

การศึกษาการใช้ชีตะกรันจากกระบวนการหลอมเหล็กหล่อแทนมวลรวมละเอียด ในแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน

A Study of Using Slag From Cast Iron Smelting Process as Hot Bin 1 Aggregate Replacement in Asphalt Concrete Hot Mix

คำนำ

ผิวพื้นถนนในประเทศไทยนิยมทำการก่อสร้างด้วยผิวทางชนิดแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) มากกว่าร้อยละ 80 ประกอบกับต้องเผชิญกับอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณการจราจร ดังนั้นการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ที่มีความแข็งแรง ทนทาน สามารถต้านทานการเกิดร่องล้อ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นยิ่ง

การออกแบบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีของมาร์แชลล์ นิยมใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยผสมกับมวลรวมละเอียด (Hot Bin 1) และมวลรวมหยาบ (Hot Bin 2, 3, 4) ชนิดหินปูน หรือหินแกรนิต หรือหินบะซอลท์ ซึ่งเป็นวัสดุตามธรรมชาติได้จากขบวนการระเบิด และบดย่อยจนละเอียดตามขนาดที่ต้องการซึ่งเป็นการทำลายทรัพยากรธรรมชาติอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีการศึกษานำวัสดุต่าง ๆ มาเป็นวัสดุทดแทนมากมาย อาทิ เช่น ถ้ำลอยลิกไนท์ ถ้ำหนักลิกไนท์ เศษแก้ว เม็ดดินผสมทรายเผา ทราย ตะกรันเตาหลอม เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำวัสดุเหลือใช้เข้ามาทดแทนวัสดุธรรมชาติ

สำหรับการศึกษาในประเทศไทย ยังไม่เคยมีการศึกษานำชีตะกรันเป็นวัสดุผสมในงานแอสฟัลต์คอนกรีตมาก่อนซึ่งการศึกษานี้จะมุ่งเน้นการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ด้านกายภาพเมื่อนำชีตะกรัน มาทดแทนมวลรวมละเอียด ว่าสามารถให้ผลดีเทียบเท่า หรือแตกต่างกับการใช้หินเป็นมวลรวมมากน้อยเพียงใด เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาการใช้วัสดุใหม่ ๆ เป็นทางเลือกต่อไป

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินชนิดต่าง ๆ เป็นมวลรวม ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน กับแอสฟัลต์คอนกรีตที่นำซีตกรันแทนมวลละเอียด ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ มีขอบเขตของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของซีตกรันโดยเปรียบเทียบกับ หินปูน หินแกรนิต และหินบะซอลท์
2. ศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ซีตกรันแทนมวลรวมละเอียดด้วยอัตราส่วนผสมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูน หินแกรนิต และหินบะซอลท์ เป็นวัสดุมวลรวม โดยการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 เป็นส่วนเชื่อมประสาน
3. เพื่อหาแนวทางที่จะนำซีตกรันมาใช้ประโยชน์ เป็นมวลรวมละเอียดในงานแอสฟัลต์คอนกรีต

ขอบเขตการศึกษา

1. หากคุณสมบัติของซีตกรัน และหินชนิดต่าง ๆ ที่นำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวม ได้แก่ หินปูน หินแกรนิต และหินบะซอลท์
2. หากคุณสมบัติต่าง ๆ ของผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ใช้ซีตกรันเป็นมวลรวมละเอียดด้วยอัตราส่วนผสมต่างๆ และใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน กับผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ใช้หินชนิดต่าง ๆ เป็นมวลรวมและใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน
3. หากคุณสมบัติทางด้านกายภาพของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต จากข้อ 1 และ ข้อ 2 ได้แก่

- ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent)
- ความหนาแน่น (Density)
- ปริมาณช่องว่าง (Air Void)
- ค่าการไหล (Flow)
- เสถียรภาพ (Stability)
- ดัชนีความแข็งแรง (Strength Index)
- เปอร์เซ็นต์การหลุดลอก (Stripping)

ทั้งนี้จะยึดถือขนาดคละตามตารางที่ 1 ขนาดคละของวัสดุผสมแทรกตามตารางที่ 2 และข้อกำหนดการออกแบบมาร์แชลล์ ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ขนาดคละของวัสดุรวมรวมของตัวอย่างทดสอบ

ขนาดที่เรียกใช้ 12.5 มม. (1/2 นิ้ว) สำหรับชั้นผิวทาง (Wearing Course)		
ความหนา 40 - 70 มม.		
ขนาด		ปริมาณผ่านตะแกรง
มม.	นิ้ว และ เบอร์	ร้อยละโดยมวล
19.00	$\frac{3}{4}$ นิ้ว	100
12.50	$\frac{1}{2}$ นิ้ว	80 - 100
4.75	ตะแกรงเบอร์ 4	44 - 74
2.36	ตะแกรงเบอร์ 8	28 - 58
0.30	ตะแกรงเบอร์ 50	5 - 21
0.075	ตะแกรงเบอร์ 200	2 - 10

ตารางที่ 2 ขนาดตะแกรงของวัสดุผสมแอสฟัลต์

ขนาดตะแกรง		ปริมาณผ่านตะแกรง
มม.	เบอร์	ร้อยละโดยมวล
0.6	ตะแกรงเบอร์ 30	100
0.3	ตะแกรงเบอร์ 50	75 - 100
0.075	ตะแกรงเบอร์ 200	55 - 100

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดการออกแบบมาร์แชลล์

รายการ		ชั้นทาง				
		Wearing Course	Wearing Course	Binder Course	Base Course	Shoulder
		9.5 มม.	12.5 มม.			
Blows		75	75	75	75	75
Stability						
	N	8006	8006	8006	7117	7117
	(lb)	(1800)	(1800)	(1800)	(1600)	(1600)
Flow	(0.01 in)	8 – 16	8 – 16	8 – 16	8 – 16	8 – 16
Air Voids	%	3 - 5	3 - 5	3 - 5	3 - 6	3 - 5
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA)						
	Minimum %	15	14	13	12	14
Stability Flow						
	N / 0.25 mm.	712	712	712	645	645
	(lb / 0.01 in)	(160)	(160)	(160)	(145)	(145)
Percent Strength Index						
	Minimum %	75	75	75	75	75
Void filled with bituminous						
	(VFB) %			65 - 80		

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เพื่อประโยชน์จากการนำจีตะกฐัน มาใช้ประโยชน์อีกครั้งหนึ่ง เป็นการอนุรักษ์ทรัพยากร และรักษาสภาพสิ่งแวดล้อม
2. เพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานในโรงงานก่อสร้างทาง
3. เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม สำหรับการนำจีตะกฐันมาทดแทนหินสำหรับงานก่อสร้างทาง

การตรวจเอกสาร

ชีตะกรันจากกระบวนการหลอมเหล็กหล่อ

ชีตะกรัน (Slag) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก หรือการแปรรูปผลิตภัณฑ์เหล็ก ซึ่งได้ในช่วงเวลาที่เหล็กละลายตัวขณะอยู่ในเตาหลอมแล้วเกิดการแยกตัวโดยเหล็กที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าจะจมลงสู่ก้นเตา ส่วนชีตะกรันซึ่งได้จากการรวมตัวกับสารละลายเชิงซ้อนซิลิเกต และออกไซด์ จะลอยตัวอยู่ด้านบนเหนือน้ำเหล็ก จากนั้นจึงถูกคัดแยกออกจากเตา ด้วยช่องระบายที่ถูกออกแบบไว้ เมื่ออุณหภูมิเย็นลงก็จะได้ชีตะกรันเหล็กที่เป็นก้อนแข็ง

ประเภทของชีตะกรัน

ชีตะกรันจากการถลุงและการหลอมแบ่งประเภทตาม NSA (National Slag Association) ออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ชีตะกรันเตาถลุง (Blast Furnace Slag) ได้มาจากการนำสินแร่ (Iron Ore) ถ่านโค้ก (Coke) และฟลักซ์ (Flux) ที่ได้จากทั้งหินปูน (Limestone) และโดโลไมต์ (Dolomite) มาหลอมด้วยความร้อนในเตาถลุง เมื่อขบวนการถลุงเหล็กเสร็จสิ้น หินปูนที่อยู่ในฟลักซ์จะทำปฏิกิริยารวมกับอลูมินา (Aluminates) และซิลิเกต (Silicates) ของสินแร่และถ่านโค้ก ในช่วงเวลาที่ชีตะกรันเย็นตัวและแข็งตัว ชีตะกรันเตาถลุงสามารถแบ่งรูปแบบออกได้หลายชั้น ได้แก่

- 1.1 Air Cooled Slag ชีตะกรันชนิดนี้ได้จากขบวนการการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ตามอุณหภูมิภายนอก เมื่อนำมาบดและร่อนตะแกรง เหมาะกับการนำไปใช้สำหรับงานถมปรับพื้นที่ผสมกับแอสฟัลต์งานทางรถไฟ

- 1.2 Pelletized or Expanded Slag ชีตะกรันชนิดนี้ได้จากขบวนการที่ชีตะกรันถูกทำให้เย็นตัวอย่างเร็ว โดยการใช้น้ำหรือละอองน้ำ จะได้มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) สามารถใช้ในงานคอนกรีตได้ ใช้สำหรับผสมในผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ อาจใช้ในงานคอนกรีตเบาได้

1.3 Granulated Slag จีตะกรันชนิดนี้ได้จากขบวนการ ที่ทำให้จีตะกรันเย็นตัวอย่างทันทีทันใด โดยการเทจีตะกรันลงสู่อ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ จีตะกรันชนิดนี้จะนำไปบดให้ละเอียดได้ ปูนซีเมนต์รู้จักกันในนาม GGBS (Ground Granulated Blast Slag)

1.4 Expanded or Lightweight ได้จากการที่เทจีตะกรันลงบ่อกักเก็บ (Sloping Pits) อย่างรวดเร็ว ในบ่อกักเก็บต้องมีความชื้นหรือไอน้ำ ทำให้จีตะกรันมีช่องว่าง (Void) และมีน้ำหนักที่เบา เหมาะกับการนำไปใช้งานคอนกรีตบล็อก

2. จีตะกรันเตาหลอม (Steel Furnace Slag) จีตะกรันเตาหลอมเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า ได้จากการนำเหล็กดิบหรือเศษเหล็ก หินปูน (CaO) และโดลามา (CaO, MgO) ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญที่นำไปใส่เข้าไปในเตาหลอมซึ่งมี 3 แบบที่ใช้งานกัน

2.1 Electric Arch Furnace จีตะกรันชนิดนี้ได้จากขบวนการการผลิตเหล็กกล้าภายในเตาหลอมที่ใช้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ไฟฟ้าทำให้เกิดทั้งความร้อนและการหลอมเหลว หินปูนจะหลอมปกคลุมน้ำเหล็ก ภายใต้การควบคุมและการกำจัดสารมลทินต่าง ๆ คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส จะค่อย ๆ ถูกกำจัดออกไปให้อยู่ในรูปของจีตะกรันเตาหลอม น้ำเหล็กที่ถูกหลอมละลายแล้วจะไหลลงสู่ด้านล่างของเตาหลอม ในขณะที่จีตะกรันเตาหลอม จะถูกดันให้ลอยสู่ด้านบนเอง จีตะกรันเตาหลอมจะถูกแยกออกจากน้ำเหล็ก โดยการเทออกอย่างช้า ๆ ลงในถังเหล็ก (Slag Pot) โดยอาจมีน้ำเหล็กปะปนมากับจีตะกรันเตาหลอมอยู่บ้าง

2.2 Open Hearth Slag จีตะกรันเตาหลอมชนิดนี้ได้มาจากการหลอมเหล็กหลายครั้ง ในขณะที่ทำเหล็กหล่อ สิ้นแร่แร่เหล็ก และเศษเหล็ก เหล็กถูกทำให้บริสุทธิ์ด้วยหินปูนเป็นเวลานาน เพื่อช่วยให้โลหะหล่อง่าย เชื้อเพลิงและอากาศที่ฉีดเข้าไปในการให้ความร้อน และให้ความร้อนเพื่อกำจัดคาร์บอนออก ขั้นตอนนี้ใช้เวลานาน

2.3 Basic Oxygen Furnace Slag จีตะกรันชนิดนี้ได้มาจากการหลอมเหล็กหล่อจากการนำเศษเหล็กถ่านโค้ก และหินปูน บรรจุในเตาหลอมสลับกันเป็นชั้น ๆ เมื่อใส่วัตถุดิบต่างๆ แล้ว จะจุดไฟให้กับถ่านโค้กและเร่งความร้อนด้วยการเป่าลม ออกซิเจนในอากาศจะเข้าไปรวมตัวกับสารมลทินต่างๆ เช่น คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส และเหล็กบางส่วน ในรูปของออกไซด์หลอมเหลวไปรวมตัวกับหินปูนและโดลามา เกิดเป็น จีตะกรันจากกระบวนการหลอมเหล็กหล่อ

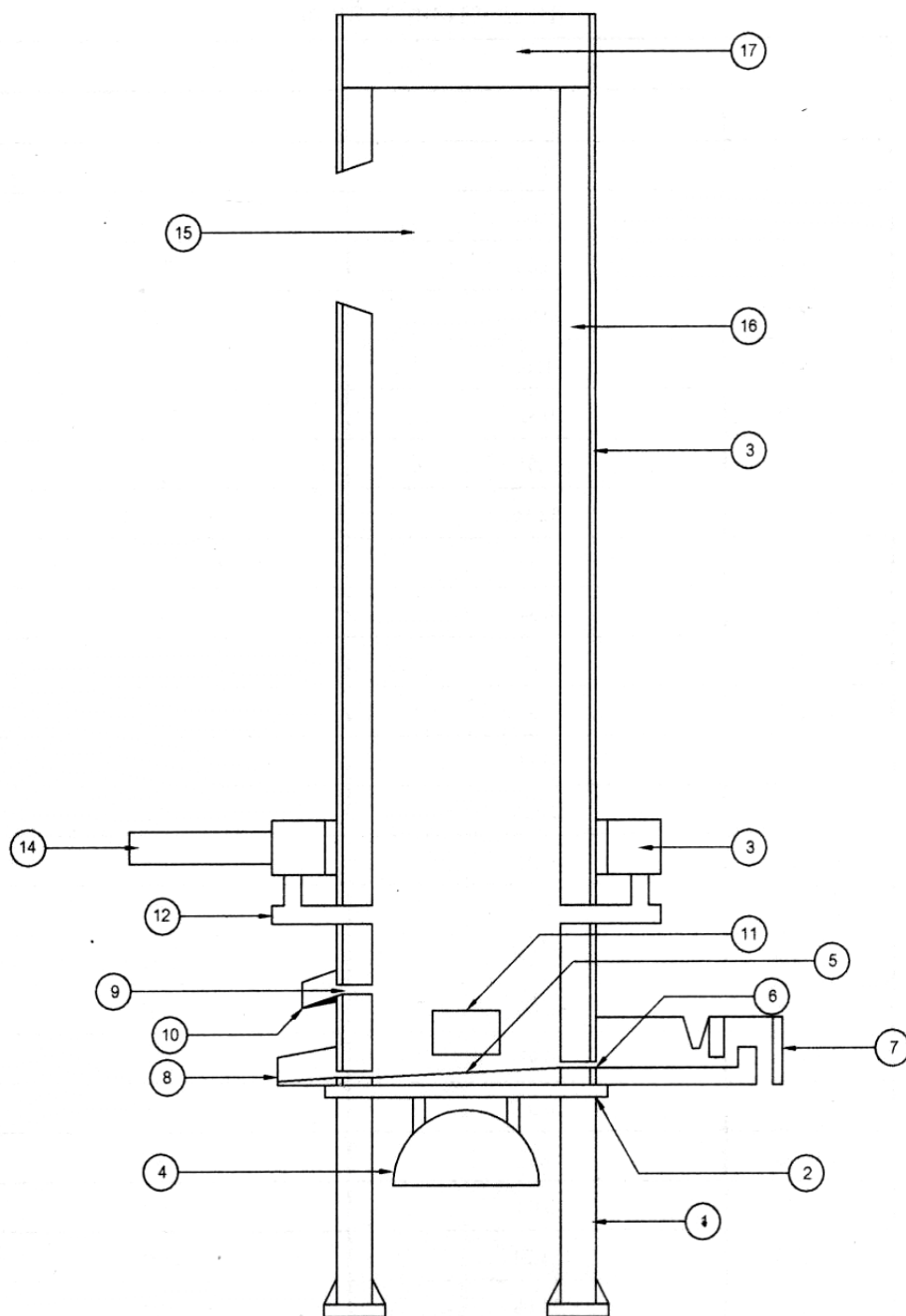
กระบวนการผลิตเหล็กหล่อในประเทศไทย

เนื่องจากประเทศไทยไม่มีโรงงานถลุงเหล็กจากสินแร่ จึงไม่มีจีตะกรันจากเตาถลุง ปัจจุบันอุตสาหกรรมการหลอมเหล็กหล่อในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นโรงงานที่ใช้เตาหลอมเหล็กหล่อชนิดที่เรียกว่า เตาคิวโปล่า (Cupola furnace) เป็นเตาหลอมเหล็กหล่อชนิด Basic Oxygen Furnace Slag สำหรับใช้หลอมเหล็กหล่อได้อย่างกว้างขวางมาก มีขนาดเตาตั้งแต่ 5-30 ตันต่อเตา ประมาณ 160 โรงงาน รวมเป็นเตาคิวโปล่าที่มีใช้อยู่ประมาณ 180 ลูก คุณลักษณะที่เด่นของเตาคิวโปล่า คือ

