

ภาคผนวก ก

วิธีการผสมผสานขนาดตะกอนของผลรวม

(Aggregate gradation blending procedures)

จุดประสงค์ในการรวมวัสดุรวมตั้งแต่สองชนิดหรือมากกว่าขึ้นไป ที่มีการจัดขนาดตะกอนต่างกัมนั้น เพื่อให้มวลรวมผสมมีการจัดเรียงขนาดและได้ตามข้อกำหนดสำหรับส่วนผสมลาดยางซึ่งใช้ในการก่อสร้างถนนลาดยาง เนื่องจากการที่จะหาหินในแหล่งเดียวกันที่มีการเรียงขนาดเหมาะสมหาได้ยาก และเพื่อผลในด้านเศรษฐกิจโดยหินที่มารวมกันได้ตามข้อกำหนดต้องเสียค่าใช้จ่ายต่ำสุด วิธีใช้ในการผสมก่อนหินแต่ละขนาดเข้าด้วยกันที่นิยมาใช้นี้ดังนี้

วิธีทดลองทำ (Trial - and - error - blending)

เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการรวมหินเพื่อให้ได้ตามข้อกำหนดวิธีการขั้นแรก คือ จดข้อมูลการเรียงขนาดของหิน และข้อกำหนดที่จะใช้ทำการคาดคะเนเปอร์เซ็นต์ของหินแต่ละแหล่งหรือขนาดและเมื่อรวมทุกแหล่งหรือขนาดแล้วจะต้องอยู่ในข้อกำหนด (specification)

วิธีการทดลองทำจะต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ทำ เพื่อให้การผสมหินแต่ละแหล่งหรือขนาดได้ตามข้อกำหนดได้ง่ายขึ้นโดยปกติวิธีนี้จะทำการทดลองผสม 2-3 ครั้ง เพื่อหาสัดส่วนการผสมที่ดีที่สุด

ในตารางผนวกที่ ผ-1 แสดงขนาดของหินสามขนาด คือ มวลรวม A มวลรวม B และ มวลรวม C วิธีการผสมในขั้นแรกดูในช่องมวลรวม A ที่ตะแกรงเบอร์ 4 มีหินค้างอยู่ 70 เปอร์เซ็นต์ ส่วนมวลรวม B และ C ไม่มีหินค้างตะแกรงเบอร์ 4 ข้อกำหนดเมื่อผสมแล้วที่จุดกึ่งกลาง (midpoint) จะต้องมีเปอร์เซ็นต์ผ่าน 50 เปอร์เซ็นต์ (หรือต่าง

50 เปอร์เซนต์)

ดังนั้นมวลรวม A ผสม = $50/70 \times 100 = 71$ เปอร์เซนต์ที่ตะแกรงเบอร์ 200
มวลรวม A ใช้ 70 เปอร์เซนต์และให้มวลรวม C ใช้ 2 เปอร์เซนต์ เมื่อรวมกันระหว่าง
มวลรวม A กับ C ที่เหลือเป็นมวลรวม B โดยให้มวลรวม B เท่ากับ 20 เปอร์เซนต์
เมื่อมวลรวม A B และ C ที่ตะแกรงเบอร์ 200 จะให้ถึงกลางตามที่ต้องการ แต่เมื่อรวม
เปอร์เซนต์ของมวลรวมกันแล้วต้องได้ 100 เปอร์เซนต์

ดังนั้นในตัวอย่างนี้ให้มวลรวม A เท่ากับ 75 เปอร์เซนต์มวลรวม B เท่ากับ 22
เปอร์เซนต์และมวลรวม C เท่ากับ 3 เปอร์เซนต์ จะได้เปอร์เซนต์การผสมเพื่อให้ได้ตาม
ข้อกำหนดที่ต้องการ

ตารางภาคผนวกที่ผ-1 วิธีการผสมผสานขนาดละเอียดของมวลรวมโดยวิธีทดลองทำ

KHON KAEN HIGHWAY				STRUCTURAL ENGINEERING 1993			
ผ่านตะแกรง No.	มวลรวม A 75% #1	มวลรวม B 22% #1	มวลรวม C 3% #1	มวลรวม ผสมผสาน	กึ่งกลางข้อ กำหนด	ข้อกำหนด	
1 นิ้ว	100 75	100 22	100 3	100	95	90-100	
3/4 นิ้ว	82 62	100 22	100 3	87	75	60-90	
1/2 นิ้ว	56 42	100 22	100 3	67	65.2	50-75	
No.4	30 23	100 22	100 3	48	50	40-60	
No.8	22 17	87 19	100 3	39	37.5	25-50	
No.40	12 9	52 11	100 3	23	25	15-35	
No.200	3 2	18 4	88 3	9	7.5	0-15	

#1 เปอร์เซนต์ทดลองทำ

วิธีทางคณิตศาสตร์

การหาสัดส่วนการผสมผสานโดยวิธีคณิตศาสตร์ ค่าที่คำนวณได้จะใกล้เคียงกับความเป็นจริง มาก การรวมหินสามขนาดหรือมากกว่าโดยวิธีทางคณิตศาสตร์ จะต้องมีการตั้งปัญหาอย่างถูกต้อง หัวข้อพิจารณาดังนี้

1. จำนวนของขนาดตะแกรง หรือขนาดของกลุ่มจะต้องไม่เกินจำนวนแหล่งของวัสดุที่ผสม
2. ผลรวมของเปอร์เซ็นต์ที่ผ่านตะแกรง x และค้างบนตะแกรง y จะต้องเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งของวัสดุที่ผสมและจุดกึ่งกลางข้อกำหนด
3. ถ้าหินที่นำมาผสมกันไม่ได้ตามข้อ 1 จะต้องมาแบ่งใหม่รวมทั้งจุดกึ่งกลางที่ได้ระบุไว้ด้วยดังที่แสดงในตัวอย่างข้างล่าง

จากตารางผนวกที่ 1 มาทำให้เป็นเปอร์เซ็นต์ที่ค้างบนแต่ละตะแกรง ซึ่งจำนวนของตะแกรง จะเกินจำนวนแหล่งของหิน ในตัวอย่างนี้จะแบ่งใหม่เป็น ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 8 (วัสดุหยาบ) ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 200 (วัสดุละเอียด) และส่วนที่ตะแกรงเบอร์ 200 (ฝุ่น) ดังแสดงในตารางผนวกที่ ผ-2

ภาคผนวกที่ ผ-2 ขนาดและมวลรวมหลังจากแบ่งกลุ่ม

ขนาดตะแกรง	มวลรวม A	มวลรวม B	มวลรวม C	กึ่งกลางข้อกำหนด
ค้างเบอร์ 8	78.0	13.0	0	62.5
ค้างเบอร์ 8	19.0	69.0	12.0	30.0
ค้างเบอร์ 200				
ผ่านเบอร์ 200	3.0	18.0	88.0	7.5
รวม	100.0	100.0	100.0	100.0

ให้ A, B และ C แทนเปอร์เซ็นต์ที่ต้องการจะใช้ผสมผสานของมวลรวม A, B และ C ตามลำดับ นำค่าในตารางที่ผนวกที่ ผ-2 มาเขียนสมการได้ดังนี้

$$0.78A + 0.13B + 0 = 62.5$$

$$0.19A + 0.69B + 0.12C = 30.0$$

$$0.03A + 0.18B + 0.88C = 7.5$$

เมื่อแก้สมการทั้งสามแล้วจะได้ A 76; B=22 และ C=2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่ได้ จะใกล้เคียงความจริงมาก

วิธีการกราฟ (Graphical method)

ในกรณีที่มีมวลรวมมีกราฟเส้นโค้งการจัดขนาดละเอียดเกินไป (overlapping grading curve) ควรใช้วิธีการช่วยในการหาผลลัพธ์ ซึ่งจะแบ่งตามชนิดของมวลรวมทั้งสามออกเป็น

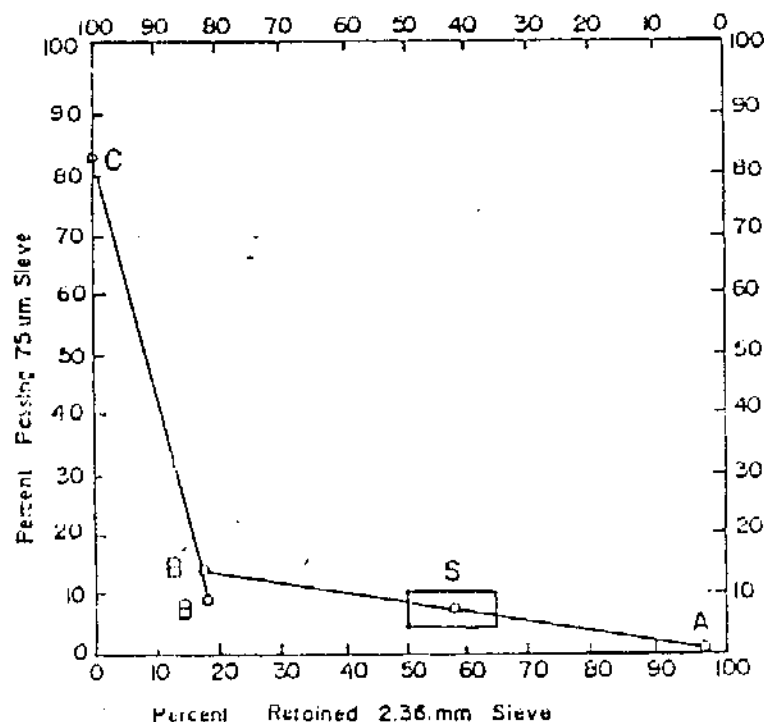
1. เปอร์เซนต์วัสดุที่ต่ำกว่าบนตะแกรงเบอร์ 8
2. เปอร์เซนต์วัสดุที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 แต่ยังคงผ่านตะแกรงเบอร์ 200
3. เปอร์เซนต์วัสดุที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200

แบ่งขีดจำกัดของข้อกำหนดที่ยอมรับได้ (allowable percentage limits) ของส่วนที่ต่ำกว่าบนตะแกรงเบอร์ 8 และส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ด้วยวิธีการเดียวกันกับวิธีทางคณิตศาสตร์

บนแผนภูมิในภาคผนวกที่ ผ-1 จุดที่วางกลมล้อมของมวลรวมแต่ละชนิดหมายถึง ขีดจำกัดของข้อกำหนดสำหรับมวลรวมทั้งสามชนิดนั้น จุด S หมายถึง จุดกึ่งกลางของขีดจำกัดของข้อกำหนด

ในการกำหนดตำแหน่งของจุดลงบนแผนภูมิใช้เพียงส่วนที่ต่ำกว่าบนตะแกรงเบอร์ 8

และส่วนที่ ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จุด A ใช้แสดงการจัด ขนาดผลของมวลรวมหยาบจุด B ใช้แสดงแทนการจัดขนาดผลของมวลรวมละเอียด และจุด C ใช้แสดงแทนการจัด ขนาดผลของวัสดุอัดแทรก (ฝุ่น) จุด S ใช้แสดงแทนจุดกึ่งกลางของการจัดขนาดผล ตามข้อกำหนด สำหรับวัสดุที่ต่างบนตะแกรงเบอร์ 8 และส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ลากเส้นตรงระหว่างจุด A และจุด S และเส้นตรงระหว่างจุด B และจุด C ต่อเส้นตรง AS ไปตัดเส้นตรง BC ที่จุด B' แต่ละส่วนของเส้นตรง (line segment) พิจารณา จากความแตกต่าง ของเปอร์เซ็นต์ระหว่างจุดปลาย (terminal points) ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ ของแต่ละวัสดุรวม ซึ่งต้องการสำหรับการผสมผสาน (blend) ก็คำนวณหาจาก สูตร



ภาพภาคผนวกที่ ผ-1 วิธีสำหรับการประมาณค่าการรวมของมวลรวมสามชนิด

$$P = Aa + Bb + Cc \dots\dots\dots$$

$$\text{ดังนั้น} \quad a = \frac{\text{ส่วนของเส้นตรง SB}',}{\text{เส้นตรง AB,}} = \frac{42}{81} = 0.52$$

$$b + c = 1.00 - 0.52 = 0.48$$

$$c = (1.00 - a) \text{ส่วนของเส้นตรง}$$

$$B,B = (1.00 - 0.52)5/73 = 0.03$$

$$b = 1.00 - (a+c) = 1.00 - (0.52+0.03) = 0.45$$

จากนั้นปรับแก้ค่าด้วยวิธีทดลองหาความจำเป็นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

วิธีการคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะ คำนวณความหนาแน่นและความยาวรวมของการผสม
ผสม

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของ Hot Bin 2} = \text{ก้างเบอร์ 4} = 2.646$$

$$\text{ผ่านเบอร์ 4} = 2.592$$

$$\begin{aligned} \text{ความถ่วงจำเพาะ} &= \frac{100}{\frac{38}{2.646} + \frac{62}{2.592}} \\ &= 2.612 \end{aligned}$$

ความถ่วงจำเพาะของ

$$\text{Hot Bin 1} = \text{ก้างเบอร์ 200} = 2.653$$

$$\text{ผ่านเบอร์ 200} = 2.654$$

$$\begin{aligned} \text{ความถ่วงจำเพาะ} &= \frac{100}{\frac{80.5}{2.653} + \frac{19.5}{2.654}} = 2.653 \end{aligned}$$

จากตารางที่ 4.15 จะได้

ความถ่วงจำเพาะรวมของการผสมผสาน

$$= \frac{100}{\frac{30}{2.653} + \frac{15}{2.612} + \frac{25}{2.657} + \frac{30}{2.652}}$$

$$= 2.647$$

ดัชนีความแบนรวมของการผสมผสาน

$$= \frac{15(100-62)48+25(100-3.2)24+30(100-0.9)31}{(100-62)15+(100-3.2)25+(100-0.3)30}$$

$$= 30 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

ดัชนีความยาวรวมของการผสมผสาน

$$= \frac{15(100-62)7+25(100-3.2)22+30(100-0.9)31}{(100-62)15+(100-3.2)25+(100-0.9)30}$$

$$= 15 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

ภาคผนวก ข

วิธีการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนโดยวิธีมาร์แชลล์

เทียบเท่า ทล.ท.604/2517, ASTM D1559

วัตถุประสงค์

เพื่อหาคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เป็นผิวทาง หรือพื้นทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

