

ทฤษฎีการเกาะยึด การหลุดลอก และการใช้สารผสม

Majidzadeh and Brovold (1) สรุปว่าการใช้แอสฟัลต์ในงานผิวทางและพื้นทาง ในลักษณะส่วนผสม (Mixtures) เป็นระบบที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ส่วน (Two Phases) คือ แอสฟัลต์ (Asphalts) กับมวลรวม (Aggregates) หน้าที่หลักของแอสฟัลต์คือ มีแรงยึดเกาะติด (Adhesive Bond) ในเนื้อแอสฟัลต์และการเกาะติด (Adhesive) หรือเกาะยึด (Adhesion) มวลรวมเข้าด้วยกัน ความแข็งแรงของส่วนผสมแอสฟัลต์กับมวลรวมได้มาจากความต้านทานในแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) และเนื่องจากการขัดกัน (Interlock) และแรงเสียดทาน (Friction) ของมวลรวม ความเสียหายในส่วนผสมมักจะเกิดในแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) ที่เกิดจากแรงยึดเกาะติด (Adhesive Bond) ในเนื้อแอสฟัลต์เอง หรือเกิดจากการเกาะยึด (Adhesion) ไม่ได้ จะเกิดความเสียหายระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม

การเกาะยึดที่ดีจะเกิดในสภาพที่แอสฟัลต์ดี มวลรวมสะอาดแห้ง ทำให้มีแรงยึดเกาะ (Bonding) ระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม ความเสียหายจะเกิดขึ้นเมื่อมีน้ำมากกระทำระหว่างผิวสัมผัส ทำให้แรงยึดเกาะเปลี่ยนไปโดยการแทนที่ (Displacement) หรือถอดถอน (Detachment) แอสฟัลต์ออกจากผิวมวลรวม กลวิธีในการเกาะยึดและการแทนที่ของน้ำสามารถอธิบายได้โดย กฎทางเทอร์โมไดนามิก (Thermodynamics) การถอดถอนหรือการหลุดลอก (Stripping) ของแอสฟัลต์ออกจากผิวมวลรวม มีผลทำให้ลดความแข็งแรงและลดอายุการใช้งานของผิวทางให้ สิ้นลง

2.1 ตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิก (Thermodynamic Variables)

พิจารณากฎทางเทอร์โมไดนามิกซึ่งใช้หากลวิธีของการเกาะยึดและการชำระชุดของการเกาะยึดเช่น การถอดถอน และการหลุดลอก โดยแบ่งเป็น 2 ระบบ (Two Systems) แต่ละระบบประกอบด้วย 3 ส่วน (Three Phases) คือ อากาศ-มวลรวม-แอสฟัลต์ และน้ำ-มวลรวม

-แอสฟัลต์ ระบบแรกจะพิจารณาถึงกลวิธีการเกาะยึดและรูปแบบของแรงยึดเกาะติดที่เพียงพอในสภาพแห้ง มวลรวมสะอาด ระบบที่สองจะพิจารณาถึงกลวิธีการหลุดลอก และการถอดถอนของแอสฟัลต์จากมวลรวมโดยน้ำ ความสามารถในการเปียก (Wettabilities) ของแอสฟัลต์เป็นสิ่งสำคัญมากโดยจะระบุเป็นความจุของแอสฟัลต์ที่แผ่กระจายตัว (Spreading) บนผิวมวลรวมแตกต่างกันตามแรงตึงผิว (Surface Tension) และความหนืด (Viscosity) ของแอสฟัลต์ เมื่อแอสฟัลต์อยู่บนผิวมวลรวมหยดหนึ่งที่ทำมุมสัมผัส  $\theta$  ระหว่างผิวมวลรวมและแอสฟัลต์ ขนาดมุมสัมผัส  $\theta$  ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแผ่กระจายของแอสฟัลต์ มุมที่เล็กกว่าแสดงว่าความจุของแอสฟัลต์ที่แผ่กระจายตัวสม่ำเสมอบนผิวมวลรวมมากกว่า ซึ่งจะแยกพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ทางเทอร์โมไดนามิกที่มีผลต่อการเกาะยึดของแอสฟัลต์กับมวลรวม สรุปได้ดังนี้

2.1.1 พลังงานอิสระที่ผิว (Surface Free Energy) การรวมตัวของโมเลกุลภายในดึงดูดโมเลกุลที่ผิวของแอสฟัลต์ทิศทางของแรงเข้าภายใน เป็นผลให้ผิวแอสฟัลต์หดตัวตามธรรมชาติอยู่ในสถานะที่มีพื้นที่ผิวน้อยสุด โดยมีพลังงานอิสระที่ผิวน้อยที่สุด พลังงานอิสระที่ผิวแอสฟัลต์แสดงเป็น  $\text{ergs/cm}^2$  ในระบบที่ประกอบด้วยมวล 2 ส่วน (Two phases) เมื่อความดัน อุณหภูมิ และส่วนประกอบคงที่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ คือ

$$dF = \gamma dA$$

หรือ  $\gamma = \left(\frac{\partial F}{\partial A}\right)_{T,P,N} = F_s \dots\dots\dots(2.1)$

เมื่อ  $F_s$  เป็นพลังงานอิสระที่ผิวต่อหน่วยพื้นที่  $A$  ค่านี้แสดงถึงความสัมพันธ์พื้นฐานของส่วนประกอบทางเคมีของผิว มีค่าเท่ากับแรงตึงผิว  $\gamma$

พลังงานที่ผิวทั้งหมดต่อหน่วยพื้นที่ ( $E_s$ ) คือ

$$E_s = F_s + TS_s \dots\dots\dots(2.2)$$

หรือ  $E_s = \gamma - TdV/dT \dots\dots\dots(2.3)$

- $S_s =$  Entropy
- $\gamma =$  แรงตึงผิว
- $A =$  พื้นที่ผิว
- $T =$  อุณหภูมิสัมบูรณ์

2.1.2 การเปียกหรือการแผ่กระจาย (Wetting) เมื่อหยดของเหลวไปบนผิวของมวลรวม พลังงานของของเหลวที่คายออกเป็นหยดถือว่าสมดุล รูปที่ 2.1 แสดงถึงแรงที่กระทำต่อความยาวส่วนเล็ก ๆ ของระบบ 3 ส่วน (3 Phases) คือ ของเหลว-ของแข็ง-อากาศ ความสามารถของของเหลวในการแผ่กระจายบนผิวหน้าของแข็งขึ้นอยู่กับมุมสัมผัส (Contact Angle) ระหว่างผิวหน้าของแข็งกับของเหลว

2.1.2.1 สมการของ Young (Young Equation) เมื่อใช้รูปแบบง่าย ๆ ของหยดของเหลวบนผิวของแข็ง และสมมติฐานของการสมดุล Thomas Young (2) ได้พัฒนาสูตรในปี 1805

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

จัดรูปสมการเป็นการเปลี่ยนแปลง พลังงานอิสระในสภาพสมดุลได้

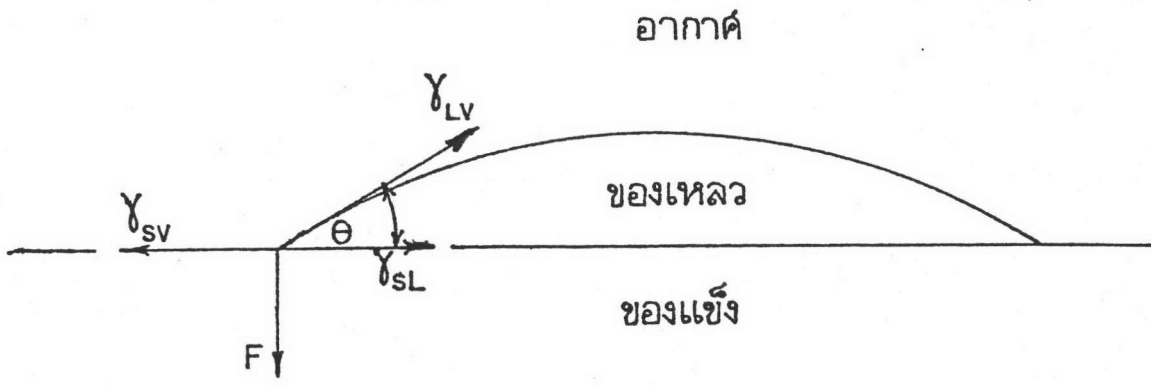
$$-\Delta F = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cos\theta \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

เครื่องหมายลบแสดงถึงพลังงาน ที่คายออกจากหยดของของเหลว สมมติว่าสมดุล

สมการ Young อาจหาจากกฎเทอร์โมไดนามิก รูปที่ 2.2 แสดงจุดเริ่มต้นสภาพสมดุลของเทอร์โมไดนามิกและการเลื่อนตัวเล็กน้อยของผิวสัมผัส พลังงานที่เปลี่ยนไปน้อยมากจนเป็นศูนย์ จุดสัมผัสที่เลื่อนจากจุด a ไปยังจุด b พื้นที่ผิวสัมผัสของของแข็งกับอากาศลดลง และพื้นที่ผิวสัมผัสของของเหลวกับอากาศและของแข็งกับของเหลวเพิ่มขึ้น แสดงได้โดย

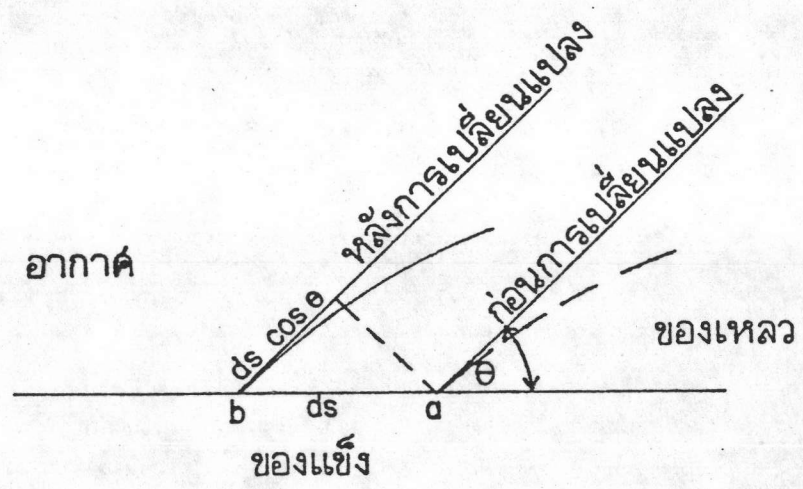
$$\begin{aligned} \gamma_{lv} (\cos\theta ds) + \gamma_{sl} ds - \gamma_{sv} ds &= 0 \\ \gamma_{lv} \cos\theta + \gamma_{sl} - \gamma_{sv} &= 0 \\ \gamma_{sv} - \gamma_{sl} &= \gamma_{lv} \cos\theta \quad \dots\dots\dots (2.6) \end{aligned}$$

ซึ่งเหมือนกับสมการที่ (2.5)



- F แรงของการเกาะยึด
- $\gamma_{sv}$  พลังงานระหว่างผิว ของแข็ง-อากาศ
- $\gamma_{lv}$  พลังงานระหว่างผิว ของเหลว-อากาศ
- $\gamma_{sl}$  พลังงานระหว่างผิว ของแข็ง-ของเหลว
- $\theta$  มุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลว กับ ผิวของแข็ง

รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงส่วนระหว่างผิว ระบบ อากาศ-ของเหลว-ของแข็ง



รูปที่ 2.2 แผนผังแสดงส่วนระหว่างผิวสัมผัสน้อย ก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงพื้นที่สัมผัสเล็กน้อย



2.1.2.2 สมการ Dupre (Dupre Equation) สมมติว่าหนึ่งหน่วยพื้นที่

สัมผัสของของเหลวกับของแข็งถูกดึงหรือดึงตูดโดยของเหลว งานที่ต้องการขยายพื้นที่เป็นงานของการเกาะยึด (Work of Adhesion)

$$W_A = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \dots\dots\dots (2.7)$$

สมการนี้คิดโดย Dupre (3) ในปี 1869 สมการนี้แสดงว่ามีการก่อตัวของผิวใหม่ 2 ผิวเป็นผิวเดียว โดยการแทนที่ของพลังงานที่สูงกว่างานในการเกาะยึด จากการแทนที่สมการ (2.5) ในสมการ (2.7) จะได้

$$W_A = \gamma_{LV} \cos\theta + \gamma_{LV}$$
$$W_A = \gamma_{LV} (\cos\theta + 1) \dots\dots\dots (2.8)$$