1. สร้างง่าย การใช้งานไม่ยุ่งยาก
2. หลอมติดต่อกันได้เป็นเวลานาน
3. ต้นทุนในการหลอมต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเตาประเภทอื่น

ในกระบวนการหลอมเหล็กหล่อสำหรับเตาคิวโปล่า จะบรรจุวัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมด้วยสัดส่วนของ เศษเหล็กหล่อและเศษเหล็กเหนียว : ถ่านโค้ก : Ferro-Silicon : Limestone ประมาณ 100 : 10 : 0.4 : 1 เชื้อเพลิงสำหรับเตาชนิดนี้คือ ถ่านโค้ก เมื่อกระบวนการผลิตเสร็จสิ้น จะได้จีตะกรันประมาณ 3 เปอร์เซนต์จากน้ำหนักของวัตถุดิบ ซึ่งเป็นกากอุตสาหกรรมเหลือทิ้ง ไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสถานที่จัดเก็บ

รูปร่างของเตาคิวโปล่าเป็นรูปทรงกระบอกกลาง ตั้งประกอบขึ้นด้วยเหล็กแผ่นม้วนกลมเป็นเปลือกเตา แล้วกรุเตาด้วยอิฐทนไฟ และมีอุปกรณ์สำคัญคือ เครื่องเป่าลม (Blower) กล่องลม (Wind box) และรูลม (Tuyeres) ดังแสดงในภาพที่ 1 วัตถุดิบคือ เศษเหล็ก (Scrap) เชื้อเพลิงได้แก่ ถ่านโค้ก และ Flux ได้แก่ หินปูน (Limestone) จะถูกบรรจุลงเตาพร้อม ๆ กันในแต่ละครั้งของการบรรจุสลับไปเป็นชั้น ๆ วัตถุดิบจะเลื่อนลงสู่กันเตาผ่านเขตสันดาป (Combustion Zone) และเขตหลอมเหลวของเตา ในขณะที่เดียวกันก๊าซร้อนจะลอยขึ้นสู่เบื้องบน วัตถุดิบจะได้รับความร้อนจากก๊าซจนถึงจุดหลอมเหลว ก๊าซจากการสันดาปจะมีอุณหภูมิสูง $1,650^{\circ}\text{C}$ - $2,000^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเกิดในเขตสันดาปของเตา แล้วเคลื่อนตัวสู่เบื้องบน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) จึงทำให้ภายในเตามีความร้อนสูงขึ้น ลมที่เป่าเข้าเตาเพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยานั้นอาจเป็นลมเย็น ลมร้อนก็ได้แต่ต้องควบคุมให้มีปริมาณพอเพียง ความดันต้องเหมาะสม เหล็กที่หลอมละลายแล้วจะหยดลงไปรวมกันอยู่ที่ก้นเตา ส่วนจีตะกรัน จะลอยอยู่บนผิวน้ำเหล็กหรืออยู่ในเบ้าหน้าเตา



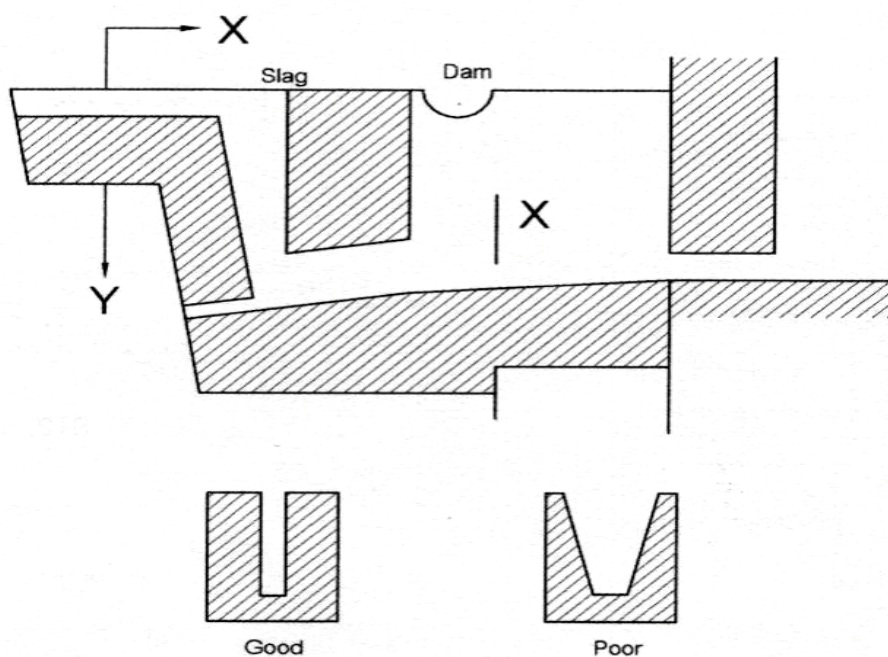
ภาพที่ 1 รูปและส่วนต่าง ๆ ของเตาควิปอล่าที่ใช้ในการหลอมเหล็กหล่อ

รายละเอียดจากภาพที่ 1

1. ขาเตา (Legs) ทำหน้าที่รองรับตัวเตา
2. พื้นเตา (Base Plate) ทำจากเหล็กเหนียวหนาประมาณ 2.54 เซนติเมตร เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสตรงกลางเจาะรูกลมมีฝาปิด-เปิด เพื่อให้เศษวัตถุดิบและถ่านโค้กหล่นออกมาเมื่อเสร็จสิ้นการหลอมในแต่ละครั้ง
3. เปลือกเตา (Shell) เป็นทรงกระบอกทำด้วยเหล็กแผ่นความหนาประมาณ 4 - 10 มิลลิเมตร ตามขนาดของเตา
4. ฝาปิด-เปิดก้นเตา (Drop-bottom)
5. แอ่งเก็บน้ำโลหะ (Cupola hearth) รองพื้นด้วยทรายหยาบมีความลาดเอียงประมาณ 1 : 12
6. รูเจาะ (Tap hole) เป็นทางให้น้ำเหล็กที่หลอมละลายแล้วไหลออกจากเตา
7. ราน้ำเหล็กด้านหน้า (Front spout) สำหรับให้น้ำเหล็กที่ไหลออกจากเตาเพื่อมาแยก Slag ออกแล้วไปตกลงสู่เบ้าพัก
8. ราน้ำเหล็กด้านข้าง (Side spout) สำหรับให้น้ำเหล็กไหลออกในตอนเริ่มแรกและตอนสุดท้ายในการหลอม
9. รูจี้ตะกรัน (Slag holes) สำหรับเจาะจี้ตะกรันกรณีมีจี้ตะกรันภายในเตามากระบายออกทางราน้ำเหล็กไม่ทัน
10. ราน้ำจี้ตะกรัน (Slag spout) สำหรับให้จี้ตะกรันไหลออก

11. ช่องสำหรับจุดเตา (Man hole) ใช้สำหรับจุดถ่านรองกันเตาเมื่อเริ่มทำการหลอม
12. รูลม (Tuyeres) เป็นท่อสำหรับให้ลมเป่าเข้าเตาโดยรอบ
13. กล่องลม (Wind box) ใช้รับลมจาก Blower เพื่อแบ่งเฉลี่ยลมให้เข้าเตาโดยผ่านทางรูลม
14. ท่อลม (Air pipe) เป็นท่อส่งผ่านลมจาก Blower ไปยังกล่องลม
15. ช่องบรรจุ (Charging door) ใช้สำหรับบรรจุวัตถุดิบต่าง ๆ เข้าเตา
16. ผนังเตา (Lining) กรุด้วยอิฐทนไฟ
17. ปล่องเตา (Stack)

ในกรณีการเจาะให้น้ำเหล็กออกจากเตาควิโปล่าแบบต่อเนื่อง รังน้ำเหล็กไหลจะต้องมี เชื้อนกัณให้จี้ตะกรันไหลออกไปต่างหาก จี้ตะกรันซึ่งมี ถ.พ. น้อยกว่าน้ำเหล็กจะลอยอยู่ส่วนบน สัด ส่วนที่สำคัญของระบบนี้ก็คือ รังสำหรับน้ำโลหะไหลและเชื้อนกัณจี้ตะกรัน จะต้องอยู่สูงกว่ารูเจาะ น้ำเหล็กออก ดังภาพที่ 2



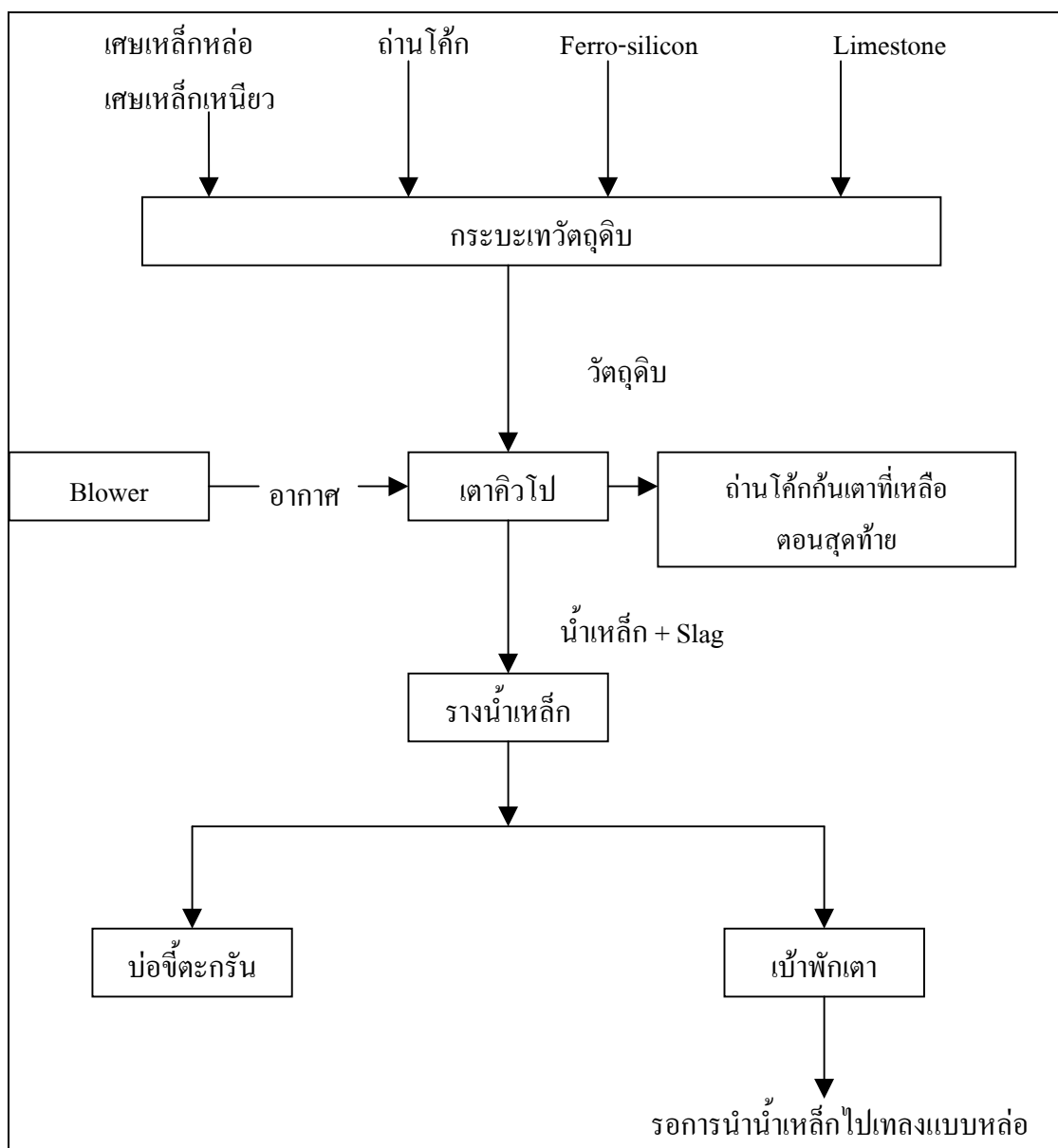
ภาพที่ 2 รูปตัดและสัดส่วนบริเวณรางน้ำเหล็ก

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเหล็กหล่อ

วัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมเหล็กหล่อ ได้แก่ เหล็กหล่อใช้แล้ว เศษเหล็กหล่อที่เหลือจากการหลอมในครั้งก่อนและเศษเหล็กเหนียวที่ปะปนติดมากับเหล็กหล่อ สำหรับเหล็กหล่อใช้แล้ว เป็นพวกอุปกรณ์เหล็กหล่อต่าง ๆ ที่เกิดการชำรุดเสียหาย เช่น เครื่องยนต์เก่า อุปกรณ์ในครัวเรือน โดยส่งจากบริษัทที่ส่งวัตถุดิบจำพวกเศษเหล็กหล่อโดยเฉพาะ

กระบวนการหลอมเหล็กหล่อ

การหลอมเหล็กหล่อจะเกิดขึ้นต่อเมื่อ มีการว่าจ้างให้ทำการหล่อเหล็กรูปพรรณต่าง ๆ ตามที่ลูกค้าต้องการ หลังจากนั้นช่างทำแบบก็จะทำแบบจนให้ได้ปริมาณน้ำหนักที่มากพอต่อการหลอมใน 1 ครั้ง จึงเริ่มทำการหลอมดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนภูมิกระบวนการหลอมเหล็กหล่อ

ในช่วงเช้า ช่างแบบจะนำแบบหล่อที่ทำเตรียมไว้ลงมาเรียงที่บริเวณทำแบบหล่อตรวจสอบ และใส่ไส้แบบหล่อ ในกรณีชิ้นงานนั้นมีไส้แบบหล่อ เตรียมแบบหล่อให้พร้อมที่จะนำน้ำเหล็ก มาเทลงแบบหล่อตรงรูปเท ส่วนช่างเตาจะทำการอุ่นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเทน้ำเหล็กคือ เบ้าเทและ เบ้าพักต่าง ๆ ด้วยไม้ฟืน และช่างเตาส่วนหนึ่งจะทำการปิดกั้นเตาใส่ดินและทราย ในบริเวณก้นเตา ภายในเตาซึ่งเป็นเขตเบ้า แล้วจุดเตาทางฝาปิด-เปิดข้างเตาด้วย ไม้ฟืนติดไฟดีแล้วจึงใส่ถ่านโค้กก้น เตาลงไปทางช่องบรรจุเพื่อให้ถ่านโค้กติดไฟ

ในช่วงบ่ายเป็นต้นไป เมื่อถ่านโค้กติดไฟทั่วดีแล้ว จึงปิดประตูข้างเตาด้วยดินเหนียวผสม ทรายและอิฐทนไฟ แล้วจึงบรรจุเศษเหล็กถ่านโค้กเข้าทางช่องบรรจุเป็นครั้งแรก พร้อมกับเปิด สวิตซ์พัดลม (Blower) หลังจากนั้นช่างเตา ที่อยู่บริเวณด้านหลังเตาจะต้องบรรจุวัตถุดิบ ในอัตราส่วน เหล็ก : ถ่านโค้ก : Ferro-Silicon : Limestone = 100 : 10 : 0.4 : 1 kg/ครั้ง โดยนำใส่กระบะเท แล้วขวานมอเตอร์ยกกระบะเทไปเทวัตถุดิบเต็มเตาอยู่เสมอ (ได้ช่องบรรจุประมาณ 10 เซนติเมตร) หลังจากเปิดสวิตซ์พัดลมแล้ว 5-10 นาที น้ำเหล็กที่เริ่มหลอมละลาย แต่อุณหภูมิยังไม่สูงนัก ประมาณ 1,000 °C ก็จะไหลออกมาทางรางน้ำเหล็กข้างเตา ซึ่งต้องปล่อยให้ไหลทิ้งไป เนื่องจาก อุณหภูมิต่ำอยู่ ไม่สามารถนำมาเทลงแบบหล่อได้ รอเวลาอีกประมาณ 5 นาที