อุปกรณ์

1. กะละมังเคลือบหรือภาชนะโลหะที่มีขอบสูงประมาณ 7 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างขอบประมาณ 25 เซนติเมตรสำหรับใส่วัสดุมวลรวม
2. ภาชนะโลหะมีขอบสูงประมาณ 15 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 เซนติเมตร สำหรับใช้ผสมวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์
3. เตาอบที่สามารถให้อุณหภูมิสูงถึง 250 องศาเซลเซียส สำหรับวัสดุมวลรวม
4. เตาแบบ Hot Plate ที่สามารถให้อุณหภูมิได้สูงถึง 200 องศาเซลเซียส สำหรับให้ความร้อนแอสฟัลต์และเครื่องมือที่ใช้ในการบดอัด
5. หม้อโลหะสำหรับใส่แอสฟัลต์เพื่อให้ความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 เซนติเมตร
6. เครื่องใช้ผสมวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์
7. เทอร์มิเตอร์ชนิดมีก้าน เป็นโลหะสามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง 250 องศาเซลเซียส
8. เครื่องชั่งสามารถชั่งน้ำหนักได้ถึง 5 กิโลกรัมมีความละเอียดถึง 1 กรัม สำหรับชั่งวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์

9. เครื่องซึ่งสามารถชั่งน้ำหนักได้ถึง 2 กิโลกรัมมีความละเอียดถึง 0.1 กรัม ใช้สำหรับชั่งวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว

10. อ่างต้มน้ำ (Boiling Water Bath) มีตะแกรงลวดสำหรับวางวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการได้

11. แท่นรอง (Compaction pedestal) ประกอบด้วยฐานไม้ ขนาดประมาณ 20 x 20 x 45 เซนติเมตร มีแผ่นโลหะขนาดประมาณ 30 x 30 x 2.5 เซนติเมตร ติดอยู่ที่ขอบบนของฐานไม้ ฐานไม้ควรเป็นไม้ที่มีความแน่นแห้ง 0.65 - 0.80 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แผ่นเหล็กจะต้องยึดแน่นกับฐานไม้ดังภาพผนวกที่ 4-2

12. แบบสำหรับบดอัด (Compaction mould) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10.16 เซนติเมตร สูง 7.62 เซนติเมตร

13. ช้อนกระแทก (Compaction hammer) ประกอบด้วยแผ่นเหล็กกลมหนา 1.27 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.842 เซนติเมตร ติดกับก้านเหล็กหนัก 4.45 กิโลกรัมสำหรับรับทั้งน้ำหนักลงบนแผ่นเหล็กกลม ในขณะที่ทำการบดอัดให้มีระยะตกของแท่งเหล็กเท่ากับ 45.72 เซนติเมตร

14. ที่จับแบบ (Mould holder) ใช้บังคับให้แบบบดอัดอยู่กับที่ในขณะที่ทำการบดอัด

15. เครื่องดันตัวอย่าง (Sample extruder)

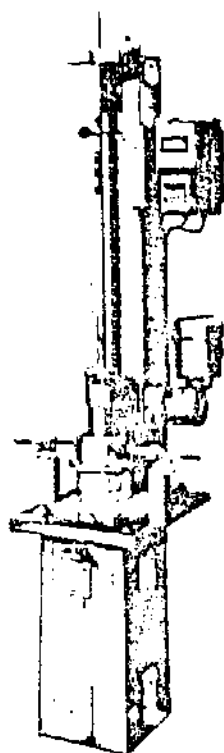
16. ถุงมือกันความร้อนชนิดใยหิน (Asbestos)

17. ถุงมือกันความร้อนชนิดหนังหรือใย สำหรับหยิบตัวอย่างที่แช่น้ำ

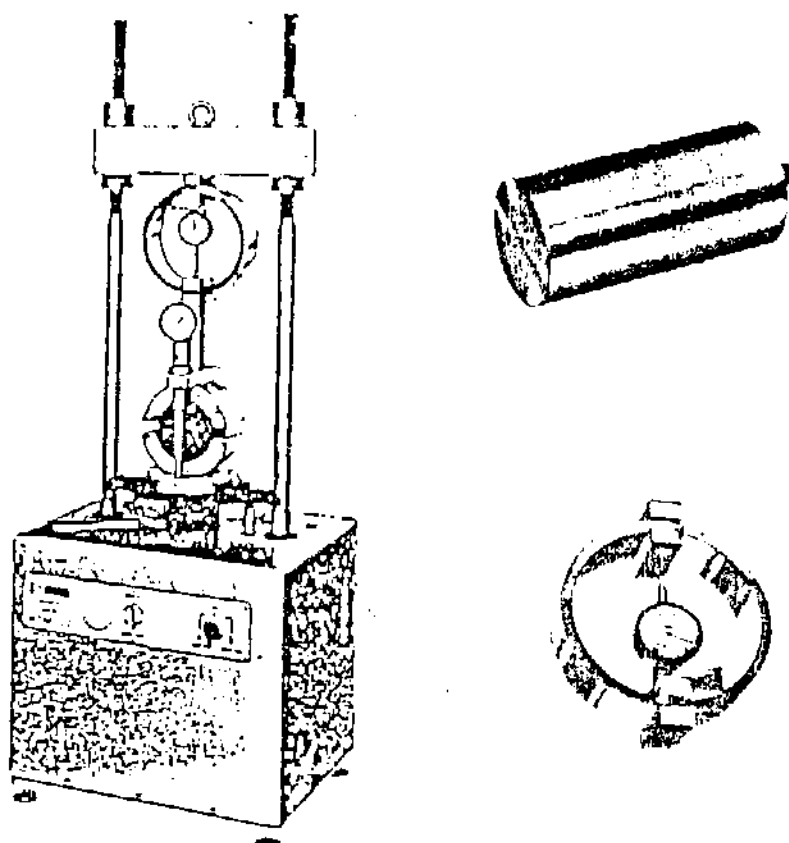
18. เครื่องทดสอบมาร์แชลล์ (Marshall testing machine) ใช้สำหรับทดสอบหาค่าเสถียรภาพ เป็นเครื่องกดที่สามารถรับแรงกดได้ไม่น้อยกว่า 3000 กิโลกรัม เป็นแบบจุดด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า อัตราเร็วของมอเตอร์ที่หมุนเท่ากับ 51 มิลลิเมตรต่อวินาที ดังภาพผนวกที่ 3

19. แบบทดสอบเสถียรภาพ (Stability mould) สำหรับใส่ตัวอย่างทดสอบหาค่าเสถียรภาพ

20. เครื่องวัดการเคลื่อนตัว (Flow meter) สำหรับทดสอบหาค่าการเคลื่อนตัวของตัวอย่างระหว่างกดอ่านค่าได้เป็น 1/10 มิลลิเมตร



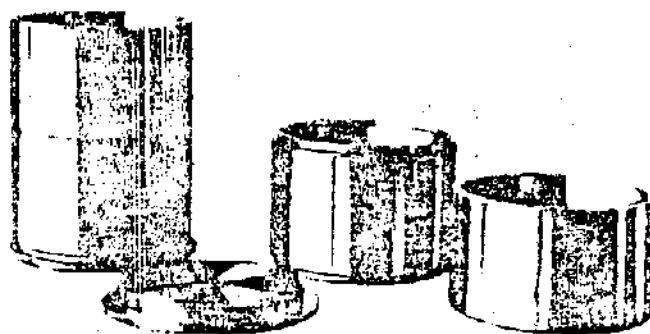
ภาคผนวกที่ ผ-2 เครื่องบดอัดตัวอย่างวิธี มาร์แชลล์ แบบใช้เครื่อง



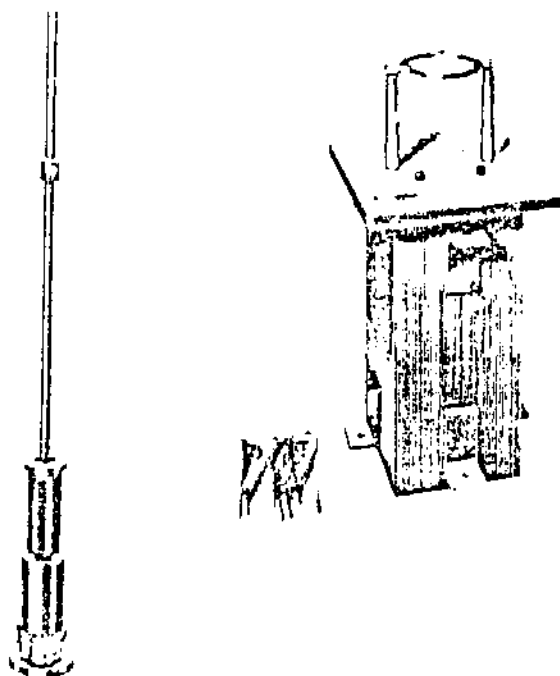
ภาคผนวกที่ ผ-3 เครื่องกดตัวอย่างด้วยวิธีมาร์แชลล์ วงแหวนวัดแรงและท่อนกด



แบบทดสอบเสถียรภาพและเครื่องวัดการเคลื่อนตัว



แบบหล่อพร้อมแผ่นฐานและบล็อกต่อ



ข้อบดกระแทกพร้อมแท่นรองการบดอัด

การเตรียมตัวอย่าง

1. ทำการทดสอบหาขนาดวัสดุชนิดเม็ดหยาบโดย "วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่าน ตะแกรงแบบมีลำาง"
2. ทดสอบหาขนาดวัสดุชนิดเม็ดละเอียดโดย "วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบลำาง"
3. ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดหยาบโดยวิธี "วิธีการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดหยาบ"
4. ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียดโดย "วิธีการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด"
5. หาค่าอัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวม เมื่อรวมกันแล้วได้ขนาดตามที่ต้องการ
6. นำวัสดุมวลรวมตามอัตราส่วนที่หาได้จากข้อ 5 หนัก 1200 กรัม (เมื่อบดอัดแล้วตัวอย่างจะหนานประมาณ 6.35 เซนติเมตรหรือ 2.5 นิ้วใส่ในกะละมังเคลือบไบบอบน เคาอบาให้ได้คุณภาพสูงขึ้น

7. นำแบบสำหรับคั่วและนึ่งไปวางบน Hot plate ที่อุณหภูมิระหว่าง 90 - 150 องศาเซลเซียส

8. นำวัสดุแอสฟัลท์ที่จะใช้ผสมไปให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิที่ทำให้แอสฟัลท์มีความหนืดเท่ากับ 85-10 second saybolt furol (สำหรับแอสฟัลท์ซีเมนต์ 80-100 ต้องให้ความร้อนถึง 145 ± 5 องศาเซลเซียส) ห้องควบคุมอุณหภูมิด้วย

วิธีการทดสอบ

1. นำกะละมังใส่ตัวอย่างวัสดุมวลรวมออกจากเตาอบแล้ว เทวัสดุมวลรวมลงในจานผสม ใช้เกรียงผสมวัสดุมวลรวมแต่ละขนาดคลุกกันให้ทั่วทั้งไว้ให้อุณหภูมิมวลรวมลดลงถึง 145 ± 5 องศาเซลเซียส (เมื่อใช้แอสฟัลท์ซีเมนต์ 80-100) ใช้เกรียงเกลี่ยตรงกลางวัสดุให้เป็นแอ่งแล้วเทแอสฟัลท์ที่เตรียมไว้ตามปริมาณที่ต้องการลงในแอ่งตัวอย่างดังกล่าว

2. นำภาชนะโลหะที่ได้จากข้อ 1 ขึ้นตั้งบน Hot plate ใช้เกรียงผสมวัสดุมวลรวมและแอสฟัลท์ทำให้เข้ากันโดยเร็วที่สุด โดยปกติประมาณ 1 นาที พยายามให้แอสฟัลท์เคลือบวัสดุทุกเม็ด

3. นำแบบสำหรับคั่วคั่วมาประกอบเข้าที่

4. เทตัวอย่างวัสดุผสมลงในแบบที่ประกอบแล้วใช้เกรียงแซะรอบ ๆ ตัวอย่างข้างในแบบประมาณ 15 ครั้ง และแซะเข้าในตัวอย่างอีก 10 ครั้ง ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิของตัวอย่างลดลงที่อุณหภูมิของตัวอย่างลดลงที่อุณหภูมิ เมื่อแอสฟัลท์มีความหนืดเท่ากับ 140+15 second saybolt furol (สำหรับแอสฟัลท์ซีเมนต์ 80-100 ให้ทิ้งตัวอย่างไว้จนอุณหภูมิลดถึง 140 ± 5 องศาเซลเซียส)

5. วางร่อนลงบนตัวอย่างในแบบทำการบดอัดตัวอย่างโดยการยกน้ำหนักและปล่อยให้น้ำหนักตกลงบนแผ่นเหล็ก ซึ่งทำงานด้วยระบบไฟฟ้าและมีควมับจำนวนครั้งแบบอัตโนมัติ จำนวนครั้งขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบ ตามตารางที่ ผ-2

6. เมื่อครบจำนวนการบดอัดแล้ว ทำการกลับตัวอย่างโดยการกลับแบบ เอาด้าน

ล่างขึ้นบนแล้วทำการบดอัดเช่นเดียวกับข้อ 5

7. ทิ้งตัวอย่างที่บดอัดเรียบร้อยแล้วไว้ในแบบ จนกระทั่งอุณหภูมิของตัวอย่างลดลงต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส จึงนำตัวอย่างออกจากแบบโดยการใช้เครื่องดันตัวอย่างทิ้งตัวอย่างไว้ในอากาศธรรมดาไม่น้อยกว่า 18 ชั่วโมง จึงนำไปทำการทดสอบขึ้นดอไป

8. ในปริมาณของการผสมโดยใช้แอสฟัลท์เบอร์ เซ็นต์อันใดอันหนึ่งให้เตรียมตัวอย่างอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง สำหรับการออกแบบให้ใช้ตัวอย่างละ เบอร์ เซ็นต์ของแอสฟัลท์อย่างน้อย 5 ค่าและแต่ละค่าต่างกัน 0.5 เบอร์ เซ็นต์

9. ทำการทดสอบหา ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างโดย

9.1 นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักในอากาศ (d)

9.2 นำตัวอย่างไปแช่น้ำธรรมดาประมาณ 5 นาที และนำตัวอย่างขึ้นเช็ดตัวอย่างให้ผิวแห้ง ชั่งน้ำหนักในอากาศ (d1)

9.3 นำตัวอย่างจากข้อ 9.2 ไปชั่งน้ำหนักในน้ำ (e)

10. ทำการทดสอบหาค่าเสถียรภาพและการเคลื่อนตัว

10.1 นำตัวอย่างที่เสร็จจากการทดสอบตามข้อ 9 แล้วไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ $60 + 1$ องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในอ่างคัมน์น้ำ

10.2 เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างขึ้นจากอ่างคัมน์น้ำเช็ดให้ผิวตัวอย่างแห้ง แล้วนำไปใส่ในแบบทดสอบเสถียรภาพเพื่อไปกวดหาค่าเสถียรภาพและการเคลื่อนตัว