เมื่อ  $\theta = 0$  ,  $W_A = 2\gamma_{LV}$   
 $\theta = 180^\circ$  ,  $W_A = 0$

ฉะนั้นงานในการเกาะยึดจะมากที่สุดเมื่อมีการแผ่กระจายสมบูรณ์ และมีมุมสัมผัสน้อยที่สุดเป็นศูนย์

2.1.3 งานของแรงยึดเหนี่ยว (Work of Cohesion) พิจารณาหลอดแก้วเล็ก ๆ

พื้นที่ 1 ตร.ซม งานที่ต้องการขยายพื้นที่ผิวเกิดจากพลังงานอิสระที่ผิวและแรงดึงผิว ถ้าหลอดแก้วมีของเหลวเต็มและแรงที่กระทำที่ปลายจนของเหลวเกิดการแยกตัวเป็นผิวใหม่ 2 ผิว สมมติว่าแรงต้านข้างที่ดึงตูดของเหลวไม่มี งานที่ต้องการในการแยกตัวเท่ากับ 2 เท่าของพลังงานอิสระที่ผิวของเหลว เป็นงานในการยึดเหนี่ยว

$$W_c = 2\gamma_{LV} \dots\dots\dots (2.9)$$

จะเห็นว่าเท่ากับสมการที่ (2.8) เมื่อ  $\theta = 0^\circ$  หรืองานในการเกาะยึดจะเท่ากับงานในการยึดเหนี่ยว  $W_A = W_c$

2.1.4 พลังงานของการจมน้ำ (Energy of Immersion) หรือแรงดึงเกาะยึด (Adhesion Tension) เมื่อของแข็งที่จมน้ำในของเหลว ผิวสัมผัสของแข็งกับอากาศเปลี่ยนเป็นของแข็งกับของเหลว ถ้าส่วนของแข็งไม่มีการดูดซึมของเหลว พลังงานที่เปลี่ยนไปเป็นผลมาจากการจมน้ำ หรือที่รู้จักกันดีในรูปของพลังงานในการจมน้ำ ถ้าของแข็งมีชั้นดูดซึมพลังงานอิสระที่ผิวของแข็งจะน้อย ของเหลวจะกระจายเคลือบของแข็ง บางครั้งพลังงานในการจมน้ำจะใช้เป็นแรงดึงเกาะยึด ซึ่งหาได้จากสมการ (2.5) ของ Young

2.1.5 สัมประสิทธิ์การแผ่กระจายตัว (Coefficient of Spreading) มีประโยชน์ใช้เปรียบเทียบความสามารถในการเปียก (Wettabilities) ของของเหลว เมื่อของเหลวแผ่กระจายบนของแข็ง เกิดแรงดึงดูดระหว่าง 2 ส่วน (Two Phases) การเปียก (Wetting) หาได้โดยงานในการเกาะยึด (Work of Adhesion) การแผ่กระจายตัวจะมีแรงต้านจากแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) ภายในของเหลว ซึ่งหาได้จากงานของแรงยึดเหนี่ยว (Work of Cohesion) ฉะนั้นอัตราการแผ่กระจายตัวหาได้จาก สัมประสิทธิ์การแผ่กระจายตัว

$$\text{Coefficient of Spreading} = W_A - W_C \dots\dots\dots(2.10)$$

การแผ่กระจายตัวเกิดขึ้นเมื่อ สัมประสิทธิ์การแผ่กระจายตัวเป็นบวก หรือ  $W_A > W_C$

2.1.6 ผลของชั้นดูดซึม (Effects of Absorbed Layers) Thelen (4) ได้กล่าวว่าธรรมชาติของผิวมวลรวมซึ่งแอสฟัลต์จะเกาะติดเป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณา มวลรวมโดยทั่วไปเป็นอะตอมที่ขัดกัน ในแต่ละอะตอมที่ประกอบกันเป็นก้อนมีแรงยึดเกาะทางประจุไฟฟ้า มวลรวมที่เกาะติดกันหากอะตอมที่ผิวไม่มีกำลัง แรงยึดเกาะจะถูกทำลาย อะตอมเหล่านี้จะต้องการรูปแบบใหม่ที่จะแทนที่แรงยึดเกาะเดิมใน 2 ทาง

ก) แรงประสานเป็นแรงที่ออกมาจากผิวและหมุนเวียนสลับเปลี่ยนอะตอมภายใน โดยการบิดตัวของผลึกที่ขัดกันขณะที่อะตอมที่ผิวถูกดึงให้ติดกับอะตอมภายใน

ข) น้ำ น้ำมัน และสารปนเปื้อนในอากาศจะถูกดึงสู่ผิวมวลรวมที่สะอาดถ้าแรงประสานทั้งหมดทิศทางเข้าสู่ภายใน มวลรวมจะไม่ดึงดูดแอสฟัลต์หรือวัสดุภายนอก ส่วนใหญ่

ผิวมวลรวมจะดูดซึมบาง ๆ แตกต่างกันไป ปกติจะเป็นน้ำที่มีอยู่เสมอ แม้มวลรวมสัมผัสกับอากาศที่อุณหภูมิปกติโดยใช้เวลาเพียงเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการดึงดูระหว่างโมเลกุลของผิว และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermics) แทนที่ทันทีพร้อมกับคายพลังงานออก ผลของการลดพลังงานอิสระที่ผิวของแข็ง ( $\pi_e$ ) ทำให้พลังงานอิสระที่ผิวของแข็งเป็น

$$F_s = \gamma_{sv} - \pi_e \dots\dots\dots (2.11)$$

แทนค่าในสมการของ Young (2.5)

$$\begin{aligned} -\Delta F &= \gamma_{sv} - \pi_e - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cos\theta \\ \gamma_{sv} - \gamma_{sl} &= \gamma_{lv} \cos\theta + \pi_e \dots\dots\dots (2.12) \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการของ Dupre (2.7) จะไดงานในการเกาะยึด

$$\begin{aligned} W_A &= \gamma_{sv} - \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \\ &= \gamma_{lv} \cos\theta + \pi_e + \gamma_{lv} \\ &= \gamma_{lv} (1 + \cos\theta) + \pi_e \dots\dots\dots (2.13) \end{aligned}$$

2.1.7 หน้าที่ของรูพรุนและรอยแตกในมวลรวม (Role of Pores and Cracks in Stone) Thelen (4) สรุปรว่าแอสฟัลต์หรือน้ำมันในแอสฟัลต์จะซึมลงในรูพรุนหรือรอยแตกของมวลรวมทำให้มวลรวมมีความแข็งแรงขึ้น เพราะรอยต่อมีแรงยึดเกาะและเกิดการหลุดลอกน้อย เนื่องจากไม่สามารถตั้งสมมติฐานที่แน่นอนเกี่ยวกับรูปร่าง จำนวน และขนาด ที่แอสฟัลต์ไหลลงไปในผิวของมวลรวม ฉะนั้นจึงยากที่จะเปรียบเทียบระหว่างอัตราการดูดซึมของแอสฟัลต์ในผิวมวลรวมที่แตกต่างกัน การเปรียบเทียบอาจจะทำได้อย่างน้อยในทฤษฎีระหว่างอัตราการไหลของแอสฟัลต์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด หรือชนิดเดียวกันแต่ที่อุณหภูมิต่างกัน ในมวลรวมชนิดเดียวกัน การศึกษาต่อไปนี้เป็นไปตาม Poiseuille's Equation สำหรับการไหลในรูเล็ก ๆ (Cylinder Capillaries)

2.1.7.1 รูลึกหรือเปิด (Deep of Open Pores) ถ้ารูลึกหรือเปิดมีการดูดซึมเล็กน้อย เปรียบเทียบความลึกของรู

$$d = \sqrt{\frac{Art}{2\eta}} \dots\dots\dots (2.14)$$

ในกรณีนี้ สมมติว่าไม่มีแรงภายนอกช่วยในการไหล

- $d$  = ความลึกของการซึมของแอสฟัลต์ (cm.)
- $A$  = แรงดึงเกาะยึด (Adhesion Tension) =  $\gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cos\theta$  (ergs/cm<sup>2</sup>)
- $r$  = รัศมีของรู (cm.)
- $t$  = เวลา (sec.)
- $\eta$  = ความหนืด (Viscosity) ของเหลว (poises)
- $\gamma_{sv}$  = แรงตึงผิว (Surface Tension) ของแข็ง (ergs/cm<sup>2</sup>)
- $\gamma_{sl}$  = แรงตึงระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial Tension) ของแข็งกับของเหลว (ergs/cm<sup>2</sup>)
- $\gamma_{lv}$  = แรงตึงผิว (Surface Tension) ของเหลว (ergs/cm<sup>2</sup>)
- $\theta$  = มุมสัมผัส ของเหลวกับของแข็ง (degree)

### 2.1.7.2 การไหลซึม 2 จังหวะ (Two Step Penetration)

ถ้าแอสฟัลต์ขณะร้อนซึมลงไปเป็นระยะทาง  $d_1$  และขณะใช้งานแอสฟัลต์จะซึมต่อไปอีกเป็น  $d_2$  เมื่อมีความร้อนจากภายนอก

$$d_2^2 - d_1^2 = \frac{Art_2}{2\eta_2} \dots\dots\dots (2.15)$$

### 2.1.7.3 รูปิด (Closed Pores) อัตราการไหลซึมลดลงและหยุดเมื่อ

อากาศในรู มีความกดดันเท่ากับ  $2A/r$  ความลึกสูงสุดของการซึมในรูทรงกระบอกตัน สมมติว่าเป็นไปตามกฎ Poiseuille's Law



$$d = l - \frac{P_0 l}{P_0 + 2A/r} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

$l$  = เป็นความลึกของรู

$P_0$  = เป็นความดันครั้งแรกของระบบ

2.1.8 ผลของความหยาบของผิวมวลรวม (Surface Roughness) <sup>พื้นที่ผิวจริง</sup> ของผิวหยาบจะมากกว่าผิวเรียบในอุดมคติเสมอเมื่อรูปร่างเท่ากัน Wenzel (5) ได้หาผลของความหยาบของผิว โดยปรับปรุงจากสมการของ Young

$$r (\gamma_{SV} - \gamma_{SL}) = \gamma_{LV} \cos \theta' \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

เมื่อ  $\theta'$  เป็นมุมสัมผัสที่หาบนผิวหยาบ

$$r = \frac{\text{พื้นที่ผิวจริง}}{\text{พื้นที่ผิวทางเรขาคณิต}}$$

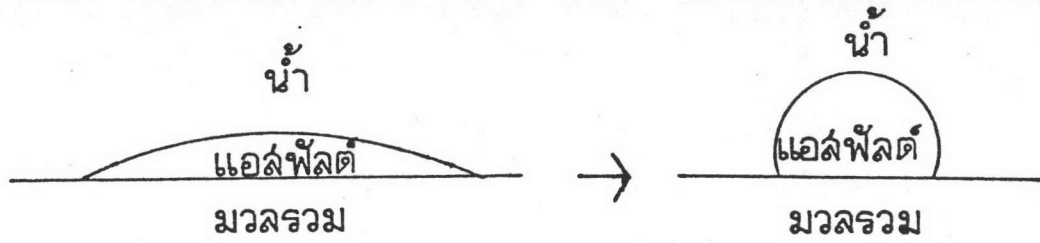
2.1.9 พลังงานการหลุดลอก (Stripping) Thelen (4) สรุปว่าเมื่อน้ำเข้าทำลายชั้นแอสฟัลต์เคลือบ (Asphalt Films) บนผิวมวลรวมจนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวมลดลง โดยพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมกับน้ำเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.3 พลังงานศักย์ในการหลุดลอก ซึ่งได้ปรับปรุงสมการของ Young จะได้ดังสมการ

$$\Delta F = \gamma_{SA} + \gamma_{AW} - \gamma_{SW} \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