เมื่ออุณหภูมิของน้ำเหล็กสูงขึ้น (สังเกตการไหลตัวของน้ำเหล็กจะไหลได้รวดเร็วขึ้น) จึงทำการอุดรูน้ำเหล็กออกด้วยดินเหนียว ช่วงนี้น้ำเหล็กจะเก็บสะสมอยู่ภายในเตาบริเวณเขตเบ้า นานประมาณ 10 นาที สังเกตมองดูทางช่องรูลมจะเห็นฟองจีตะกรัน ลอยขึ้นมาอยู่ใต้รูลม ซึ่งแสดงว่าปริมาณน้ำเหล็กที่กักเก็บไว้ในเขตเบ้า มีปริมาณที่มากพอแล้ว จึงทำการเจาะน้ำเหล็ก ออกทางรางน้ำเหล็กหน้าเตา แล้วต่อจากนี้จะไม่อุดรูน้ำเหล็กอีกเลย น้ำเหล็กจะไหลออกมา ตลอดเวลาลงสู่เบ้าพักหน้าเตาจนกว่าจะสิ้นสุดการหลอม น้ำเหล็กที่ออกมาจากเตานี้จะมีอุณหภูมิ ประมาณ 1,300 – 1,500°C ไหลลงไปสู่เบ้าพักที่รองอยู่หน้าเตา ส่วนจีตะกรัน ซึ่งเบากว่าจะลอยอยู่ ด้านบนของน้ำเหล็ก และแยกลงทางรางจีตะกรันที่อยู่ด้านข้างของรางน้ำเหล็ก จึงเป็นอันเสร็จสิ้น กระบวนการหลอมเหล็กจากเตาควิปอล่า

ลักษณะทางกายภาพของจีตะกฐัน

จีตะกฐันจากเตาหลอมเหล็กหล่อ มีลักษณะ เป็นเม็ดเหลี่ยมแข็ง มีเนื้อหยาบสีเขียวเข้มคล้าย แก้ว สามารถย่อยให้ละเอียดได้โดยง่าย ได้เม็ดละเอียดที่มีเหลี่ยมคมดีมาก ไม่ละลายน้ำ แต่มีขนาด ไม่แน่นอน ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 จีตะกฐันจากกระบวนการหลอมเหล็กหล่อ

คุณสมบัติทางเคมีของจีตะกฐัน

จีตะกฐัน ประกอบด้วยธาตุต่างๆ ได้แก่ SiO_2 (ซิลิกอนไดออกไซด์) เป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 69 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ CaO (แคลเซียม ออกไซด์) ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ FeO (ไอออน ออกไซด์) ประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ และ MnO (แมงกานีส ออกไซด์) ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าประมาณของคุณสมบัติทางเคมีของจีตะกรัน

ส่วนประกอบทางเคมี		เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
CaO	Calcium Oxide	25
FeO	Iron Oxide	4
MnO	Magnesium Oxide	2
SiO ₂	Silicon Dioxide	69

แนวทางการใช้ประโยชน์ของจีตะกรัน

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของจีตะกรัน ในประเทศไทย และ จีตะกรันในต่างประเทศ พบว่าสามารถนำจีตะกรันมาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

1. ใช้เป็นวัสดุมวลรวม (Aggregate Base) ในพื้นทาง
2. ใช้เป็นหินโรยทางรถไฟ (Rail Ballast)
3. ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ (Cement Manufacture)
4. ใช้เป็นวัสดุดินถม (Back fill)
5. ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงเสถียรภาพความคลาด (Rip-Rap Protection)
6. ใช้เป็นวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Bituminous Concrete)
7. นำมาปรับปรุงเพื่อทำพื้นทาง (Base Course) และรองพื้นทาง (Sub base)

การปรับปรุงคุณสมบัติของมวลรวมและการใช้วัสดุทดแทน

การศึกษาในประเทศ

ปิยะ (2521) ได้ทำการศึกษาถึงเสถียรภาพของวัสดุผสมทรายกับแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 80/100 โดยนำทราย 6 ชนิด ได้แก่ ทรายแม่น้ำ 3 ชนิด และทรายบก 3 ชนิด นำมาผสมกับ แอสฟัลต์ซีเมนต์ และได้ทำทรายเปรียบเทียบกับหินฝุ่นและฝุ่น ด้วยส่วนผสมในจำนวนร้อยละ ที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ทรายธรรมชาติล้วนๆ ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ เสถียรภาพต่ำ แต่เมื่อใช้หินฝุ่นที่ปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักมวลรวมทำให้ได้เสถียรภาพ

(Stability) เพิ่มขึ้นอีก 2 - 3 เท่า ส่วนการใช้ฝุ่นที่ระดับ 12 - 18 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักมวลรวม ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ปริมาณ 8 - 11 เปอร์เซ็นต์ ทำให้คุณสมบัติของทรายผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ สามารถเข้าเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบตามวิธีมาร์แชลล์

ปรีชา (2521) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเม็ดดินผสมทรายเผา หินปูนเผาแก้ว ตะกรันเตาถลุง และตะกรันเตาหลอม พบว่าเม็ดดินจากปทุมธานี ผสมทรายละเอียด 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก นำมาเผาที่อุณหภูมิ 800 - 1200 °C ให้ค่าความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance) และค่าการสึกหรอ (LAA) อยู่ในเกณฑ์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุผิวทางได้ดีกว่า เม็ดดินจากราชบุรีที่มีค่าการสึกหรอที่สูงกว่า (มากกว่า 40%) ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุผิวทางแต่ค่าการหลุดลอกของมวลรวมของดินจากทั้ง 2 แหล่ง มีค่าเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในมาตรฐาน

นอกจากนี้ หินปูนเผาที่อุณหภูมิ 176 - 700 °C ไม่ได้ทำให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลเพิ่มขึ้น แต่กลับให้ค่าการสึกหรอเพิ่มมากขึ้นอีก ส่วนแก้วให้ค่าการสึกหรอสูง ค่าความต้านทานการลื่นไถลต่ำมาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำมาเป็นวัสดุผิวทาง แต่สำหรับตะกรันเตาถลุง และตะกรันเตาหลอม ให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลและค่าการสึกหรอที่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นวัสดุผิวทางโดยเฉพาะตามจุดอันตราย

ประยูร (2527) ได้ทำการศึกษาการใช้เม็ดดินเผาเป็นวัสดุมวลรวมในงานผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนต์โดยใช้เม็ดดินเผาจากหนองงูเห่าขนาด $\frac{1}{2}$ " นำมาเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C และใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 80/100 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน พบว่าเม็ดดินเผา มี ถ.พ. รวมเฉลี่ยต่ำกว่า หินปูน มีความพรุนมากกว่า มีผิวที่หยาบกว่าหินปูน

จากการทดสอบในสนาม ผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนต์ที่ใช้เม็ดดินเผาเป็นวัสดุมวลรวม มีค่าความต้านทานการลื่นไถลเฉลี่ยสูงกว่าที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวม ทั้งในสภาพผิวแห้งและผิวเปียก และค่าความต้านทานการลื่นไถลของมวลรวมจากเม็ดดินเผา มีค่าน้อยกว่ามวลรวมจากหินปูน เมื่ออายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

ชัยชาญ (2530) ได้ทำการศึกษาการนำขี้เถ้าลอยมาเป็นวัสดุอัดแทรก (Filler) สำหรับ แอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้ขี้เถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 80/100 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน จากการทดสอบวิธีมาร์แชลล์ โดยใช้ ปริมาณแอสฟัลต์ตั้งแต่ 4.5 - 7.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวม วัสดุอัดแทรก 0 - 8 เปอร์เซ็นต์ และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งเป็นตัวเปรียบเทียบ จากการทดลองพบว่าเถ้าลอยลิกไนต์ สามารถใช้เป็นวัสดุอัดแทรกในแอสฟัลต์คอนกรีตได้ และการผสมขี้เถ้าลอยไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ ช่วยให้ส่วนผสมมีเสถียรภาพดีขึ้น ช่วยลดช่องว่างอากาศและทำให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นมากขึ้น ส่วนผสมดังกล่าวสามารถนำไปใช้กับถนนที่มีการจราจรหนาแน่นได้

นิรชร (2539) ได้ศึกษาการใช้เถ้าหนักลิกไนต์แทนมวลรวมละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยนำมาผสมแทนมวลละเอียดใน Hot Bin 1 ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 โดยทำการ เปรียบเทียบกับหินปูนและหินบะซอลท์ จากการทดลองพบว่าหากใช้เถ้าหนักลิกไนต์แทนมวลรวม ละเอียดใน Hot Bin 1 ที่ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ 6.2 และ 7.2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของมวลรวมสำหรับหินปูนและหินบะซอลท์ตามลำดับ มีผล ทำให้คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตสอดคล้องตามข้อกำหนด

สมพงษ์ (2542) ได้นำเถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมเพิ่มในแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70 จากการทดสอบโดยวิธีมาร์แชลล์พบว่า เมื่อใช้เถ้าลอยลิกไนต์เม็ดละเอียด (0.001- 0.075 มม.) ผสมไม่เกินปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์และใช้ปริมาณ แอสฟัลต์ซีเมนต์ 4 - 7 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลว่า ค่าโพรงอากาศลดลง เสถียรภาพดีขึ้น ความหนาแน่น มากขึ้น สามารถนำไปออกแบบส่วนผสมชั้นผิวทางได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์มากขึ้น เถ้า ลอยมีขนาดเม็ดใหญ่ขึ้น จะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตร่วนขึ้นและค่าเสถียรภาพลดลง

ในกรณีที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์แทนมวลรวมละเอียด เมื่อทำการเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์ คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลละเอียด พบว่าค่าเสถียรภาพลดลง โพรงอากาศเพิ่มมากขึ้น ส่วนผสมค่อนข้างร่วน ความหนาแน่นน้อยลง แต่ยังอยู่ในข้อกำหนดของชั้นรองพื้นทาง

ศรันยา (2544) ได้นำตะกรันเตาหลอมมาทดแทนวัสดุมวลรวมผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70 ทดสอบโดยวิธีมาร์แชลล์ จากการเปรียบเทียบกับมวลรวมจากหินปูน หินบะซอลท์ และ หินแกรนิต ผลทดลองพบว่า มวลรวมจากตะกรันเตาหลอม มีค่าความปลอดภัยจากการลื่น

ไอลสูงสุด มีค่าเสถียรภาพสูงสุด ค่าการไหลต่ำ แต่เนื่องจากตะกรันเตาหลอมมีค่าความหนาสูงมากกว่าหินทุกชนิด จึงจำเป็นต้องใช้ปริมาณแอสฟัลต์มากกว่าหินทุกชนิด และมีค่าการสึกหรอ (LAA) ต่ำกว่าหินปูน แต่สูงกว่าหินบะซอลท์และหินแกรนิต ดังนั้นตะกรัน เตาหลอมมีความเหมาะสมกับผิวทางที่มีปริมาณการจราจรที่สูง และบริเวณที่เป็นทางโค้งหรือทางแยกได้ดี

ลิทริสคัล และ สมัคร (2545) ได้ทำการศึกษาผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน โดยใช้ตะกรันเตาหลอมเป็นวัสดุมวลรวม จากการทดลองพบว่า ตะกรันเตาหลอมเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง มีรูปร่างที่เหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวม เมื่อนำตะกรันเตาหลอมไปทดสอบแสดงให้เห็นว่า มีค่าความต้านทานการลื่นไถลสูง ค่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตดีกว่ามวลรวมชนิดอื่นที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของผิวทางยาวนานขึ้น

ปริมม (2546) ได้ศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้ทรายหยาบเป็นวัสดุแทนที่มวลรวมละเอียด ทำการทดสอบโดยวิธีมาร์แชลล์พบว่า จากการนำทรายหยาบจากแหล่งแม่น้ำเจ้าพระยา มาแทนหินปูนที่เป็นมวลละเอียด ในอัตราส่วน 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ของมวลรวมทั้งหมด ผลการทดลองพบว่า ทรายหยาบสามารถปรับปรุงคุณภาพของส่วนเคลือบได้ ทำให้เสถียรภาพลดลง ส่วนผสมค่อนข้างร้อน โปร่งอากาศมากขึ้นและความหนาแน่นน้อยลง แต่ยังคงอยู่ในข้อกำหนดของชั้นผิวทาง เมื่อใช้ทรายหยาบไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณมวลรวมทั้งหมด

การศึกษาในต่างประเทศ

Rosner (1982) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการนำเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุอัดแทรก โดยเปรียบเทียบการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ผลการทดลองพบว่า ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมวลรวม ทำให้ช่องว่างแอสฟัลต์คอนกรีตน้อยกว่าการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว

AL-Suhaibai and Tons (1991) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมเพิ่มในแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 20 พบว่าการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่มีมวลละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 325) เป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 20 ทำให้มีความหนืดสูงกว่าใช้เถ้าลอยที่มีมวลหยาบกว่า และสามารถนำไปใช้กับงานแอสฟัลต์คอนกรีตได้

Ramirez (1992) ศึกษาการใช้ตะกรันจากเตาหลอมชนิด Open hearth, Basic Oxygen หรือ Electric arc เป็นมวลรวมผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ จากผลการศึกษาทั้งในห้องทดลองและในภาคสนามพบว่า ค่าเสถียรภาพดีขึ้น ค่าความต้านทานการลื่นไถลดีขึ้น ความร้อนที่สะสมอยู่ในส่วนผสมยาวนานขึ้น และไม่เกิดลอนคลื่นบริเวณด้านหน้ารถขณะทำการบดอัดด้วยรถบด

จากการทดสอบที่ถนนสาย FB-2 และ FJ-1 ที่รัฐ Pennsylvania ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่ามีค่าเสถียรภาพสูง การหลุดลอกต่ำกว่ามวลรวมจากหินปูน เปอร์เซ็นต์การพองตัว (Swell) ยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ไม่มีปัญหาจากการใช้งานจริงในภาคสนาม

Nouman (1992) ได้ทำการศึกษาการนำตะกรันชนิด Electric arc และ Open hearth จากโรงงาน Sysco ใน Sydney, Nova Scotia โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 150/200 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน จากการผสมตะกรันกับหินในสัดส่วนต่าง ๆ กัน จำนวน 6 ตัวอย่างและตะกรันล้วน โดยวิธีมาร์แชลล์ จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ในเรื่อง ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile strength) ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) การล้าและการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร การเสียหายจากความชื้น และความล้า ผลการทดสอบพบว่ามวลรวมจากตะกรันแสดงคุณสมบัติได้ดีกว่ามวลรวมที่ใช้ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั่วไป สำหรับส่วนผสมที่ใช้ตะกรันล้วนทำให้ผิวทางมีความสามารถต้านทานการเกิดร่องล้อ และการเสียหายแตกร้าว เนื่องจากอุณหภูมิเย็นได้ดี

Abdul (1992) ได้ทำการศึกษาเรื่องปัจจัยของชนิดวัสดุอัดแทรกและคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต จากการนำวัสดุแทรก 3 ชนิด ได้แก่ ฝุ่นหินปูน ปูนขาว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน พบว่าเมื่อนำปูนขาวแทนฝุ่นหินปูน ทำให้ได้ค่า Optimum Asphalt Content เพิ่มขึ้น ปริมาณช่องว่างอากาศลดลงในขณะที่หน่วยน้ำหนักลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ การนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนฝุ่นหินปูน การนำปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มาผสมแทนจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง VMA เลขการใช้ฝุ่นหินปูน 8 เปอร์เซ็นต์ในส่วนผสม ทำให้ค่าการเกิดร่องล้อสูงสุด และการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 5.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดร่องลือน้อยที่สุด

Akhtarhusein (1995) ได้ทำการศึกษาจากการนำทรายจากแม่น้ำ 4 แหล่ง และหินแกรนิต 1 แหล่ง นำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อเป็นวัสดุอัดแทรก และใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC-20 เป็นวัสดุเชื่อมประสานโดยวิธีมาร์แชลล์ โดยได้ผสมทรายแม่น้ำจากแหล่งต่าง ๆ กับหินแกรนิต ในอัตราส่วน 20 : 80 ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มวัสดุอัดแทรกเข้าไปในส่วนผสมส่งผลให้ความเครียด (Strain) ลดลง ในขณะที่ ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) เพิ่มขึ้น จากวัสดุอัดแทรกที่ใช้ปริมาณทรายที่ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวัสดุอัดแทรกที่ใช้หิน 100 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณอากาศลดลงมากกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์