10.3 นำแบบทดสอบเสถียรภาพที่ได้จากข้อ 10.2 ไปวางบนเครื่องทดสอบมาร์แชลล์ให้แบบทดสอบเสถียรภาพอยู่ในท่อนกอด (piston) ซึ่งติดกับ proving ring สำหรับอ่านน้ำหนักกด

10.4 เดินเครื่องให้แบบทดสอบเสถียรภาพ เคลื่อนไปสัมผัสท่อนกอดจนกระทั่งเข็มของ dial gauge ที่ติดกับ proving ring ขยับตัว หยุดเครื่องทำการตั้งเข็มของ dial gauge ที่เลข 0

10.5 นำเครื่องวัดการเคลื่อนตัวไปวางบนแกนสำหรับทดสอบ หาค่าการเคลื่อนตัวซึ่งติดกับแบบทดสอบเสถียรภาพ ตั้งเข็ม dial gauge ของเครื่องวัดการเคลื่อนตัวให้อยู่ที่เลข 0 ใช้มือจับเครื่องวัดการเคลื่อนตัวให้อยู่กับที่

10.6 เดินเครื่องให้กดแบบทดสอบเพื่อหาค่าเสถียรภาพโดยอ่านค่าน้ำหนักสูงสุดที่

กดจากเข็ม dial gauge จากการเคลื่อนที่ proving ring เป็นค่าที่อ่านได้ (measured) ซึ่งต้องแก้ไข (adjust) สำหรับตัวอย่างมาตรฐานที่หนา 6.35 เซนติเมตร ดังแสดงในตารางผนวกที่ ผ-3

10.7 ขณะที่ทำการทดสอบหาค่าเสถียรภาพเข็ม dial gauge ของเครื่องวัดการเคลื่อนตัวและเคลื่อนที่ อ่านค่าการเคลื่อนตัวจาก dial gauge ที่น้ำหนักสูงสุด

การคำนวณ

คำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะอิมตัวผิวแห้งของส่วนผสม (bulk specific gravity) ช่องว่างระหว่างมวลรวมวัสดุ (VMA) ช่องว่างอากาศในส่วนผสม (air void) และช่องว่างที่ถูกแอสฟัลท์แทนที่ (VFB) ดังนี้

1. คำนวณหาปริมาณ แอสฟัลท์ประสิทธิภาพโดยน้ำหนักของส่วนผสม (effective asphalt cement by weight of mix) b_1

$$b_1 = \frac{b - x(100 - b)}{100}$$

กำหนดให้ b = เปอร์เซนต์ของแอสฟัลท์โดยน้ำหนักของส่วนผสม

x = แอสฟัลท์ ที่สูญเสียไปจากการดูดซึมของมวลรวม, 1 กิโลกรัม ของแอสฟัลท์/100 กิโลกรัมของมวลรวม

2. คำนวณหาความถ่วงจำเพาะรวมของส่วนผสม (bulk specific gravity of specimen)

$$g = \frac{d}{d_1 - e}$$

ตารางภาคผนวกที่ ผ-3 อัตราส่วนเทียบเสถียรภาพ

(Stability Correlation Ratios)

ปริมาตรของ ก้อนตัวอย่าง ลบ.ชม.	ความหนาของ ก้อนตัวอย่าง นิ้ว	ความหนาของ ก้อนตัวอย่าง มม.	อัตราส่วนเทียบ
200 ถึง 213	1	25.4	5.56
214 ถึง 225	$1\frac{1}{17}$	27.0	5.00
226 ถึง 237	$1\frac{1}{8}$	28.0	4.55
238 ถึง 250	$1\frac{3}{16}$	30.2	4.17
251 ถึง 264	$1\frac{1}{4}$	31.8	3.85
265 ถึง 276	$1\frac{5}{10}$	33.3	3.57
277 ถึง 289	$1\frac{3}{8}$	34.9	3.33
290 ถึง 301	$1\frac{7}{16}$	36.5	3.03
302 ถึง 316	$1\frac{1}{2}$	38.1	2.78
317 ถึง 328	$1\frac{9}{16}$	39.7	2.50
329 ถึง 340	$1\frac{5}{8}$	41.3	2.27
341 ถึง 353	$1\frac{11}{16}$	42.9	2.08
354 ถึง 367	$1\frac{3}{4}$	44.4	1.92
368 ถึง 379	$1\frac{13}{16}$	46.0	1.79
380 ถึง 392	$1\frac{7}{8}$	47.6	1.67
393 ถึง 405	$1\frac{15}{16}$	49.2	1.56
406 ถึง 420	2	50.8	1.47
421 ถึง 431	$2\frac{1}{16}$	52.4	1.39
432 ถึง 443	$2\frac{1}{8}$	54.0	1.32

ตารางภาคผนวกที่ ผ-3 อัตราส่วนเทียบเสถียรภาพ

(Stability Correlation Ratios)(ต่อ)

ปริมาตรของ ก้อนตัวอย่าง ลบ.ชม.	ความหนาของ ก้อนตัวอย่าง นิ้ว	ความหนาของ ก้อนตัวอย่าง มม.	อัตราส่วนเทียบ
444 ถึง 456	2 ³ /16	55.6	1.25
457 ถึง 472	2 ¹ /4	57.2	1.19
473 ถึง 482	2 ⁵ /16	58.7	1.14
483 ถึง 495	2 ³ /8	60.3	1.09
496 ถึง 508	2 ⁷ /16	61.9	1.04
509 ถึง 522	2 ¹ /2	63.5	1.00
523 ถึง 535	2 ⁹ /16	64.0	0.96
536 ถึง 546	2 ⁵ /8	65.1	0.93
547 ถึง 559	2 ¹¹ /16	66.7	0.89
560 ถึง 573	2 ³ /4	68.3	0.86
574 ถึง 585	2 ¹³ /16	71.4	0.83
586 ถึง 598	2 ⁷ /8	73.0	0.81
599 ถึง 610	2 ¹⁵ /16	74.6	0.73
611 ถึง 625	3	76.2	0.76

ค่าอัตราส่วนเทียบนี้ใช้คู่กับค่าเสถียรภาพที่อ่านได้จากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ
กับตัวอย่างที่มีความหนามาตรฐาน 35 มม. (2.5 นิ้ว)

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับความหนา เมื่อเทียบกับก้อนตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลาง
กลาง 101.6 มม. (4 นิ้ว)

กำหนดให้ d = น้ำหนักตัวอย่างในอากาศ (กรัม)

d_1 = น้ำหนักตัวอย่างอิมัลชันแห้งในอากาศ (กรัม)

e = น้ำหนักตัวอย่างอิมัลชันในน้ำ (กรัม)

3. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของแอสฟัลท์ประสิทธิภาพ (percent volume of effective asphalt cement), i

$$i = \frac{B_1 g}{G_a c}$$

กำหนดให้ $G_a c$ = ความถ่วงจำเพาะรวมของแอสฟัลท์

4. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของมวลรวมในก้อนตัวอย่าง, j

$$j = \frac{(100 - b) g}{G_a x}$$

กำหนดให้ $G_a x$ = ความถ่วงจำเพาะรวมของมวลรวม

5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างในอากาศในก้อนตัวอย่าง ช่องว่างอากาศเท่ากับ $100 - i - j$

6. คำนวณหา V.M.A. (voids in mineral aggregate) V.M.A. เท่ากับ $100 - j$

7. คำนวณหาช่องว่างที่บรรจุบิทูเมน (voids filled with bitumen, V.F.B.)

$$V.F.B. = 100 \text{ i/l}$$

8. ค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

8.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลท์ โดยน้ำหนักของมวลรวม

8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลท์ โดยน้ำหนักของมวลรวม

8.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของส่วนผสมกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลท์ โดยน้ำหนักของมวลรวม

8.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลท์ โดยน้ำหนักของมวลรวม

8.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ V.M.A. กับ เปอร์เซ็นต์แอสฟัลท์ โดยน้ำหนักของมวลรวม

8.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ V.M.A. กับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลท์ โดยน้ำหนักของมวลรวม

ภาคผนวก ค

คุณสมบัติวัสดุและขบวนการผลิต

ก. คุณสมบัติของส่วนผสมและข้อกำหนดคอนกรีตแอสฟัลท์

การออกแบบโครงสร้างของถนนชั้นผิวทางที่เป็นคอนกรีตแอสฟัลท์ ตามวิธีของ มาร์แชลล์มีมาตรฐานและข้อกำหนดดังนี้

1. ช่องว่างอากาศ (Air void) การออกแบบคอนกรีตแอสฟัลท์จะต้องมีช่องว่างอากาศ ดังแสดงในรูปที่ ผ-4 เพียงพอ โดยภายหลังจากการบดอัดที่จบจนถึงที่สุดแล้วจะยังคงมีช่องอากาศอยู่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 3 ของปริมาณทั้งหมดเนื่องจากแอสฟัลท์เป็นของเหลวหนืด ถ้าหากวัสดุผสมมีช่องว่างอากาศน้อยเกินไปและเมื่อมีค่าเท่ากับศูนย์แล้วน้ำหนักที่มากจะกระทำต่อคอนกรีตแอสฟัลท์ จะถ่ายลงสู่แอสฟัลท์ที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุรวมตัวให้แรงดันระหว่างเม็ดวัสดุลดลง ซึ่งจะทำให้เสถียรภาพของคอนกรีตแอสฟัลท์ลดลงได้ด้วย จากประสบการณ์ร่องรอยล้อและการทะลักของคอนกรีตแอสฟัลท์จะเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตแอสฟัลท์ มีช่องว่างอากาศน้อยกว่าร้อยละ 1 ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณแอสฟัลท์น้อยก็ตาม

ความสัมพันธ์ระหว่างการบดทับในห้องปฏิบัติการ และการบดทับในสนามยังไม่มีข้อกำหนดโดยสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตาม US. CORPS OF ENGINEERS (1958) ได้แนะนำไว้เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดความแน่นมากเกินไปในสนาม อันเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกบนล้อยาง ซึ่งมีความดันประมาณ 100 lb/in^2 ตัวอย่างคอนกรีตแอสฟัลท์ในห้องปฏิบัติการที่ได้รับการบดทับตามวิธีของมาร์แชลล์ จะมีช่องว่างอากาศไม่น้อยกว่าร้อยละ 3 และเพื่อเป็นการลดการเสื่อมคุณภาพของแอสฟัลท์ อันเนื่องมาจากสภาวะภูมิอากาศ ช่องว่างอากาศจะต้องไม่มากไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 ของปริมาณทั้งหมดตามตารางที่ภาคผนวก ผ-4

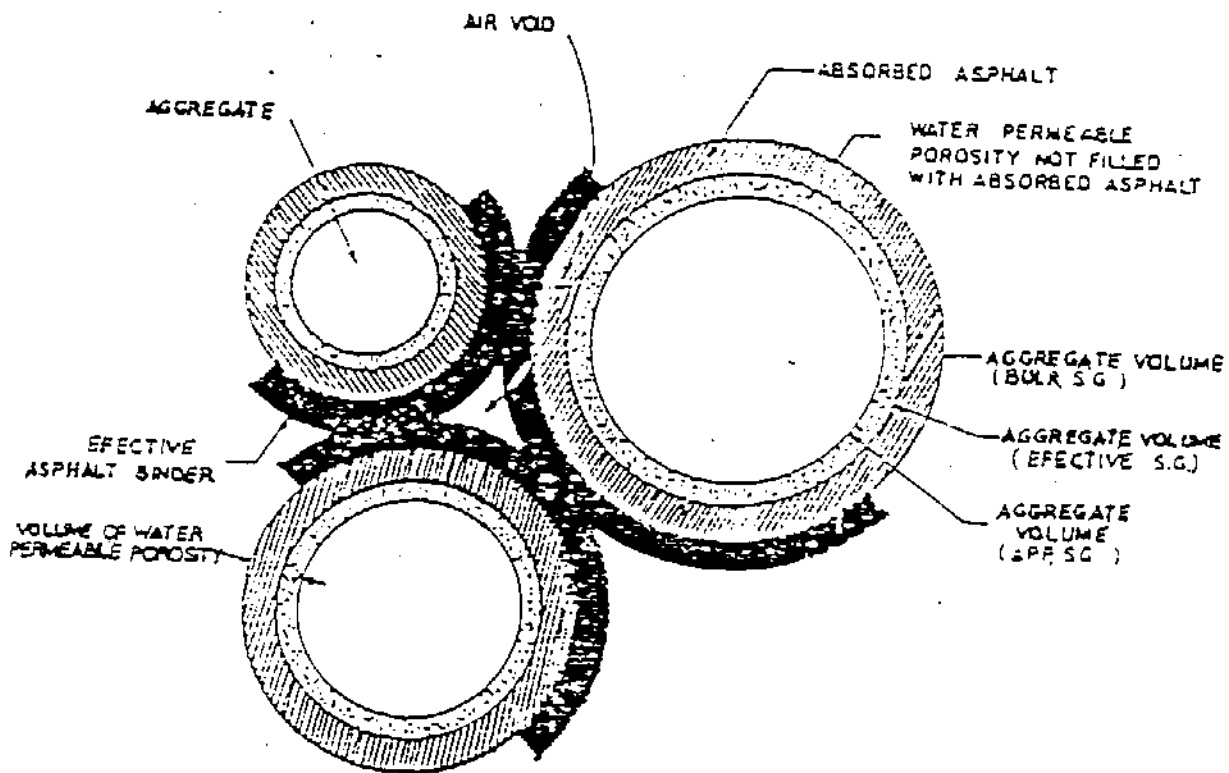
2. ช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุรวมรวม (Void in Mineral Aggregate)
 ช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุรวมรวมในแอสฟัลท์ติกคอนกรีต หมายถึง ช่องว่างที่บรรจุแอสฟัลท์ และช่องว่างอากาศไว้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ ๔-4, ๔-5 ช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุรวมรวม มีไว้เพื่อที่จะให้แอสฟัลท์ติกคอนกรีต มีความต้านทานต่อน้ำหนักกระทำที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ กัน ความหนาของชั้นแอสฟัลท์ที่เคลือบเม็ดวัสดุจะต้องไม่บางเกินไป มิฉะนั้นชั้นของแอสฟัลท์ที่เคลือบอยู่นั้น จะไม่สามารถรับความเครียดที่เกิดขึ้นและจะทำให้รอยแตกร้าว ในแอสฟัลท์ที่ใช้จะสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของเม็ดวัสดุรวมรวม ฉะนั้น ขนาดเม็ดที่ใหญ่ที่สุดของวัสดุรวมรวม จึงมีความสัมพันธ์กับปริมาณแอสฟัลท์ MCLEOD (1959) ได้เสนอแนะขีดจำกัดสูงสุดของช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุรวมรวมในแอสฟัลท์ติกคอนกรีต ซึ่งจะให้ความหนาที่น้อยที่สุดของชั้นแอสฟัลท์ที่เคลือบเม็ดวัสดุอยู่ได้ โดยที่ไม่ให้มีช่องว่างอากาศน้อยเกินไป ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ ๔-5 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่น้อยที่สุด กับขนาดโคสดูของวัสดุรวมรวมได้แสดงไว้ในรูปภาคผนวกที่ ๔-6