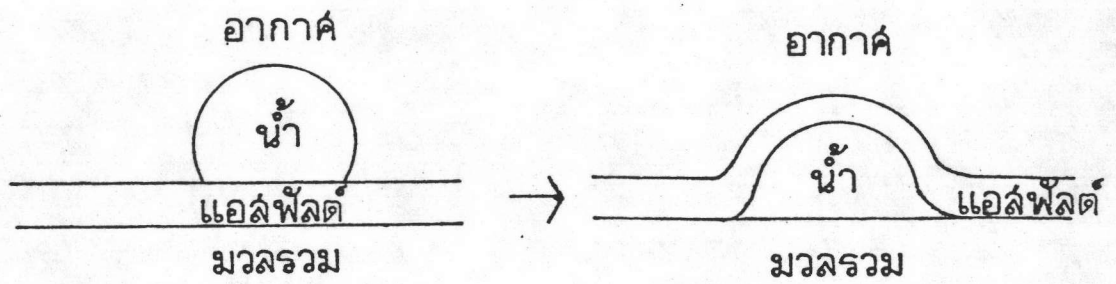
$\gamma_{SA}$  = แรงดึงระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial Tension) ของมวลรวมกับแอสฟัลต์

$\gamma_{AW}$  = แรงดึงระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial Tension) ของแอสฟัลต์กับน้ำ

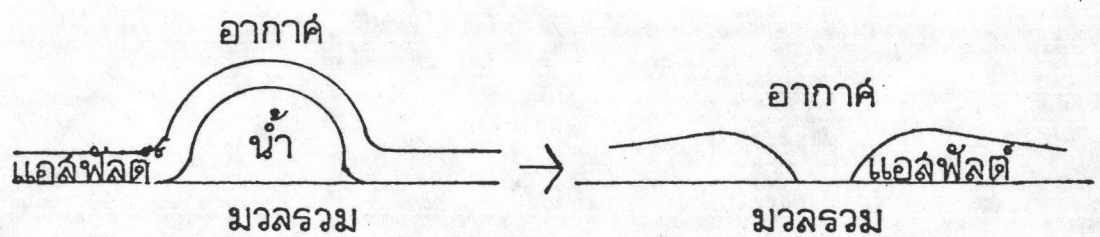
$\gamma_{SW}$  = แรงดึงระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial Tension) ของมวลรวมกับน้ำ



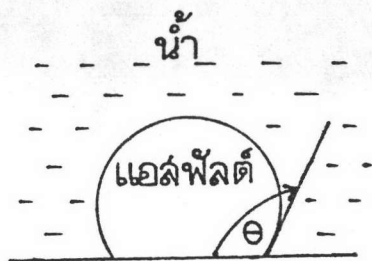
รูปที่ 2.3 การหลุดลอกปกติ



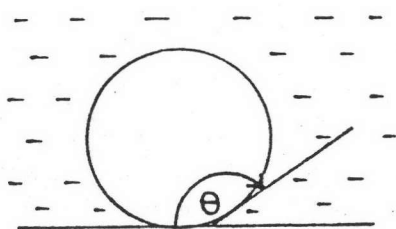
รูปที่ 2.4 รูปแบบการพองตัวของแอสฟิลต์



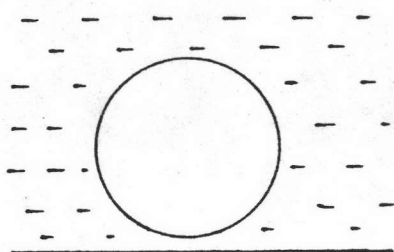
รูปที่ 2.5 รูปแบบการเกิดรอยบุ๋มบนผิวแอสฟิลต์



ก) เมื่อหยดแอสฟัลต์อยู่บนผิวมวลรวม  
มีมุมสัมผัสมากกว่า  $90^\circ$  และถูกน้ำ  
กระทำ



ข) น้ำจะเริ่มแทนที่ผิวสัมผัส แอสฟัลต์  
กับมวลรวม ทำให้มุมสัมผัสเพิ่ม  
ขึ้น



ค) ในที่สุด น้ำแทนที่ผิวสัมผัสแอสฟัลต์  
กับมวลรวม จนมุมสัมผัสเป็น  $180^\circ$   
เกิดการหลุดลอก

รูปที่ 2.6 กระบวนการหลุดลอก

ภายใต้สภาวะความดันปกติ แรงดึงระหว่างผิวมวลรวมกับน้ำน้อยมากเกือบเท่ากับศูนย์ เมื่อพิจารณาสมการของ Dupre งานในการเกาะยึด  $W_A = 2 \gamma_{Aw} (\cos\theta + 1)$  เมื่อมุมสัมผัส แอสฟัลต์มวลรวม  $\theta = 180^\circ$  งานในการเกาะยึด  $W_A = 0$  รูปที่ 2.6 แสดงการหลุดลอกของแอสฟัลต์ออกจากผิวมวลรวม

2.1.10 พฤติกรรมการบวมและการพองตัว(Pitting and Blistering) Thelen

(4) สรุปว่า พฤติกรรมนี้เกิดเมื่อแอสฟัลต์ที่เคลือบมวลรวมสามารถรั่วหรือหลุดลอก เนื่องจากสภาพอากาศ จากรูปที่ 2.4 เมื่อแสงแดดอ่อนๆ ล่องภายใต้หลังฝนตกซึ่งมีหยดน้ำบนผิวถนน แอสฟัลต์จะไหลจากหยดน้ำ กระจายตัว น้ำจะเข้าสู่ภายในเนื้อแอสฟัลต์ได้ และเมื่อแสงแดดร้อนขึ้นน้ำจะพองตัว(Blistering)และดันฟิล์มแอสฟัลต์เคลือบแตก เมื่อน้ำระเหย แอสฟัลต์จะเป็นรอยบวม(Pitting) จากรูปที่ 2.5 พลังงานสำหรับการพองตัว และการเกิดรอยบวม จะเป็นค่าแรงดึงระหว่างผิวสัมผัส

2.1.11 ผลของอุณหภูมิ (Temperature) ทั้งพลังงานอิสระที่ผิวและพลังงานผิว

เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute Temperature) แรงดึงผิวของของเหลวลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า Surface Entropy ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แสดงเป็นสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดึงผิว (S)

$$S = -d\gamma/dT \dots\dots\dots (2.19)$$

- เมื่อ S = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดึงผิว
- $\gamma$  = แรงดึงผิว
- T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

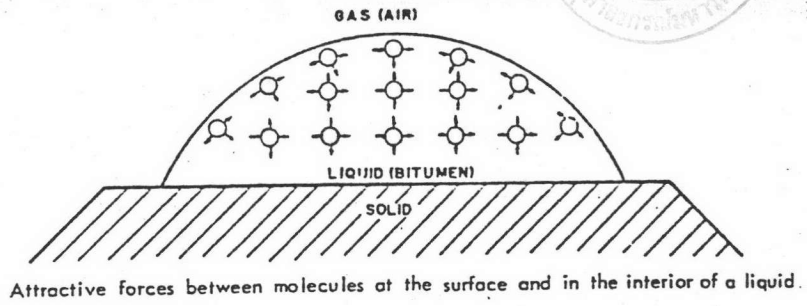
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการเกาะยึดของส่วนผสม (The Factors Influencing the Adhesion of Mictures)

Majidzadeh and Brovold (1) สรุปว่า ในการผสมแอสฟัลต์กับมวลรวม เพื่อให้

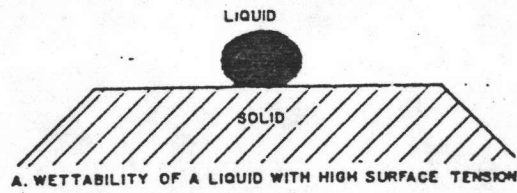
เข้ากันมากที่สุด และมวลรวมมีแอสฟัลต์เคลือบสมบูรณ์ การแผ่กระจายของแอสฟัลต์บนผิวมวลรวม เป็นปรากฏการณ์ทางเทอร์โมไดนามิก โดยต้องการแอสฟัลต์ที่มีความหนืดต่ำมวลรวมผิวสะอาด แห่ง มีระยะเวลาในการบ่มให้สารละลาย และน้ำระเหย และแอสฟัลต์แข็งตัว ทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์ กับมวลรวมแข็งแรงภายใต้สภาพแห้ง (Dry Condition) เมื่อเปิดการจราจรใหม่ ๆ ฝนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระทันหัน สภาพแวดล้อม เช่น น้ำ แสงสว่าง ความร้อน การจราจร ทำให้แอสฟัลต์ที่เคลือบผิวมวลรวมชำรุดเสียหายได้ง่าย มีผลทำให้เกิดการหลุดลอก หรือการถลอกของแอสฟัลต์ออกจากผิวมวลรวม การเกาะยึดที่ดีระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวมเกิดขึ้นได้เมื่อมีการควบคุมปัจจัย ที่มีผลต่อพฤติกรรมเกาะยึดของส่วนผสม

2.2.1 คุณสมบัติของแอสฟัลต์ (Asphalt Properties) ด้านการหดตัว (Rheological) และกายภาพเคมี (Physicochemical) มีผลต่อพฤติกรรมของผิวสัมผัสแอสฟัลต์กับมวลรวม แอสฟัลต์มีอัตราการเกาะตัวสูงมีโมเลกุลเรียงชิดกันมาก รับแรงดึงได้สูง และมีความเครียด (Strain) สูง ในขณะที่ชำรุด ความแข็งแรงและรูปแบบการเสียหายของแอสฟัลต์ขึ้นอยู่กับแรงดึงผิว ความหนืด ความหนาฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบ ส่วนประกอบทางเคมีและความหนา

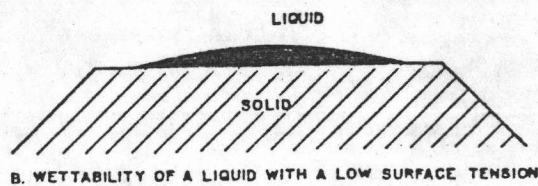
2.2.1.1 แรงดึงผิว (Surface Tension) และพลังงานอิสระที่ผิว (Surface Free Energy) เป็นตัวแปรที่ใช้หาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติระหว่างผิวแอสฟัลต์และอากาศเกี่ยวข้องกับการไม่สมดุลย์ของแรงที่ดึงดูดระหว่างโมเลกุลภายในและที่ผิว ดังรูปที่ 2.7 โมเลกุลภายในจะดึงดูดโมเลกุลที่ผิวมีทิศทางเข้าภายในทุกทาง ทำให้เกิดแรงดึงผิวมีขนาดเป็นแรงต่อความยาว dynes/cm. พลังงานที่ผิวหรือพลังงานอิสระที่ผิวเป็นค่างานต่อหน่วยพื้นที่  $\text{ergs/cm}^2$  ที่ขยายพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม งานนี้จะสะสมในผิวของวัสดุและจะเกิดขึ้นเมื่อมีการดึงดูดที่ผิวเกิดขึ้น พลังงานที่ผิวหรือแรงดึงผิวมีค่าตัวแลกกัน แต่หน่วยต่างกัน แรงดึงผิวมีผลต่อการเปียก (Wetting) หรือการแผ่กระจายตัว (Spreading) ของแอสฟัลต์บนผิวมวลรวม อัตราการแผ่กระจายขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล การเกาะติด และการเกาะยึด (Adhesion) เปรียบเทียบกับแรงดึงดูดโมเลกุล การเกาะติด (Adhesive) ภายในรูปที่ 2.8 แรงดึงผิวสูงแสดงความสัมพันธ์ถึงแรงดึงดูดโมเลกุลของการเกาะติดภายในสูง เป็นผลให้ความสามารถในการแผ่กระจายต่ำ ความสามารถในการแผ่กระจายเพิ่มขึ้นขณะที่แรงดึงผิวหรือพลังงานอิสระที่ผิวของการเกาะติดภายในลดลง



รูปที่ 2.7 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ผิว และภายในของเหลว