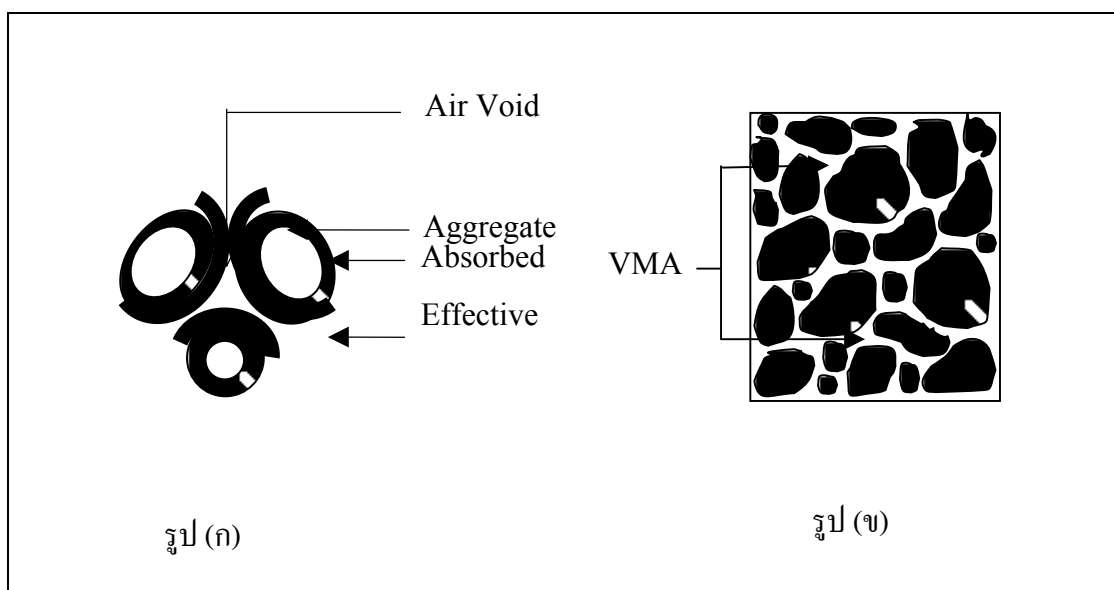
จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนของวัสดุอัดแทรกลงไป สามารถลดการเกิด ร่องล้อลงได้ แต่เมื่อเพิ่มวัสดุอัดแทรกจากทรายแม่น้ำขึ้นอีก 20 เปอร์เซ็นต์ กลับเพิ่มการเกิด ร่องล้อ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แอสฟัลต์คอนกรีต

แอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง วัสดุทำผิวทางหรือผิวทางที่ถูกบดอัดแน่น ได้จากการผสมกัน ระหว่างวัสดุมวลรวม (Aggregate) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) ตามอัตราส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้ ในการผสมกันจะต้องให้ความร้อนทั้งวัสดุมวลรวม และ แอสฟัลต์ซีเมนต์จนได้ อุณหภูมิตามที่กำหนดเสียก่อน เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วจึงนำไปใช้งานพร้อมบดอัดให้แน่นขณะที่ยัง ร้อนอยู่

ภาพที่ 5 แสดงถึงส่วนประกอบต่าง ๆ โดยทั่วไปของแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งแสดงถึง ช่องว่างอากาศ (Void in The Mineral Aggregate หรือ VMA) ของแอสฟัลต์คอนกรีต



ภาพที่ 5 ส่วนประกอบทั่วไปของแอสฟัลต์คอนกรีต

รูป (ก) แสดงถึงแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยแอสฟัลต์และวัสดุมวลรวม แอสฟัลต์ส่วนหนึ่งจะถูกดูดเข้าไปในเม็ดวัสดุมวลรวม (Absorbed Asphalt) แอสฟัลต์ส่วนที่เหลือเรียกว่าแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (Effective Asphalt) ทำหน้าที่เคลือบผิวเม็ดวัสดุมวลรวมช่องว่างระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์เรียกว่าช่องว่างอากาศ (Air Voids)

รูป (ข) แสดงถึงช่องว่างในวัสดุมวลรวม (VMA) ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาตรทั้งหมดของแอสฟัลต์คอนกรีตหักออกด้วย ปริมาตรของวัสดุมวลรวมหรือช่องว่างที่อยู่ระหว่างมวลรวม ซึ่งรวมทั้งช่องว่างอากาศและปริมาตรแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ โดยแสดงค่าเป็นร้อยละ

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต มีดังนี้

1. ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่น หมายถึง ปริมาณมวลของแอสฟัลต์คอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความแน่นมากพอ ทำให้มีอายุการใช้งานยืนยาวและมีคุณภาพดี อย่างไรก็ตาม การบดอัดโดยรถบดในสนามทำได้ความหนาแน่นน้อยกว่าความแน่นที่ออกแบบไว้ซึ่งใช้วิธีบดอัดด้วยเครื่องมือในห้องทดลอง ดังนั้นการกำหนดค่าความแน่นต่ำสุดที่ต้องบดอัดให้ได้ในสนาม จะกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแน่นที่ทดลองได้ในห้องทดลอง สำหรับกรมทางหลวงกำหนดไว้ว่า ต้องบดอัดให้ได้ความแน่นไม่น้อยกว่า 98% ของความแน่นที่ทดลองได้ในห้องทดลอง

2. ช่องว่างอากาศ (Air Voids)

แอสฟัลต์คอนกรีตประกอบด้วยเม็ดวัสดุรวม ซึ่งถูกเคลือบด้วยฟิล์มของแอสฟัลต์ระหว่างเม็ดวัสดุรวมที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์เหล่านี้จะมีช่องว่างเล็ก ๆ เรียกว่าช่องว่างอากาศ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความหนาแน่นของช่องว่างอากาศจำนวนหนึ่งที่เพียงพอ แต่ไม่มากเกินไป ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเปิดการจราจรแล้ว รถที่แล่นบนผิวทางจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแน่นขึ้นจากเดิม ทำให้ปริมาณช่องว่างอากาศลดลง ถ้าปริมาณช่องว่างอากาศขณะก่อสร้างเสร็จใหม่มีไม่เพียงพอ จะทำให้แอสฟัลต์ทะลักขึ้นมาที่ผิวและเกิดการเยิ้ม (Bleeding) นอกจากนี้ ช่องว่างอากาศยังเป็นที่รองรับแอสฟัลต์ที่ขยายตัว เมื่ออากาศร้อนด้วย

ปริมาณช่องว่างอากาศมีผลต่อความคงทน (Durability) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต กล่าวคือ ปริมาณช่องว่างอากาศยิ่งน้อยเท่าใด น้ำและอากาศจะซึมผ่านเข้าไปทำลายแอสฟัลต์และการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ยากยิ่งขึ้น ทำให้ผิวทางมีอายุยืนยาว แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าความแน่นต่ำสุดของของผิวทาง จะต้องคำนึงถึงปริมาณช่องว่างอากาศด้วย โดยปกติผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดเสร็จใหม่ ๆ โดยทั่วไปนิยมกำหนดค่าความแน่นต่ำสุดซึ่งทำให้ปริมาณช่องว่างอากาศน้อยกว่า 8%

สำหรับผิวทางชั้นบนสุดจะออกแบบให้มีปริมาณช่องว่างอากาศอยู่ระหว่าง 3–5 % ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณและน้ำหนักของรถที่แล่นบนผิวทาง ส่วนผิวทางชั้นล่าง ๆ อาจออกแบบให้มีปริมาณ ช่องว่างได้มากกว่านี้ เช่น 4 - 7% เป็นต้น

3. ช่องว่างในวัสดุมวลรวม (Voids in the Mineral Aggregate หรือ VMA)

ช่องว่างในวัสดุมวลรวม คือ ปริมาตรช่องว่างทั้งหมดที่มีอยู่ระหว่างเม็ดของวัสดุมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว ซึ่งรวมช่องว่างส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Void filled with bituminous หรือ VFB) ด้วย

โดยที่ช่องว่างในวัสดุมวลรวม คือ ปริมาตรช่องว่างสำหรับปริมาตรของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (Effective Asphalt) ซึ่งหมายถึงปริมาตรแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้งหมดที่ใส่ลงไปผสม หักด้วยปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกดูดซึมเข้าไปในเม็ดของวัสดุมวลรวม ปริมาตรช่องว่างที่เหลือจากการแทนที่ของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพคือ ปริมาตรช่องว่างอากาศดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้น ถ้าหากออกแบบส่วนผสมให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาตรช่องว่างอากาศเท่ากันแล้ว แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่าช่องว่างในวัสดุมวลสูงกว่าจะมีความทนต่อการใช้งานนานกว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่าช่องว่างในวัสดุมวลต่ำกว่า ซึ่งอธิบายได้โดยอาศัยหลักความจริงว่า การที่วัสดุมวลรวมมีค่าช่องว่างในวัสดุมวลสูงย่อมหมายถึง จะมีปริมาตรช่องว่างสำหรับใส่แอสฟัลต์ซีเมนต์ได้มาก ทำให้ได้ฟิล์มแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ห่อหุ้มผิววัสดุมวลรวมหนาขึ้น ส่งผลทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความทนต่ออายุการใช้งานยืนยาว

การออกแบบส่วนผสมที่มีค่าช่องว่างในวัสดุมวลน้อยกว่าข้อกำหนด จะทำให้ต้องใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมน้อยลง ซึ่งประหยัดแต่ไม่ควรกระทำเพราะจะทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีความทนลดลง

4. ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement Content)

ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใส่ลงไปผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นอย่างมาก ดังนั้นปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้จะต้องถูกต้องและแน่นอน ไม่ว่าจะเป็นการผสมในห้องทดลองหรือที่โรงผสม (Mixing Plant) ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ (Design Criteria) ซึ่งได้แก่ข้อกำหนดต่าง ๆ เกี่ยวกับคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ต้องการ จะเป็นตัวกำหนดปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ต้องใช้ผสม

ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตจะเป็นเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม ได้แก่ ขนาดกะ (Gradation) และคุณสมบัติในการดูดซึมแอสฟัลต์ซีเมนต์ วัสดุมวลรวมขนาดกะซึ่งประกอบด้วยเม็ดขนาดเล็ก ต้องการแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับผสมมากกว่าวัสดุมวลรวมที่ประกอบด้วยเม็ดขนาดใหญ่กว่า เหตุผลก็คือ วัสดุมวลรวมเม็ดขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าวัสดุมวลรวมเม็ดใหญ่ (ที่ปริมาตรเท่ากัน) จึงต้องใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์มากกว่าเพื่อเคลือบผิวเม็ดวัสดุมวลรวม

คุณสมบัติในการดูดซึมแอสฟัลต์ซีเมนต์ของวัสดุมวลรวม วัสดุมวลรวมที่ดูดซึมแอสฟัลต์ซีเมนต์มากทำให้ต้องใช้แอสฟัลต์ผสมมาก เพื่อชดเชยส่วนที่ถูกดูดซึม

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ค่าเสถียรภาพ (Stability)

ค่าเสถียรภาพของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตคือ ความสามารถในการรับน้ำหนักการจราจรโดยไม่เกิดร่องล้อ คลื่น หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ในลักษณะอื่น ๆ

ค่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตขึ้นอยู่กับความเสียดทาน (Internal Friction) และแรงยึดเกาะ (Cohesion) ระหว่างเม็ดของวัสดุมวลรวม ความเสียดทานเป็นผลมาจากคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม ซึ่งได้แก่รูปร่างของเม็ดวัสดุ ลักษณะความเรียบ ความหยาบ หรือความขรุขระของผิววัสดุ ส่วนแรงยึดเกาะเป็นผลมาจากคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ว่าสามารถยึดเม็ดวัสดุมวลรวมให้ติดกันได้ดีเพียงใด ผลรวมของความเสียดทานและแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมจะช่วยป้องกันไม่ให้เม็ดวัสดุเกิดการเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกัน เมื่อมีน้ำหนักรถกระทำ

โดยปกติแล้ว วัสดุมวลรวมที่มีลักษณะเม็ดเป็นเหลี่ยม ผิวหยาบขรุขระ จะให้ค่าเสถียรภาพสูง ส่วนแรงยึดเกาะจะมีมากถ้าแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้มีความหนืด (Viscosity) สูง หรือขณะที่แอสฟัลต์ซีเมนต์มีอุณหภูมิต่ำ การเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ในส่วนผสม จะทำให้ค่าแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์จนถึงจุดหนึ่ง จะทำให้แอสฟัลต์ที่เคลือบเม็ดวัสดุมวลรวมหนาเกินไป เป็นผลให้ความเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมลดลง ทำให้ค่าเสถียรภาพลดลงด้วย

ในการออกแบบส่วนผสม จะต้องออกแบบให้ค่าเสถียรภาพสูงพอที่จะรับน้ำหนักการจราจรได้ แต่มีข้อควรคำนึงถึงคือ ค่าเสถียรภาพที่สูงมากเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแข็งเกินไป ขาดความยืดหยุ่น อาจทำให้ผิวทางเสียหายได้ โดยเฉพาะแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปูลงบนพื้นทาง หรือผิวทางเดิมที่มีการแอ่นตัว (Deflection) สูง

สาเหตุที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเสถียรภาพต่ำ ได้แก่

- (1) ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้เกิดเป็นคลื่นลูกกระนาบ หรือเกิดร่องล้อ หรือเกิดการเยิ้ม (Bleeding)
- (2) ใช้ทรายที่มีเม็ดขนาดกลาง (Medium Size Sand) มากเกินไป ทำให้บดอัดยาก หรือแม้กระทั่งบดอัดเสร็จใหม่จะมีลักษณะเคลื่อนตัวได้ง่าย (ไม่อยู่ตัว)
- (3) วัสดุมวลรวมมีลักษณะกลม ผิวเรียบ ขยับตัวได้ง่าย ทำให้เกิดร่องล้อ

2. ความคงทน (Durability)

ความคงทน หมายถึง ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ ปัจจัยที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตเสื่อมสภาพ อาจเป็นผลมาจากภูมิอากาศ สภาพการจราจร หรือทั้ง 2 อย่าง ปัจจัยเหล่านี้ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้เสื่อมสภาพ เนื่องจากขบวนการ Polymerization และ Oxidation วัสดุมวลรวมเสื่อมสภาพจนเกิดการแตกตัว (Disintegration) และฟิล์มแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เคลือบวัสดุมวลรวมหลุดลอก (Stripping)

การออกแบบส่วนผสมเพื่อให้ได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความคงทน ทำได้ 3 วิธี คือ

- (1) ใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทำให้ได้ฟิล์มแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เคลือบผิววัสดุมวลรวมหนา ฟิล์มแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่หนาจะเสื่อมสภาพช้ากว่าฟิล์มบาง นอกจากนั้นการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์มาก จะช่วยอุดช่องว่างอากาศที่อาจต่อเนื่องกัน (Interconnected Air Voids) ทำให้น้ำและอากาศผ่านเข้าไปทำลายเนื้อแอสฟัลต์คอนกรีตได้ยาก

(2) เลือกขนาดกละที่ทำให้ส่วนผสมมีลักษณะแน่น (Dense Gradation) รวมทั้งใช้วัสดุมวลรวมที่มีความแข็งแรง และมีคุณสมบัติในการยึดเกาะแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ดี ขนาดกละที่มีลักษณะแน่นทำให้น้ำและอากาศผ่านได้ยาก ความแข็งแรงของวัสดุมวลรวม ป้องกันการแตกหักจากน้ำหนักจราจร คุณสมบัติการเกาะยึดระหว่างวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะช่วยไม่ให้หินหลุด (Raveling) ในสภาวะการใช้งานขณะที่ผิวทางเปียกน้ำ

(3) ออกแบบส่วนผสมรวมทั้งการบดอัดในสนาม ในลักษณะที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่กั้นน้ำ (Maximum Impermeability) มีช่องว่างระหว่างอนุภาคของช่องว่างในวัสดุมวลรวมให้มากที่สุด

สาเหตุที่ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตขาดความคงทน ได้แก่

(1) ปริมาณแอสฟัลต์น้อยไป ทำให้ผิวทางมีลักษณะแห้ง หินหลุด ช่องว่างอากาศมากไป ซึ่งอาจเนื่องมาจากออกแบบไม่เหมาะสม หรือบดอัดไม่พอ ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดรอยแตกหรือแยกออกเป็นชั้นเล็ก ๆ ก็ได้

