะแกรงนั้น หรือใช้เวลาเขย่านานทั้งหมดประมาณ 15 นาทีเมื่อเขย่าเสร็จแล้วตัวอย่างก้อนใหญ่กว่าตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ต้องมีตัวอย่างค้างตะแกรงแต่ละขนาดไม่เกิน 6 กรัมต่อ 1,000 ตารางมิลลิเมตร หรือไม่เกิน 200 กรัม สำหรับตะแกรงเส้นผ่านศูนย์กลาง 203 มิลลิเมตร (8 นิ้ว) ถ้าตัวอย่างค้างตะแกรงเกินกว่าที่กำหนดให้แบ่งตัวอย่างทดสอบสองครั้ง หรือเพิ่มตะแกรงขนาดใหญ่กว่าตะแกรงที่ค้างเกินเข้าไปอีกขนาดหนึ่ง นำตัวอย่างที่ค้างตะแกรงแต่ละขนาดไปชั่งซึ่งได้มวลของตะแกรงกับตัวอย่างที่ค้างตะแกรงนำไปหักออกกับมวลของตะแกรงเปล่าขนาดนั้น ๆ จะได้มวลที่ค้างตะแกรงนั้น

2.7.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (absorption) ของมวลรวมหยาบ

ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.207/2517 วิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ

2.7.5 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (absorption) ของมวลรวมละเอียด

ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.209/2518 วิธีการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดละเอียด

2.7.6 ค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index)

ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.210/2518 วิธีการทดสอบหาค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) นำตัวอย่างที่ค้างบนแต่ละตะแกรงที่ได้เตรียมตัวอย่างไว้แล้วมาทดสอบลอดผ่าน

ช่องวัดความหนา โดยใช้ส่วนที่แบนที่สุดลอดผ่านตรงช่องที่มีตัวเลขเท่ากับตะแกรงที่ค้ำนั้นทีละก้อน ให้ทำทุก ๆ ขนาดของวัสดุ นำส่วนที่ค้ำและส่วนที่ผ่านช่องวัดความหนาของวัสดุแต่ละขนาดไปชั่ง แล้วบันทึกไว้

2.7.7 ค่าดัชนีความยาว (Elongation Index)

ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.211/2518 วิธีการทดลองหาค่าดัชนีความยาว (Elongation Index) นำตัวอย่างที่ค้ำบนแต่ละตะแกรงที่ได้เตรียมตัวอย่างไว้แล้วมาทดสอบลอดผ่านช่องวัดความยาว โดยใช้ส่วนที่ยาวที่สุดลอดผ่านตรงช่องที่มีตัวเลขเท่ากับตะแกรงที่ค้ำนั้นทีละก้อน ให้ทำทุก ๆ ขนาดของวัสดุ นำส่วนที่ค้ำและส่วนที่ผ่านช่องวัดความยาวของวัสดุแต่ละขนาดไปชั่ง แล้วบันทึกไว้

2.7.8 ความคงทนต่อการกัดกร่อน (Soundness)

ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท.213/2531 วิธีการทดลองหาค่าความคงทน (Soundness) ของมวลรวม โดยการใช้โซเดียมซัลเฟต หรือแมกนีเซียมซัลเฟต มวลรวมสำหรับทำผิวจราจร จะต้องมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอากาศหรือสารเคมีไม่แตกหักออกจากกัน วัสดุมวลรวมที่ไม่ทนทานต่อสภาพอากาศ Shale เป็นต้น การทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศโดยใช้โซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulphate) หรือแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulphate) มีการทดสอบดังนี้ ร่อนวัสดุมวลรวมตัวอย่างตามตะแกรงมาตรฐานที่กำหนดไว้ แล้วแบ่งวัสดุมวลรวมส่วนที่ผ่านตะแกรงต่าง ๆ แยกใส่ภาชนะแต่ละส่วนภาชนะใส่ตัวอย่างแต่ละส่วนนั้นลงในโซเดียมซัลเฟตหรือแมกนีเซียมซัลเฟตภาชนะจะต้องออกแบบให้สารละลายไหลเข้าออกได้สะดวกและตัวอย่างวัสดุมวลรวมต้องหลุดออกจากภาชนะได้นำวัสดุมวลรวมขึ้นมาอบแห้งตามเวลาและอุณหภูมิที่กำหนด ภายหลังการอบแห้งแล้วให้นำวัสดุมวลรวมไปจุ่มลงในสารละลายอีก ทำเช่นเดิมหลาย ๆ รอบจนครบจำนวนรอบที่กำหนด แล้วหาเปอร์เซ็นต์การละลายหายไปของวัสดุมวลรวมแต่ละขนาด โดยการร่อนผ่านตะแกรงที่กำหนดให้หาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของวัสดุมวลรวมแต่ละขนาด โดยเทียบมวลก่อนการทดสอบค่าผลรวมของการสูญเสียมวลของวัสดุมวลรวมแต่ละขนาด จะเป็นค่าการสูญเสีย N วัสดุมวลรวมตัวอย่างทั้งหมด

2.8 การทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์

2.8.1 การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของบิทูมินัส (Penetration)

มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความแข็งของบิทูมินัส โดยจะใช้เข็มมาตรฐานกดอย่างอิสระเป็นเวลา 5 วินาที บนผิวของตัวอย่าง 3 ครั้ง แต่ละครั้ง จะห่างจากขอบไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งหากค่า Penetration สูงจะแสดงว่าตัวอย่างมีความแข็งน้อย ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ทล.-ท. 403/2518 วิธีการทดลองหาค่า Penetration ของวัสดุแอสฟัลต์ (เทียบเท่า AASHTO T54eT. 46)

2.8.2 การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุบิทูมินัส มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหา จุดอ่อนตัวของบิทูมินัสที่ อุณหภูมิ 30°C โดยจะใช้เครื่องมือทดสอบ Ring-and-Ball และปรับ อุณหภูมิสูงขึ้นในอัตรา 5°C ต่อนาที ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ASTM D36/D36M14e1 Standard Test Method for Softening Point of Bitumen