3. ค่าการเคลื่อนตัว (Flow) MCLAUGHLIN และ GOETZ, (1952) ได้พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ (มุมเสียดทานภายใน) กับค่าการเคลื่อนตัวสามารถเขียนดังสมการ

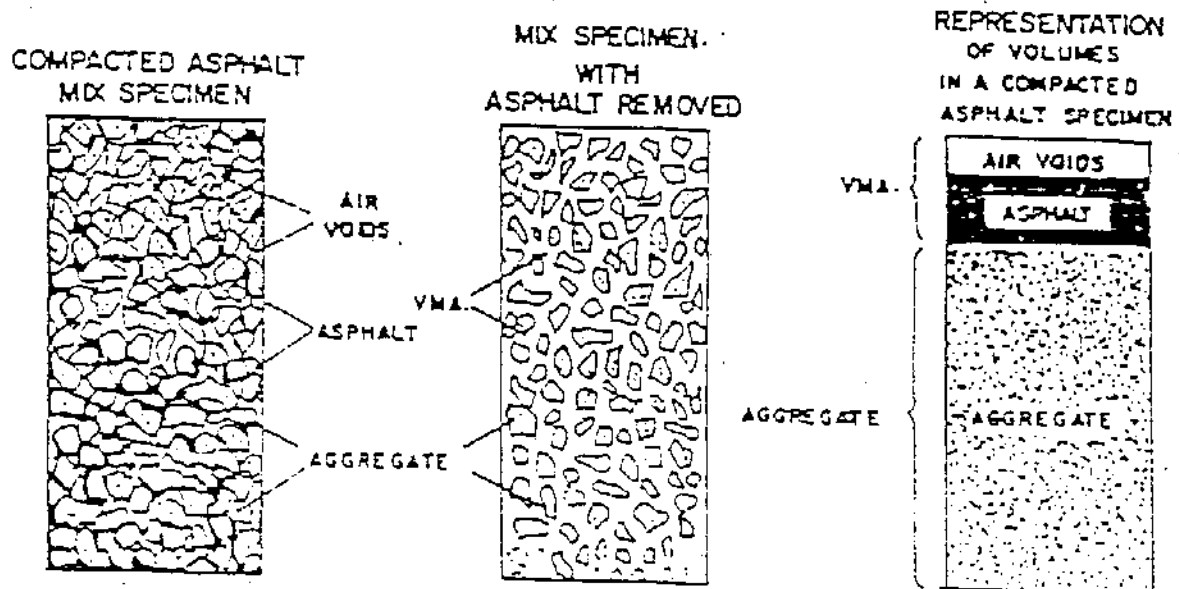
$$\phi = 60 - \text{Flow} \dots\dots\dots(1)$$

ในแอสฟัลท์ติกคอนกรีตชั้นผิวถนน ที่จะต้องมีความทนทานต่อแรงเสียดทานเนื่องจากการจราจรต้องมีค่า ϕ ไม่น้อยกว่า 40 และการเคลื่อนตัวไม่เกิน 20 ในกรณีที่มีค่าเคลื่อนตัวต่ำมาก (ต่ำกว่า 6) แสดงว่าวัสดุนั้นจะแตกง่ายหรือปริมาณแอสฟัลท์น้อยเกินไป

สำหรับค่าการเคลื่อนตัวที่ใช้จะเป็นไปตามข้อกำหนดของ THE ASPHALT INSTITUTE (1980) ดังตารางภาคผนวกที่ ๔-6 ค่าการยุบตัวมีหน่วยเป็น 0.01 นิ้ว จะมีค่าระหว่าง 8 - 16 ในการวิจัยนี้กำหนดหน่วยเท่ากับ 1/100 นิ้ว



ภาคผนวกที่ ผ-4 แสดงช่องว่างอากาศ ปริมาณแอสฟัลท์ที่ดูดเกาะ และดูดซึม
ในส่วนผสม (The ASPHALT INSTITUTE, 1974)



ภาคผนวกที่ ผ-5 แสดงช่องว่างระหว่างวัสดุรวม (VMA) ในตัวอย่างบดอัด
(THE ASPHALT INSTITUTE, 1974)

ตารางภาคผนวกที่ ผ-4 แสดงค่าช่องว่างระหว่างวัสดุรวมที่ต้องการ
(MCLEOD, 1959)(MINIMUM PERCENT VOIDS IN MINERAL AGGREGATE (VMA))

U.S.A	Nominal Maximum Particle Size # in.*	Minimum Voids in Mineral Aggregate, Percent
1.18 mm. (No.16)	0.0569	23.5
4.36 mm. (No.8)	0.093	21
4.78 mm. (No.4)	0.187	18
12.5 mm. (1/2 in.)	0.500	15
19.0 mm. (3/4 in.)	0.750	14
25.0 mm. (1 in.)	1.0	13
37.5 mm. (1 1/2 in.)	2.0	11.5
63 mm. (2-1/2 in.)	2.5	11

* Standard Specification for Wire Cloth Sieves for Testing
Purposes, AASHTO Designation M 92

* For processed aggregate the nominal maximum particle size in
the largest sieve size listed in the applicable specification
upon which any material is permitted to be retained.

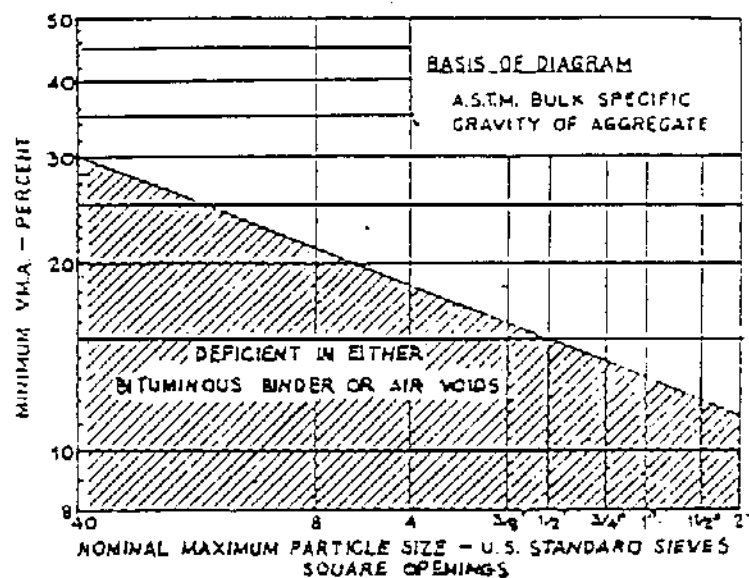
4. ความแน่นของวัสดุผสม (Density) ความแน่นเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องใช้การควบคุมการก่อสร้าง เพราะว่าผิวถนนที่บดอัดเสร็จแล้ว จะต้องมีความแน่นสูงมากพอที่จะรับปริมาณการจราจร ในการทดลองออกแบบส่วนผสม และวิเคราะห์ความแน่นของตัวอย่างที่บดอัดโดยทั่ว ๆ ไป มีหน่วยเป็นปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต (ปอนด์/ฟุต³) หรือกิโลกรัมต่อ

ลูกบาศก์เมตร (กก./ม³) ความแน่นที่ทดลองได้ ในห้องปฏิบัติการทดลองจะนำมาเป็น
ค่ามาตรฐาน สำหรับความแน่นที่บดอัดในสนาม โดยคิดเป็นปริมาณร้อยละของความหนา
แน่นที่บดอัดได้ในห้องทดลอง

ตารางภาคผนวกที่ ๙-5 แสดงส่วนประกอบของแอสฟัลท์

ส่วนประกอบ	อัตราส่วน C : H	ลักษณะ
Asphaltane	> 0.8	เป็นผงสีน้ำตาลจนถึงดำ เมื่อถูก ความร้อนจะลวกเป็นโพเลยถ้าได้รับ ความร้อนสูง ไม่ละลายใน N-Heatane
Asphaltic Resin	ระหว่าง 0.6-0.8	แข็ง เพราะ สีน้ำตาลแก่ สามารถ ปั้นและเอี้ยดจะหลอมเหลว ที่อุณหภูมิ 200 องศาฟาเรนไฮต์ ละลายได้ ใน N-Heatane คุณภาพมีVis- cosity ค่า ที่อุณหภูมิสูง
Oily Constituents	< 0.6	มีสีน้ำตาลเข้ม จนถึงน้ำตาลปนแดง เป็นของเหลว เหมือนน้ำมันหล่อลื่น ละลายได้ใน N-Heataneค่าVis- cosity เปลี่ยนเล็กน้อยต่ออุณหภูมิ

C = Carbon , H = Hidrogen



ภาคผนวกที่ ผ-6 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่าง ระหว่างมวลรวมที่มีน้อยที่สุดกับ
ขนาดโคสของวัสดุมวลรวม (THE ASPHALT INSTITUTE, 1965)

ตารางภาคผนวกที่ ผ-6 ข้อเสนอแนะ ข้อกำหนดของคุณภาพแอสฟัลต์ติกคอนกรีต
(THE ASPHALT INSTITUTE, 1980)

Marshall Method Mix Criteria	Heavy Traffic Surface & Base	
	Min	Max
- Compaction number of blow each end of Specimen		75
- Stability (lb)	1500	-
- Flow 0.25 mm (0.01 in)	8	15
- Percent Air voids	3	5
- Void in Mineral Aggregate (VMA)	ดูตารางที่ ผ-5	

จ. คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

แอสฟัลต์ติกคอนกรีตแบบผสมร้อน (Hot Mix) ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิด คือ วัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอยู่ในแหล่งธรรมชาติต่าง ๆ เป็นส่วนใหญ่ และจำเป็นต้องนำมาทดสอบ เพื่อปรับค่าให้ได้ตามมาตรฐานของข้อกำหนด

1. วัสดุมวลรวม

วัสดุผสมแอสฟัลต์ที่ใช้ลาดถนนโดยทั่วไปประกอบด้วยมวลรวมประมาณ 90 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ 75 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มวลรวมมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมรรถนะ (Performance) ของโครงสร้างถนนแบบลาดยางเพราะเป็นส่วนสำคัญในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างถนนส่วนประกอบของวัสดุมวลรวมประกอบด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

(1) วัสดุมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) หมายถึง ส่วนผ่านตระแกรงเบอร์ 8 เสถียรภาพของส่วนผสมได้จากการขัดกัน (Interlock) ของมวลรวมหยาบและจากแรงเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุต่อการเคลื่อนตัว

(2) วัสดุมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) หมายถึง ส่วนผ่านตระแกรงเบอร์ 8 และค้างบนตระแกรงเบอร์ 200 มวลรวมละเอียดเป็นส่วนที่เพิ่มความแข็งแรงโดยการขัดกันของวัสดุ และในเวลาเดียวกันมวลรวมละเอียดยังทำหน้าที่ลดช่องว่างในมวลรวมหยาบ

(3) ฝุ่น (Filler) หมายถึง ส่วนที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 200 ฝุ่นทำหน้าที่อุดช่องว่างในส่วนผสม และในขณะเดียวกันเป็นตัวเพิ่มความแข็งแรงให้กับยางที่เคลือบวัสดุ

การประเมินค่ามวลรวม (Evaluating Aggregate) การคัดเลือกวัสดุ มวลรวมเพื่อใช้งานโครงสร้างถนนแบบลาดยาง ขึ้นอยู่กับแหล่งวัสดุที่หาได้ (Availability) ราคา (Cost) และคุณภาพของวัสดุ รวมถึงชนิดของการก่อสร้างที่ตั้ง

จุดหมายไว้ มวลรวมที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างถนนลาดยาง กำหนดค่าให้เกณฑ์ของ

1.1 การกระจายของมวลรวม มวลรวมที่มีการกระจายไม่ดี อาจทำให้เกิดการแยกตัวของมวลรวมได้ ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อการบดอัดแอสฟัลต์ติกคอนกรีตแทรกอยู่ทั่ว ๆ ไปอย่างพอเหมาะมีความสามารถทำงานได้เสถียรภาพที่สูง และทนทานต่อสภาพการการใช้งาน ส่วนผลของมวลรวมที่ให้ความแน่นสูงสุด และให้ช่องว่างระหว่างเม็ดน้อยที่สุด สามารถหาได้จากสมการของฟูลเลอร์ (Fuller's Curve) ซึ่งเขียนได้สมการดังนี้

$$P = 100 [d/D]^{1/2}$$

ในเมื่อ P = ปริมาณร้อยละที่ผ่านตระแกรงใด ๆ

d = ขนาดช่องตระแกรงใด ๆ

D = ขนาดช่องตระแกรงใหญ่ที่สุด

เส้นโค้งที่หาได้จากสมการของฟูลเลอร์ บกดินแล้วจะไม่ใช้เนื่องจากไม่มีช่องว่างเพียงพอสำหรับแอสฟัลท์ การจัดขนาดผลของหิน ต้องคำนึงถึงความประหยัดและสามารถปฏิบัติงานจริงในสนามได้

1.2. ความแข็งแรงและความเหนียว (Strength and Toughness)
มวลรวมคละที่นำมาผสมกับแอสฟัลท์ เพื่อใช้งานผิวทางจะถูกแรงกระทำตลอดเวลา ดังนั้นมวลรวมคละต้องมีความแข็งแรงและความเหนียว เพื่อป้องกันมิให้เกิดการแตก ภายใต้น้ำหนักของรถที่กระทำซึ่งมีผลให้เสถียรภาพลดลง

วิธีการทดสอบความแข็งแรง และความเหนียวของมวลรวมคละที่ใช้ปัจจุบัน ได้แก่วิธีการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการสึกหรอของมวลรวมคละชนิดหยาบ โดยวิธีลอสนอนเจลิส (Los Angeles Abrasion Test) การทดสอบนี้จะเกิดทั้งการกระแทก (impact) และขัดสี (abrasion) ค่าการสึกหรอของมวลรวม ที่ได้จากการทดสอบสำหรับชั้นผิวทาง ต้องไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์