(2) คุณสมบัติในการยึดเกาะระหว่างวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ภายใต้สภาวะเปียกน้ำไม่ดีพอ ทำให้ฟิล์มของแอสฟัลต์ซีเมนต์หลุดออกจากวัสดุมวลรวม ทำให้หินหลุดหรือหินโผล่

3. ความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำและอากาศ (Impermeability)

ปริมาตรช่องว่างอากาศ เป็นตัวบ่งชี้ถึงความยากง่ายต่อการซึมผ่านของน้ำและอากาศ แต่ที่สำคัญยิ่งกว่าปริมาตรช่องว่างก็คือ ลักษณะของช่องว่างซึ่งได้แก่ขนาดของช่องว่างแต่ละช่อง ช่องว่างทะลุติดต่อกันหรือไม่ และช่องว่างทะลุถึงผิวนอกของแอสฟัลต์คอนกรีตหรือไม่ ถึงแม้ว่าความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำและอากาศ จะเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีต มีความคงทน แต่ในความเป็นจริงแล้ว แอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมด น้ำ และอากาศ จะสามารถซึมผ่านได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งหากมีค่าไม่เกินเกณฑ์กำหนดแล้ว ก็ถือว่า “ใช้ได้”

สาเหตุที่ให้น้ำและอากาศซึมผ่านทางแอสฟัลต์คอนกรีต

(1) ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์น้อยไป ทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว ทำให้หินหลุด

(2) การออกแบบส่วนผสมให้ปริมาตรช่องว่างอากาศมากเกินไป

(3) บดอัดไม่เพียงพอ ทำให้มีปริมาตรช่องว่างอากาศมากเกินไป น้ำซึมผ่านได้ง่าย

4. ความง่ายในการปูและการบดอัด (Workability)

แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปูและบดอัดยากอาจแก้ไขได้โดยการออกแบบใหม่ หรือเปลี่ยนแหล่งวัสดุมวลรวมใหม่ และ/หรือเปลี่ยนขนาดกะของวัสดุมวลรวมใหม่ สาเหตุที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตปูและบดอัดยาก

(1) Maximum Size ของวัสดุมวลรวมโตเกินไป ทำให้ผิวหน้าหยาบ ปูยาก วัสดุมวลรวมมีส่วนที่หยาบมากเกินไปทำให้บดอัดยาก อุณหภูมิขณะผสมต่ำทำให้แอสฟัลต์เคลือบผิววัสดุมวลรวมไม่ทั่ว ความคงทนต่ำ ผิวหยาบ บดอัดยาก

(2) ใช้ทรายที่มีเม็ดขนาดกลางผสมมากเกินไปทำให้ส่วนผสมไม่อยู่ตัว อ่อนขวยขยาบ ขณะบดอัด บดอัดยาก

(3) ปริมาณวัสดุอัดแทรก (Filler) น้อยเกินไป ส่วนผสมมีลักษณะอ่อนขวยขยาบน้ำซึมผ่านได้ง่าย

(4) ปริมาณวัสดุอัดแทรกมากเกินไป ส่วนผสมจะมีลักษณะแข็งหรือเหนียวหนืด ทำงานยาก และไม่คงทน

5. ความสามารถในการยืดหยุ่นตัว (Flexibility)

ความสามารถในการยืดหยุ่นตัวโดยไม่แตก เป็นสิ่งที่ต้องการในการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะเกิดการยืดหยุ่นตัวโดยการทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักกด หรือโดยการโป่งขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของดินชั้นทางข้างล่างตลอดเวลา

แอสฟัลต์คอนกรีตชนิด Open-Graded จะสามารถยืดหยุ่นตัวได้ดีกว่าชนิด Dense-Graded แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นตัวได้ดี มักจะมีค่าเสถียรภาพต่ำกว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นตัวได้น้อย

6. ความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance)

ความต้านทานต่อการล้า คือความสามารถในการต้านทานการดัดโค้งแบบซ้ำซาก (Repeated Bending) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่เกิดจากน้ำหนักล้อกระทำ ปริมาตรช่องว่างอากาศ (เกี่ยวกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์) และความหนืดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ มีผลต่อความต้านทานต่อการล้า กล่าวคือ แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาตรช่องว่างอากาศมาก ไม่ว่าจะเป็นผลจากการออกแบบหรือจากการบดอัดไม่เพียงพอ ทำให้ความต้านทานต่อการล้าลดลง ในทำนองเดียวกัน การใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เสื่อมสภาพและแข็งตัวได้ง่าย ทำให้ความต้านทานต่อการล้าลดลงเช่นกัน

นอกจากนั้น ความหนาและความแข็งแรงของชั้นผิวทาง ตลอดจนความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างที่รองรับผิวทาง ก็มีผลต่ออายุและความสามารถรับน้ำหนักของผิวทางโดยไม่เกิดรอยแตก กล่าวคือ ผิวทางที่หนารวมทั้งชั้นโครงสร้างที่รองรับผิวทางแข็งแรง จะทำให้ไม่เกิด การแอ่นตัวมาก จึงมีอายุรับน้ำหนักล้อซึ่งกระทำซ้ำ ๆ ได้นานกว่า

สาเหตุที่ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าต้านทานการล้าต่ำ ได้แก่

- (1) ปริมาณแอสฟัลต์น้อยเกินไป จะทำให้เกิดรอยแตกเมื่อน้ำหนักกระทำซ้ำมาก ๆ
- (2) การมีช่องอากาศมากเกินไป ทำให้แอสฟัลต์เสื่อมสภาพเร็ว เกิดรอยแตกง่าย

(3) การบดอัดไม่เพียงพอ ทำให้แอสฟัลต์เสื่อมสภาพเร็ว เกิดรอยแตกได้ง่าย

(4) ผิวทางหนาไม่พอ ทำให้เกิดการแอ่นตัวมากเกินไป เมื่อหน้าหนักกระทำก็ทำให้เกิดรอยแตกได้ง่าย

7. ความต้านทานต่อการลื่น (Skid Resistance)

สาเหตุที่ทำให้ผิวทางลื่น เนื่องจากปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์มากเกินไป เกิดการเยิ้ม ขนาดและลักษณะผิวของวัสดุรวมไม่เหมาะสม ผิวทางมีลักษณะเรียบเกินไป นานมีโอกาสท่วมเมื่อวัสดุรวมทำให้ลื่น เมื่อวัสดุรวมถูกขัดสีโดยการจราจรทำให้ลื่นง่าย

วัสดุที่ใช้ทำแอสฟัลต์

วัสดุที่ใช้ทำแอสฟัลต์คอนกรีต ประกอบด้วย วัสดุรวมรวม (Aggregate) และ แอสฟัลต์ชนิดแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement)

1. วัสดุรวมรวม (Aggregate)

วัสดุรวมรวมประกอบด้วย วัสดุรวมหยาบ วัสดุรวมละเอียด และ วัสดุอัดแทรก แต่ละชนิดมีคุณสมบัติดังนี้

1.1 วัสดุรวมรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ตามคำนิยามของกรมทางหลวง หมายถึง วัสดุรวมรวมที่มีขนาดโตกว่า 4.75 มม. (ค้ำตะแกรงเบอร์ 4) ปกติวัสดุรวมรวมหยาบจะใช้หินไม่ตั้งแต่ 2 ขนาดขึ้นไปผสมกัน เช่น ใช้หินโตสุด 19 มม. ผสมกับหินขนาดโตสุด 9.5 มม. เป็นต้น หินแต่ละขนาดที่ใช้จะมีลักษณะค่อนข้างเป็นขนาดเดี่ยว (Single Size) ทั้งนี้เพื่อลดการแยกตัว (Segregation)

ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง วัสดุมวลรวมหยาบจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

(1) สะอาดปราศจากสิ่งสกปรก ดินเหนียว ทรายแป้ง หรืออินทรีย์วัตถุผสมหรือปน และจะต้องไม่มีปฏิกิริยากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งจะทำให้คุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตเสื่อมสภาพ

(2) ค่า Los Angeles Abrasion เมื่อทดสอบตามวิธี AASHTO T 96 ไม่เกินร้อยละ 40

(3) เมื่อทดสอบ Soundness Test โดยใช้สารละลาย Sodium Sulphate ตามวิธี AASHTO T 104 น้ำหนักที่หายไปไม่เกินร้อยละ 9

(4) ค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) และดัชนีความยาว (Elongation Index) เมื่อทดสอบตามวิธี BS 812 ไม่เกินร้อยละ 30

(5) ผิวต้องถูกไม่แตกอย่างน้อยหนึ่งหน้า ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50

1.2 วัสดุมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ตามคำนิยามของกรมทางหลวง หมายถึง วัสดุมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 4) และต้องมีคุณสมบัติดังนี้

(1) ต้องเป็นหินฝุ่น หรือทราย

(2) สะอาด ปราศจากสิ่งสกปรก ดินเหนียว ทรายแป้ง หรืออินทรีย์วัตถุผสมหรือปะปนอยู่และ จะต้องไม่มีปฏิกิริยากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ซึ่งจะทำให้คุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตเสื่อมสภาพ

(3) ค่า Sand Equivalent เมื่อทดสอบตามวิธี AASHTO T 176 มากกว่าร้อยละ 50 โดยปกติไม่ควรใช้ทราย จะใช้เมื่อจำเป็น เช่น ต้องการปรับปรุงขนาดกะ ของมวลรวม หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของแอสฟัลต์คอนกรีต

1.3 วัสดุอัดแทรก (Mineral Filler) เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุมวลรวม หมายถึง วัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 กรณีที่วัสดุมวลรวมละเอียดมีส่วนผสมไม่พอ จำเป็นใช้วัสดุอัดแทรกด้วยเพื่อปรับปรุงขนาดกะ วัสดุอัดแทรกที่ใช้ ได้แก่

(1) ฝุ่นหิน (Stone Dust) ใช้ปรับปรุงขนาดกะ

(2) ปูนขาว ปูนซีเมนต์ ใช้ปรับปรุงขนาดกะ และ/หรือ ด้านทานการหลุดออก (Anti-Stripping) ของฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบหินตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง วัสดุอัดแทรกได้แก่ ฝุ่นหิน ปูนซีเมนต์ ปูนชิลิก้าหรือวัสดุพวก Non Plastic ซึ่งกรมทางหลวงเห็นชอบให้ใช้ได้ และจะต้องแห้งไม่จับกันเป็นก้อน มีขนาดกะดังต่อไปนี้

ผ่านตะแกรงเบอร์ 30	ร้อยละ 100	โดยน้ำหนัก
ผ่านตะแกรงเบอร์ 50	ร้อยละ 75 - 100	โดยน้ำหนัก
ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	ร้อยละ 55 - 100	โดยน้ำหนัก

1.4 ขนาดกะรวม (Combined Gradation) เป็นการคำนวณจากการประมาณค่าเพื่อหาสัดส่วนผสม จากค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ลอดผ่าน (Passing) ของยังหิน 1, 2, 3 และ 4 (รวมกรณีมีวัสดุอัดแทรกด้วย) โดยที่สัดส่วนผสมของขนาดกะรวมจากทุกๆยังหิน ต้องรวมกันแล้ว เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และต้องอยู่ในช่วงที่กำหนด (Desired) ตามการทดลองที่ ทล.-ท 408/2532 ด้วย

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตตามวิธีมาร์แชลล์

คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต นอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ผสมแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ด้วย ดังนั้นการออกแบบเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้เพื่อให้ได้ แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการและถูกต้องตามข้อกำหนด (Specification) ของงานด้วยขั้นตอนต่างๆ ที่ต้องดำเนินการตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งได้สูตรส่วนผสมสำหรับงาน (Job Mix Formula) มีดังต่อไปนี้ตามลำดับ

1. การเลือกแหล่งวัสดุ

ก่อนอื่นต้องศึกษารายละเอียดของแบบก่อสร้างและข้อกำหนดอย่างละเอียด รวมทั้งปริมาณการจราจร ภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ฯลฯ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับพิจารณาว่าควรใช้วัสดุชนิดใดจากแหล่งใด โดยคำนึงถึงความสะดวก ประหยัด กำลังการผลิตตลอดจนผลการใช้งานในอดีตของวัสดุแหล่งนั้นด้วย

2. การเก็บตัวอย่างแอสฟัลต์

ควรเก็บตัวอย่างแอสฟัลต์ 3 ส่วน เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

ส่วนแรก ใช้สำหรับทดลองเพื่อตรวจสอบว่ามีคุณสมบัติถูกต้องตามข้อกำหนดหรือไม่

ส่วนที่สอง ใช้สำหรับทดลองหาคุณสมบัติซึ่งจำเป็นต้องทราบ สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบคุณสมบัติเหล่านี้ได้แก่

(1) ความถ่วงจำเพาะ ตามวิธีการทดลอง ASTM D 70

(2) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Kinematic Viscosity (ASTM T 2170) กับอุณหภูมิ

ส่วนที่สาม ใช้สำหรับผสมทำก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ตามวิธี ASTM D 1559

3. การเก็บตัวอย่างวัสดุมวลรวม

ควรเก็บตัวอย่างวัสดุมวลรวมทั้ง 3 ชนิด เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

3.1 วัสดุอัดแทรก

- (1) ทดลองเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติตามที่ระบุไว้ในข้อกำหนด
 - (2) ทดลองหาขนาดกละ ตามวิธี ASTM D 546
 - (3) ทดลองหาขนาดกละ ตามวิธี ASTM D 845 หรือ C 188
- ตัวอย่างที่หล่อเก็บไว้เตรียมก่อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตตามวิธี ASTM D 1559

3.2 วัสดุมวลรวมจากถังหินเย็น (Cold Bins) จากกอง (Stockpile) หรือแหล่งผลิต

- (1) ทดลองเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติตามที่ระบุไว้ในข้อกำหนด
- (2) ทดลองหาขนาดกละ ตามวิธี ASTM C 117 และ C 136
- (3) ทดลองหาดัชนีเบน (FI) และดัชนีความยาว (EI) ตามวิธี BS 812
- (4) หาค่าอัตราส่วนผสม ซึ่งทำให้

- ขนาดกละรวม (Combined Gradation) ตรงตามข้อกำหนด กรณีที่ใช้วัสดุอัดแทรกด้วย ให้นำมาคิดด้วย

- ดัชนีความแบน ดัชนีความยาว ของวัสดุผสมไม่เกินข้อกำหนด

- มีความเป็นไปได้ที่จะทำได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนด (โดยเฉพาะข้อกำหนดของ VMA) ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์พิจารณาจากขนาดกละรวม

(5) ป้อนวัสดุมวลรวม (ไม่รวมวัสดุอัดแทรก) จากถังหินเย็น ตามอัตราส่วนผสมเข้าหม้อเผา (Dryer) เพื่อเก็บตัวอย่างจากถังหินร้อน (Hot Bins)

3.3 วัสดุมวลรวมจากถังหินร้อน (Hot Bins)

- (1) ทดลองหาขนาดกละ ตามวิธี ASTM C 117
- (2) ทดลองหาดัชนีความแบนและดัชนีความยาว ตามวิธี BS 812
- (3) ทดลองหาความถ่วงจำเพาะแบบ Bulk (Oven – Dry Basis)

- ของวัสดุมวลรวมหยาบ ตามวิธี ASTM C 127
- วัสดุมวลรวมละเอียด ตามวิธี ASTM C 127

(4) หาอัตราส่วนผสม ซึ่งทำให้ได้ขนาดผลรวม (Combined Gradation) ใกล้เคียงกับขนาดผลรวมของวัสดุจากขุ้่งหินเย็น มากที่สุดและอยู่ในข้อกำหนด กรณีที่ใช้วัสดุอัดแทรกให้นำมาคิดด้วย

(5) จากผลทดลองที่ได้ตามข้อ (2) และอัตราส่วนที่ได้จากข้อ (4) คำนวณหาดัชนีความแบน และดัชนีความยาวของวัสดุมวลรวมที่ผสมกันแล้ว ซึ่งจะต้องใช้ได้ตามข้อกำหนด

(6) ผสมทดลองเพื่อทำก้อนตัวอย่าง แอสฟัลต์คอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มม. (4 นิ้ว) สูง $63.5 + 0.05$ มม. (2.5 นิ้ว) ตามวิธี ASTM D 1559 โดย

- ใช้อัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมตามข้อ (4)
 - ใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมอย่างน้อย 5 ค่า โดยเพิ่มขึ้นหรือลดลงครั้งละ 0.5 % โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม
 - แต่ละค่าของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ผสม ให้ทำตัวอย่างไม่น้อยกว่า 3 ก้อน
- (7) ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตจากข้อ (6) ทุกก้อน
- ทดลองหาความหนาแน่น ตามวิธี ASTM D 2726 แล้วหาค่าเฉลี่ย (ค่าที่ผิดปกติไม่นำมาเฉลี่ยด้วย)
 - ทดลองหาค่าเสถียรภาพ และ ค่าการไหล ตามวิธี ASTM D 1559 แล้วหาค่าเฉลี่ย (ค่าที่ผิดปกติไม่นำมาเฉลี่ยด้วย)

(8) ทดลองหา Theoretical Maximum Specific Gravity ของแอสฟัลต์คอนกรีตตามวิธี ASTM D 2041

(9) คำนวณค่าต่าง ๆ จากสูตรต่อไปนี้

$$Gag = \frac{100}{\frac{PF}{GF} + \frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3} + \frac{P4}{G4}}$$

$$b = \frac{100 * a}{100 + a}$$

$$Gv = \frac{100 - b}{\frac{100}{Ga} - \frac{b}{Gac}}$$

$$x = \frac{100(Gv - Gag)Gac}{Gv * Gag}$$

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

$$j = \frac{c * l}{Gac}$$

$$k = \frac{(100 - b) * l}{Gab}$$

$$l = 100 - k$$

$$m = l - j$$

$$n = \frac{100 * j}{l}$$

เมื่อ :

PF = ปริมาณวัสดุอัดแทรก เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมทั้งหมด

P1 = ปริมาณวัสดุมวลรวมจาก Hot Bin 1 เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุ
มวลรวมทั้งหมด

P2 = ปริมาณวัสดุมวลรวมจาก Hot Bin 2 เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุ
มวลรวมทั้งหมด

P3 = ปริมาณวัสดุมวลรวมจาก Hot Bin 3 เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุ
มวลรวมทั้งหมด

P4 = ปริมาณวัสดุมวลรวมจาก Hot Bin 4 เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุ
มวลรวมทั้งหมด

Gag = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมที่ผสมกันแล้ว

G_m = Theo. Maximum Sp.Gr.