2.8.3 ทดสอบความหนืด (Viscosity)

โดยการทดสอบนี้จะใช้วิธี Brook fields ในการทดสอบและใช้เครื่องมือ Rotational Viscometer ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบที่ ASTM D4402 Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer

2.8.4 การทดสอบความสามารถในการยืดตัว (Ductility)

มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความ เหนียวของบิทูเมน ในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 5°C 13°C และ 25°C ตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 405/2519 วิธีการทดลองหาค่า Ductility ของวัสดุแอสฟัลต์ (เทียบเท่า AASHTO T.-51)

2.8.5 การทดสอบหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดึง (Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilometer)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาความยืดหยุ่นแอสฟัลต์โดยวัดระยะคืนตัวกลับ หลังจากตัวอย่างแอสฟัลต์ถูกดึงจนขาด ตัวอย่างจะถูกดึงที่อุณหภูมิ 25°C+0.50°C ความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อนาที ตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 415/2548 วิธีการทดลองหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดึง (Elastic Recovery of Bituminous Materials by Ductilometer)

2.9 พลาสติก (Plastics)

พลาสติก คือ สารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และธาตุอื่นๆ เป็นส่วนประกอบย่อย ถือว่าเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวัน ของมนุษย์ในปัจจุบันเป็นอย่างมาก พลาสติก (Plastic) เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่ผลิตจากวัสดุพลาสติกหรือพอลิเมอร์ (Polymers) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างที่มีเชื่อมโยงกันเป็นรูปต่างๆ ซึ่งมีความหลากหลายและมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามประเภทของพลาสติกนั้น ๆ พลาสติกมักนิยมใช้ในชีวิตประจำวันและในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจากมีความสะดวกสบาย มีราคาถูก มีน้ำหนักเบา และมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ แต่ในขณะเดียวกันก็เกิดปัญหาต่าง ๆ เช่น ปัญหาขยะพลาสติกที่สะสมขึ้นมากในสิ่งแวดล้อมซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อธรรมชาติและสุขภาพมนุษย์ได้ พลาสติก สามารถแยกได้ 6 ชนิด ดังนี้

2.9.1 โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET)

โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติเป็นพลาสติกแข็งไปจนถึงแข็ง โดยการปรับความหนาแน่นน้ำหนักเบา, มีความเหนียวและทนทาน มีการยืดหยุ่น ต่อแรง กระแทกและไม่แตกเมื่อถูกแรงกดดันแต่มีข้อเสียคือฝุ่น และสิ่งสกปรกเกาะติดได้ง่าย

2.9.2 โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)

โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงคือ เป็นพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) ที่มีค่าความหนาแน่นสูง มีโครงสร้างทางเคมีที่เป็นกิ่งสาขา (Branching) น้อย จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง มีความแข็งแรง เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้น จะทำให้มีความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้ผิวแตกกรันได้ง่าย ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนสารเคมีได้ดี

2.9.3 โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC)

โพลีไวนิลคลอไรด์เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ และสลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนหรือเมื่ออยู่ภายใต้แสงแดดเป็นเวลานาน จึงมีการเติมสารเติมแต่งเพื่อให้คุณสมบัติตามที่ใช้ต้องการ ทำให้พลาสติกชนิดนี้กลายเป็นพลาสติกที่มีความแข็งแรง ทนร้อน ทนไฟ และมีความคงทน

2.9.4 โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)

โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นพลาสติกที่ผลิตโดยใช้แรงดันสูง มีความเหนียวและยืดหยุ่นทนต่อการกรอแตก มีความนิ่ม แต่ไม่ใส ทนต่อสารเคมีได้ดีทนอุณหภูมิ ได้สูงถึง 95 องศาเซลเซียส ในช่วงสั้น ๆ ได้

2.9.5 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

โพลีโพรพิลีนเป็นพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็ง ความเปราะและ แตกหักง่ายน้อยกว่า HDPE, ทนต่อแรงกระแทกรอยขีดข่วน ไม่เสีรูปง่าย ทนความร้อนสูง

2.9.6 โพลีสไตรีน (Polystyrene, PS)

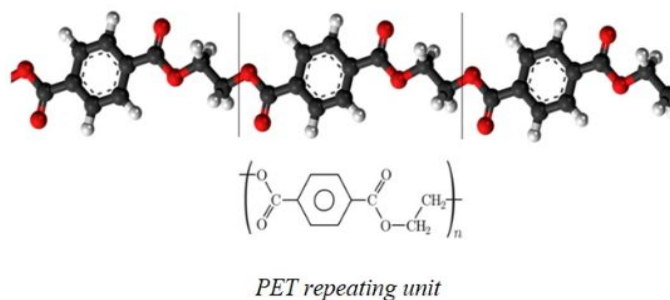
โพลีสไตรีนเป็นพลาสติกชนิดแข็ง มีความคงรูปแข็งแต่เปราะ สามารถทาสีต่าง ๆ ได้ และไม่มีรอยยืดหยุ่น ไม่สามารถรับน้ำหนักได้มากเพราะเปราะ

ตารางที่ 2.5 ความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิด

ชนิดของพลาสติก	จุดหลอมเหลว(°C)
โพลีโพรพิลีน (PE), HDPE	120 - 130
โพลีโพรพิลีน (PE), LDPE	100 - 110
โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC)	75 - 100
โพลีสไตรีน (PS)	180 - 240
โพลีโพรพิลีน (PP)	130 - 171
โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)	250 - 260

2.10 วัสดุโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต PET

โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate) เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะขวดน้ำดื่มและขวดน้ำอัดลม ด้วยคุณสมบัติเฉพาะตัวที่มีความแข็งแรง ทนทาน น้ำหนักเบา และใส จึงสามารถตอบสนองต่อความต้องการของอุตสาหกรรมสมัยใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ PET ยังสามารถนำมารีไซเคิลได้ง่าย และมีแนวโน้มในการนำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยเฉพาะในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา เช่น การปรับปรุงสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งกำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน



รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุล (Poly Ethylene Terephthalate, PET)
(ที่มา <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-plastic>)

2.10.1 คุณสมบัติของ PET

โพลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นพอลิเมอร์ชนิดกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแข็งแรงและมีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 250 °C (Modarres & Hamed, 2014) ลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปจะใส แข็งแรง ทนต่อแรงดึง มีความเหนียวในระดับที่เหมาะสม และไม่ดูดซึมน้ำ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนจากสารเคมีหลายชนิด เช่น กรดอินทรีย์อ่อน น้ำมัน และแอลกอฮอล์ PET ยังแสดงคุณสมบัติทางกลที่ดี ได้แก่ ความต้านแรงดึง (Tensile Strength) สูงถึงประมาณ 50–75 MPa และโมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ประมาณ 2,000–2,800 MPa ซึ่งทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องรับภาระน้ำหนักและแรงกระแทก (Jin et al., 2020) การใช้ PET อย่างแพร่หลายมักพบในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เช่น ขวดพลาสติกใส กล่องใส่อาหาร พลาสติก รวมถึงในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (เส้นใยโพลีเอสเตอร์) และอุตสาหกรรมรถยนต์ เช่น ฉนวนกันความร้อนหรือฉนวนกันเสียง จากคุณสมบัติที่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย PET จึงเป็นหนึ่งในพลาสติกที่ถูกรีไซเคิลมากที่สุดในโลก โดยเฉพาะในรูปของขวดน้ำดื่ม ซึ่งมีรหัสรีไซเคิล คือ #1

2.10.2 การประยุกต์ใช้ PET ในแอสฟัลต์คอนกรีต

การนำพลาสติก PET ที่ผ่านการรีไซเคิลมาใช้งานแอสฟัลต์คอนกรีตได้รับความสนใจจากนักวิจัยและวิศวกรมากขึ้นในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงกลของวัสดุผิวทาง และลดปริมาณขยะพลาสติก ที่กำจัดอย่างไม่เหมาะสม PET สามารถทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรงในแอสฟัลต์คอนกรีตได้ทั้งในรูปแบบผสมแห้ง (Dry Process) และแบบผสมเปียก (Wet Process) Sharma et al. (2017) รายงานว่าการเติม PET ที่อัตราส่วน 5–10 % โดยน้ำหนักของยางแอสฟัลต์ สามารถเพิ่มความต้านทานต่อการเสียดสี (rutting resistance) และแรงล้า (Fatigue Resistance) ได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม Modarres และ Hamed (2014) ชี้ให้เห็นว่าการกระจายตัวของ PET ในเนื้อยางอาจเป็นปัญหาในกระบวนการผสม โดยเฉพาะเมื่อใช้ PET ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) หรือมีขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ พลาสติก PET เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการนำกลับมาใช้งานทางวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะในการ

เพิ่มสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีต จากคุณสมบัติเชิงกลที่ดี และความสามารถในการต้านทานการเสียดสี การนำขยะ PET มาใช้ยังตอบโจทย์แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และการก่อสร้างอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตาม ความท้าทายยังคงอยู่ที่การควบคุมขนาด อัตราส่วน และการกระจายตัวของ PET ภายในส่วนผสม ซึ่งเป็นจุดที่งานวิจัยในอนาคตควรให้ความสำคัญมากขึ้น จึงนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

2.11 การประเมินสภาพความเสียหายประเภทต่าง ๆ ของถนนลาดยาง

การประเมินสภาพความเสียหายของถนนลาดยาง (Flexible Pavement Distress Evaluation) เป็นกระบวนการสำคัญในการบริหารจัดการบำรุงรักษาทางหลวงและถนนสายรองในงานวิศวกรรมโยธา โดยมีเป้าหมายเพื่อระบุลักษณะ ประเภท ความรุนแรง และปริมาณของความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวถนน ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวางแผนซ่อมแซม การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และการออกแบบโครงสร้างผิวทางใหม่ ความเสียหายของถนนลาดยางสามารถจำแนกออกเป็นหลายประเภท เช่น รอยแตกกว้างแบบล้าจากการรับน้ำหนักซ้ำ (Fatigue Cracking), รอยแตกแนวยาวหรือแนวขวาง (Longitudinal/Transverse Cracking), การเกิดร่องล้อ (Rutting), การหลุดร่อนของวัสดุผิวทาง (Raveling) และการยุบตัวเฉพาะที่ (Depression) เป็นต้น ซึ่งความเสียหายแต่ละประเภทสะท้อนถึงปัญหาทางโครงสร้าง วัสดุ หรือสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน

หลักการสำคัญในการประเมินความเสียหายประกอบด้วยการสำรวจภาคสนาม การเก็บข้อมูลโดยตรง เช่น การตรวจสอบด้วยสายตา หรือโดยใช้อุปกรณ์ดิจิทัล เช่น กล้องความละเอียดสูง อุปกรณ์สแกนภาพ หรือรถสำรวจสภาพทาง (Pavement Condition Survey Vehicle) ข้อมูลที่ได้จะถูกวิเคราะห์และให้คะแนนตามเกณฑ์มาตรฐาน เช่น Pavement Condition Index (PCI) ตามแนวทางของ ASTM D6433 ซึ่งเป็นวิธีการประเมินสภาพผิวทางโดยการให้คะแนนแต่ละประเภทของความเสียหายตามความรุนแรงและความถี่ แล้วสรุปเป็นคะแนนดัชนีสะท้อนสภาพถนน (PCI) ที่มีช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 100 โดยค่าที่สูงกว่าบ่งชี้ถึงสภาพถนนที่ดีกว่า