1.3 รูปร่างของอนุภาค (Particle Shape) มวลรวมคละที่มีแง่เหลี่ยมมุม จะจัดกันได้ดี ทำให้ค่าเสถียรภาพโดยเฉพาะหินเกรตบร่งเพิ่มขึ้น กรวดก้อนกลมเมื่อนำมาใช้งานแอสฟัลต์ติกคอนกรีตที่ต้องการค่าเสถียรภาพสูง กรวดก้อนกลมจะต้องมีหน้าแตกไม่น้อยกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ อย่างน้อยหนึ่งด้านของกรวดที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 4 มวลรวมคละที่แบนและยาว จะมีปัญหาในการทำงาน ทำให้เกิดการแตกแยกขนาด (Segregate) ในส่วนผสมและกำลังของส่วนผสมลดลง

1.4 ความพรุน (Porosity) มวลรวมที่มีความพรุนสูง ทำให้มีการดูดซึมแอสฟัลต์ได้สูงขึ้นและสิ้นเปลืองแอสฟัลต์ในส่วนผสม มวลรวมที่มีความพรุนต่ำจะดูดซึมน้ำมันที่ประกอบอยู่ในแอสฟัลต์เหลือเฉพาะเนื้ออย่างบางผิวของวัสดุมวลรวม ทำให้เกิดปัญหาการหลุดลอกของวัสดุมวลรวมแอสฟัลต์ ความพรุนที่เหมาะสมประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ จะช่วยให้การยึดเกาะระหว่างหินก่อนแอสฟัลต์ดีขึ้น

1.5 ลักษณะของพื้นผิว (Surface Texture) ผิวของมวลรวมที่ขรุขระทำให้การรับแรงของหินดีขึ้น ลักษณะของผิวหินมีความสำคัญต่อการยึดเกาะระหว่างหินก่อนกับแอสฟัลต์ ผิวหินเรียบแอสฟัลต์จะเคลือบผิวหินได้ง่าย แต่การยึดเกาะไม่ดีผิวที่ขรุขระมากกว่าจะให้ค่าเสถียรภาพ และความคงทนของส่วนผสมสูงกว่า

1.6 สารเคมีที่ผิวหิน (Surface Chemistry) หินจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามคุณลักษณะการยึดเกาะ ดังนี้

1.6.1 Hydrophobic หมายถึง หินที่เกาะกับแอสฟัลต์ได้ดีกว่าน้ำ เช่น หินปูน หินที่มีคุณสมบัตินี้จะเปียกแอสฟัลต์ได้ง่ายกว่าน้ำ หรือหินชนิดที่มีประจุที่ผิวเป็นบวก (Electropositive) ซึ่งประจุบวกนี้จะผลักกับน้ำ

1.6.2 Hydrophile หมายถึง หินที่เปียกน้ำได้ง่ายกว่าแอสฟัลต์หินชนิดนี้จะมีประจุที่ผิวเป็นลบ (Electro-Negative) ได้แก่ หินประเภทซิลิเซียส (Acidic or

Siliceous Aggregate) เช่น ควอทซ์ เป็นต้น

1.7 วัสดุที่เคลือบผิวหิน (Surface Coating) สิ่ง que เคลือบอยู่ที่ผิวหินมีดินเหนียวดินตะกอน หินปูน เหล็กออกไซด์ ยิบซั่ม และอื่น ๆ สิ่ง que เคลือบนี้มีความแข็งและความหนาต่างกัน ถ้าไม่ล้างออกแล้วมีผลทำให้เกิดการหลุดลอกได้

1.8 ความทนทาน (Soundness) คือ ความสามารถในการต้านทานความเสียหายของมวลรวมผลจากการกระทำของสภาพดินฟ้าอากาศ (Weathering) การทดสอบทำได้โดยการนำมวลรวมผลที่แห้งแช่ลงในสารละลายโซเดียม หรือแมกนีเซียมซัลเฟต สารละลายจะซึมเข้าไปในช่องว่างของหินเมื่อนำไปเข้าตู้อบจะทำให้เกิดแรงดันขึ้นทำให้ผิวหินแตกออก เมื่อทำการทดสอบ 5 รอบแล้ว นำมาร้อนผ่านตะแกรงพาเปอร์เซนส์โดยน้ำหนักของตัวอย่างหิน ที่หายไปจากเดิม จากข้อกำหนดของ AASHTO Specification M29-70 สำหรับมวลรวมผลชนิดละเอียดที่ใช้ผสมแอสฟัลท์คอนกรีตน้ำหนักของหินต้องหายไปไม่มากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ จากการนำสารละลายโซเดียมซัลเฟตส่วนมวลรวมผลชนิดหยาบ AASHTO Specification M79-64 เมื่อนำสารละลายโซเดียมซัลเฟต ต้องหายไปไม่มากกว่า 12 เปอร์เซ็นต์

1.9 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ (Specific Gravity and Water Absorption) การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวม เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าช่องว่าง ระหว่างเม็ดของวัสดุมวลรวม และช่องว่างอากาศภายในวัสดุผสมเครื่องมือทดสอบ และวิธีการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะแบบบัลลส์และค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวมหยาบ ใช้วิธีมาตรฐาน ASTM C127 สำหรับมวลรวมละเอียด ใช้วิธีมาตรฐาน ASTM C128

1.10 ความสะอาด (Cleanliness) วัสดุจะมีคุณภาพไม่ดีหากวัสดุมวลรวมที่ใช้มีดินเหนียวปนอยู่มากเกินไป ความสะอาดของมวลรวมอาจตรวจพินิจได้ด้วยตาแต่ควรพิสูจน์ด้วยการวิเคราะห์ล้างผ่านตะแกรง หรือใช้การทดสอบหาค่าสัดส่วน ระหว่าง

ปริมาณฝุ่นละอองที่ก่อความเสียหาย หรือวัสดุเหมือนดินเหนียวกับปริมาณวัสดุรวมที่ผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 4 การทดสอบทรายสมมูลย์ (Sand Equivalent Test) ซึ่งพัฒนาโดย The California Division of Highways และอธิบายใน AASHTO T176 หรือ ASTM D2419 The Asphalt Institute (1970)) ได้กำหนดค่าต่ำสุดของค่าทรายสมมูลย์ ของวัสดุรวมที่ใช้งานแอสฟัลต์ติกคอนกรีต ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

1.11 ลักษณะความแบนและความยาว (Flakiness and Elongation) กำหนดเป็นค่าดัชนีความแบนและความยาวซึ่งมีผลต่อความสามารถในการรับแรงอัด และมีผลกระทบต่อค่าเสถียรภาพของวัสดุ การหาค่าดัชนีความแบนจะใช้วิธีตามมาตรฐาน SSS12-19625 มาตรฐานของกรมทางหลวงกำหนดค่าดัชนีความแบนและความยาว ต้องมีค่าไม่มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์

2. วัสดุแอสฟัลท์

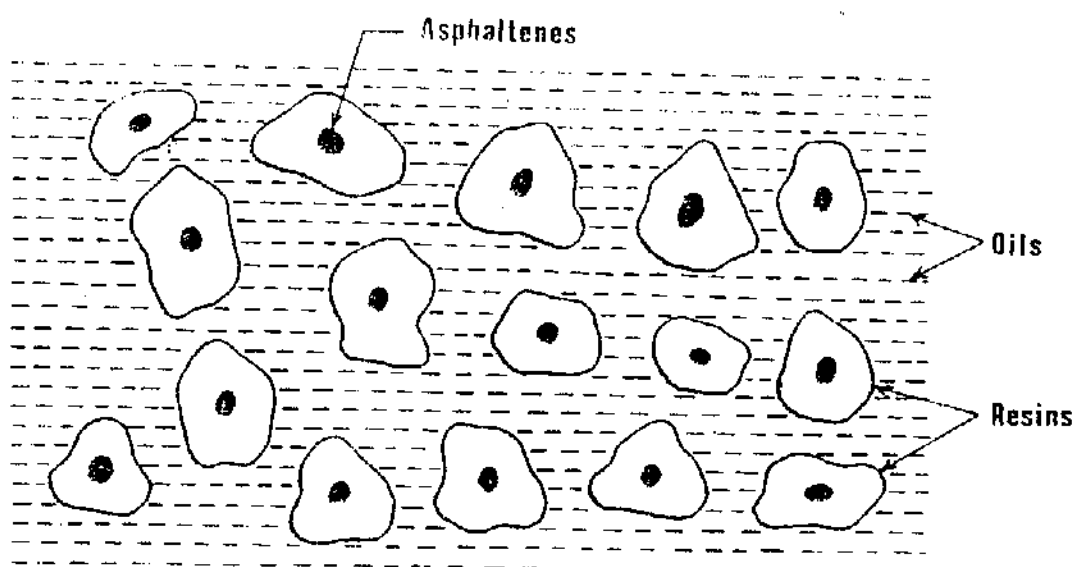
แอสฟัลท์ที่ใช้ส่วนใหญ่จะได้รับการกลั่นปิโตรเลียม (Petroleum Asphalt) มีการใช้แอสฟัลท์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural or Native Asphalt) อยู่บ้างเพียงเล็กน้อย ปิโตรเลียมแอสฟัลท์ทนทาน (Durable) ได้ดีเท่าแอสฟัลท์ธรรมชาติ และมีข้อดีกว่าในการกลั่นให้ได้คุณสมบัติสม่ำเสมอ ปราศจากสารอินทรีย์หรือสารประกอบอื่น ๆ ที่ไม่พึงประสงค์ ในขณะที่แอสฟัลท์ตามธรรมชาติมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ และมีวัสดุที่ไม่พึงประสงค์อยู่ด้วย

2.1 คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์

2.1.1 คุณสมบัติทางเคมี แอสฟัลท์เป็นสารประกอบประเภท Complex Mixture of Hydrocarbon คือสารที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน จึงมีโมเลกุลใหญ่และมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 300 ถึง 5000 หน่วย

2.1.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ แอสฟัลต์สามารถแยกส่วนประกอบออกได้เป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ ผ-7 ส่วนประกอบทั้ง 3 นี้ สามารถแยกความแตกต่างได้ โดยถืออัตราส่วนของคาร์บอน (C) ต่อไฮโดรเจน (H) เป็นหลัก ดังแสดงในตารางที่ ผ-6

ภาพผนวกที่ ผ-7 แสดงส่วนประกอบทางฟิสิกส์ของแอสฟัลต์



แอสฟัลต์ทั่ว ๆ ไป จะมีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.95 ถึง 1.05 โดยปกติแล้ว แอสฟัลต์เหลวจะมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า 1 และแอสฟัลต์แข็งจะมีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1

2.2 น้ำมันดิบที่ใช้ในการผลิตแอสฟัลต์ (Crude Oil) แอสฟัลต์เป็นส่วนประกอบของปิโตรเลียม ส่วนมากปิโตรเลียมที่ยังไม่ได้กลั่นจะมีแอสฟัลต์บรรจุอยู่ และบางครั้งน้ำมันดิบอาจเป็นแอสฟัลต์เกือบทั้งหมด อย่างไรก็ตาม น้ำมันดิบบางชนิดไม่มีแอสฟัลต์อยู่เลย จากมูลฐานของแอสฟัลต์ที่ผสมอยู่ สามารถจำแนกน้ำมันดิบอย่างกว้าง ๆ ดังนี้

2.2.1 ประเภทฐานแอสฟัลท์ (Asphalt Base Crude)

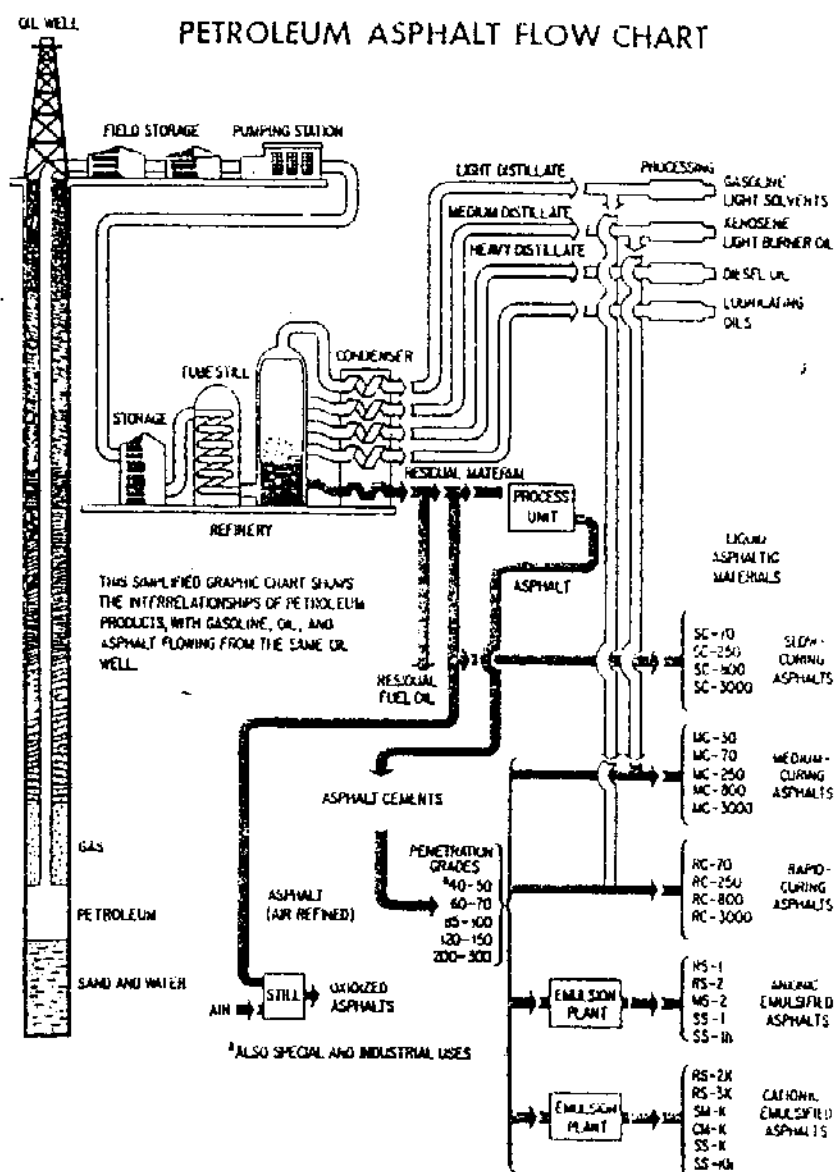
2.2.2 ประเภทฐานพาราฟิน (Paraffin Base Crude) มีส่วนผสมทั้งพาราฟินแต่ไม่มีแอสฟัลท์