ก) แรงดึงผิวสูง



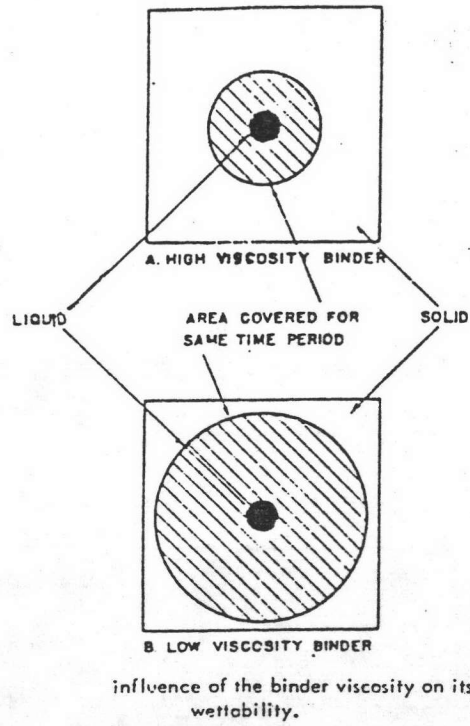
ข) แรงดึงผิวดำ

รูปที่ 2.8 ความสามารถในการเปียก หรือ การแผ่กระจาย ของของเหลว บนผิวของแข็ง

2.2.1.2 ความหนืด (Viscosity) จะแสดงความสัมพันธ์กับอุณหภูมิโดยแสดงถึงอัตราการเคลื่อนที่และขนาดแรงดึงดูดของโมเลกุลภายในแอสฟัลต์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลและแรงดึงผิวของแอสฟัลต์ลดลง เป็นผลทำให้ความหนืดต่ำจะให้อัตราการแผ่กระจายสูงกว่าแอสฟัลต์ซึ่งมีความหนืดสูง การเพิ่มอัตราการแผ่กระจายของแอสฟัลต์ในการเตรียมส่วนผสมแอสฟัลต์กับมวลรวม แอสฟัลต์ต้องมีอุณหภูมิสูง และความหนืดต่ำ ในทางตรงกันข้ามขณะใช้งานแอสฟัลต์ควรมีความหนืดสูง ส่วนผสมจะได้ทนต่อการหลุดลอกได้ดีกว่า แอสฟัลต์ซึ่งมีความหนืดต่ำกว่า รูปที่ 2.9 จะเห็นว่าความหนืดของแอสฟัลต์สูงจะมีพื้นที่การเคลือบมวลรวมน้อยในสภาพผิวและอุณหภูมิเหมือนกัน

2.2.1.3 ความหนาของฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบ (Film Thickness) มีผลต่อพฤติกรรมการหดตัว (Rheological) ของแอสฟัลต์กับการเกาะยึดกับมวลรวม ความแข็งแรงของแอสฟัลต์จะแปรเปลี่ยนตามความหนาของฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบ ความหนืด แรงเฉือนของแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ความหนาของฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบมวลรวมลดลงค่าแรงดึงจะเพิ่มขึ้นด้วย การเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบบาง ๆ โดยการจำกัดการไหล (Flow Restriction) การจัดเรียงตัวของโมเลกุล ลดช่องว่างและพองอากาศในแอสฟัลต์ ฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบบาง ๆ ทำให้เกิดการแตกเปราะ ฉีกขาด ที่ฟิล์มเกาะยึดได้ง่าย เมื่อฟิล์มแอสฟัลต์หนามากความเสียหายจะเกิดในเนื้อแอสฟัลต์เพราะการยึดตัวขาด

2.2.1.4 ส่วนประกอบและแหล่ง (Composition and Source) แอสฟัลต์ ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ที่มีส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติโมเลกุลต่างกัน โมเลกุลบางส่วนที่ให้พลังงานที่ผิวของแข็งตามต้องการ มีขั้วประจุ 2 ขั้ว (Dipoles) ที่อ่อนมาก หรือไม่มีขั้วประจุ (Nonpolar) โดยที่ศูนย์กลางเป็นประจุบวก และมีประจุลบไม่เท่ากัน Thomson (6) กล่าวว่า การแบ่งส่วนประกอบของแอสฟัลต์ได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับวิธีการแยกส่วนประกอบ แต่ส่วนประกอบหลักมี 2 ส่วน คือ Asphaltenes และ Maltenes โดยมีสัดส่วนประมาณ 1:40 ส่วนที่เป็นศูนย์กลางมีขั้วประจุโมเลกุลสูง ไม่ละลายในสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น Pentane หรือ Heptane เรียกว่า Asphaltenes มีส่วนประกอบของ Condensed Aromatic Hydrocarbon, Heteroaromatic Compound ของ ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน ใน Pyrole, Pyridine, Amine, Amide, Ketones, Phenols,



รูปที่ 2.9 ผลของความหนืดของแอสฟัลต์ ต่อความสามารถในการแผ่กระจาย



Carboxylic Acids และโลหะพวก Nickel ใน Porphyrin ส่วนที่เป็นสารละลายล้อมรอบ Asphaltenes เรียกว่า Maltenes ซึ่งมีส่วนประกอบของ Resin, Aromatic Hydrocarbon ที่มีหรือไม่มี Heteroatoms (first Acidaffins), Olefins, Alkenes (Second Acidaffins) Napthenes และ Paraffins (Saturates) แอสฟัลต์ส่วนใหญ่จะมีความอ่อนไหวต่อการหลุดลอก มีคุณสมบัติในการเกาะติดต่างกัน

2.2.1.5 ความทนทาน (Durability) เป็นคุณสมบัติภายหลังการใช้งาน สภาพแวดล้อมมีผลให้มีการเปลี่ยนแปลง ความเหนียว แรงดึงผิว ส่วนประกอบแอสฟัลต์ของ Asphaltenes ต่อ Maltenes ลดลง หรือมีการระเหยของ Maltenes ทำให้แอสฟัลต์แข็งตัว มีผลอย่างมาก ต่อความแข็งแรงของผิวสัมผัส เมื่อมีน้ำหนักกระทำอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ เนื้อแอสฟัลต์ จะแตกเปราะเสียหาย แต่ที่อุณหภูมิสูงและมีน้ำหนักกระทำอย่างช้า ๆ การไหลตัวเหนียว (Viscous Flow) มีมาก ทำให้เกิดการชำรุดเนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่าง หรือยึดตัวขาด

2.2.2 คุณสมบัติของมวลรวม (Aggregate Properties) ด้านเนื้อแร่ ทางกล และผิวของมวลรวม มีผลต่อการสัมผัส เกาะยึด และยึดหดตัวของรอยต่อมาก

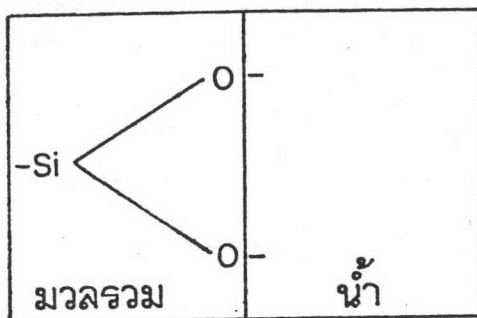
2.2.2.1 ส่วนประกอบเนื้อแร่ (Mineralogy Composition) เป็นส่วนสำคัญเบื้องต้นในการเกาะยึด มวลรวมจะมีประจุที่ผิวไม่สมดุลย์ มีผลให้แรงดึงผิวหรือพลังงานที่ผิวต่างกัน ผิวมวลรวมที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์ที่มีประจุตรงกันข้าม จะมีพลังงานในการเกาะติดแอสฟัลต์ โดยต้องการพลังงานในการเกาะติดให้มาก เมื่อน้ำซึ่งมีพลังงานที่ผิวสูงกว่าแอสฟัลต์ น้ำจะสามารถแทนที่ฟิล์มแอสฟัลต์เคลือบ (Film of Asphalts) ออกจากผิวมวลรวมได้ เรียกว่าการหลุดลอก จากพฤติกรรมนี้มวลรวมจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เปียกน้ำได้ยาก (Hydrophobic) และเปียกน้ำได้ง่าย (Hydrophilic) โดยมวลรวมประเภท Hydrophobic จะเปียกหรือยึดเกาะของเหลว ประเภทน้ำมันได้ดีกว่าน้ำหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Liophilic มวลรวมประเภทนี้จึงเคลือบ และยึดเกาะแอสฟัลต์ได้ดีกว่าน้ำ เพราะแอสฟัลต์ให้พลังงานแก่ผิวมวลรวมที่ต้องการได้สูงกว่า ในทางตรงกันข้ามมวลรวมประเภท Hydrophilic จะเปียกหรือยึดเกาะน้ำได้ดีกว่าแอสฟัลต์ เมื่อแยกประเภทมวลรวมตามเนื้อแร่ จะได้ 2 ประเภท คือ Acidic และ Basic

ก) มวลรวมประเภท Acidic จะมีปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{CO}_2$  เป็นสัดส่วนอยู่มาก จึงอาจเรียกมวลรวมประเภทนี้ว่า Siliceous ซึ่งเมื่อมีน้ำหรือความชื้นอยู่บนผิวมวลรวม จะเกิด Ionization ได้ประจุไฟฟ้าลบที่ผิวมวลรวม จากรูปที่ 2.10 มวลรวมประเภท Acidic เป็นประเภทที่เปียกน้ำได้ง่าย (Hydrophilic) จึงมีความสามารถในการเกาะยึดแอสฟัลต์ไม่ดี หรือหลุดลอกได้ง่าย ได้แก่ คิวอิท และแกรนิต

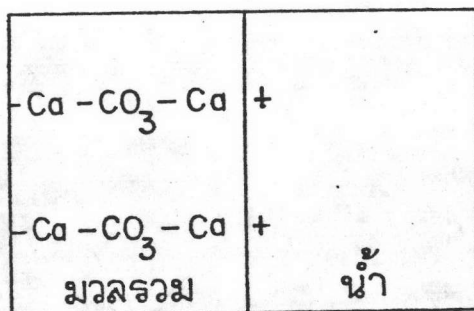
ข) มวลรวมประเภท Basic จะมีปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  ต่ำ แต่มีส่วนประกอบของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  และ  $\text{CaCO}_3$  เป็นสัดส่วนอยู่มาก จึงเรียกมวลรวมประเภทนี้ว่า Calcareous ซึ่งเมื่อมีน้ำหรือความชื้นอยู่บนผิวของมวลรวม จะเกิดประจุไฟฟ้าบวกปรากฏที่ผิวมวลรวม จากรูปที่ 2.11 มวลรวมประเภท Basic เป็นประเภทที่เปียกน้ำได้ยาก (Hydrophobic) จึงมีความสามารถในการเกาะยึดแอสฟัลต์ดีหรือหลุดลอกได้ยาก ได้แก่ หินปูน ดูตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.12 แสดงปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่จะใช้แบ่งประเภทมวลรวม Acidic และ Basic และตารางที่ 2.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ส่วนประกอบเนื้อแร่

2.2.2.2 ความหยาบของผิว (Surface Roughness) ลักษณะผิวของมวลรวมมีผลต่อการเกาะยึด และการแผ่กระจายของแอสฟัลต์ ความหยาบของผิวเป็นเหตุให้การแผ่กระจายของแอสฟัลต์ไม่ทั่วถึง เนื่องจากมีช่องว่างอากาศหรือน้ำในรูพรุน ซึ่งน้ำอาจจะสะสมในโพรงหิน และระเหยออกได้ดีเท่ากับการซึมจากภายนอกผ่านฟิล์มแอสฟัลต์เข้าไปได้ การเคลือบบนผิวหยาบจะสมบูรณ์ต้อง ใช้พลังงานสูงในการแผ่กระจายของแอสฟัลต์ แต่ความหยาบของผิวมวลรวมเชื่อว่าจะให้แรงยึดเกาะได้ดีกับแอสฟัลต์ เพราะการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสเป็นผลให้มีค่าความเค้น (Stress) ตรงผิวสัมผัสต่ำ เมื่อมีแรงกระทำตรงผิวสัมผัสเท่ากับผิวเรียบหรือต้านทานต่อแรงกระทำได้ดี