ตารางที่ 2.6 ลักษณะและสาเหตุของความเสียหายประเภทต่างๆของถนนลาดยาง

กลุ่มของความเสียหาย	การเปลี่ยนรูปร่าง (DEFORMATION)	
ชนิดความเสียหาย	ลักษณะ	สาเหตุ
ร่องล้อ (Rutting)	เกิดการเสียรูปร่างถาวรของผิวทางหรือชั้นพื้นทางตามแนวล้อใน ลักษณะยุบตัว หรือการเคลื่อนตัวด้านข้างโดยปกติจะมีสัดส่วนความยาวร่องล้อต่อความกว้างร่องล้อมากกว่า 4 เท่า	1) ความหนาของโครงสร้างทางไม่เพียงพอ 2) ความแข็งแรงของวัสดุชั้นผิวทางหรือชั้นพื้นทางไม่เพียงพอ 3) การบดอัดในชั้นผิวทางหรือชั้นพื้นทางที่ไม่ดี
การปูดนูน (Shoving)	เกิดรอยนูนหรือรอยทรุดเป็นแอ่งเฉพาะที่ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนตัวของชั้นผิวทางเป็นแนวยาวตามทิศทางจราจร ซึ่งเกิดจากการหยุดหรือการออกตัวของยานพาหนะ ส่วนแนวขวางกับทิศทางจราจรจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเลี้ยวหรือการกลับรถ	1) ความแข็งแรงของวัสดุชั้นผิวทางหรือชั้น พื้นทางไม่เพียงพอ 2) การยึดเกาะระหว่างชั้นวัสดุโครงสร้างทางที่ไม่ดี 3) โครงสร้างทางที่ไม่แข็งแรง 4) ความหนาของผิวทางไม่เพียงพอ
กลุ่มของความเสียหาย	รอยแตก (CRACK)	
รอยแตกตามยาว (Longitudinal crack)	เกิดรอยแตกตามแนวยาวในชั้นผิวทาง โดยรอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีแนวเดียวหรือหลายแนวขึ้นอยู่กับความรุนแรงแต่จะไม่มีรอยแตกตามขวางมาเชื่อมระหว่างรอยแตกตามยาว	<u>รอยแตกตามยาวแนวเดียวและหลายแนว</u> 1) การหดตัวหรือรอยต่อของชั้นพื้นทางเป็นวัสดุผสมซีเมนต์หรือยางแอสฟัลต์ 2) การก่อสร้างรอยต่อที่ไม่ได้คุณภาพ 3) การกระด้างขึ้นของยางแอสฟัลต์ (Aging หรือ Oxidation) 4) การทรุดตัวที่ต่างกันของโครงสร้างทาง
รอยแตกตามขวาง (Transverse crack)	เกิดรอยแตกขึ้นตามแนวขวางกับทิศทางจราจรโดยรอยแตกไม่ เชื่อมต่อเป็นโครงข่าย	1) การหดตัวของชั้นพื้นทางที่เป็นวัสดุผสมซีเมนต์หรือยางแอสฟัลต์รอยแตกตามขวาง (Transverse Crack) 2) เกิดจากการก่อสร้างรอยต่อที่ไม่ได้คุณภาพ หรือรอยแตกจากการหดตัว
รอยแตกโครงข่าย (Block crack)	เกิดรอยแตกเชื่อมต่อกันเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยม โดยรอยแตกจะกระจายเต็มผิวทาง มีขนาดตั้งแต่ 0.30 เมตรถึง 3.00 เมตร	1) รอยแตกต่อเนื่องจากถนนคอนกรีตด้านล่าง 2) การหดตัวและความล้าในชั้นพื้นทางเป็นวัสดุผสมซีเมนต์ 3) การหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต 4) วัสดุแอสฟัลต์ชั้น Wearing Course ที่ เปราะหรือไม่แข็งแรง

ที่มา : คู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง , สำนักวิศวกรรมและตรวจสอบกรมทางหลวง, 2550

2.12 ร่องล้อ (Rutting)

ร่องล้อ (Rutting) เป็นลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต คือผิวจราจรยุบตัวเป็นร่องตามรอยของล้อรถ (Wheel Paths) ภายใต้น้ำหนักจราจร หรืออาจจะมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Lateral Movement) โดยอาจปรากฏผิวจราจรบุดที่บริเวณขอบของร่องดังกล่าวในคราวเดียวกัน มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของโครงสร้างชั้นทาง วัสดุในแต่ละชั้นทางถูกอัดแน่นตามร่องล้อ หรือมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก มีสาเหตุเนื่องจาก น้ำหนักจราจรมากเกินไปกีดความหนาของโครงสร้างชั้นทางไม่เพียงพอการบดทับชั้นวัสดุไม่แน่นพอความมลาของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง หรือเกิดจากความอ่อนแอของวัสดุชั้นทางที่อยู่ใต้ชั้นผิวจราจร หรือส่วนผสมผิวทางแอสฟัลต์มีความแข็งแรงไม่เพียงพอ

ผิวจราจรยุบตัวในรูปของรอยลึกตามแนวล้อรถ ส่งผลต่อความปลอดภัยในการเดินทาง และลดสมรรถนะการใช้งานของถนนอย่างชัดเจน โดยสาเหตุของการเกิดร่องล้อนั้นสามารถจำแนกได้เป็น 2 กรณีหลัก ได้แก่

- 1) การเสียรูปถาวรของวัสดุมวลรวมภายในชั้นทาง (Permanent Deformation of the Granular or Asphalt Mix) การเสียรูปถาวรมักเกิดจากการจัดเรียงตัวที่ไม่เหมาะสมของวัสดุมวลรวม หรือความแน่นของชั้นทางที่ต่ำกว่ามาตรฐาน ส่งผลให้เมื่อมีแรงกดทับจากการจราจรซ้ำๆ วัสดุจะเกิดการเคลื่อนตัวและจมตัวอย่างถาวร ซึ่งความเสียหายนี้พบได้ทั้งในชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีการควบคุมคุณภาพการบดอัดไม่เพียงพอหรือใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติต้านทานการเสียรูปต่ำ