2.2.3 ประเภทฐานผสม (Mixed-Base Crude) มีส่วนผสมทั้งพาราฟินและแอสฟัลท์ ประเภทที่กลั่นเอาส่วนที่เป็นน้ำมันออกแล้วจะให้แอสฟัลท์มากที่สุดคือประเภทฐานแอสฟัลท์ โดยมีองค์ประกอบใหญ่ คือ น้ำมันเบนซิน (Gasoline) น้ำมันก๊าด (Kerosene) น้ำมันดีเซล (Diesel oil) น้ำมันหล่อลื่น (Lubrication) น้ำมันเชื้อเพลิง และแอสฟัลท์ (Asphalt)

2.3 กระบวนการผลิตแอสฟัลท์ปิโตรเลียมดิบประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ รวมทั้งแอสฟัลท์ด้วย การกลั่น (Refining) เป็นการแยกส่วนให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และแอสฟัลท์รูปที่ ผ-8 แสดงแผนภูมิสายงาน (Flow Chart) การกลั่นปิโตรเลียมดิบของโรงกลั่นน้ำมันจนได้ผลิตภัณฑ์แอสฟัลท์

กรรมวิธีการผลิต จะป้อนปิโตรเลียมเข้าไปในหอให้ความร้อน ซึ่งเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นการเริ่มต้นของการกลั่น จากนั้นจะผ่านเข้าตู้หอกลั่น (Distillation Tower) เพื่อแยกส่วนประกอบที่เบากว่า (ระเหยง่ายกว่า) สำหรับกระบวนการกลั่นต่อไปอีกให้ได้ผลิตภัณฑ์ แนพธา (Naptha) น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ

สารเหลือจากการกลั่น (Residue) จากกรรมวิธีกลั่นเป็นส่วนที่หนัก (Heavy fraction) ของปิโตรเลียมดิบ เมื่อนำเข้ากรรมวิธีต่อไปจะได้ผลิตภัณฑ์อื่นอีกรวมทั้งแอสฟัลท์ด้วย แอสฟัลท์ที่แยกออกจากส่วนที่เหลือเมื่อกลั่นตามกรรมวิธีอีก จะได้แอสฟัลท์ซีเมนต์



ภาคผนวกที่ พ-8 แผนภูมิสายงานการกลั่นปิโตรเลียมสำหรับแอสฟัลท์ซีเมนต์

ขบวนการผลิตแอสฟัลท์มีอยู่ 3 วิธี คือ

- (a) Vacuum Reduction
- (b) Oxidation
- (c) Propane Precipitation

ขบวนการผลิตวิธี Vacuum Reduction จะให้แอสฟัลท์ซีเมนต์ที่มีความชื้น
เหลว (เกรด) ต่าง ๆ ตามความต้องการ เช่น AC 80-100 ขึ้นไป

ขบวนการผลิตวิธี Oxidation ให้แอสฟัลท์ที่มีความชื้นเหลวแข็งขึ้นกว่าวิธี
Vacuum Reduction ทำโดยนำเอาแอสฟัลท์ซีเมนต์ที่ยังไม่แข็งพามาให้ความร้อนประมาณ
500 องศาฟาเรนไฮด์ ขณะเดียวกันก็พ่นอากาศเข้าไปทางด้านล่าง ออกซิเจนในอากาศ
จะทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นน้ำมันในแอสฟัลท์ซีเมนต์เปลี่ยนเป็นแอสฟัลท์เรซิน (Asphalt
Resin) และทำปฏิกิริยาต่อเนื่องมาเป็นแอสฟัลท์ทินส์ (Asphaltanes) ทำให้แอสฟัลท์
แข็งขึ้น เนื่องจากส่วนที่เป็นของเหลว ได้แก่ น้ำมันต่าง ๆ จะลดลงไปแอสฟัลท์ที่ได้จาก
ขบวนการที่เรียกว่า Propane Precipitation จะให้แอสฟัลท์ที่แข็งมากเกินไป
ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานผิวทาง

2.4 แอสฟัลท์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) แอสฟัลท์ซีเมนต์สำหรับงานสร้าง
ผิวจราจรนั้น มีลักษณะกึ่งอ่อนแข็งที่อุณหภูมิธรรมดา และมีเกรดต่าง ๆ กันตั้งแต่แข็งมาก
จนถึงอ่อนมาก ในการนำไปใช้งานคัมให้เหลวให้ได้อุณหภูมิประมาณ 145 องศาเซลเซียส
เกรดของแอสฟัลท์ได้แบ่งตามความอ่อนแข็ง (Penetration) ที่อุณหภูมิองศาเซลเซียส
โดยใช้น้ำหนัก 100 กรัม กดเข็มมาตรฐานให้จมลงในเนื้อแอสฟัลท์ในเวลา 5 วินาที
ข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลท์ซีเมนต์ (Specification for Asphalt Cement) แอสฟัลท์
ซีเมนต์แบ่งเกรดตามช่วงมาตรฐานของความชื้นเหลว โดยใช้การทดลอง Penetration
เป็นมาตรฐานของการวัด แบ่งออกเป็นเกรดมาตรฐานแข็งกว่าจะมีการทะลวงน้อย
และแอสฟัลท์ที่อ่อนจะมีค่าการทะลวงสูง การที่แอสฟัลท์ซีเมนต์ให้มีหลายเกรดนั้น ก็เพื่อ

าให้สามารถเลือกใช้ให้เหมาะกับงาน และสภาพดินฟ้าอากาศแต่ละส่วนของโลก

สำหรับจุดประสงค์ในงานด้านวิศวกรรมและการก่อสร้าง คุณสมบัติที่สำคัญของ
แอสฟัลท์ซีเมนต์มี 3 ประการ คือ

1) ความข้นเหลว (Consistency) แอสฟัลท์ซีเมนต์เป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติก
ค่อนข้างเหลว เมื่อได้รับความร้อนแสดงลักษณะเฉพาะโดยความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน การ
แบ่งเกรดของแอสฟัลท์ซีเมนต์ แบ่งตามช่วงของความข้นเหลว ที่อุณหภูมิมาตรฐานการระบุ
และการวัดค่าความข้นเหลวของแอสฟัลท์ซีเมนต์ใช้การทดสอบหาความหนืด (Viscosity
Test) หรือการทดสอบการทะลวง (Penetration Test)

2) ความบริสุทธิ์ (Purity) ส่วนประกอบใหญ่ของแอสฟัลท์ซีเมนต์เป็นปิโตรเมน
ซึ่งละลายได้ในคาร์บอนไดซัลไฟด์มากกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์ สิ่งเจือปน (impurities)
ที่มีอยู่เป็นพวกสารเฉื่อย (inert) โดยปกติแอสฟัลท์ซีเมนต์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมัน
หรือความชื้นปนอยู่ อย่างไรก็ตามในการบรรทุกขนส่งอาจมีความชื้นปะปนได้จากภาชนะ
ที่ใช้บรรจุ

3) ความปลอดภัย (Safety) ข้อกำหนดระบุว่า แอสฟัลท์ต้องไม่เดือด
เป็นฟองเมื่อมีอุณหภูมิถึง 175 องศาเซลเซียส แอสฟัลท์ซีเมนต์เมื่อได้รับความร้อนจน
อุณหภูมิสูงพอจะมีไอ (Fumes) ที่ลุกวาบได้เมื่อสัมผัสกับประกายไฟ (Spark) หรือ
เปลวไฟ (Flame) แต่อุณหภูมิที่ทำให้จุดวาบไฟมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ทั่ว ๆ ไป ในการ
ปฏิบัติงาน แต่เพื่อความแน่ใจว่าความปลอดภัยมีเพียงพอ จึงจำเป็นต้องทราบ
จุดวาบไฟ (Flash Point) ของแอสฟัลท์ที่นำมาใช้งาน

3. ปูนซีเมนต์ (Portland Cement)

ปูนซีเมนต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือแคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration) สำหรับของชื่อปูนซีเมนต์ที่เรียกกันว่า "ปอร์ตแลนด์" นี้ได้มาจากการตั้งชื่อของ นายโจเซฟ แอสปดิน โดยที่ปี ค.ศ. 1824 เขาได้ทำการจดทะเบียนวิธีการผลิตปูนซีเมนต์อย่างหนึ่ง ซึ่งได้จากการเผาส่วนระหว่างหินปูนและดินเหนียว และเมื่อนำมาบดจะได้เนื้อปูนซีเมนต์เหลืองเทา คล้ายกับหินในเกาะของเมืองปอร์ตแลนด์ประเทศอังกฤษ เขาจึงตั้งชื่อว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ได้ในตอนแรกนี้ยังมีคุณภาพต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาส่วนผสมดังกล่าวใช้ความร้อนต่ำ ซึ่งทำให้ปูนกับดินเหนียวยังรวมตัวไม่ดี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมปัจจุบันโดยที่เมื่อผสมกับ หิน กรวด ทราย และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งแรงและทนทานคล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีตได้แก่ ฐานราก เขื่อน กำแพงดิน พื้นถนน เมื่อเสริมด้วยเหล็กจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับพื้น หลังคา สะพาน อาคาร อุโมงค์ และอื่น ๆ หรือเมื่อผสมรวมกับทราย และปูนขาวจะเป็นปูนฉาบสำหรับก่ออิฐหรือหิน เป็นต้น

3.1 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์ (Manufacture of Portland Cement)

วัตถุดิบ วัตถุดิบที่สำคัญซึ่งใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ประกอบด้วย สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน และอลูมิเนียม โดยมีอัตราส่วนผสมที่พอเหมาะดังตารางที่ ผ-6 เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

วัตถุดิบที่ใช้นี้อาจแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียม ได้แก่

หิน ปูน (Lime Stone) ดินสอพอง (Chalk) ดินปูนขาว (Marl) และประเภท
ที่ใช้ธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียม ได้แก่ หินเชล (Shale) ดินเหนียว (Clay) หินชนวน
(Slate)

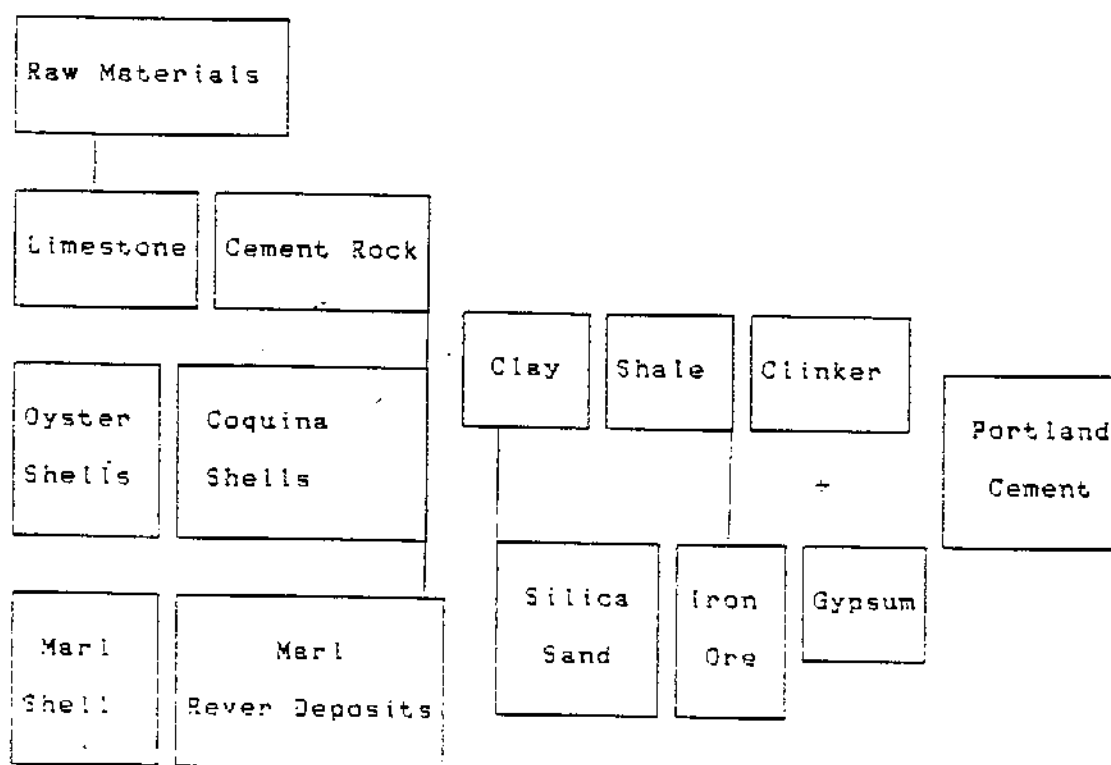
ตารางภาคผนวกที่ ผ-6 สัดส่วนของออกไซด์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ	เปอร์เซ็นต์
ปูนขาว (CaO)	60 - 65
ซิลิกา (SiO ₂)	20 - 25
เหล็กออกไซด์ (Fe ₂ O ₃) และอลูมินา (Al ₂ O ₃)	7 - 12

นอกจากนี้ยังมีวัตถุดิบอย่างอื่นอีกเช่น แร่เหล็ก (Iron Ore) ใช้เพิ่มเติมปริมาณ
ให้ได้ตามต้องการ ในกรณีที่หินเชลหรือดินเหนียวที่ใช้ปริมาณของเหล็กต่ำ ยิปซัม (Gypsum)
ใช้เพื่อเป็นสารเร่งหรือหน่วงการก่อสร้างโดยผสมรวมกับปูนเม็ดจากเตาเผา

กรรมวิธีในการผลิตอาจเป็น การผลิตแบบแห้ง (Dry Process) หรือการผลิต
แบบเปียก (Wet Process) ดังแสดงในรูปที่ ผ-9 กล่าวคือวัตถุดิบก่อนการเผาอาจให้
ผ่านกระบวนการบดและผสมในกระบวนการเปียก วัตถุดิบได้รับการบดและการผสมเปียก
การเลือกกระบวนการผลิตจะต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบ น้ำที่จะจ่ายให้โรงงาน
ราคาของเชื้อเพลิง แหล่งกำลังไฟฟ้า วิธีเก็บฝุ่น ตลอดจนความสม่ำเสมอของวัตถุดิบป้อน
เข้าเตาเผา ถ้าวัตถุดิบที่มีอยู่เป็นซีเมนต์และหินปูนซึ่งแห้งตามธรรมชาติ หรือมีความชื้นอยู่
น้อยก็อาจทำให้แห้งก่อน โดยใช้ความร้อนที่ออกจากเตาเผาแล้วจึงนำไปบดและผสมกันใน