G_v = Virtual Sp.Gr.

G_F = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุอัดแทรก

G_1 = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุรวมรวมจากขุ้่งหินร้อน

G_2 = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุรวมรวมจากขุ้่งหินร้อน

G_3 = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุรวมรวมจากขุ้่งหินร้อน

G_4 = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุรวมรวมจากขุ้่งหินร้อน

b = ปริมาณแอสฟัลต์ เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของแอสฟัลต์

x = Asphalt Lost by Absorption

(10) เลือกปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อใช้เป็นสูตรส่วนผสม สำหรับทำงาน (Job Mix Formula)

(11) สูตรส่วนผสมสำหรับทำงานควรมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

ชนิด แหล่ง และคุณสมบัติของวัสดุทุกชนิดที่ใช้

- สูตรส่วนผสมของวัสดุรวมรวมทั้งขุ้่งหินเย็น และขุ้่งหินร้อน กรณีที่มีวัสดุอัดแทรก ด้วยให้ระบุไว้ด้วย

- ขนาดผลรวม ของวัสดุรวมรวม

- ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้

- ส่วนคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ (Allowable Tolerance)

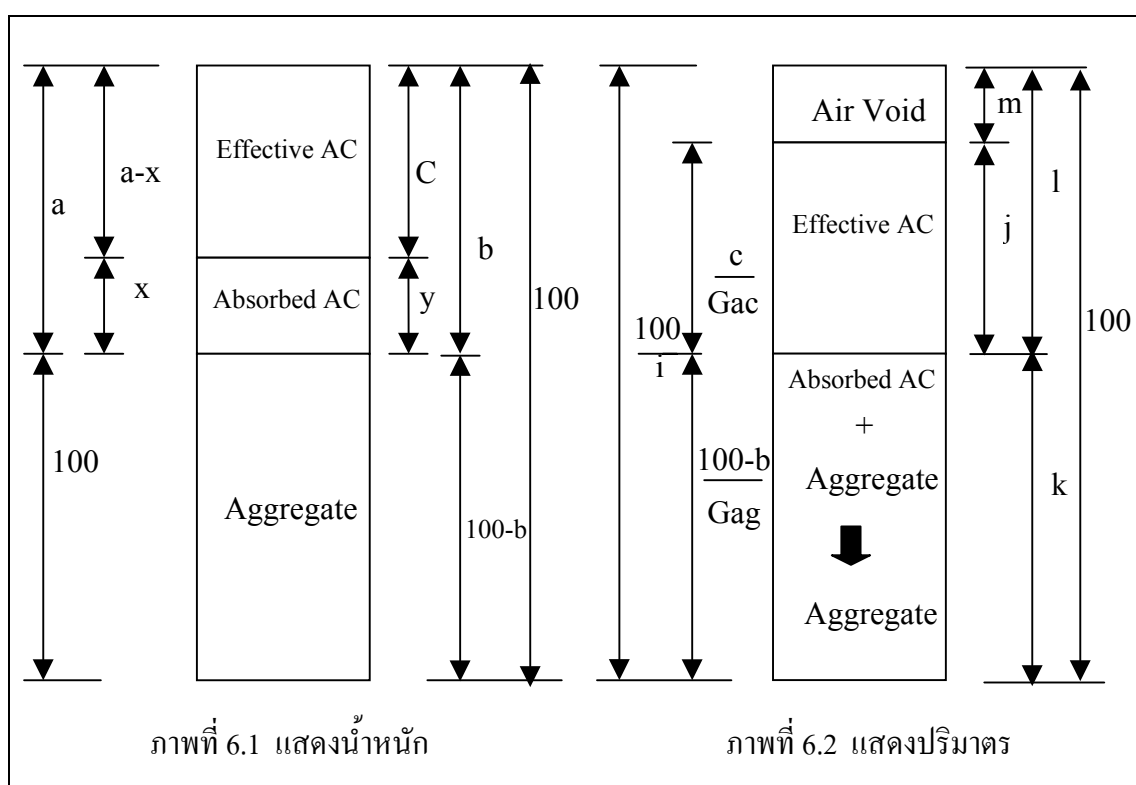
- อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิวัสดุรวมรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ก่อนผสม อุณหภูมิเมื่อผสมเสร็จ ขณะปู และขณะบดอัด

- เงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบ เช่น ออกแบบโดยวิธีดำหรีบคอดที่ 50 หรือ 75 ครั้งตามข้อกำหนด เป็นต้น

(12) กรณีผลการออกแบบได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติ ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด ให้เปลี่ยนอัตราส่วนผสมของมวลรวมและทดลองซ้ำ

การคำนวณหาค่าปริมาตรของส่วนต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

การหาค่าปริมาตรของส่วนต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีตเช่น VMA , Air Voids และ VFA ต้องอาศัยข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ และการคำนวณโดยการแบ่งมิติทางด้านน้ำหนัก และมิติทางด้านปริมาตรดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งมิติด้านน้ำหนักและมิติด้านปริมาตร

ภาพที่ 6.1 มิติด้านซ้ายมือของรูป เป็นน้ำหนักของส่วนต่าง ๆ คิดเป็นร้อยละของน้ำหนัก
มวลรวม มิติด้านขวามือของรูปเป็นน้ำหนักของส่วนต่าง ๆ คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักทั้งหมด

ภาพที่ 6.2 มิติด้านซ้ายมือของรูป เป็นปริมาตรของส่วนต่างๆ ซึ่งคำนวณจากมิติด้านขวามือ
ของรูป มิติด้านขวามือของรูป เป็นปริมาตรของส่วนต่างๆ คิดเป็นร้อยละของปริมาตรทั้งหมด
เมื่อ :

- a = ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ผสม หน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุรวม
x = ปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมโดยวัสดุรวม หน่วยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก
ของวัสดุรวม
i = ความหนาแน่นของแอสฟัลต์คอนกรีต หน่วยเป็นกรัม/มิลลิลิตร
Gac = ความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์ซีเมนต์
Gag = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุรวม

จากภาพที่ 6.1 เทียบอัตราส่วนด้านซ้ายมือกับด้านขวามือของรูป จะได้

$$\frac{b}{100} = \frac{a}{100 + a} : \quad b = \frac{a}{(100 + a) * 100}$$

และ $\frac{x}{100} = \frac{y}{100 + b} : \quad y = \frac{x * (100 - b)}{100}$

$$c = b - y : \quad c = \frac{b - (x * (100 - b))}{100}$$

จากภาพที่ 6.2 เทียบอัตราส่วนด้านซ้ายมือกับด้านขวามือของรูป จะได้

$$\frac{j}{100} = \frac{\frac{c}{Gac} * \frac{i}{100}}{1} : \quad j = \frac{c * i}{Gac}$$

และ $\frac{k}{100} = \frac{\frac{100 - b}{Gag} * \frac{i}{100}}{1} : \quad k = \frac{(100 - b) * i}{Gag}$

$$\begin{array}{lclclcl}
 \text{โดยคำนิยาม} & 1 & = & \text{VMA} & = & 100 - k \\
 & m & = & \text{Air Voids} & = & 1 - j \\
 & & & \text{VFA} & = & \frac{j}{1 * 100}
 \end{array}$$

วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลอง

การศึกษาการใช้ซีตะกรันแทนมวลรวมละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีต มีขั้นตอนการทดลอง 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. ตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวม มวลรวมที่เลือกใช้ในการทดลองนี้เป็นหินที่นิยมใช้โดยทั่วไปในประเทศไทย ได้แก่ หินปูน หินแกรนิต หินบะซอลท์ และ ซีตะกรัน ซึ่งต้องการทดสอบในการศึกษานี้
2. เตรียมตัวอย่างซีตะกรัน นำซีตะกรันจากโรงงาน มาทำความสะอาด บดให้ละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 และถาดรอง (pan)
3. หาระดับแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสม ใช้หินล้วนทั้ง 3 ชนิด โดยไม่ใส่ซีตะกรัน ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ใน 5 ระดับ ได้แก่ 4.5, 5, 5.5, 6 และ 6.5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับหินปูนและหินแกรนิต สำหรับหินบะซอลท์ ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ใน 5 ระดับ ได้แก่ 5, 5.5, 6, 6.5 และ 7.0 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้โดยวิธีมาร์แชลล์ เพื่อหาระดับแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดตามข้อกำหนดการออกแบบมาร์แชลล์ ตามตารางที่ 3 นำระดับที่หาได้ไปใช้เป็นค่าคงที่ในการทดสอบขั้นต่อไป
4. หาระดับการทดแทนมวลรวมละเอียดด้วยซีตะกรันที่ดีที่สุด นำซีตะกรันทดแทนมวลรวมละเอียด ด้วยอัตราส่วน 4, 8, 12, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด โดยกำหนดระดับการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 ให้คงที่ ทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้โดยวิธีมาร์แชลล์ เพื่อหาระดับการแทนด้วยซีตะกรัน ที่ให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดตามข้อกำหนดการออกแบบมาร์แชลล์ ในตารางที่ 3 คือ ได้ค่าเสถียรภาพสูงที่สุด

5. ตรวจสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมซีตะกรันในระดับที่เหมาะสม ผสมก่อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ซีตะกรันในระดับที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 มาผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ 5 ระดับ คือ 4.5, 5, 5.5, 6 และ 6.5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับหินปูนและ หินแกรนิต สำหรับหินบะซอลท์ ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ใน 5 ระดับ คือ 5, 5.5, 6, 6.5 และ 7.0 เปอร์เซ็นต์ ตรวจสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้โดยวิธีมาร์แชลล์ เปรียบเทียบกับ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ผสมซีตะกรัน

ตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวม

ในการตรวจสอบวัสดุมวลร่วนนั้นแยกออกเป็น การตรวจสอบวัสดุมวลรวมหยาบ และ ตรวจสอบวัสดุรวมละเอียด มีวิธีการตรวจสอบมวลรวม ดังต่อไปนี้

1. วัสดุมวลรวมหยาบ ต้องทำการตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวมหยาบ ดังนี้

- ขนาดคละ (Gradation) ทำการทดสอบ ตามการทดลองที่ ทล. – ท. 204/2516 หรือ AASHTO T85 – 78 หรือ ASTM C136 – 84

- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทำการทดสอบ ตามการทดลองที่ ทล. – ท. 207/2517 หรือ AASHTO T85 – 77 หรือ ASTM C127 – 84

- ความคงทน (Soundness) ทำการทดสอบ ตามการทดลองที่ ทล. – ท. 213/2531 หรือ AASHTO T104– 77 หรือ ASTM C88 – 83

- ดัชนีความแบน (Flakiness Index) ทำการทดสอบ ตามการทดลองที่ ทล. – ท. 210/2518

- ดัชนีความยาว (Elongation Index) ทำการทดสอบ ตามการทดลองที่ ทล. – ท. 211/2518

- ความสึกหรอของมวลรวมหยาบ โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล. – 202/2518 หรือ AASHTO T96 - 77 หรือ ASTM C131-81

1.1 ขนาดกะละของมวลรวมหยาบ (Gradation) จะทำการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่านมา หรือที่ค้างตะแกรงขนาดต่าง ๆ กับมวลรวมทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = \frac{R}{T} \times 100$$

เมื่อ P = เปอร์เซนต์ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก

R = มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด

T = มวลของตัวอย่างทั้งหมด

1.2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Specific Gravity) (ขนาดโตกว่า 4.75 มม.) แบบส่วนใหญ่ (Bulk Specific) และแบบปรากฏ (Apparent Specific Gravity) และปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ (Water Absorption) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Bulk Specific Gravity (Dry)} = \frac{W_D}{W_s - W_w}$$

$$\text{Bulk Specific Gravity (Sat)} = \frac{W_s}{W_s - W_w}$$

$$\text{Apparent Specific Gravity} = \frac{W_D}{W_D - W_w}$$

$$\text{Water Absorption} = \frac{W_D}{W_s - W_D}$$

เมื่อ W_D = มวลของวัสดุอบแห้งในอากาศ, กรัม

W_s = วัสดุของผิวแห้ง (Standard Surface), กรัม

W_w = มวลของวัสดุในน้ำ

1.3 ค่าความคงทน (Soundness) โดยการหาความคงทนของมวลรวม วัสดุมวลรวมหยาบ โดยเพื่อหาความต้านทานต่อการแตก หรือการแยกของมวลรวมในสารละลายอิ่มตัว โซเดียมซัลเฟต หรือแมกนีเซียมซัลเฟส เพื่อที่จะได้ใช้ข้อมูลในการช่วยพิจารณา ค่าความคงทนของมวลรวมที่ถูกกระทำโดยดินฟ้าอากาศ

1.4 ดัชนีความแบน (Flakiness Index, FI) เป็นการหามวลของวัสดุที่มีความหนาของ ด้านแบนที่น้อยกว่า 3/5 เท่าของขนาดเฉลี่ยของวัสดุนั้น โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับมวล ของวัสดุที่นำมาทดสอบ สำหรับข้อกำหนดของทางหลวง ค่าดัชนีความแบนต้องมีค่าไม่มากกว่า ร้อยละ 30 ซึ่งค่าดัชนีความแบนคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ดัชนีความแบน (Flakiness Index)} = \frac{X}{W} \times 100$$

เมื่อ $X =$ น้ำหนักรวมเป็นกรัมของตัวอย่างทุกขนาดที่ผ่าน

$W =$ น้ำหนักรวมเป็นกรัมของตัวอย่างทุกขนาดที่ค้างบนแต่ละตะแกรง

1.5 ดัชนีความยาว (Elongation Index, EI) เป็นการหามวลของวัสดุที่มีความยาวของ ส่วนยาว มากกว่า 1.8 เท่าของความหนาเฉลี่ยของวัสดุ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับมวลที่นำมา ทำการทดสอบ ข้อกำหนดของกรมทางหลวง ค่าดัชนีความยาวต้องมีค่าไม่มากกว่าร้อยละ 30 ซึ่งค่า ดัชนีความยาวคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ดัชนีความยาว (Elongation Index)} = \frac{Y}{W} \times 100$$

เมื่อ $Y =$ น้ำหนักรวมเป็นกรัมของตัวอย่างทุกขนาดที่ค้างบน Length Gauge

$W =$ น้ำหนักรวมเป็นกรัมของตัวอย่างทุกขนาดที่ค้างบนแต่ละตะแกรง
ก่อนนำไปผ่าน Length Gauge(ค่าของ EI ควรปัดเป็นเลขจำนวนเต็ม)