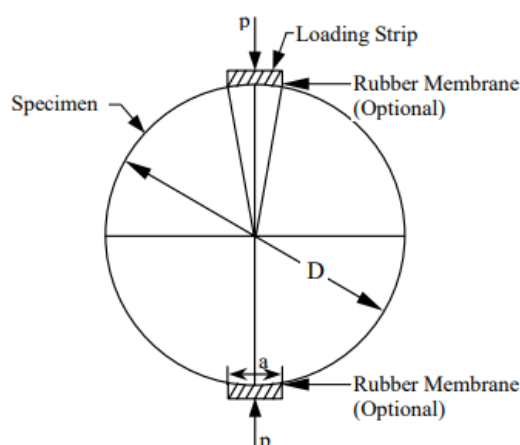
- 2) การไหลเยิ้มของวัสดุยึดเหนี่ยวแอสฟัลต์ที่เกิดจากอุณหภูมิสูง (Asphalt Binder Flow Due to High Temperature) กรณีการไหลเยิ้มพบได้บ่อยในภูมิอากาศร้อน เช่น ประเทศไทย ร่องล้อนักเกิดจากการไหลของยางแอสฟัลต์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเกินจุดอ่อนตัว โดยเฉพาะเมื่อใช้วัสดุยึดเหนี่ยวที่มีความหนืดต่ำหรือไม่มีคุณสมบัติต้านทานการเปลี่ยนรูปภายใต้อุณหภูมิสูง (Low High-Temperature Performance Grade) เมื่อมีแรงกระทำจากล้อรถซ้ำๆ ยางแอสฟัลต์จะไหลจากบริเวณที่ล้อสัมผัสไปสะสมในบริเวณข้างเคียง ทำให้เกิดร่องล้อตามแนวล้อรถ

การวิจัยที่ผ่านมา ชี้ให้เห็นว่าการเกิดร่องล้อมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ประเภทของวัสดุที่ใช้ คุณภาพของงานก่อสร้าง สภาพภูมิอากาศ และประเภทของการจราจร โดยการทดสอบการเกิดร่องล้อด้วยเครื่อง Wheel Tracking Test สามารถนำมาใช้ประเมินความต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุผิวทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นเกณฑ์สำคัญในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริง

2.13 การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS)

การทดสอบกำลังดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS) เป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการประเมินความสามารถในการต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมโยธาผ่านทาง การทดสอบนี้มีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อประเมินความต้านทานของวัสดุต่อการแตกร้าวเนื่องจากแรงดึง ซึ่งมีผลกระทบต่อความทนทานของโครงสร้างทาง การทดสอบ ITS กระทำโดยการวางตัวอย่างทรงกระบอกแนวนอนบนเครื่อง

ทดสอบแล้วออกแรงกดในแนวตั้งฉากกับแกนกลางของตัวอย่าง ทำให้เกิดแรงดึงในแนวรัศมี และสามารถคำนวณค่าแรงดึงทางอ้อมได้จากสมการเชิงกลศาสตร์ของวัสดุ (ชัยธนวัชร พรหมศร และคณะ, 2546) การทดสอบแบบแรงดึงทางอ้อม นั้นกระทำโดยการให้น้ำหนักทดสอบที่เป็นแรงกด (Compression Load) ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้งแบบ อัตราคงที่ (Static Load) หรือแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) โดยที่ให้น้ำหนักกระทำตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง
(ที่มา : Sousa et al ,1991)

มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ ITS ที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไป ได้แก่ ASTM D6931 ซึ่งกำหนดขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่าง การควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมความเร็วในการโหลด และการคำนวณค่าความต้านแรงดึง โดยการทดสอบสามารถดำเนินการได้ทั้งในสภาพแห้งและเปียก เพื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการต้านทานแรงดึงเมื่อวัสดุอยู่ในสถานะที่อาจเกิดความชื้น ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของถนนแอสฟัลต์

คุณสมบัติที่สามารถวัดได้จากการทดสอบ ITS ได้แก่ ค่ากำลังต้านแรงดึงสูงสุดของวัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลปาสกาล (kPa) และค่าดัชนีความชื้น (Moisture Susceptibility Index) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังต้านแรงดึงของตัวอย่างในสถานะเปียกและแห้ง โดยค่าที่สูงแสดงถึงความทนทานต่อความชื้นที่ดี งานวิจัยจำนวนมากได้นำค่าดังกล่าวมาใช้ในการเปรียบเทียบสูตรผสมแอสฟัลต์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริง ในการประยุกต์ใช้จริง การทดสอบ ITS มีบทบาทสำคัญในกระบวนการออกแบบและประเมินสมรรถนะของผิวทางแอสฟัลต์ โดยเฉพาะในการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงวัสดุ เช่น การเติมวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) การใช้สารเพิ่มคุณภาพแอสฟัลต์ (Additives) หรือการเลือกใช้วัสดุรีไซเคิล งานวิจัยของชัยธนวัชร พรหมศร และคณะ (2546) ได้ศึกษาเปรียบเทียบสูตรผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เติมวัสดุเสริมแรงจากเส้นใยธรรมชาติต่างชนิด พบว่า การเติมเส้นใยบางชนิดสามารถเพิ่ม