ภาวะแห้งได้ โดยมีราคาการผลิตต่ำ ซึ่งในลักษณะนี้กระบวนการแห้งเสียค่าใช้จ่ายน้อย
 อย่างไรก็ดีมีส่วนผสมหนึ่งของสารผสมอยู่ในภาวะเปียก ค่าใช้จ่ายในการทำวัตถุดิบแห้ง
 ในกระบวนการแห้งจะเพิ่มขึ้นและอาจสูงกว่าค่าใช้จ่ายในกระบวนการเปียก ในด้านการ
 ควบคุมส่วนประกอบวัตถุดิบทางเคมี กระบวนการทั้งสองจะไม่แตกต่างกันนัก กระบวน
 การเปียกจะซับซ้อนน้อยกว่าและเหมาะกว่าแต่ในการปรับปรุงคุณภาพ และการเพิ่มชนิด
 ของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์จากวัตถุดิบที่มีอยู่ กระบวนการแบบแห้งสามารถควบคุมให้มี
 ประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการเปียก



เมื่อนำวัตถุดิบมาบดละเอียดและผสมเข้าด้วยกัน ในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วส่วนผสมนี้จะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตาเผา (Kiln) เตาเผาเปรียบเสมือนหัวใจของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์เป็นเครื่องจักรที่ใหญ่และแพงที่สุดทำงานตลอด 24 ชั่วโมงโดยไม่มี การหยุดพักเตาเผา ส่วนใหญ่ในปัจจุบันนี้ใช้แบบเตาหมุน (Rotary Kiln) ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่มีลักษณะรูปทรงกระบอกยาวประมาณ 50-150 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-4 เมตร ภายในมีด้วยอิฐทนไฟหมุนรอบตัวในแนวเอียงอย่างช้า ๆ ประมาณ 1-3 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้เผาประมาณ $1,400 - 1,500^{\circ}\text{C}$ วัตถุดิบที่ผสมและถูกเผาแล้วจะกลายเป็นปูนเม็ด (Clinker) ถูกส่งออกมาข้างนอกทางด้านล่างของเตา

สีและรูปร่างของปูนซีเมนต์จะบ่งถึงการเผา ว่าเป็นไปอย่างถูกต้องหรือไม่ ถ้าเผาได้ที่ปูนเม็ดจะมีสีคานเขียว เหมือนแก้วใส เมื่อเย็นตัวจะแวววาวเป็นจุดก้อนใหญ่ ส่วนมากจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 มม. (1 นิ้ว) ปูนเม็ดที่ยังเผาไม่ได้นั้นจะมีสีน้ำตาลเป็นหย่อม ๆ ไม่เป็นมันเหมือนที่เผาได้ที่แล้ว ปูนเม็ดที่เผาเกินพอจะมีสีน้ำตาลเข้มเป็นหย่อม ๆ การเผาเกินพอไม่เป็นการเสียหายแต่อย่างใดเพียงแต่สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบดปูนเม็ด ทั้งนี้เพราะปูนเม็ดที่ผสมเกินพอมีความแข็งแรง

ปูนเม็ดที่ได้จากเตาเผาจะร้อนมาก ต้องได้รับการลดอุณหภูมิ ให้เหมาะสมก่อนนำ การไปบด การลดอุณหภูมิกระทำโดยใช้เครื่องทำให้เย็น (Clinker Cooler) ซึ่งอาจจะเป็นแบบหมุน (Rotary Cooler) หรือแบบตระแกรง การทำให้ปูนเม็ดเย็นลงนั้นจะต้องมีการควบคุมอย่างดี เพราะมีผลต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์ ถ้าปูนเม็ดถูกทำให้เย็นตัวเร็วจะบดง่าย และความแข็งแรงภายใน 7 วันดีขึ้น แต่ถ้าปูนเม็ดถูกทำให้เย็นลงช้า ๆ ความแข็งแรงในระยะหลังจะสูงขึ้น ปูนเม็ดที่เย็นตัวลงแล้วจะถูกนำไปบดละเอียดในหม้อบดปูน (Cement Mill) ปูนเม็ดที่บดละเอียดแล้วส่วนมากจะผ่านตระแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200 ได้หมด ปูนซีเมนต์ที่บดแล้วนี้ จะมีปริมาณผสมอยู่ด้วยประมาณ 5 % เพื่อทำให้ปูนซีเมนต์ก่อตัวช้าลง เมื่อผสมกับน้ำเพราะถ้าไม่มีปริมาณผสมอยู่แล้วปูนซีเมนต์นี้จะก่อตัวเร็วเกินไปจนไม่มีเวลานานพอที่จะเอาไปเทลงแบบได้ เมื่อได้ผสมกับน้ำแล้ว ปูนซีเมนต์

ที่มีความละเอียดมากกว่า จะก่อตัวและให้กำลังความแข็งแรงได้เร็วกว่า ส่วนปูนซีเมนต์ที่หายากอาจทำให้เกิดการคายน้ำได้มากกว่าปูนซีเมนต์ที่ละเอียด ปูนซีเมนต์สำเร็จรูปที่ได้นี้จะถูกนำไปเก็บไว้ในถังทรงกระบอกใหญ่ตั้ง มีผนังกบดอัดกันความชื้นเพื่อนำไปบรรจุใส่ถุงและจำหน่ายต่อไป ในประเทศไทยจะบรรจุถุงกระสอบมีเนื้อปูนจริง 50 กิโลกรัม

3.2 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุซิลิเนียมซิลิกอนอลูมิเนียมและเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเคมี และรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ดในรูปของผลึกละเอียดมาก สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่างที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลังจากการเผาแล้วได้แก่ เทตระคัลเซียม ซิลิเกต (Tetracalcium Silicate) ไดคัลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) และเทตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Alumino-ferrite) ดังแสดงตารางที่ ผ-7 ซึ่งได้ให้ชื่อย่อของสารประกอบเหล่านี้ตามอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ โดยให้ชื่อย่อของออกไซด์ของธาตุใดด้วยอักษรของธาตุนั้นเพียงตัวเดียว กล่าวคือ Ca D ย่อเหลือตัว C; SiO_2 ย่อเหลือตัว S; Al_2O_3 ย่อเหลือตัว A; และ Fe_2O_3 ย่อเหลือตัว F

นอกจากนี้แล้วยังมีสารประกอบอื่น ๆ อีกที่ได้หลังจากการเผา เช่น MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O ซึ่งพบอยู่เป็นจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ จำนวนเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบเหล่านี้ ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ชนิดหนึ่ง ๆ ไม่เท่ากัน ประเภทของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับจำนวนของสารประกอบเหล่านี้ สารประกอบ C_3S ทำให้ปูนซีเมนต์ที่กำลังรับแรงได้เร็ว สารประกอบ C_2S ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็ว เป็นสารประกอบทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงในระยะหลัง และยับยั้งเป็นตัวหน่วงเวลาให้ปูนซีเมนต์ก่อตัวและแข็งตัวตามต้องการ

ตารางภาคผนวกที่ ผ-7 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรซิลเซียมซิลิเกต	$3 \text{ Ca-O} - \text{SiO}_2$	$\text{C}_3 \text{ S}$
ไดซิลเซียมซิลิเกต	$2 \text{ Ca-O} - \text{SiO}_2$	$\text{C}_2 \text{ S}$
ไตรซิลเซียมอลูมิเนต	$3 \text{ CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3 \text{ A}$
เตตราซิลเซียมอลูมิเนียมเฟอร์ไรต์	$4 \text{ CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4 \text{ AF}$

3.3 อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

จำนวนของสารประกอบ ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ ทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไป เช่น ทำให้ปูนซีเมนต์กำลังรับแรงเร็วหรือช้า ระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัว อาจเร็วขึ้นหรือช้าลง ความร้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยา ระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์อาจสูงหรือต่ำเป็นต้น

สารประกอบไตรซิลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดซิลเซียมซิลิเกต (C_2S) ซึ่งผสมรวมกันเป็นปริมาณเท่ากับ 70-80 % ของปริมาณของปูนซีเมนต์ทั้งหมด จะเป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ ดังตารางที่ ผ-8 กล่าวคือ ถ้ามี C_3S ผสมอยู่น้อย จะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีความแข็งแรง หรือกำลังสูงในระยะแรก (High early strength) และให้ปริมาณความร้อนมาก แต่ในทางตรงกันข้ามถ้ามี C_2S ผสมอยู่มากและมี C_2S ผสมอยู่น้อยจะได้ปูนซีเมนต์ที่มีความแข็งแรงต่ำหรือกำลังช้าและปริมาณความร้อนน้อย สารประกอบไตรซิลเซียมอลูมิเนต จะมีผลต่อการทำปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำตลอดจนความร้อนที่เกิดขึ้น ถ้าปูนซีเมนต์มีผสมอยู่น้อย ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำก็จะน้อย แต่ช่วยให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยสูงกว่า มีรอยแตกร้าว (Cracking) น้อยกว่า มีความคงทนต่อปฏิกิริยาของกรดและเกลือซัลเฟตดีกว่าปูนซีเมนต์

ที่มี C_4A ผสมอยู่มาก ถ้ามีปริมาณของปูนขาว CaO อยู่ในปูนซีเมนต์มาก จะทำให้ปูนซีเมนต์ที่มีระยะเวลาการก่อตัวช้า (Slow Setting) แต่จะได้ปูนซีเมนต์ที่มีกำลังสูงในระยะแรก ถ้าหากมีปริมาณของปูนขาวนี้มากเกินไป จะทำให้ปูนซีเมนต์ที่มีความไม่คงตัว (Unsoundness)

ตารางภาคผนวกที่ ผ-8 ปริมาณร้อยละของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ

สารประกอบ	ประเภท หนึ่ง	ประเภท สอง	ประเภท สาม	ประเภท สี่	ประเภท ห้า
ไตรซิลเซียมซิลิเกต	45	46	56	30	43
ไดซิลเซียมซิลิเกต	25	29	15	46	36
ไตรซิลเซียมอลูมิเนต	12	6	12	54	4
เตตราซิลเซียมอลูมิ	8	12	8	13	12
โรเฟอร์ไรท์					

ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของซิลิกา SiO_2 (Silica) และอลูมินา Al_2O_3 (Alumina) อยู่มากจะเป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูง แต่ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณซิลิกามากเพียงอย่างเดียวจะเป็นปูนซีเมนต์ที่มีระยะเวลาการก่อตัวช้า ซึ่งตรงกันข้ามกับปริมาณของอลูมินามากซึ่งทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น

ออกไซด์ของเหล็ก Fe_2O_3 (Iron Oxide) รวมกับปูนขาวและซิลิกาจะเป็น

ประโยชน์ต่อบุนซีเมนต์ที่มีซิลิกาสูง คือทำให้ปริมาณของไตรคัลเซียมอลูมิเนตลดลง แต่บุนซีเมนต์ที่มี Fe_2O_3 มากเกินไปจะแข็งตัวช้าเกินไป

ถ้ามีปริมาณของแมกนีเซียม (Magnesium) อยู่มากในส่วนผสมของบุนซีเมนต์จะทำให้เกิดความไม่คงตัว (Unsoundness)

3.4 ประเภทของบุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สมาคมทดสอบวัสดุแห่งประเทศไทย (ASTM) และสำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย (ม.อ.ก. 15) แบ่งบุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ 5 ประเภทคือ

1. บุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง เป็นบุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และสำหรับใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่ว ๆ ไปที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศรุนแรงหรือในที่อันตรายจากซัลเฟตพิเศษ หรือที่ความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำ จะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตรายแก่บุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพานาคสีเขียว และตราเพชร ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะในตารางที่ ๘-9
2. บุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสอง เป็นบุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงกันดินหนา ๆ หล่อทำคอนกรีตขนาดใหญ่ ต่อม่อสะพาน เป็นต้น ซึ่งได้แก่ บุนซีเมนต์ตราพานาคเจ็ดเศียร
3. บุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสาม เป็นบุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (High Early Strength Cement) หรือที่เรียกว่าฮูบเปอร์ซีเมนต์ บุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทนี้ให้กำลังสูงในระยะแรก มีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาผลิตได้โดยการเปลี่ยนสัดส่วนและโดยการเตรียมสารอื่นโดยการบดให้ละเอียดยิ่งขึ้น หรือโดยการเผาให้ดีขึ้น มีประโยชน์ในการอัดคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็วหรือถอดแบบเร็ว เช่น เสาเข็ม คอนกรีต ถนน พื้นและคาน ที่ต้องถอดแบบเร็วเป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดงและตราสามเพชร

4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสี่ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ ใช้มากในงานก่อสร้างคอนกรีตหนา เช่น เขื่อน เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นจะแข็งตัว

5. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ต้านทานซัลเฟตได้สูงสำหรับใช้กับโครงสร้างที่อยู่ในที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น น้ำหรือดินที่มีด่าง (Alkaline) สูงมีระยะเวลาการแข็งตัวช้ากว่าประเภทหนึ่ง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม

ตารางภาคผนวกที่ ผ-9 การหาความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (1)

Sample No.	Type of Cement	Weight of Sample gm.	Volume use Instead of gm/cm ³	Density of Cement gm/cm ³	Specific Gravity of Cement
1	Portland Cement Type 1	64	20.4	1	3.14

4 ปูนขาว (Lime)

ปูนดิบ (Quicklime) คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ผลิตโดยการเผาหินที่มีส่วนประกอบใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในบางครั้งใช้หินที่มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) แทน

ปูนดิบสามารถแบ่งออกตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น :

(1) ปูนขาวก้อน (Lump lime) เป็นขนาดของปูนดิบที่ออกมาจากเตาแบบตั้ง มีขนาด 4-12 นิ้ว (10-30 เซนติเมตร)

(2) ปูนเม็ดขาว (Granular lime) เป็นขนาดที่ออกจากเตาเผาแบบหมุน ขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว (0.63 เซนติเมตร)

(3) ปูนขาวเม็ดใหญ่ (Pebble lime) เป็นปูนดิบที่ผลิตโดยการเผาหินปูนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว - 2 นิ้ว (1.9-5 เซนติเมตร)

(4) ปูนขาวบด (Crushed lime) เป็นปูนดิบที่บดจนได้ขนาดที่ต้องการ เช่น ผ่านตะแกรงเบอร์ 6, 10 หรือ 20

(5) ปูนผง (Pulverized lime) ปูนดิบที่ถูกบดอัดให้เป็นผงผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ให้ความ

ปูนดิบแบ่งตามปริมาณแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมที่มีอยู่เป็น 4 ประเภท

(ก) แคลเซียมสูง (High-Calcium) ปูนดิบที่ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 90 % หรือมากกว่า บางทีเรียกว่าปูนขาวค้าง

ข) แคลเซียม (Calcium) ปูนดิบที่ประกอบด้วย CaO น้อยกว่า 75%

ค) แมกนีเซียมสูงหรือโดโลไมติก (High-magnesian or Dolomitic) ปูนดิบที่ประกอบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์มากกว่า 25%