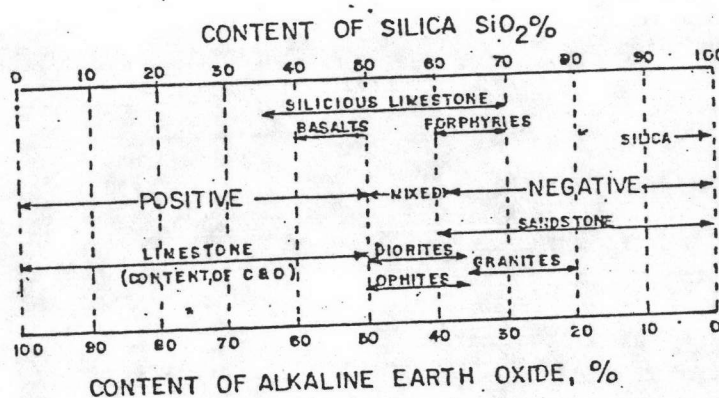
2.2.2.3 ความพรุน (Porosity) รูพรุน (Pores) โพรง (Crevices) และรูเล็ก ๆ (Capillaries) ที่ผิวมวลรวม เป็นผลให้แอสฟัลต์ซึมเข้าไปยึดติดในรูพรุน และก่อรูปต่อเนื่องช่วยการเกาะยึด เมื่อมีการให้ความร้อนเพื่อเตรียมการผสมแอสฟัลต์ น้ำในรูพรุนระเหยออกเหลืออากาศอยู่ ทำให้เกิดแรงดึงดูดในรูพรุน แอสฟัลต์สามารถเข้าสู่รูพรุนต่าง ๆ ได้ง่าย ในทางตรงกันข้ามถ้าแอสฟัลต์ไม่สามารถซึมเข้าสู่รูพรุนได้ เมื่อมีอากาศร้อนเป็นผลให้อากาศหรือ



รูปที่ 2.10 เมื่อมีความชื้นบนผิวมวลรวม Siliceous



รูปที่ 2.11 เมื่อมีความชื้นบนผิวมวลรวม Calcareous



Classification of aggregates (13)

รูปที่ 2.12 การแบ่งมวลรวมตามปริมาณ silica ( $SiO_2$ )

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทมวลรวม ตามปริมาณ SiO<sub>2</sub>

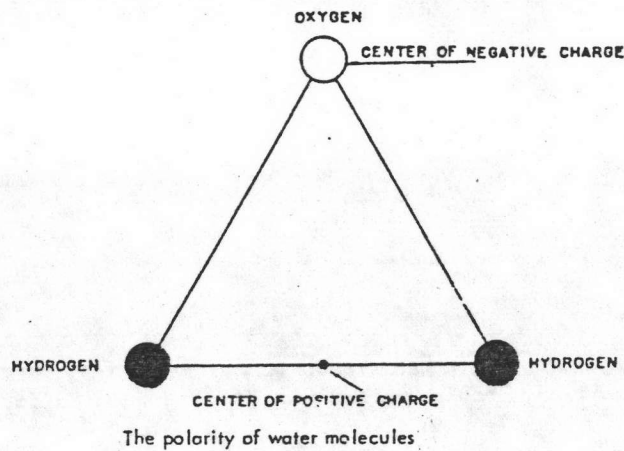
ACTIC CLASSIFICATION BASED ON SiO<sub>2</sub> CONTENT

Classification	Percentage SiO <sub>2</sub>	
	Knight	Kraus
Acidic rocks	66 or more	65 to 80
Intermediate rocks	55 to 66	52 to 65
Basic rocks	Less than 55	Less than 52
Ultra-basic rocks	No maximum agreed upon	-

ตารางที่ 2.2 เปอร์เซนต์เฉลี่ยส่วนประกอบเนื้อแร่ของมวลรวม

AVERAGE PERCENTAGE MINERALOGICAL COMPOSITION

Rock	Quartz	Orthoclase	Plagioclase	Augite	Hornblende	Biotite	Muscovite	Epidote	Rock Glass
Igneous Rocks									
Granite	30	41	8	-	-	3	3	1	-
Diorite	8	7	30	3	27	4	0.1	5	-
Gabbro	0.5	-	44	28	9	2	-	1	-
Diabase	-	-	44	46	-	-	-	-	2
Rhyolite	32	45	3	-	0.7	3	2	2	0.4
Trachyte	3	42	1	2	6	0.5	-	8	9
Andesite	0.6	-	48	14	3	-	-	3	13
Basalt	-	-	36	35	-	-	-	-	21
Metamorphic Rocks									
Quartzite	84	3	-	-	1	2	2	2	-
Feldspathic-quartzite	46	27	1	-	-	2	5	1	-
Hornblende-gneiss	10	16	15	3	45	3	1	2	-
Granite-gneiss	37	32	3	-	-	7	11	2	-
Biotite-schist	34	13	3	-	1	38	3	2	-
Mica-schist	37	16	1	-	-	13	26	2	-
Slate	29	4	-	-	-	-	55	2	-
Marble	3	0.2	0.2	-	-	-	-	Calcite = 96	-
Amphibolite	3	1	8	-	70	1	0.2	12	-
Sedimentary Rocks									
Sandstone	79	5	0.3	-	-	0.2	1	-	-
Feldspathic-sandstone	35	26	2	-	-	0.6	2	1	-
Calcareous-sandstone	46	3	2	-	-	-	-	Calcite = 42	-
Chert	93	-	-	-	-	-	-	Calcite = 1	-
Limestone	6	-	-	-	-	Dolomite = 8	-	Calcite = 83	-
Dolomite	5	-	-	-	-	Dolomite = 82	-	Calcite = 11	-



รูปที่ 2.13 ขั้วประจุโมเลกุลของน้ำ

น้ำในรูปพรุน เกิดการขยายตัวมาแทนที่การเกาะติดระหว่างผิวแอสฟัลต์กับมวลรวม ทำให้เกิดการหลุดลอกได้

2.2.2.4 สิ่งที่เกาะเคลือบผิว (Surface Coating) มวลรวมที่ใช้ในการก่อสร้าง บ่อยครั้งมีชั้นฝุ่นหรือความชื้นที่ถูกดูดซึมบนผิวมวลรวม จะขัดขวางหรือลดอัตราการกระจายตัว หรือเคลือบด้วยแอสฟัลต์ ทำให้เกิดแรงยึดเกาะไม่เพียงพอ ฉะนั้นมวลรวมที่สะอาดแห้ง จะช่วยให้มีการเกาะยึดที่ดีกับแอสฟัลต์

2.2.3 คุณสมบัติของน้ำ น้ำในรูปของเหลว และไอ เป็นสาเหตุสำคัญต่อความเสียหายในการเกาะยึดระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม น้ำในรูปของเหลวอาจเข้าไปในส่วนผสมแอสฟัลต์มวลรวมตามช่องว่างโดยผ่านรูเล็ก ๆ จำนวนมากบนแอสฟัลต์ หรือจากภายในรูปพรุนของผิวมวลรวมมาสู่ผิวสัมผัส ทำให้เกิดการหลุดลอกของแอสฟัลต์จากผิวมวลรวม ในส่วนผสมที่บดอัดดีซึ่งมีการชึมน้ำต่ำจะ ไม่มีปัญหาในการหลุดลอก แต่ในส่วนผสมแบบ Open Graded, Macadam และ Surface Treatment ที่มีน้ำไหลเข้าออกอยู่เสมอ น้ำเป็นของเหลวที่มีขั้วประจุ 2 ขั้ว (Dipole) ซึ่งมีประจุบวกตรงกลาง และมีประจุลบไม่สมดุลย์ ดังรูปที่ 2.13 ในสนามไฟฟ้าสถิตโมเลกุลของน้ำสามารถดึงดูดผิวของมวลรวม Acidic ได้เพียงพอกับประจุที่ผิวไม่สมดุลย์ และค่า pH ของน้ำเชื่อว่ามีผลสำคัญต่อการเกาะยึด Gzernski (7) พบว่าสารละลายที่มีค่า pH สูง มักเกาะได้ดีบนผิวมวลรวม Basic และ pH ต่ำจะเกาะอยู่บนผิวมวลรวม Acidic

2.3 กลวิธีในการเกาะยึด (Mechanisms of Adhesion) Rice (8) ได้สรุปทฤษฎีหลักง่าย ๆ ไว้ดังนี้

2.3.1 ทฤษฎีทางกล (Mechanical Theory) ลักษณะผิวการขัดกันทางกล (Mechanical Interlock) ของการเกาะติดกับมวลรวมเป็นข้อพิจารณาเบื้องต้น ผู้เสนอทฤษฎีนี้คือ McBain and Hopkins (9) กล่าวว่า การเกาะติดในรูปพรุน และความหยาบของผิว จะทำให้การขัดกันทางกล และการแผ่กระจายเคลือบที่สมบูรณ์สามารถให้แรงยึดเกาะ แข็งแรงกว่าผิวที่เรียบ อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ในรูปพรุนของผิวเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหาย ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับการเกาะยึดระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวมที่มีลักษณะผิวต่าง ๆ ซึ่งมีผลมาจากส่วนประกอบทางเนื้อแร่

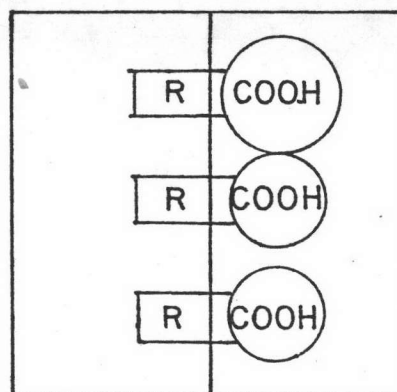
มีผลต่อการขัดกันทางกลต่างกัน ความหยาบและความขรุขระของผิวช่วยเพิ่มการเกาะยึด เพราะพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวมเพิ่มขึ้น แต่การเคลือบผิวหยาบกระทำได้ยากและที่แง่มุมของมวลรวมที่แหลมอาจมีปัญหาต่อการเกาะยึด เพราะฟิล์มแอสฟัลต์เคลือบที่บางจะอ่อนไหวต่อการหลุดลอกได้ง่าย ขนาดของหน้าผิวสัมผัส จุดสัมผัส ความพรุน ล้วนมีผลต่อการเกาะยึด

2.3.2 ทฤษฎีการจัดเรียงตัวของโมเลกุล (Molecular Orientation) เมื่อโมเลกุลของแอสฟัลต์มาสัมผัสกับผิวมวลรวมจะจัดเรียงตัวเพื่อให้มีพลังงานเพียงพอตามต้องการบนผิวมวลรวมเพื่อให้เกิดความจุสูงสุด โมเลกุลของแอสฟัลต์จะเป็นแบบไม่มีขั้วประจุ หรือมีประจุอย่างอ่อน แต่โมเลกุลของน้ำเป็นแบบประจุ 2 ขั้วที่แข็งแรง ทำให้น้ำมีพลังงานเกาะยึดกับประจุบนผิวมวลรวมได้เร็วและง่ายกว่าแอสฟัลต์ อย่างไรก็ตามโดยปราศจากน้ำ แอสฟัลต์ที่มีขั้วประจุจะจัดเรียงตัวบนผิวมวลรวมตามออรันในผิวมวลรวมในทิศทางของประจุเกิดการเกาะยึดที่ดีได้ ความหนาของชั้นโมเลกุลน้อยมากประมาณ 10 - 100 หน่วย Angstrom ทฤษฎีนี้ยังไม่มีผู้ยอมรับมากนัก เพราะมีผลการวิจัยน้อยมาก

2.3.3 ทฤษฎีปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reaction Theory) พิจารณาการเกาะยึดที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างส่วนประกอบของผิวมวลรวม และแอสฟัลต์ จากการที่แบ่งผิวมวลรวมตามส่วนประกอบเคมีเป็น Acidic และ Basic พบว่ามีการเกาะยึดแตกต่างกัน และสอดคล้องกับส่วนประกอบทางเคมีของแอสฟัลต์กับมวลรวม โดยมีการเกาะยึดเกิดในมวลรวมประเภท Basic ดีกว่า Acidic มวลรวมประเภท Basic จะมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ต่ำ และแอสฟัลต์จะประกอบด้วย Napthenic Acid หรือ R ซึ่งเป็น fatty chain ประเภท Hydrophobic และมี Carboxylic Acid Group - COOH เป็น Hydrophilic จะมีไฮโดรคาร์บอนเป็นโครงสร้าง เมื่อไปสัมผัสกับผิวมวลรวมประเภท Alkaline หรือ Basic ส่วนของ Carboxylic Acid จะถูกดูดซึมเข้าสู่ผิวมวลรวมเกิดการเกาะยึด จากรูปที่ 2.14 และเมื่อมีน้ำอยู่บนผิวมวลรวมโมเลกุลของกรดในแอสฟัลต์จะแตกตัวเป็นออรัน 2 ชนิด  $\text{R-COO}^-$  และ  $\text{H}^+$  จากรูปที่ 2.15 แต่ถ้าแอสฟัลต์ไปสัมผัสกับผิวมวลรวม Acidic ส่วนประกอบ Carboxylic Acid ในแอสฟัลต์จะขัดขวางการเกาะยึด