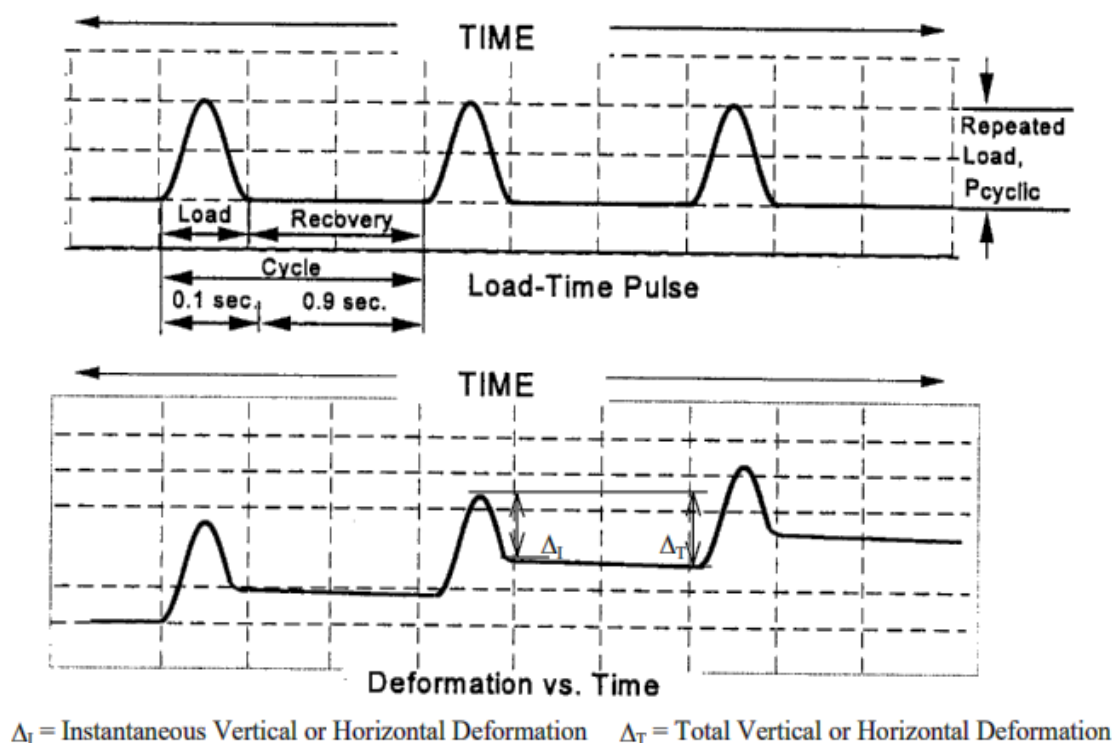
ค่า ITS ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาในสภาวะเปียก ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการต้านทานการแทรกซึมของน้ำและการหลุดร่อนของวัสดุ

2.14 การทดสอบโมดูลัสการคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus, ITMR)

ในการออกแบบถนนลาดยางแบบยืดหยุ่น (flexible Pavement) ค่า MR ถือเป็นพารามิเตอร์หลักในการวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อนำไปกำหนดความหนาของชั้นฐาน ชนิดของวัสดุ และประเมินการเสีรूपสะสมภายใต้การจราจรซ้ำ การออกแบบแบบ Mechanic-Empirical เช่น AASHTO 93 หรือโมเดลใหม่ ๆ ต่างต้องอาศัยค่า MR ที่แม่นยำ การใช้ MR ยังช่วยในการเปรียบเทียบวัสดุที่มีการปรับปรุง เช่น การเติมเส้นใย หรือการใช้วัสดุรีไซเคิล เพื่อทำนายความทนทานต่อการยุบตัวและการเสีรूपถาวรในระยะยาว

การทดสอบหาค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus, MR) ดำเนินการด้วยเทคนิค Repeated Load Indirect Tensile Test สำหรับตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต และ Cyclic Triaxial Test สำหรับวัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทาง การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมิน ความยืดหยุ่นเชิงเส้น ของวัสดุภายใต้การโหลดซ้ำ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญในการออกแบบระบบโครงสร้างถนน MR จะสะท้อนพฤติกรรมของวัสดุในงานสนามที่ถูกกระทำด้วยแรงล้อรถที่ปลดปล่อยซ้ำ (ชัยธนวัชรพรหมศร et al., 2541)

มาตรฐานที่ใช้ ได้แก่ AASHTO T-274 สำหรับวัสดุชั้นไม่ยึดติด (unbound granular and soils) และแนวทาง Pro-46 หรือ ASTM D4123 สำหรับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้ indirect tension โดยกำหนดขนาดตัวอย่าง อุณหภูมิ โหลด ลักษณะคลื่น และจำนวนรอบโหลด เพื่อให้ผลลัพธ์มีความเชื่อถือได้ และสามารถเปรียบเทียบระหว่างห้องปฏิบัติการได้อย่างสมำเสมอ ตัวอย่าง โดยการกระทำการให้น้ำหนักสลับกับการหยุดพักน้ำหนักเข้าไปมาโดยตรวจสอบและ บันทึกค่า Deformation ทั้งแนวราบและแนวตั้ง แต่จะให้ความสนใจเฉพาะในส่วนของค่า Recoverable Deformation ซึ่งพิจารณาได้จากสมมติฐานที่ว่าความสัมพันธ์ ระหว่าง Load และ Deformation มีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load-Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ ITS
แบบ Repeated Load (ที่มา : Sousa et al ,1991)

คุณสมบัติที่วัดได้จากการทดสอบ MR ได้แก่ค่า Resilient Modulus (MR) ซึ่งมีหน่วยเป็น MPa หรือ kPa และสามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์ต่อระดับความชื้น ความหนาแน่น และความเค้นที่แตกต่างกัน สามารถนำไปวิเคราะห์ใน Mechanistic-Empirical Pavement Design เพื่อประเมินการเสียรูปถาวร (Permanent Deformation) และอายุการใช้งานของผิวทาง

2.15 การทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test)

การทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test: ITFT) เป็นหนึ่งในกระบวนการประเมินความสามารถของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในการต้านทานต่อความล้าภายใต้แรงดึงซ้ำๆ โดยอาศัยหลักการจำลองสภาวะการจราจรซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นจริงบนถนนลาดยาง ซึ่งแรงดึงทางอ้อมนั้นเกิดจากการบีบแบนกระบอกทรงกระบอกตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบ ส่งผลให้เกิดแรงดึงตามแนวตั้งฉากกับแนวแรงกระทำ โดยทั่วไปการทดสอบจะดำเนินการภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความถี่ของแรงซ้ำตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น AASHTO T322 หรือ ASTM D6931 ซึ่งใช้เพื่อประเมินความทนทานของวัสดุต่อความล้า (Fatigue Life) ในการใช้งานจริง

รายละเอียดของการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T322 ระบุให้ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร. และสูง 63.5 มิลลิเมตร. โดยทดสอบภายใต้โหลดเป็นคลื่นไซน์ (Haversine) หรือโหลดแบบกำหนดแรงซ้ำที่ความถี่ 5–10 Hz ในอุณหภูมิที่ควบคุมประมาณ 20°C หรืออุณหภูมิที่แสดงลักษณะการล้าเด่นชัด ตัวแปรสำคัญที่ได้จากการทดสอบ ได้แก่ จำนวนรอบก่อนแตกร้าว (Fatigue Life), ความเค้นสูงสุดที่ตัวอย่างรับได้ และการเปลี่ยนแปลงของสภาพวัสดุในระหว่างการทดสอบ เช่น ค่าความแข็งแรงเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Modulus) ที่ลดลง

คุณสมบัติที่สามารถวัดได้จากการทดสอบนี้ ได้แก่ ความทนทานต่อความล้า (Fatigue Resistance), ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบการโหลดจนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกร้าว และการคาดการณ์อายุใช้งานของผิวทางแอสฟัลต์ที่ได้รับแรงซ้ำอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้างชั้นทาง โดยเฉพาะในงานของกรมทางหลวง ที่มีการนำผลการทดสอบไปใช้ในงานวิจัยและพัฒนาสูตรผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานต่อการแตกร้าวจากความล้าในระยะยาว เช่น โครงการพัฒนาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเศษยางหรือพลาสติกเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและลดการแตกร้าวจากแรงกระทำซ้ำ

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา อภิชาติ สุตดีพงษ์ และคงศักดิ์ อัครวงษ์วัฒนา (2567) ได้ศึกษาความล้าของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมวัสดุรีไซเคิล โดยเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานแรงล้าระหว่างวัสดุปกติกับวัสดุปรับปรุง พบว่าการผสมวัสดุเสริมสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของผิวทางได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยงานวิจัยดังกล่าวมีผลต่อแนวทางการออกแบบโครงสร้างชั้นทางของกรมทางหลวงในปัจจุบัน การทดสอบการล้าโดยแรงดึงทางอ้อมนับเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้ นักวิศวกรรมสามารถประเมินประสิทธิภาพของวัสดุทางในระยะยาว และพัฒนาองค์ความรู้ในการออกแบบวัสดุผิวทางให้มีความยั่งยืนและคุ้มค่าต่อการใช้งานจริงในภาคสนาม โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาพแวดล้อมการจราจรหนาแน่นของประเทศไทย

2.16 สมการทำนายความเสียหายเนื่องจากการล้า

โดยสมการทำนายความเสียหายเนื่องจากการล้า เป็นไปตามมาตรฐาน BS EN 12697 (2007) แนะนำสมการทำนายความเสียหายเนื่องจากการล้า (N_f) จากความเครียดเริ่มต้น (Initial Tensile Strain) และค่าคงที่ของวัสดุ (Material Constant) ดังสมการที่ (2.28) ซึ่งสามารถใช้ได้กับการทดสอบการล้าเนื่องจากแรงดึงทางอ้อมทั้งแบบควบคุมความเค้นคงที่ (Stress Control) หรือควบคุมความเครียดคงที่ (Strain Control) (Gupta S. and A. Veeraragavan, 2009)

$$N_f = k \left(\frac{1}{\mu \varepsilon} \right)^n \quad (2.28)$$

เมื่อ N_f = อายุการล้า (รอบ)
 $\mu \varepsilon$ = ความเครียดดึงเริ่มต้น (ไมโครสเตรน)
 k, n = ค่าคงที่ของวัสดุ

ค่าความเครียดดึงเริ่มต้น สามารถคำนวณได้จากค่าโมดูลัสคืนตัวเนื่องจากแรงดึงทางอ้อม หน่วยแรงที่ใช้ทดสอบการล้าภายใต้แรงดึงทางอ้อม และอัตราส่วนปัวร์ซอง ตามคำแนะนำของ Kennedy (1978) และ Mohammed (1993) ดังสมการที่ 2.29

$$\mu\epsilon = \frac{\sigma(1+3\nu)}{IT_{MR}} \quad (2.29)$$

โดยที่ σ = หน่วยแรงที่ใช้ทดสอบการล้าภายใต้แรงดึงทางอ้อม (กิโลพาสคัล)
 ν = อัตราส่วนปัวร์ซองเรโซ เท่ากับ 0.35
 IT_{MR} = ค่าโมดูลัสการคืนตัว (เมกะพาสคัล)

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อภิชาติ สุดดีพงษ์ และคงศักดิ์ อัครวงษ์วัฒนา (2567) ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน RAP/RCA และปริมาณ PET ต่อสมบัติทางกลของแอสฟัลต์ คอนกรีตทั้งแบบสถิต (เสถียรภาพ ดัชนีกำลัง และ กำลังดึงทางอ้อม) แบบพลวัต (โมดูลัสคืนตัวภายใต้แรงดึง ทางอ้อม อายุการล้าภายใต้แรงดึงทางอ้อม การยุบตัวถาวร ความต้านทานการเกิดร่องล้อ) ผลทดสอบชี้ให้เห็น ว่าที่ปริมาณ PET ค่าเดียวกัน สมบัติทางกลทั้งแบบสถิตและพลวัตของแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าที่ดีที่สุดที่ อัตราส่วน RAP/RCA เท่ากับ 80/20 การเติม PET ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลทุกด้านของแอสฟัลต์ คอนกรีต โดยมีค่าการปรับปรุงสูงสุดที่ปริมาณ PET ร้อยละ 0.6