ง) แมกนีเซียม (Magnesium) ปูนดิบที่ประกอบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) หรือแมกนีเซียม (Magnesium) ไม่น้อยกว่า 20%

(6) หินปูน (Limestone Rocks)

หินปูนที่บริสุทธิ์ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งจะแยกตัวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (1652° ฟาเรนไฮต์) หรือกว่าโดยมีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ถูกขับออกในรูปของก๊าซคงเหลือปูนดิบหรือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไว้ในรูปของแข็งสีขาว

เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตประกอบด้วย CaO 56 ส่วน และ CO_2 44 ส่วน โดยน้ำหนัก สัดส่วนตามทฤษฎีของปูนดิบที่ได้จากการเผาหินปูนจะมี 56 ส่วน ในทางปฏิบัติจะได้น้อยกว่านี้มาก เพราะมีสารอื่นเจือปนอยู่ในหินปูนและเพราะความไม่สมบูรณ์ของกระบวนการเผา

หินปูนที่พบในธรรมชาติจะมีแมกนีเซียม (MgO) แทนที่บางส่วนของปูนขาวซึ่งอาจจะเรียกได้ว่าเป็นหินปูนขาวแมกนีเซียม (Magnesium Limestone) นอกจากแมกนีเซียมแล้วปกติยังมีซิลิกา เหล็กออกไซด์ และอลูมินาอยู่ด้วยนอกจากนี้ยังมีซัลเฟอร์และอัลคาไลส์เล็กน้อย

ลักษณะทางกายภาพของหินปูนมีความสำคัญต่ออุณหภูมิในการเผา หินปูนที่หยาบและพรุนจะเผาได้เร็วกว่าหินปูนที่แน่นและผลึกละเอียด หินก้อนเล็กอาจเผาได้ดีกว่าหินก้อนใหญ่

4.1 การผลิตปูนขาว

4.1.1 การเผา

การเผา (Burning or Calcination) ปูนขาวมีความมุ่งหมาย 3 ประการ

- (1) ให้น้ำในหินระเหยไป
- (2) ให้มีการแยกตัวทางเคมีเมื่อหินปูนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
- (3) ขับคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากรูปของก๊าซคงเหลือออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียมไว้

การระเหยของน้ำที่อยู่ในหิน หมายถึง บางส่วนของความร้อนที่เข้าไปในระหว่าง การเผา ไม่มีส่วนช่วยโดยตรงในการแยกตัวของคาร์บอนเนตความร้อนนี้ไม่ถือว่าเป็นการแยกตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์ ๗ ความดัน 1 บรรยากาศจะเกิดขึ้น ๗ อุณหภูมิ 898 องศาเซลเซียส (1650 องศาฟาเรนไฮต์) สำหรับแมกนีเซียมคาร์บอเนตค่ากว่านี้

ก) เตาที่ใช้ในปูนขาวมี : เตาแบบครึ่งคราว (Intermittent Kiln) เตาเผาแบบติดต่อกัน (Continuous kiln) และเตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln)

(1) เตาเผาแบบครึ่งคราว ในสมัยเริ่มแรกเตาเผาแบบนี้เป็นโครงสร้างแบบโดมก่อด้วยหินปูนก้อนใหญ่ที่จะเผา โดยมีก้อนเล็กกองไว้บนโดม จุดไฟใต้โดม เมื่อหินทั้งหมดร้อนแดงให้เผาต่อไปอีก 3 หรือ 4 วัน จนกระทั่งหินเริ่มอ่อนตัวจึงค่อยดับไฟแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง การเอาปูนขาวออกเป็นการรื้อเตาไปในตัวด้วย

เตาเผาแบบครึ่งคราวที่ถาวรที่ใช้กันในปัจจุบันซึ่งมักจะเรียกว่าเตาเผา หม้อ (Pot Kilns) สร้างด้วยหินและบุด้วยอิฐทนไฟ มีตะแกรงสำหรับเป็นที่วางเพลิง

(2) เตาเผาแบบติดต่อกัน เป็นเตาเผาที่อยู่บนแนวตั้งที่เชื้อเพลิงและหินปูนผสมกันป้อนเข้าสู่ข้างบน โดยให้เชื้อเพลิงและหินปูนเป็นชั้นสลับกันอยู่ในเตาปูนขาวที่เผาได้นำเอาออกที่ก้นเตา

เตาเผาแนวตั้งอีกอย่างหนึ่งออกแบบมาให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับหินปูน โดยเชื้อเพลิงเผาอยู่ในผนังเตาหรืออยู่นอกเตา ด้วยเหตุนี้หินปูนจึงสัมผัสกับก๊าซร้อนของการสันดาปเท่านั้น

(3) เตาเผาแบบหมุน มีการใช้เตาเผาแบบนี้ในการเผาปูนขาวมากข้อเสียของการเผาแบบหมุน คือหินปูนต้องได้รับการบดให้เป็นก้อนแล้วก่อนการเผา ปูนขาวที่เผาได้ละเอียดเกินกว่าที่จะขายได้เป็นปูนขาวก้อนได้ จึงต้องได้รับการบดให้เป็นผงหรือให้รวมกับน้ำเสียก่อน

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาปูนขาวมีไม้ ถ่านหิน น้ำมันดิบ (Bituminous Coal) ก๊าซธรรมชาติและก๊าซกลั่น (Producer Gas) การเผาบางแห่งใช้ไฟฟ้าให้ความร้อนเชื้อเพลิง ไม่มีข้อดีเหนือกว่าถ่านหิน เพราะมีเปลวเพลิงกระจายความร้อนได้ทั่วถึงดีกว่าก๊าซธรรมชาติและก๊าซกลั่น การใช้ในโรงงานเผาปูนขาวขนาดใหญ่และทันสมัยเพราะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนดีกว่าก๊าซร้อน และให้เตาอยู่ที่กึ่งกลางของเตาเผา

วัสดุที่ต้องใช้งานในการปฏิบัติการของเตาเผาประกอบด้วยวัสดุ 3 ประเภท ดังนี้

(ก) หินปูนได้รับความร้อนเบื้องต้นจากก๊าซร้อนของการสันดาปที่ออกจากเตา

(ข) การแยกตัวของหินปูนเกิดจากความร้อนโดยตรงจากเชื้อเพลิง

(ค) ปูนขาวที่เผาได้ซึ่งสะสมอยู่ตอนล่าง ของเตาถูกนำออกจากเตาเป็นครั้งคราว ปูนขาวที่อยู่ในเตา ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง ไม่อาจนำออกจากเตาหมด เพราะนอกจากจะต้องให้ปูนขาวเหลือบางส่วนอยู่เต็มตอนล่างของเตาได้ตะแกรงที่วางเชื้อเพลิง เพื่อไม่ให้หินปูนที่ยังมิได้รับการเผาลงถึงระดับได้ตะแกรง ซึ่งเป็นเขตที่ไม่มีเปลวของความร้อน ส่วนของเตาได้ตะแกรงเชื้อเพลิงเรียกว่าตัวทำความเย็น (Cooler)

การนำเอาปูนขาวออกจากเตากระทุ้งโดยการเปิดประตูที่อยู่ใต้ตะแกรง โดยใช้
ก้อนเหล็กที่มีน้ำหนักขวิดลงบนที่รองรับ

จ) เตาเผาเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor Kilns) ประกอบด้วยปล่องในแนวตั้งที่มี
ห้องให้ความร้อน 4 ห้อง และห้องให้เป็นห้องหนึ่งอยู่ทีกัน และก๊าซร้อนและก๊าซเชื้อเพลิง
ถูกเป่าขึ้นข้างบนภายใต้ความดันผ่านชั้นหินปูนในแต่ละห้อง เพื่อให้เกิดการรบกวนวัสดุชั้น
ของหินปูนอยู่ในสภาพลอยตัวด้วยอากาศ และก๊าซเป่าผ่านในปริมาณที่เพียงพอที่จะทำให้
วัสดุลอยตัวระดับของหินปูนจะลอยตัวถึงระดับที่ออกที่อยู่ตอนบน ซึ่งเป็นท่อให้ไหลออก
ไปสู่ห้องล่างอยู่ต่ำกว่าถัดลงไป วัสดุจะผ่านลงสู่ห้องล่างถัดไปที่อยู่ต่ำกว่าซึ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้น
และหินปูนสูงขึ้น ตามลำดับ จนกระทั่งหินปูนถูกเผาอย่างสมบูรณ์ในห้องที่อยู่ต่ำสุด ผลผลิต
ที่เผาแล้วจะไหลลงสู่ห้องให้เป็นตัวที่กันของปล่องที่นั้นจะเป็นตัวในอากาศ แล้วปล่อยออก
หินปูนที่ใช้ป้อนเตาเผาให้ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ส่วนที่เป็นฝุ่นละเอียดคามาซึ่งปูนขาวที่มี
สมบัติที่สามารถผลิตเตาเผาเครื่องปฏิกรณ์ จะทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงกว่าเตาหมุน

การปฏิบัติภายหลังการเผา

ปูนขาวที่เป็นตัวแล้ว เมื่อนำออกจากเตาเผาพร้อมที่จะนำออกจากหน่วยในรูปของปูน
ขาวในเตาที่ไม่มีห้องให้เป็นตัว ให้แม่ปูนขาวบนพื้นเพื่อให้เป็นตัวหรือปล่อยให้อยู่ในภาชนะ
ที่ป้องกันเชื้อเพลิงได้ 2-3 ชั่วโมงก่อนที่จะนำไปเก็บ ปูนขาวที่ได้รับการเผาไม่เพียงพอ
หรือเกินก็จะมีลักษณะที่สังเกตได้ง่าย ให้ทำการคัดเลือกขณะที่กำลังให้ลงสู่รถรองรับหรือ
ขณะอยู่บนพื้นเพื่อให้เป็น

4.2 ตัวอย่างปูนขาว

ปูนขาวที่ใช้ผสมกับแอสฟัลท์คอนกรีต เป็นปูนขาวที่ผลิตโดยบริษัทศิลาทิพย์จำกัด เป็น
ปูนขาวที่ส่งไปจำหน่ายต่างประเทศ ไม่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไปเป็นปูนขาว สำหรับใช้
งานด้านวิทยาศาสตร์เหมาะสำหรับใช้ในการวิจัย มีคุณสมบัติดังแสดงไว้ในตารางที่ ผ-9,
ตารางที่ผ-10 ปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมแอสฟัลท์ติกคอนกรีต ร้อยละ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5,
3.0 และ 3.5 ของน้ำหนักมวลรวม

ตารางภาคผนวกที่ ผ-10 การวิเคราะห์ปูนดิบ (Analysis of Quicklimes)

ประเภทปูนขาว Class of Lime	ปูนดิบแคลเซียมสูง High-Calcium Quicklime			ปูนดิบแคลเซียมและ แมกนีเซียม Calcium and Mag- nesium Quicklimes			ปูนดิบโดโลไมต์ Dolomitic Quicklime		
ส่วนประกอบ Component	ต่ำสุด Min. %	สูงสุด Max. %	เฉลี่ย Ave.of (10)%	ต่ำสุด Min. %	สูงสุด Max. %	เฉลี่ย Ave.of (6)%	ต่ำสุด Min. %	สูงสุด Max. %	เฉลี่ย Ave.of %
SiO ₂	0.33	2.20	0.18	0.66	9.00 *	3.12	0.14	1.59	0.87
Fe ₂ O ₃	0.08	0.43	0.23	0.17	0.59	0.41	0.19	0.39	0.29
Al ₂ O ₃	0.02	0.42	0.22	0.18	2.57 *	0.93	0.14	0.49	0.32
CaO	91.4	98.1	94.98	78.59	84.8	81.42	55.8	64.5	60.13
MgO	0.17	4.55	1.39	1.03	16.8	9.26	31.6	40.6	36.12
H ₂ O	0.36	3.45	1.66	0.63	12.4 **	4.18	0.55	1.56	1.06
CO ₂	0.20	1.84	0.83	0.24	1.94	0.18	0.35	3.01	1.68

* สารเจือปนเกรดสูงเกินไป

** แสดงการเริ่มต้นรวมกับความชื้นในอากาศ

ตารางภาคผนวกที่ พ-11 รายละเอียดกำหนดสำหรับปูนดิบ

(ASTM Specification of Lime)

Composition	Calcium Lime	Magnesium Lime
Calcium Oxide,min.,%	75	-
Magnesium Oxide, min., %	-	20
Calcium & Magnesium Oxide, min., %	95	95
Silica, Alumina, and Oxide of Iron max., %	5	5
Carbon Dioxide, max.,%		
(a) If sample is taken from kiln	3	3
(b) If sample is taken at any other place	10	10

ตารางภาคผนวกที่ ผ-12 สรุปลำดับขั้นตอนการ Mixes Design

(ใช้สารปรับปรุงหรือเพิ่มคุณสมบัติ)

1. เตรียมวัสดุมวลรวมหยาบ วัสดุมวลรวมละเอียด ยางแอสฟัลท์
AC 60-70 ปูนซีเมนต์และปูนขาว
2. ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่เตรียมในข้อ 1
3. ทำการ Combine Aggregate
4. ทำการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแอสฟัลท์โดยวิธีมาร์แชลล์
 - 4.1 ชั่งน้ำหนักมวลรวมสำหรับผสมแต่ละตัวอย่างและสารปรับปรุง
 - 4.2 ให้ความร้อนมวลรวมของส่วนผสม สารปรับปรุง แต่ละตัวอย่าง
ในเตาอบ
 - 4.3 บรรจุมวลรวมของส่วนผสม สารปรับปรุง แต่ละตัวอย่าง
ในเครื่องผสม
 - 4.4 เติมแอสฟัลท์ร้อนตามปริมาณที่กำหนดลงในตัวอย่างผสม
 - 4.5 ผสมมวลรวม สารปรับปรุง และแอสฟัลท์เข้าด้วยกัน
 - 4.6 นำวัสดุผสมร้อนเข้าแบบบดอัดทำก้อนตัวอย่าง
 - 4.7 บดอัดให้ก้อนตัวอย่างเย็นแล้วดันตัวอย่างออกจากแบบ
 - 4.8 นำก้อนตัวอย่างทำการทดสอบหาค่าต่าง ๆ ที่กำหนด
5. ทำการทดสอบตัวอย่างต่อไป โดยเริ่มทำจากขั้นตอนที่ 4 อีกครั้ง
ตามต้องการ

ภาคผนวกที่ ผ-10 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ผลการออกแบบส่วนผสม
คอนกรีตแอสฟัลท์ที่ปรับปรุงคุณภาพโดยผสมปูนขาว กับคอนกรีต
แอสฟัลท์ที่ปรับปรุงคุณภาพโดยผสมปูนซีเมนต์