R	COOH
R	COOH
R	COOH

แอสพัลต์

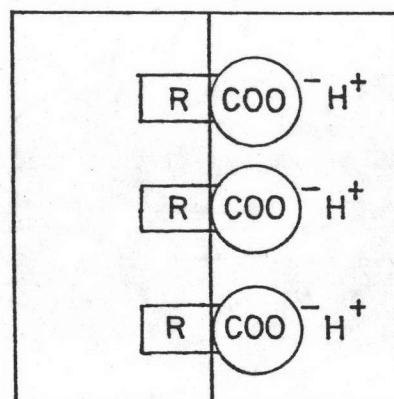


แอสพัลต์ มวลรวม

รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบทางเคมีของแอสพัลต์ กับการเกาะติด  
มวลรวม Basic ในสภาพแห้ง

R	$\text{COO}^- \text{H}^+$
R	$\text{COO}^- \text{H}^+$
R	$\text{COO}^- \text{H}^+$

แอสพัลต์



แอสพัลต์ มวลรวม

รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบทางเคมีของแอสพัลต์ กับการเกาะติด  
มวลรวม Basic ในสภาพชื้น

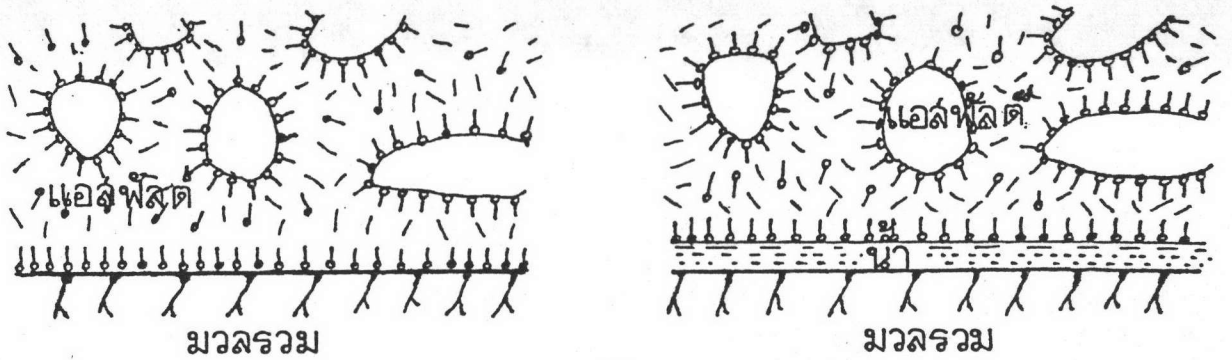
2.3.4 ทฤษฎีพลังงานระหว่างผิว (Theory of Interfacial Energy) เป็นแนวความคิดที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดในการพิจารณาการเกาะยึด ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางเทอร์โมไดนามิก (Thermodynamic) ที่สัมพันธ์กับพลังงานที่ผิวของมวลรวม การเคลือบหรือการแผ่กระจายของแอสฟัลต์บนผิวมวลรวมและการหลุดลอกของแอสฟัลต์จากผิวมวลรวมเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบ โดยผิวหน้าของมวลรวมจะมีแรงไม่สมดุลย์ เป็นผลให้แรงดึงผิวหรือพลังงานที่ผิวต่างกัน เมื่อมีแอสฟัลต์สัมผัสกับผิวมวลรวม แอสฟัลต์จะให้พลังงานที่ผิวมวลรวมตามต้องการ จนทำให้พลังงานที่ผิวหน้าเดิมของมวลรวมลดลง เกิดการแผ่กระจายของแอสฟัลต์บนผิวหน้ามวลรวมซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแอสฟัลต์กับมวลรวม ทฤษฎีนี้ยังให้ความสำคัญของโครงสร้างโมเลกุล ชีวประจุ และการดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแอสฟัลต์ โดยแอสฟัลต์ที่มีชีวประจุจะ เกาะยึดผิวหน้ามวลรวมได้ดีกว่าแอสฟัลต์ไม่มีชีวประจุ และน้ำมันพลังงานและชีวประจุที่แข็งแรงกว่าแอสฟัลต์ จึงเกาะติดกับผิวมวลรวมได้ดีกว่าแอสฟัลต์ แนวความคิดนี้ใช้อธิบายการหลุดลอกของแอสฟัลต์จากผิวมวลรวมโดยน้ำ จากรูปที่ 2.16 ทฤษฎีนี้ยังช่วยสนับสนุนทฤษฎีทางกลซึ่งกล่าวว่า ความหยابหรือรูพรุนของมวลรวมจะมีการเกาะยึดกับแอสฟัลต์ได้ดีกว่ามวลรวมผิวเรียบ เพราะมวลรวมที่ผิวขรุขระ หยاب และมีรูพรุน จะมีพลังงานระหว่างผิวมากกว่า

## 2.4 การชำรุดของแรงยึดเกาะในส่วนผสม (Failure of Asphalt Aggregate Bond)

Majidzadeh and Brovold (1) สรุปว่าการชำรุดเสียหายของส่วนผสมที่ขาดแรงยึดเกาะ หรือขาดความต้านทานในแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) สามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ การชำรุดที่แรงยึดเหนี่ยวในเนื้อแอสฟัลต์ (Cohesion Failure) และการชำรุดที่การเกาะยึด (Adhesion Failure)

2.4.1 การชำรุดที่แรงยึดเหนี่ยว (Cohesion Failure) จะเกิดขึ้นที่ระนาบหรือภายในเนื้อแอสฟัลต์จนเกิดการแยกตัว จนมวลรวมหลุดร่อน แต่มีแอสฟัลต์เคลือบอยู่เพราะขาดแรงยึดเกาะติด (Adhesive Bond) ในเนื้อแอสฟัลต์เอง ซึ่งต้องวิเคราะห์คุณสมบัติการหดตัว (Rheological) ของแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นในส่วนผสมที่ใช้มวลรวมสะอาด และแห้ง



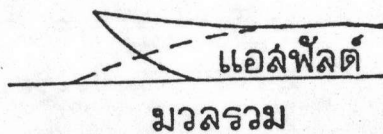


- โมเลกุลมีขั้วประจุ
- โโมเลกุลไม่มีขั้วประจุ
- Asphaltene

รูปที่ 2.16 การดูดซึมขั้วประจุโมเลกุล ของแอสฟัลต์กับมวลรวม



รูปที่ 2.17 การหลุดลอกของแอสฟัลต์แบบม้วนกลับ (Roll Back)



รูปที่ 2.18 การหลุดลอกของแอสฟัลต์แบบยกขึ้น (Lift Off)

2.4.2 การชำรุดที่การเกาะยึด (Adhesion Failure) จะเกิดที่ระนาบผิวสัมผัสของแอสฟัลต์กับมวลรวม เมื่อมวลรวมมีความชื้นและสภาพแวดล้อมไม่ปกติ เป็นผลทำให้แอสฟัลต์หลุดลอกออกจากผิวมวลรวม โดยมีปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ น้ำ การจราจร อุณหภูมิ ปริมาณและความหนืดของแอสฟัลต์ ช่องว่างในส่วนผสมสูง ความไม่สะอาดของมวลรวม การเคลือบ ส่วนประกอบและลักษณะผิวของมวลรวม การเกิดแรงเค้นภายในช่องว่างเป็นผลให้เกิดการแทนที่ (Displacement) ของน้ำ และเกิดการหลุดลอก (Stripping) หรือถอดถอน (Detachment) ของแอสฟัลต์ออกจากผิวมวลรวม

ScanRoad (10) สรุปว่าการเกิดการหลุดลอกในผิวทาง เมื่อมีน้ำกระทำเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ

ก) จะเริ่มขึ้นที่ชั้นล่างสุด ถ้าวัสดุพื้นทางเปียกหรือมีน้ำขึ้นมาจากชั้นล่าง ๆ (Capillary water) เป็นผลให้ความสามารถในการรับแรงกด (Bearing Capacity) ลดลง เมื่อมีการจราจรกระทำเรื่อย ๆ ผิวทางเริ่มแตก น้ำซึมเข้าไปเป็นผลให้เกิดการหลุดลอก และผิวทางเริ่มหลุดร่อนเรื่อย ๆ การหลุดลอกชนิดนี้ยากแก่การตรวจสอบ ความเสียหายอาจจะเกิดจากสาเหตุอื่น ๆ เช่น การอ่อนตัวของวัสดุพื้นทาง หรือร่องพื้นทาง เพราะการระบายน้ำไม่ทัน ทำให้น้ำไหลเข้าออกตามช่องว่างของส่วนผสมได้สะดวก

ข) จะเกิดขึ้นที่ชั้นผิวทางที่อึดตัวเพราะล้อของยานช่วยกดอัดน้ำลงไป ในช่องว่างผิวทางตรงบริเวณหน้าล้อ และจะถูกดูดออกด้านหลังล้อด้วยความดันต่าง ๆ กัน จนทำให้เกิดการขบวนการหลุดลอก ส่วนผสมละเอียดจะหลุดออกจากมวลรวมหยาบและผิวทางจะดูดซึมน้ำได้ง่าย เกิดการเสียหายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.5 กลวิธีในการหลุดลอก (Mechanisms of Stripping) หรือการชำรุดของการเกาะยึด Majidzadeh and Brovold (1) สรุปไว้ 4 ทฤษฎี คือ

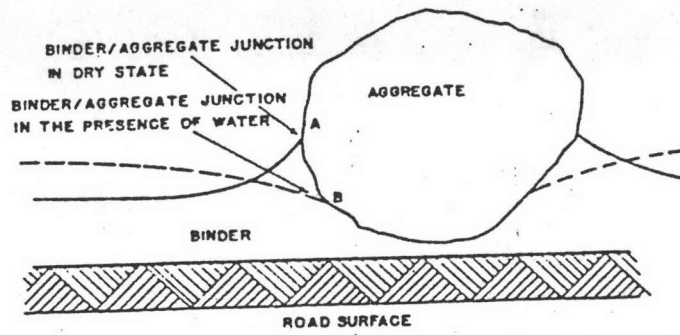
2.5.1 ทฤษฎีการแทนที่ (Displacement Concept) โดยน้ำแทนที่ผิวสัมผัสแอสฟัลต์กับมวลรวมจนเกิดการหลุดลอกของแอสฟัลต์ออกจากผิวมวลรวม พิจารณาความสัมพันธ์ของมวลรวม

ที่วางตัวในฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบไม่ต่อเนื่อง เช่น ผิวทางเซอร์เฟสทรีสเมนต์, แมคคาตัม ดูรูปที่ 2.19 ที่ จุด A ในแผนภาพแสดงความสมดุลย์ของตำแหน่งสัมผัสของระบบแอสฟัลต์มวลรวม ในสภาพแห้งเมื่อน้ำกระทำ จุด A จะเกิดแรงไม่สมดุลย์ ต้องเลื่อนไปเป็นจุด B เพื่อให้เกิดสภาพสมดุลย์ของแรง การทดลองในสนามและห้องปฏิบัติการพบว่าการเลื่อนตัวของแอสฟัลต์มีผลต่อการชำระของทางจำนวนมาก เกิดการหลุดลอก การแทนที่ผิวสัมผัสของแอสฟัลต์จากผิวมวลรวม ขึ้นอยู่กับความหนืดของแอสฟัลต์ ถ้าแอสฟัลต์มีความหนืดสูง ในขณะที่ใช้งานพบว่ามีความต้านทานต่อการแทนที่สูงกว่า ฉะนั้นส่วนผสมเมื่อถูกฝนหรือน้ำ ก่อนที่จะมีความหนืดตามต้องการในการเกาะยึด จะทำให้เกิดการหลุดลอก และการเกาะยึดเสียหายสูงกว่า