สุทธิชัย เจริญกิจ และคณะ (2564) ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยพลาสติกกรีโซเคิลประเภทโพลีเอทิลีนทาเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate: PET) และพลาสติกประเภทโพรลีโอพิลีน (Polypropylene : PP) ซึ่งผลการ ทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าเสถียรภาพมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2,133 bs. ของตัวอย่างแอสฟัลต์ที่ไม่ผสม พลาสติก PET เพิ่มขึ้นเป็น 2,824 bs. เมื่อผสม PET ที่อัตราส่วน ร้อยละ 10 (เพิ่มขึ้นร้อยละ 32.40) และเมื่อใช้พลาสติก PP ผสมเพิ่มที่อัตราส่วนร้อยละ 10 ค่าเสถียรภาพขึ้นร้อยละ 12.92 อยู่ที่ 2,430 (bs. จาก 2,133 (bs. ของตัวอย่างแอสฟัลต์ไม่ผสมพลาสติก PP กล่าวคือจากการศึกษาคุณสมบัติทาง วิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตได้อย่างมีนัยยะสำคัญ

ประสพโชค ชื่นศิริ และนิรชร นกแก้ว (2563) ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ คอนกรีตผสมขยะพลาสติกโพลีเอทิลีน โดยการใช้แอสฟัลต์คอนกรีตดังกล่าวเป็นแบบผสมร้อน และใช้ เกรด Wearing ขนาด 12 มิลลิเมตร ศึกษาโดยการเพิ่มอัตราส่วนผสมจากขยะดังกล่าว ร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และลดปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้สูงสุด ร้อยละ 5 โดยปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ พบว่า การลดปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถลดได้สูงสุดร้อยละ 5 โดยปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์และใช้ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ร้อยละ 4.75 โดยปริมาณมวลรวม ถึงจะมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรม ทางหลวง

H Fikri (2020) ศึกษาเกี่ยวกับสารประกอบ Asphalt Concrete Wearing Course โดยใช้ แอสฟัลต์ 60/70 ซึ่งดัดแปลงด้วยขยะขวดพลาสติก PET ในปริมาณที่ร้อยละ 0, 3, 6, 9 และ 12

ผลทดสอบของ Marshall แสดงให้เห็นว่าระดับที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ (AOL) สำหรับแอสฟัลต์ ร้อยละ 0 คือประมาณ 5.9 ส่วนแอสฟัลต์ดัดแปลงด้วย PET ร้อยละ 3, 6, 9 และ 12 คือประมาณ 5.95 จากการวิเคราะห์ ระดับที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วย PET ร้อยละ 9 มีค่าความเสถียรดีขึ้น ที่ร้อยละ 33 ที่ทำให้แอสฟัลต์ดัดแปลงที่เหมาะสมที่สุด

Moghaddam et al. (2014) ศึกษาพฤติกรรมการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ ปรับปรุง ด้วย PET โดยนำขวด PET มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำมาบดด้วยเครื่องบด (Crushing Machine) จนได้เกล็ดพลาสติก PET และผสมโดยตรงกับมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ PET ที่ละลาย จากการผสมของวัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิสูง จะช่วยเคลือบผิวของมวลรวมและช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์กับมวลรวม ทำให้การยุบตัวถาวรลดลง

N Hidayat et al. (2019) ศึกษาผลของการเติม PET ในอัตราร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 สำหรับหลักสูตรตัวประสานคอนกรีตแอสฟัลต์ต่อคุณลักษณะของมาร์แชล ซึ่งให้ผลการเติมปริมาณ พลาสติก PET และตัวเติมขยะคาร์ไบด์ส่งผลต่อค่าของลักษณะเฉพาะของแอสฟัลต์ของ Marshall ที่มี ประสิทธิภาพมากที่สุดคือระดับที่ร้อยละ 1 โดยมีความหนาแน่น 2.23 กรัม/ซีซี ค่า VIM 4.82% ค่า VMA 14.58% ค่า VFA 67.18% ค่าการไหล 3.30 มิลลิเมตร ค่าความเสถียร 3060.42 กิโลกรัม และค่า MQ 936.79 กิโลกรัม/มิลลิเมตร.

Rahman and Wahab (2013) ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมและผลกระทบจากการใช้ PET เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และพบว่าตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสม PET มีความต้านทานการยุบตัวถาวรสูงกว่า ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา โดยแอสฟัลต์ คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วย PET ในปริมาณร้อยละ 20 จะมีค่า การยุบตัวถาวรต่ำที่สุด

Taheri Z. (2004) ได้ศึกษา PET ในรูปของเม็ดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มม. ซึ่งจะ แทนที่ (โดยปริมาตร) ส่วนหนึ่งของมวลรวมหยาบที่มีขนาดเท่ากัน (2.36-4.75 มิลลิเมตร) ในส่วนผสม ที่เตรียมไว้ทั้งหมด มีการใช้ปริมาณบิตูเมนที่เหมาะสมที่สุดที่กำหนดร้อยละ 6.6 ในการใช้การแทนที่ มวลรวมหยาบที่แตกต่างกันร้อยละ 5 ผลการวิจัยพบว่าการแทนที่รวมร้อยละ 20 โดยปริมาตร ด้วยเม็ด PET จะส่งผลให้ความหนาแน่นของส่วนผสมอัดจำนวนมากลดลงร้อยละ 2.8 ค่าการไหล ในส่วนผสมพลาสติกฟลด์ต่ำกว่าค่าของตัวอย่างควบคุม

Aghayan and Khafajeh (2019) ได้ศึกษาการใช้ เม็ดพลาสติก PET แทนที่มวลรวม ในสัดส่วนคือ ร้อยละ 0, 30, 50, 70 และ 100 ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS), ความไวต่อความชื้น, การทดสอบดัดครึ่งวงกลม (Semi-Circular Bending: SCB) และการทดสอบการต้านทานการเกิดร่องล้อ (Wheel Tracking Test) ภายใต้สภาวะการ ทดสอบที่แตกต่างกัน พบว่า การเพิ่มปริมาณ PET จะทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (ITS) ลดลง แต่ กลับช่วยเพิ่มความต้านทานต่อความชื้นได้ อีกทั้งยังพบว่าความสามารถในการต้านทานการเกิดร่องล้อ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ดีขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใช้ PET ในปริมาณร้อยละ 25 – 50 สามารถ เพิ่มสมรรถนะของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ แต่หากใช้มากเกินไป สมรรถนะจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