2.5.2 ทฤษฎีการถอดถอน (Detachment Theory) พิจารณากรณีส่วนผสมแอสฟัลต์เคลือบมวลรวมแต่ละก้อนอย่างต่อเนื่อง แต่ไม่มีแรงยึดเกาะเพียงพอ เกิดจากน้ำเข้าแทนที่ผิวสัมผัสระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวมทำให้แอสฟัลต์ไม่เกาะติดกับผิวมวลรวมโดยตรง จึงไม่มีพลังงานระหว่างผิว ตามกฎของเทอร์โมไดนามิก โดยน้ำมาจากทั้งภายใน และภายนอก มวลรวม ได้แก่ การหมุนเวียนของอากาศชื้นผ่านส่วนผสม น้ำฝนน้ำท่วมขังโดยตรง และน้ำที่อยู่ในรูพรุนของมวลรวม เมื่อเกิดความเค้นและการหดตัวของแอสฟัลต์จะเกิดแรงดึงสูงอย่างรวดเร็วตรงผิวสัมผัส ทำให้เกิดการชำระของฟิล์มแอสฟัลต์

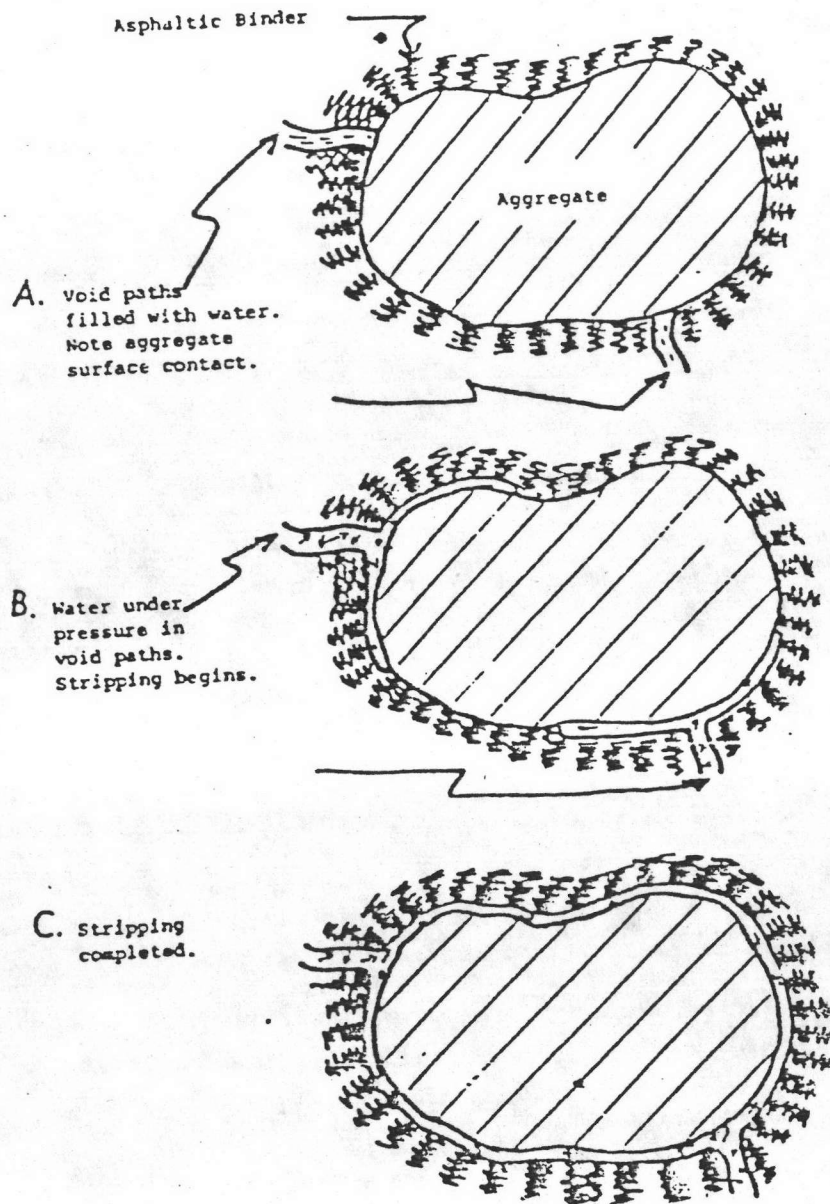
2.5.3 ทฤษฎีการฉีกขาดของฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบ (Film Rupture Theory) ในส่วนผสมที่มีการเคลือบสมบูรณ์ แต่ความหนาไม่สม่ำเสมอ การหลุดลอกที่สังเกตเห็นได้ ไม่สามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีก่อน ๆ การชำระของฟิล์มแอสฟัลต์เคลือบจะเกิดที่ขอบมุมมวลรวมที่แหลมที่มีฟิล์มแอสฟัลต์เคลือบบางที่สุด การชำระเริ่มด้วยความเค้น (Stress) ที่เกิดจากการเคลื่อนไหวและการนวดของล้อรถยนต์ ทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์เคลือบที่บางเกิดการฉีกฉีกขาด น้ำสามารถเข้าไปแทนที่แอสฟัลต์บนผิวมวลรวมได้ง่าย

2.5.4 ทฤษฎีความดันโพรง (Pore Pressure Theory) น้ำที่กระทำในส่วนผสมเป็นปัญหายุ่งยากที่ทฤษฎีหนึ่งทฤษฎีใดจะอธิบายได้เพียงพอ สาเหตุหนึ่งแห่งการเสียหายคือจากความดันของน้ำภายในโพรง หรือช่องว่างส่วนผสม โดยเฉพาะชั้นพื้นทางแอสฟัลต์ที่มีปริมาณช่องว่างสูง น้ำอาจจะหมุนเวียนอิสระในช่องว่างโดยความเค้น (Stress) ที่เกิดจากขยวดยาน



Retraction of the binder/water interface over the aggregate surface in the presence of water.

รูปที่ 2.19 การร่นตัวของจุดสัมผัสเม็ด แอสฟัลต์-มวลรวม เมื่อมีน้ำกระทำ



รูปที่ 2.20 การเกิดความดันโพรงในส่วนผสม

I 10302153.

จะอัดและดูดน้ำหรือมีการระบายของน้ำออกได้ช้า เกิดความดันของน้ำเข้าออกแทรกเข้าไปตามรอยต่อผิวสัมผัสระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม ทำให้เกิดการหลุดลอกในที่สุด รูปที่ 2.20

2.6 สารผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement Additives) ซึ่ง Haas et al (11) ได้รวบรวมสรุปไว้ดังนี้

2.6.1 คำจำกัดความ สารผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์คือวัสดุซึ่งใช้เติมและ/หรือผสมกับแอสฟัลต์ก่อนกระบวนการผสมหรือระหว่างกระบวนการผสม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ และ/หรือพฤติกรรมการใช้งานของแอสฟัลต์ และ/หรือผสมกับแอสฟัลต์ที่ใช้งานแล้วในกระบวนการหมุนเวียน (Recycling) ส่วนผสมเก่ามาใช้งานอีก เพื่อปรับปรุงหรือทำให้คุณสมบัติของแอสฟัลต์ใช้แล้วมีสภาพเหมือนแรกใช้งานอีกครั้ง สารเพิ่มขยาย (Extender) ในแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นสารผสมหรือเปลี่ยนส่วนประกอบทางเคมีของแอสฟัลต์บางส่วน และอาจมีผลช่วยปรับปรุงพฤติกรรมหรือประหยัดกว่า

2.6.1.1 ประโยชน์ในการเลือกใช้สารผสม (Additives) หรือสารเพิ่มขยาย (Extender)

- ก) เพื่อแก้ไขหรือบรรเทาปัญหาของผิวทาง
- ข) เพื่อให้ได้ประโยชน์ด้านการประหยัด รักษาสภาพแวดล้อม พลังงาน การนำไปใช้งาน และพฤติกรรมการใช้งาน

2.6.1.2 ข้อพิจารณาการเลือกใช้สารผสม ต้องสัมพันธ์กับทางเลือกที่จะแก้ปัญหา

- ก) สาเหตุที่เป็นไปได้ที่จะใช้สารผสมแก้ปัญหาได้หรือไม่ หรืออาจใช้วิธีการอื่นควบคุมที่ดีกว่าในการผสม การออกแบบ การก่อสร้าง
- ข) สารผสมเพียงควบคุมปัญหาหรือไม่ หรืออีกนัยหนึ่งมีประสิทธิภาพคุ้มค่าเพียงไรในการนำมาใช้

2.6.2 การแก้ไขปัญหาลึกของผิวทางแอสฟัลต์ด้วยสารผสม สารผสมอาจช่วยแก้ไขปัญหของผิวทางแอสฟัลต์ได้ เมื่อไม่สามารถใช้ทางเลือกอื่นในการแก้ไข การเลือกใช้สารผสม

ที่เหมาะสมจึงต้องเข้าใจปัญหาก่อนสรุปปัญหาหลักของผิวทางแอสฟัลต์ได้แก่

2.6.2.1 การหลุดลอก (Stripping) เกิดจากการแทนที่ของชั้นแอสฟัลต์ เคลือบบนผิวมวลรวมโดยน้ำ และเป็นปัญหาที่ซับซ้อนในการหาสาเหตุ กลวิธี และประเมิน ประสิทธิภาพของสารผสม นอกจากแอสฟัลต์และมวลรวมแล้ว ปริมาณช่องว่าง ลักษณะส่วนผสม น้ำและ อุณหภูมิ ล้วนมีผลต่ออัตราการหลุดลอก การหลุดลอกประกอบด้วย

ก) การแตกแยกและหลุดตัวของมวลรวมผิวทาง (Surface Ravelling)

ข) การหลุดลอกของแอสฟัลต์ ออกจากผิวมวลรวมที่ชั้นล่าง ๆ ของผิวทาง

ค) ความไม่มีเสถียรภาพ หรือส่วนผสมเปื่อยยุ่ย (Mushy) เนื่องจากการรวมตัวของแอสฟัลต์ที่หลุดลอก กับน้ำ

2.6.2.2 การเกิดร่องล้อ (Rutting) เป็นปัญหาสำคัญในกรณีที่มีปริมาณจราจรสูง โดยเฉพาะรถบรรทุกหนัก สาเหตุมาจากการออกแบบส่วนผสมและโครงสร้าง หรือแอสฟัลต์อ่อนตัวเกินไป เพราะแอสฟัลต์ที่อ่อนนุ่มเหมาะกับการใช้ที่อุณหภูมิต่ำต้านทานการแตกร้าว แต่มีความแกร่ง (Stiffness) ต่ำที่อุณหภูมิสูง แม้จะมีการออกแบบส่วนผสมที่ดี

2.6.2.3 การแข็งตัวของแอสฟัลต์ (Hardening) เป็นปัญหาที่ขึ้นอยู่กับ การออกแบบส่วนผสมและการก่อสร้างที่ใช้อุณหภูมิสูงเกินไปในกระบวนการผสม ทำให้มีปริมาณ ช่องว่างสูงเกินไป การแข็งตัวเกินไปของแอสฟัลต์จะทำให้ส่วนผสมเปราะ และเกิดการแตกร้าว

2.6.2.4 การเข้มนของแอสฟัลต์ (Flushing) เป็นปัญหาของการออกแบบ ส่วนผสมและการก่อสร้าง ความชื้นเหลวของแอสฟัลต์ที่เลือกใช้ต้องสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และสภาพ การจราจรหนักที่แอสฟัลต์ต้องใช้งาน

2.6.2.5 การแตกร้าวเนื่องจากพื้นทางชั้นล่าง (Reflection Cracks) ในการปูผิวทางใหม่บนผิวทางเดิมที่มีรอยแตกร้าวอยู่แล้วหรือแตกร้าวเพราะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ตารางที่ 2.3 ปัญหาหลักของผิวทางแอสฟัลต์ กับทางเลือกในการใช้สารผสม

ชนิดของปัญหา	ชนิดของสารผสมที่ใช้	การใช้ที่เหมาะสม
การหลุดลอก (Stripping)	สารต้านการหลุดลอก (Antistripping Agents)	ควบคุมปริมาณช่องว่าง จะได้ผลดีมาก
การแตกร้าวเนื่องจาก อุณหภูมิ (Thermal Cracking)	Sulphur	ใช้แอสฟัลต์ที่อ่อนตัวกว่า หรือ แอสฟัลต์ที่อ่อนไหวต่ออุณหภูมิต่ำ
การเกิดร่องล้อ (Rutting)	Sulphur, Polymers	การเลือกใช้วัสดุ และการ ออกแบบส่วนผสม ช่วยแก้ไข ปัญหาได้
การแข็งตัวของแอสฟัลต์ (Hardening of Binder)	สารต้านการเปลี่ยนแปลง ทางเคมี (Anti-Oxidants Agents)	ควบคุมการผลิตและปริมาณ ช่องว่าง
การเขี่ยม (Flushing)	ไม่สามารถแก้ปัญหาได้โดยตรง	ควบคุมการออกแบบส่วนผสม
การแยกตัวของมวลรวม (Segregation)	ยังไม่มีการใช้	การปรับปรุงออกแบบโครงสร้าง อาจช่วยได้
การแตกร้าวเพราะการ ปูผิวทางใหม่บนผิวทาง เดิม (Reflection cracks)	Rubber Asphalt, Fabrics, Polymers	ไม่นิยมใช้เพราะยังไม่ทราบ ประสิทธิภาพ
เพื่อให้ได้ความชื้นเหลือ ของแอสฟัลต์ที่นำมาใช้ อีกในชบวนการหมุนเวียน ส่วนผสมใช้แล้ว (Recycled Mixed)	Rejuvenating Agents	แอสฟัลต์อ่อนตัวเพียงพอใน การผสมมวลรวมเดิม

ในการเลือกใช้ชนิดของสารผสมจะแตกต่างกันไปตามปัญหาที่ต้องแก้ไข มีการวิจัยสรุปแนะนำชนิดของสารผสม ที่สามารถแก้ไขปัญหาละเอียดไว้ในตารางที่ 2.3

2.6.3 ประเภทของสารผสมที่ใช้แก้ไขปัญหา และได้มีการศึกษาวิจัยกันอยู่ทั่วไป ได้แก่

ก) Antioxidants Agents ได้แก่ Dialkyldithiocarbonate

ข) Anti-Stripping Agents

- Cationic Surfactants

- Iron Napthenate

- Hydrated Lime

- Silanes และอื่น ๆ

ค) Carbon Black

ง) Foam Suppresants ได้แก่ Silicone

จ) Polymers

- Latex เช่น Neoprene, Styrene-Butadiene

- เศษยางรถยนต์เก่า

- เศษยางแห้งจาก Latex

- พลาสติกซึ่งมีส่วนประกอบมาจาก Polyethylene และ Polypropylene

- Chemcrete

ฉ) Recyling Agents ได้แก่ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่มีปริมาณ

ไฮโดรคาร์บอนสูง

ช) Extenders ได้แก่ Sulphur

2.6.4 สารผสมช่วยการเกาะยึด (Adhesion Promoting Agents) หรือ สารปรับปรุงการเกาะยึด (Adhesion Improving Additives) หรือสารต้านการหลุดลอก (Anti Stripping Agents) ในส่วนผสมแอสฟัลต์กับมวลรวมปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งคือ ความเสียหาย เนื่องจากการขาดแรงยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม หรือการหลุดลอกของแอสฟัลต์ออกจากผิวมวลรวม เพื่อแก้ไขปัญหาละเอียดและปรับปรุงพฤติกรรมการใช้งานให้ดีขึ้นมีวิธีการ



มากมายในการควบคุมการหลุดลอก การใช้สารผสมเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไข้ปัญหา

2.6.4.1 วิธีการควบคุมการหลุดลอกหรือช่วยการเกาะยึด Divito and Morris (12) กล่าวว่ามึหลายวิธี คือ

- ก) การผสมปูนขาวหรือซีเมนต์ปริมาณเล็กน้อยลงในมวลรวม หรือใช้ในรูปแบบน้ำปูนขาว น้ำปูน เคลือบผิวมวลรวม ก่อนกระบวนการผสม
- ข) การเคลือบมวลรวมด้วยน้ำมันหล่อลื่น น้ำมัน แอสฟัลต์ ก่อนกระบวนการผสม
- ค) การผสมส่วนละเอียตตามธรรมชาติ
- ง) หลีกเลี้ยงการใช้มวลรวมที่เปียกน้ำได้ง่าย (Hydrophilic)
- จ) ล้าง ร่อนแยกทั้ง หรือผสมมวลรวมให้สะอาด
- ฉ) ผสมสารเคมีต้านการหลุดลอก

Majidzadeh and Brovold (1) สรุปว่าการป้องกันการหลุดลอก และปรับปรุงการเกาะยึดมี 2 แนวทาง แนวทางแรกผิวของมวลรวมถูกเคลือบหรือผสมด้วยสารที่เหมาะสม เช่น น้ำปูน, น้ำมันสารเคมี และส่วนละเอียต ฯลฯ ที่จะเปลี่ยนขั้วประจุไฟฟ้าที่ผิวมวลรวม และ/หรือ ลดพลังงานที่ผิวของมวลรวม และ/หรือเปลี่ยนส่วนประกอบทางเคมีของผิวมวลรวมจากประเภท Hydrophilic ให้เป็น Hydrophobic แนวทางที่สอง โดยใช้สารผสมลงในแอสฟัลต์เพื่อลดแรงดึงผิวของแอสฟัลต์ และให้แอสฟัลต์มีขั้วประจุตรงกันข้ามกับผิวมวลรวมหรือทำปฏิกิริยากับผิวมวลรวม โดยมีโมเลกุลการเกาะยึดที่ยาวปลายด้านหนึ่งมีขั้วประจุอีกด้านไม่มีขั้วประจุ ลักษณะเดียวกับแอสฟัลต์

2.6.4.2 ข้อพิจารณาในการเลือกใช้สารผสมช่วยการเกาะยึด ขึ้นอยู่กับชนิดของแอสฟัลต์ ปริมาณแอสฟัลต์ ลักษณะทางกายภาพเคมีของมวลรวม และสภาพแวดล้อมในการใช้งาน เช่น อุณหภูมิ น้ำ การจราจร ข้อกำหนดที่ต้องการของสารผสมช่วยการเกาะยึด คือ

- ก) สารผสมต้องมีประสิทธิภาพที่ปริมาณเล็กน้อย
  - ข) ประหยัด
  - ค) ให้การเกาะยึดที่ต้านทานการกระทำของน้ำ โดยธรรมชาติ
- น้ำจะมีพลังงานสูงกว่าแอสฟัลต์ จึงสามารถแทนที่ผิวสัมผัสการเคลือบของแอสฟัลต์ออกจากผิวมวล



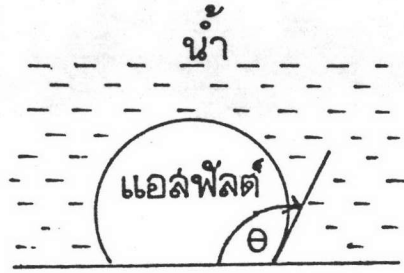
รวมที่มีประจุลบได้ง่าย แต่สารผสมช่วยการเกาะยึดบางชนิดช่วยให้แอสฟัลต์มีความสามารถในการแผ่กระจายและเคลือบเกาะยึดมวลรวมแห้งได้ดี แม้จะมีน้ำมากกระทำเพื่อแทนที่ และสารผสมช่วยการเกาะยึดบางชนิดยังคงช่วยให้แอสฟัลต์รักษาสภาพการเคลือบ มีมุมสัมผัสระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวมไม่เปลี่ยนแปลง เรียกว่า Passive Adhesion และสารผสมช่วยการเกาะยึดบางชนิดช่วยให้แอสฟัลต์สามารถแผ่กระจายเคลือบเกาะยึดบนผิวมวลรวมเปียกชื้นได้ โดยลดมุมสัมผัสระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม เรียกว่า Active Adhesion ดูรูปที่ 2.21

ง) ไม่มีผลที่ไม่พึงประสงค์ต่อแอสฟัลต์ การใช้งาน สภาพแวดล้อม และอื่น ๆ ประการสำคัญต้องมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี ไม่สูญเสียประสิทธิภาพเมื่อใช้ในอุณหภูมิสูง หรือการใช้งานเป็นเวลานาน ๆ หรือแยกตัวออกจากแอสฟัลต์ขณะให้ความร้อน หรือไปทำปฏิกิริยากับบางส่วนของแอสฟัลต์ลดประสิทธิภาพในการเกาะยึดลง

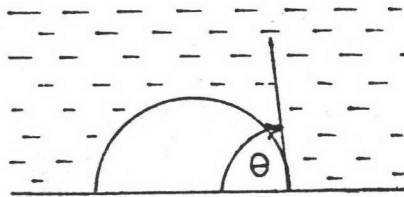
2.6.5 ชนิดของสารผสมช่วยการเกาะยึด Zvejnieks (13) กล่าวว่ามีการนำสารเคมีมาใช้แพร่หลายในยุโรป โดยเฉพาะประเทศอังกฤษ สวีเดน เพื่อไขปัญหาการหลุดลอก และมีการปรับปรุงประสิทธิภาพเรื่อยมา แม้ว่าจะทราบส่วนประกอบทางเคมี การประเมินผลยังมีความจำเป็นอยู่มาก สารผสมช่วยการเกาะยึดที่ผสมกับแอสฟัลต์โดยตรง ที่นิยมมักเป็นพวก Fatty Amines, Primary Fatty Amines, Fatty Amino Amides, Imidazolines, Fatty Diamines, Fatty Acids, Fatty Acid Amine, Metal Soaps, Alkynolamine, Fatty Esters, Secondary and Tertiary Fatty Amines, Resin Amines, Quarternary Ammonium Compounds, Fatty Alcohols และ Silicones ซึ่ง Majidzadeh and Brovold(1) ได้สรุปสารผสมช่วยการเกาะยึด ที่ได้มีการวิจัยไว้ในต่างประเทศ ดูตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สารผสมด้านการหลุดลอกที่ใช้ในส่วนผสมแอสฟัลต์

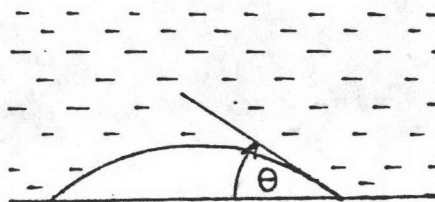
สารด้านการหลุดลอก	หมายเหตุ
1. ส่วนละเอียด ปูนขาว ซีเมนต์ ประมาณ 1 - 2 % โดยน้ำหนัก	ปรับปรุงการเกาะยึดมวลรวมชั้นได้ดี
2. กรด (Acid)	ชนิดและปริมาณไม่แน่ชัด
3. วัสดุที่มีชื่อประจุ เช่น กรดอินทรีย์ หรือ แอลกอฮอล์	ผสมกับแอสฟัลต์
4. Surface Active Chemicals เช่น สบู่ แคลเซียม ตะกั่ว เหล็ก	ลดพลังงานระหว่างผิว
5. Cationic Surface Active Agents	ถูกดูดซึมระหว่างผิวสัมผัส
6. Cationic Cetyl Pyridinium Bromide	การทดลองในห้องทดลองดี
7. Organic Amines	เหมาะกับผิวเซอร์เฟสทรีสเมนต์
8. Amines, Diamines ที่มีลูกโซ่ ไฮโดรคาร์บอนยาว	มีคุณภาพดีสูงสุดที่ 1.5%
9. Road Tar, 10 % โดยน้ำหนัก	ปรับปรุงเล็กน้อย
10. Oil หรือ Soot	ยังเป็นปัญหา
11. Fly Ash	ยังเป็นปัญหา
12. เคลือบผิวมวลรวมด้วย Silicone หรือสารละลาย Metal Salt น้ำมันดีเซล, Oleic Acid, Nepthenic Acids, Tar, Bitumen	ดี
13. ผสมในแอสฟัลต์ด้วย Stearine Pitch Oleic Acids, Napthenic Acids	ต้านทานการถอดถอน



ก) เมื่อมีน้ำกระทำ หรือมวลรวมเปียกขึ้น  
มุมสัมผัสแอสฟัลต์ กับ มวลรวม  
มากกว่า  $90^\circ$



ข) สารผสมช่วยการเกาะยึดในแอสฟัลต์  
ช่วยให้มุมสัมผัสของแอสฟัลต์ กับ  
มวลรวมน้อยกว่า  $90^\circ$



ค) การแผ่กระจายของแอสฟัลต์ บนผิว  
มวลรวมเพิ่มขึ้น จนมุมสัมผัสของ  
แอสฟัลต์ กับผิวมวลรวมน้อยที่สุด

รูปที่ 2.21 การเกิด Active Adhesion