1.6 ความสึกกร่อนของมวลรวมหยาบ โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion เป็นการทดลองหาค่าการสึกหรอของมวลรวมหยาบ ว่ามีความต้านทานต่อการขัดสีและการกระแทกของเครื่องจักรบดอัดความแน่นดีหรือไม่ โดยกรมทางหลวงยอมให้ค่าการสึกหรอของวัสดุมวลรวมชั้นผิวทางไม่เกินร้อยละ 40 ในการคำนวณค่าการสึกหรอสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย} = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } A &= \text{น้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ} \\ B &= \text{น้ำหนักตัวอย่างทุกขนาดที่ค้างตะแกรงเบอร์ 12} \end{aligned}$$

2. วัสดุมวลรวมละเอียด ต้องทำการตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวมละเอียดดังนี้

- ขนาดกละ (Gradation) ทำการทดสอบ ตามรายการทดลองที่ ทล. – ท. 205/2517 หรือ AASHTO T85 – 78 หรือ ASTM C136 – 84A

- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทำการทดสอบ ตามการทดลองที่ ทล. – ท. 209/2517 หรือ AASHTO T84 – 77 หรือ ASTM C128 – 84

- ความคงทน (Soundness) ทำการทดสอบ ตามการทดลองที่ ทล. – ท. 213/2531 หรือ AASHTO T104 – 77 หรือ ASTM C88 – 83

- ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent) ทำการทดสอบ ตามการทดลองที่ ทล. – ท. 203/2515 หรือ AASHTO T176 – 73 หรือ ASTM D2419 – 74

2.1 ขนาดกละของมวลรวมละเอียด (Gradation) จะทำการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่านมา หรือที่ค้างตะแกรงขนาดต่าง ๆ กับมวลรวมทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรง } P = \frac{R}{T} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } P &= \text{โดยน้ำหนัก} \\ R &= \text{มวลรวมของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด} \\ T &= \text{มวลของตัวอย่างทั้งหมด} \end{aligned}$$

2.2 ความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ การทดสอบจะต้องทำการแยกวัสดุรวมละเอียดนี้ออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ล้างตะแกรงเบอร์ 200 กับส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วทำการคำนวณจากสมการดังนี้ ความถ่วงจำเพาะแบบส่วนใหญ่ (Bulk Specific Gravity)

$$G_A (30^\circ\text{C}) = \frac{W_D d_t}{0.9957(W_s + W_2 + W_1)}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } G_B &= \text{ความถ่วงจำเพาะแบบส่วนใหญ่} \\ W_D &= \text{น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (Weight of Dry Sample), กรัม} \\ W_s &= \text{น้ำหนักของตัวอย่างชื้น (Weight of Saturated Surface Sample), กรัม} \\ W_2 &= \text{น้ำหนักภาชนะ (Pycnometer) + น้ำ ; กรัม} \\ W_1 &= \text{น้ำหนักภาชนะ (Pycnometer) + น้ำ ; ตัวอย่าง ; กรัม} \\ d_t &= \text{ความหนาแน่นของน้ำขณะทำการทดสอบ ณ อุณหภูมิ } t^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ (Apparent Specific Gravity)

$$G_B (30^\circ\text{C}) = \frac{W_D d_t}{0.9957(W_D + W_2 + W_1)}$$

สำหรับวัสดุมวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 นั้น สามารถจะหาค่าความถ่วงจำเพาะแบบส่วนใหญ่ได้ เพราะไม่สามารถทำให้ผิวนอกของมวลรวมแห้ง โดยที่ยังมีความชื้นอยู่ภายในได้ (เนื่องจากมวลรวมนั้นมีความเป็นพลาสติกมาก)

2.3 ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent, SE) วิธีการนี้เป็นการทดลองเพื่อ หาสัดส่วนระหว่างฝุ่นหรือวัสดุประเภทดินเหนียว กับวัสดุเม็ดหยาบจำพวกกรวดหรือทรายที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งได้กำหนดค่าต่ำสุดของทรายที่ใช้ ต้องมีค่าต้องไม่น้อยกว่า 50% โดยหาได้จากสมการ

$$\text{ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent, SE)} = \frac{\text{Sand reading}}{\text{Clay reading}} \times 100$$

การเตรียมตัวอย่างซีตะกรัน

โดยการนำซีตะกรัน จากโรงงานหล่อเหล็กมาทำความสะอาด บดให้ละเอียดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ ให้ได้ขนาดคละของซีตะกรัน มีขนาดเดียวกับขนาดคละของมวลรวมละเอียดของหินปูน หินแกรนิต หินบะซอลท์ โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. นำซีตะกรัน มาทำความสะอาดโดยการล้าง แล้วนำไปใส่บุงกีเป็นภาชนะเพื่อร่อนในน้ำเพื่อกำจัดถ่านโค้ก และสิ่งสกปรกที่ปะปนมาออก
2. นำซีตะกรันไปตากแดดให้แห้ง
3. นำซีตะกรันไปใส่ในเครื่อง Los Angeles Abrasion เพื่อบดย่อยให้ซีตะกรันให้ละเอียด
4. นำซีตะกรัน มาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์# 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 และค้ำบนถาดรองลักษณะของผงซีตะกรันแสดงในภาพผนวก
5. ชั่งน้ำหนักมวลรวม 4 ขนาด (Hot bin 1, 2, 3, และ 4) ของหินปูน หินแกรนิตและหินบะซอลท์ ดังตารางผนวกที่ 77, 78 และ 79 ตามลำดับ ทดแทนมวลรวมละเอียด (Hot bin 1) ด้วยซีตะกรัน ระดับ 4, 8, 12, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด ซึ่งเป็นน้ำหนักเท่ากับ 48, 96, 114, 192 และ 240 กรัม ตามลำดับในทุกชนิดหิน

การเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตตามวิธีมาร์แชลล์

คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต นอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาผสมแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมวัสดุที่ใช้ด้วย ดังนั้น การออกแบบเพื่อหาอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสม จึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. การเลือกวัสดุ ในขั้นแรก จะต้องศึกษาถึงรายละเอียดของแบบก่อสร้างและข้อกำหนดอย่างละเอียด รวมทั้งปริมาณการจราจร ภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ฯลฯ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับพิจารณาว่า ควรใช้วัสดุชนิดใด จากแหล่งใด โดยคำนึงถึงความสะดวก ประหยัด กำลังการผลิต ความมั่นคงแข็งแรงของวัสดุนั้น ๆ เมื่อนำมาใช้งาน
2. วัสดุแอสฟัลต์ ในขั้นตอนนี้จะต้องศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ว่ามีคุณสมบัติถูกต้องตามข้อกำหนดหรือไม่ และเหมาะสมที่จะใช้กับสายทางนั้น ๆ หรือไม่ มากน้อยเพียงใด
3. วัสดุมวลรวม เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุมวลรวมแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนวณหาอัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมทั้งหมดเพื่อให้ได้ขนาดคละที่เหมาะสม
4. ทดลองผสม เพื่อทำก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มม. (นิ้ว) สูง 63.5 ± 1.3 มม. (2.5 ± 0.05 นิ้ว) ตามวิธี ASTM D1559 โดยใช้ปริมาณแอสฟัลต์ผสมอย่างน้อย 5 ค่า โดยเพิ่มหรือลดครั้งละ 0.5 % โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม จำนวนตัวอย่างในแต่ละปริมาณแอสฟัลต์ต้องไม่น้อยกว่า 3 ก้อนตัวอย่าง

การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต

วัสดุผสมได้จากการผสมร้อนระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ เมื่อทำการบดอัดตามวิธีของมาร์แชลล์ (บดอัดด้วยค้อนมาตรฐาน 75 ครั้งต่อด้านของก้อนตัวอย่าง) โดยอุณหภูมิขณะทำการบดอัดอยู่ระหว่าง $170 - 175^{\circ}\text{C}$ และ $150 - 155^{\circ}\text{C}$ สำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70

1. ทดสอบหาค่าความหนาแน่น ตามวิธี ASTM D2726 (ค่าที่ผิดปกติไม่นำมาคำนวณด้วย)
2. ทดสอบหาค่าเสถียรภาพ และค่าการไหล ตามวิธี ASTM D1559 แล้วหาค่าเฉลี่ย (ค่าที่ผิดปกติไม่นำมาคำนวณด้วย)
3. ทดสอบหาค่าดัชนีความแข็ง (Strength Index, SI) วิธีการทดสอบ Ontario Vacuum Immersion Marshall Test เป็นการทดสอบวิธีหนึ่งที่เริ่มทำการทดสอบในประเทศแคนาดา เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์การหลุดร่อน (Stripping Resistance) ของมวลรวมผสมร้อน โดยการใช้ค่าเฉลี่ยของการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ จากก้อนตัวอย่างที่แช่ในน้ำเกลือ (0.5% Salt Solution) เทียบกับค่าเฉลี่ยของค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์จากก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้แช่ในน้ำเกลือ (Unsoaked) โดยค่านี้จะเทียบออกมาเป็น เปอร์เซนต์ค่าดัชนีความแข็งแรงของมวลรวมผสมร้อนที่จะนำไปปูลาด ถ้าค่าดัชนีความแข็งมีค่าต่ำ จะชี้ให้เห็นว่าผิวทางนั้นหลุดร่อนได้ง่าย สำหรับกรมทางหลวงได้กำหนดค่าดัชนีความแข็งไว้ว่าจะไม่ต่ำกว่า 70%

ค่าดัชนีความแข็งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$SI = \frac{\text{Soaked Sample}}{\text{Unsoaked Sample}} \times 100$$

เมื่อ $SI = \text{ค่าดัชนีความแข็ง, \%}$

Soaked Sample และ Unsoaked Sample คือ ค่าที่อ่านได้จากการทดสอบหาเสถียรภาพของก้อนตัวอย่าง

4. นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่าง ๆ กับอัตราส่วนผสมของวัสดุเชื่อมประสาน

สูตรคำนวณค่าคุณสมบัติของ แอสฟัลต์คอนกรีต

ในการคำนวณส่วนต่างๆ ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นการคำนวณหาน้ำหนักของส่วนประกอบ หรือปริมาตรของส่วนประกอบก็ตาม จะคิดอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการนำค่าต่าง ๆ ไปใช้ในงานสนาม

1. การคำนวณหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวม (G_{AG})

$$G_{AG} = \frac{100}{\sum_{n=1}^4 \frac{P_n}{G_n} + \frac{P_f}{G_f}}$$

เมื่อ P_f = ปริมาณวัสดุอัดแทรกเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุ
มวลรวมทั้งหมด

P_n = ปริมาณวัสดุมวลรวมจาก Hot Bin n เป็นร้อยละโดยน้ำหนัก
ของวัสดุทั้งหมด

G_f = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุอัดแทรก

G_n = ความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมจาก Hot Bin n

2. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลต์ที่หายไป เนื่องจากดูดซึมของมวลรวม (Asphalt Lost by Absorption Asphalt, Ab)

เปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลต์ที่หายไป เนื่องจากการดูดซึมของมวลรวม (Ab)

$$Ab = \frac{100 \times (G_v - G_{AG}) \times G_{AC}}{G_v \times G_{AG}}$$

เมื่อ G_{AC} = ความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์ซีเมนต์

$$G_V = \text{Virtual Specific Gravity} = \frac{100 - b}{\frac{100}{G_m} - \frac{b}{G_{AC}}}$$

$$G_M = \text{Theoretical Maximum Specific Gravity}$$

$$= \text{ปริมาณแอสฟัลต์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทั้งหมดของส่วนผสม}$$

3. การคำนวณหาความถ่วงจำเพาะที่มากที่สุดตามหลักวิชาการ (Theoretical Maximum Specific Gravity, G_m) ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณได้จาก การทดสอบตามวิธีของ ASTM D2041 และคำนวณตามสมการ

ความถ่วงจำเพาะที่มากที่สุดตามหลักวิชาการ

$$G_m = \frac{D}{A + D - E}$$

เมื่อ

$$D = \text{น้ำหนักของตัวอย่างในอากาศ}$$

$$A = \text{น้ำหนักของ Flask ในน้ำ}$$

$$E = \text{น้ำหนักของ Flask + น้ำหนักตัวอย่างในน้ำหลังจากดูดฟองอากาศส่วนเกินออกไปแล้ว}$$

4. คำนวณหาปริมาณแอสฟัลต์ส่วนที่เหลือจากกฎมวลรวมดูดซึมไปแล้วเป็นเปอร์เซ็นต์ (Effective Asphalt) โดยน้ำหนักของส่วนผสม

$$E_{AC} = \frac{b - Ab(100 - b)}{100}$$

5. การคำนวณหาความหนาแน่นทั้งหมดของก้อนตัวอย่าง (Bulk Density)

$$D_E = \frac{AC_a}{AC_s - AC_w}$$

เมื่อ D_E = ความหนาแน่นทั้งหมดของก้อนตัวอย่าง

AC_a = น้ำหนักตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ชั่งในอากาศ

AC_s = น้ำหนักตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ชั่งในอากาศ เมื่อมีความชื้น (สภาพ Saturated Surface Dry)

AC_w = น้ำหนักตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ชั่งในน้ำ

6. การคำนวณหาปริมาตรของแอสฟัลต์ทั้งหมดในก้อนตัวอย่าง โดยไม่รวมปริมาณของแอสฟัลต์ที่ถูกมวลรวมดูดซึมเข้าไปในรูปของเปอร์เซ็นต์

$$V_{AC} = \frac{E_{AC} \times D_E}{G_{AC}}$$

7. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของมวลรวมทั้งหมดในก้อนตัวอย่าง

$$V_{AG} = \frac{(100 - b)}{G_{AG}} \times D_E$$

8. การคำนวณหาช่องว่างในวัสดุมวลรวม (Voids in the Mineral Aggregate; VMA) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์

$$VMA = 100 - V_{AG}$$

9. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างในอากาศ (Air voids) ในก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

$$AV = VMA - V_{AC}$$

10. การคำนวณหาสัดส่วนระหว่างปริมาตรของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ ต่อช่องว่างของมวลรวมหินที่บดอัด ในรูปของเปอร์เซ็นต์ (Voids filled with bituminous; VFB) ในก้อนของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

$$\text{VFB} = \frac{100 \times V_{AC}}{\text{VMA}}$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบคุณสมบัติมวลรวม

1. มวลรวมประเภทจีตะกฐัน จากการทดสอบทางกายภาพของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ได้ผลดังนี้

1.1 ค่าความสึกหรอ เป็นการหาค่าความสึกหรอของความสามารถของมวลรวมหยาบต่อการขัดสีและการกระแทกของเครื่องจักรบดอัด ดังตารางผนวกที่ 1 มีค่าร้อยละ 57.1 ซึ่งข้อกำหนดให้ค่าความสึกหรอต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 40

1.2 ความทนทาน เป็นการหาค่าความทนทานของมวลรวมละเอียดโดยใช้สารละลาย Sodium Sulfate ทดสอบ จำนวน 5 รอบ ดังตารางผนวกที่ 2 มีค่าร้อยละ 4.1 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 9 ตามข้อกำหนด

1.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด Hot Bin 1 ส่วนที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 200 และส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 สำหรับนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนผสมของมวลรวม ดังตารางผนวกที่ 3 และ 4 มีค่า 2.688 และ 2.764 ตามลำดับ

1.4 ค่าทรายสมมูล เป็นการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนของฝุ่นหรือวัสดุประเภทเดียวกับดินเหนียวที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 4 ดังตารางผนวกที่ 5 มีค่าร้อยละ 86 ซึ่งต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ตามข้อกำหนด

1.5 เปอร์เซ็นต์การหลุดออก เป็นการทดสอบเพื่อเปอร์เซ็นต์การหลุดออกออก ระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์กับมวลรวมหยาบ ที่มีขนาดระหว่าง 12.7-25.4 มม. ดังตารางผนวกที่ 6 มีค่าร้อยละ 13 ซึ่งต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ตามข้อกำหนด

2. มวบรวมประเภทหินปูน จากการทดสอบทางกายภาพของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ได้ผลดังนี้

2.1 การเรียงขนาดและขนาดของเม็ดวัสดุที่จำแนกออกเป็น Hot Bin 1, 2, 3 และ 4 ดังตารางผนวกที่ 7, 8, 9, 10 และ 11 ตามลำดับ ผลการทดสอบนี้นำไปใช้ในการคำนวณหาการเรียงขนาดของมวลรวมผสมตามอัตราส่วนผสม เพื่อให้ได้ขนาดละเอียดเป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวง

2.2 ค่าดัชนีความแบน เป็นการหาร้อยละของน้ำหนัkmวลรวมหยาบ ที่มีความหนาของด้านแบน มีค่าน้อยกว่า 0.6 เท่าของขนาดเฉลี่ยของมวลรวมนั้น ผลการทดสอบดังตารางผนวกที่ 12, 14 และ 16 มีค่าร้อยละ 33, 17 และ 24 ตามลำดับ

2.3 ค่าดัชนีความยาว เป็นการหาร้อยละของน้ำหนัkmวลรวมหยาบที่มีความยาวของส่วนยาวมากกว่า 1.8 เท่าของขนาดเฉลี่ยของมวลรวมนั้น ผลการทดสอบดังตารางผนวกที่ 13, 15 และ 17 มีค่าร้อยละ 18, 19 และ 33 ตามลำดับ

2.4 ค่าความสึกหรอ เป็นการหาค่าความสึกหรอของความสามารถของมวลรวมหยาบต่อการขัดสีและการกระแทกของเครื่องจักรบดอัด ดังตารางผนวกที่ 18 มีค่าร้อยละ 31.70 ซึ่งข้อกำหนดให้ค่าความสึกหรอต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 40

2.5 ความทนทาน เป็นการหาค่าความทนทานของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ โดยใช้สารละลาย Sodium Sulfate ทดสอบ จำนวน 5 รอบ ดังตารางผนวกที่ 19 และ 20 มีค่าร้อยละ 3.9 และ 1.1 ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินร้อยละ 9 ตามข้อกำหนด

2.6 ค่าทรายผสมมูล เป็นการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนของฝุ่นหรือวัสดุประเภทเดียวกับดินเหนียวที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 4 ดังตารางผนวกที่ 21 มีค่าร้อยละ 80 ซึ่งต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ตามข้อกำหนด

2.7 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด ส่วนที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 200 และส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 สำหรับนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนผสมมวลรวม ดังตารางผนวกที่ 22 และ 23 มีค่า 2.756 และ 2.824 ตามลำดับ

2.8 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ Hot Bin 2, 3, 4 สำหรับนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนผสมมวลรวม ดังตารางผนวกที่ 24 มีค่า 2.773, 2.785 และ 2.790 ตามลำดับ

3. มวลรวมประเภทหินแกรนิต จากการทดสอบทางกายภาพของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ได้ผลดังนี้

3.1 การเรียงขนาดและขนาดของเม็ดวัสดุที่จำแนกออกเป็น Hot Bin 1, 2, 3 และ 4 ดังตารางผนวกที่ 25, 26, 27, 28 และ 29 ตามลำดับ ผลการทดสอบนี้นำไปใช้ในการคำนวณหาการเรียงขนาดของมวลรวมผสมตามอัตราส่วนผสม เพื่อให้ได้ขนาดคละ ตามมาตรฐานกรมทางหลวง

3.2 ค่าดัชนีความแบน เป็นการหาร้อยละของน้ำหนักมวลรวมหยาบ ที่มีความหนาของด้านแบน มีค่าน้อยกว่า 0.6 เท่าของขนาดเฉลี่ยของมวลรวมนั้น ผลการทดสอบดังตารางผนวกที่ 30, 32 และ 34 มีค่าร้อยละ 20, 5 และ 7 ตามลำดับ

3.3 ค่าดัชนีความยาว เป็นการหาร้อยละของน้ำหนักมวลรวมหยาบที่มีความยาวของส่วนยาวมากกว่า 1.8 เท่าของขนาดเฉลี่ยของมวลรวมนั้น ผลการทดสอบดังตารางผนวกที่ 31, 33 และ 35 มีค่าร้อยละ 9, 15 และ 9 ตามลำดับ

3.4 ค่าความสึกหรอ เป็นการหาค่าความสึกหรอของความสามารถของมวลรวมหยาบต่อการขัดสีและการกระแทกของเครื่องจักรบดอัด ดังตารางผนวกที่ 36 มีค่าร้อยละ 29.8 ซึ่งข้อกำหนดให้ค่าความสึกหรอต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 40

3.5 ความทนทาน เป็นการหาค่าความทนทานของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบโดยใช้สารละลาย Sodium Sulfate ทดสอบ จำนวน 5 รอบ ดังตารางผนวกที่ 37 และ 38 มีค่าร้อยละ 3.7 และ 1.1 ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินร้อยละ 9 ตามข้อกำหนด

3.6 ค่าทรายผสมมูล เป็นการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนของฝุ่นหรือวัสดุประเภทเดียวกับดินเหนียวที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 4 ดังตารางผนวกที่ 39 มีค่าร้อยละ 75 ซึ่งต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ตามข้อกำหนด

3.7 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด ส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 200 และส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 สำหรับนำไปใช้ในการคำนวณหาความถ่วงจำเพาะของส่วนผสมมวลรวม ดังตารางผนวกที่ 40 และ 41 มีค่า 2.645 และ 2.712 ตามลำดับ

3.8 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ Hot Bin 2,3,4 สำหรับนำไปใช้ในการคำนวณหาความถ่วงจำเพาะของส่วนผสมมวลรวม ดังตารางผนวกที่ 42 มีค่า 2.639, 2.647 และ 2.656 ตามลำดับ

4. มวลรวมประเภทหินบะซอลต์ จากการทดสอบทางกายภาพของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ได้ผลดังนี้

4.1 การเรียงขนาดและขนาดของเม็ดวัสดุที่จำแนกออกเป็น Hot Bin 1, 2, 3 และ 4 ดังตารางผนวกที่ 43, 44, 45, 46 และ 47 ตามลำดับ ผลการทดสอบนี้นำไปใช้ในการคำนวณหาการเรียงขนาดของมวลรวมผสมตามอัตราส่วนผสม เพื่อให้ได้ขนาดคละ ตามมาตรฐานกรมทางหลวง

4.2 ค่าดัชนีความแบน เป็นการหาล้อยละของน้ำหนักมวลรวมหยาบ ที่มีความหนาของด้านแบน มีค่าน้อยกว่า 0.6 เท่า ของขนาดเฉลี่ยของมวลรวมนั้น ผลการทดสอบดังตารางผนวกที่ 48, 50 และ 52 มีค่าร้อยละ 69, 30 และ 21 ตามลำดับ

4.3 ค่าดัชนีความยาว เป็นการหาล้อยละของน้ำหนักมวลรวมหยาบที่มีความยาวของส่วนยาวมากกว่า 1.8 เท่าของขนาดเฉลี่ยของมวลรวมนั้น ผลการทดสอบดังตารางผนวกที่ 49, 51 และ 53 มีค่าร้อยละ 18, 39 และ 20 ตามลำดับ

4.4 ค่าความสึกหรอ เป็นการหาค่าความสึกหรอของความสามารถของมวลรวมหยาบต่อการขัดสีและการกระแทกของเครื่องจักรบดอัด ดังตารางผนวกที่ 54 มีค่าร้อยละ 29.3 ซึ่งข้อกำหนดให้ค่าความสึกหรอต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 40

4.5 ความทนทาน เป็นการหาค่าความทนทานของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบโดยใช้สารละลาย Sodium Sulfate ทดสอบ จำนวน 5 รอบ ดังตารางผนวกที่ 55 และ 56 มีค่าร้อยละ 3.9 และ 1.0 ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินร้อยละ 9 ตามข้อกำหนด

4.6 ค่าทรายสมมูล เป็นการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนของฝุ่นหรือวัสดุประเภทเดียวกับดินเหนียวที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 4 ดังตารางผนวกที่ 57 มีค่าร้อยละ 74 ซึ่งต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ตามข้อกำหนด

4.7 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด ส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 200 และส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 สำหรับนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนผสมของมวลรวม ดังตารางผนวกที่ 58 และ 59 มีค่า 2.752 และ 2.943 ตามลำดับ

4.8 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ Hot Bin 2, 3, 4 สำหรับนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของส่วนผสมมวลรวม ดังตารางผนวกที่ 60 มีค่า 2.781, 2.794 และ 2.796 ตามลำดับ

5. การทดสอบหาค่าการดูดซึมของแอสฟัลต์คอนกรีต และการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม เมื่อผสมรวมกับซีตกรันโดยการแทนที่ มวลรวมละเอียด ปริมาณ 4, 8, 12, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวม

5.1 ค่าการดูดซึมของแอสฟัลต์คอนกรีต ของมวลรวมประเภทหินปูนมีค่าร้อยละ 0.27 และเมื่อผสมรวมกับซีตกรันโดยการแทนที่ มวลรวมละเอียดปริมาณ 4, 8, 12, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวม ผลการทดสอบนำไปใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ตามวิธีมาร์แชลล์ ได้ค่าร้อยละ 0.29, 0.30, 0.30, 0.32 และ 0.33 ตามลำดับ

5.2 ค่าการดูดซึมของแอสฟัลต์คอนกรีต ของมวลรวมประเภทหินแกรนิต มีค่าร้อยละ 0.27 และ เมื่อผสมรวมกับซีตกรันโดยการแทนที่ มวลรวมละเอียด ปริมาณ 4, 8, 12, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวม ดัง ผลการทดสอบนำไปใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ตามวิธีมาร์แชลล์ ได้ค่าร้อยละ 0.29, 0.30, 0.30, 0.31 และ 0.33 ตามลำดับ

5.3 ค่าการดูดซึมของแอสฟัลต์คอนกรีต ของมวลรวมประเภทหินบะซอลต์ มีค่าร้อยละ 0.45 และ เมื่อผสมรวมกับจีตะกรันโดยการแทนที่ มวลรวมละเอียด 4, 8, 12, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวม ผลการทดสอบนำไปใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ตามวิธีมาร์แชลล์ ได้ค่าร้อยละ 0.47, 0.49, 0.51, 0.52 และ 0.53 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 สรุปค่าการดูดซึมของแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อผสมกับจีตะกรัน โดยการแทนที่ มวลรวมละเอียด ปริมาณ 4, 8, 12, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวมทั้งหมด

รายการ	ไม่ผสมกับ จีตะกรัน	เปอร์เซ็นต์จีตะกรันแทนที่ มวลรวมละเอียดโดยน้ำหนักรวม				
		4	8	12	16	20
หินปูน	0.27	0.29	0.30	0.30	0.32	0.33
หินแกรนิต	0.27	0.29	0.30	0.30	0.31	0.33
หินบะซอลต์	0.45	0.47	0.49	0.51	0.52	0.53

5.4 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมประเภทหินปูน มีค่า 2.773 และ เมื่อผสมรวมกับ จีตะกรันด้วยการแทนที่ มวลรวมละเอียดด้วย 4, 8, 12, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวม ผลการทดสอบนำไปใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ตามวิธีมาร์แชลล์ ได้ค่า 2.770 2.767, 2.765, 2.762 และ 2.759 ตามลำดับ

5.5 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมประเภทหินแกรนิต มีค่า 2.650 และ เมื่อผสมรวมกับจีตะกรันด้วยการแทนที่ มวลรวมละเอียดด้วย 4, 8, 12, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวม ผลการทดสอบนำไปใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ตามวิธีมาร์แชลล์ ได้ค่า 2.651, 2.65, 2.655, 2.657 และ 2.658 ตามลำดับ

5.6 ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมประเภทหินบะซอลต์ มีค่า 2.784 และเมื่อผสมรวมกับจีตะกรันด้วยการแทนที่ มวลรวมละเอียดด้วย 4, 8, 12, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวม ผลการทดสอบนำไปใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ตามวิธีมาร์แชลล์ ได้ค่า 2.781, 2.777, 2.774, 2.771 และ 2.768 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 สรุปค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม เมื่อผสมกับซีเมนต์กรัน โดย การแทนที่มวลรวม
ละเอียดในระดับ 4, 8, 12, 16 และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวมทั้งหมด

รายการ	ไม่ผสมกับ ซีเมนต์กรัน	เปอร์เซ็นต์ซีเมนต์กรันแทนที่มวลรวมละเอียด โดยน้ำหนักรวม				
		4	8	12	16	20
หินปูน	2.773	2.770	2.767	2.765	2.762	2.759
หินแกรนิต	2.650	2.651	2.653	2.655	2.657	2.658
หินบะซอลท์	2.784	2.781	2.777	2.774	2.771	2.768

เปรียบเทียบผลการทดสอบก่อนตัวอย่างโดยวิธีมาร์แชลล์

จากการทดสอบก่อนตัวอย่าง และวิธีการวิเคราะห์โดยวิธีมาร์แชลล์ ประกอบด้วย
เปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างโครงอากาศ ค่าความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์ช่องว่างบิทูเมน เปอร์เซ็นต์
ช่องว่างระหว่างมวลรวม ค่าการไหลและค่าเสถียรภาพ หินทุกชนิดจะพิจารณาตามข้อกำหนด
สำหรับเปอร์เซ็นต์ช่องว่างโครงอากาศ ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ในตารางที่ 3 สำหรับชั้นผิว
ทางต้องอยู่ในช่วง 3-5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการวิเคราะห์ จึงพิจารณาเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติ
แอสฟัลต์คอนกรีตจากช่องว่างโครงอากาศที่ 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่ากลาง

1. ผลการทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลล์สำหรับหินปูน

1.1 การทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลล์สำหรับหินปูน ตารางผนวกที่ 62 และภาพผนวกที่ 1
เมื่อพิจารณาที่ช่องว่างโครงอากาศที่ 4 เปอร์เซ็นต์ อ่านกราฟปริมาณวัสดุเชื่อมประสานได้ 5.13
เปอร์เซ็นต์ นำค่าที่อ่านได้นี้ไปอ่านค่าความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์ช่องว่างบิทูเมน เปอร์เซ็นต์ ช่อง
ว่างระหว่างมวลรวม ค่าการไหลและค่าเสถียรภาพได้ค่า 2.472 กรัม/มิลลิลิตร, 73.97 เปอร์เซ็นต์,
15.2 เปอร์เซ็นต์, 12.20/100 นิ้ว และ 2482 ปอนด์. ตามลำดับ

1.2 กำหนดปริมาณวัสดุเชื่อมประสานคงที่ ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ แล้วแทนค่าส่วนผสม
เฉพาะมวลรวมละเอียด ด้วยซีเมนต์กรันร้อยละ 4, 8, 12, 16 และ 20 ของน้ำหนักรวม ตามลำดับ
ดังตารางผนวกที่ 63 และภาพผนวกที่ 2 เลือกค่าร้อยละที่ซีเมนต์กรัน ที่ให้ค่าเสถียรภาพสูงสุด
คือ 3690 ปอนด์

1.3 กำหนดอัตราส่วนผสมจากข้อ 1.2 ที่ได้ค่าเสถียรภาพสูงสุด เมื่อผสมกับจีตะกรัน ด้วยการแทนที่ มวลรวมละเอียดคือ 8 เปอร์เซ็นต์ นำไปออกแบบส่วนผสมมาร์แชลล์ใหม่ ดังตารางผนวกที่ 64 และภาพผนวกที่ 3 เมื่อพิจารณาช่องว่างโพรงอากาศที่ 4 เปอร์เซ็นต์ อ่านกราฟปริมาณวัสดุเชื่อมประสานได้ 4.95 เปอร์เซ็นต์ นำค่าที่อ่านได้นี้ไปอ่านค่าความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์ช่องว่างบิทูเมน เปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างมวลรวม ค่าการไหล และค่าเสถียรภาพได้ 2.475 กรัม/มิลลิลิตร, 73.05 เปอร์เซ็นต์, 14.68 เปอร์เซ็นต์, 12.32/100 นิ้ว และ 3653 ปอนด์ ตามลำดับ

1.4 ค่าดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีต เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าต้านทาน การหลุดลอกของแอสฟัลต์คอนกรีต จากก้อนตัวอย่างที่ใช้มวลรวมประเภทหินปูน และใช้จีตะกรัน ด้วยการแทนที่มวลรวมละเอียดที่ระดับ 8 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางผนวกที่ 65 และ 66 ตามลำดับ มีค่าดัชนีความแข็งแรงร้อยละ 75.9 และ 76.6 ตามลำดับ ซึ่งข้อกำหนดให้ค่าดัชนีความแข็งแรงของ แอสฟัลต์ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 แสดงว่า จีตะกรันเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาผสม แอสฟัลต์คอนกรีต ร่วมกับ มวลรวมประเภทหินปูน โดยทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์ คอนกรีต เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (0.93เปอร์เซ็นต์)

2. ผลการทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลล์สำหรับหินแกรนิต

2.1 การทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลล์สำหรับหินแกรนิต ตารางผนวกที่ 67 และ ภาพผนวกที่ 4 เมื่อพิจารณาที่ช่องว่างโพรงอากาศที่ 4 เปอร์เซ็นต์ อ่านกราฟปริมาณวัสดุเชื่อม ประสานได้ 5.03เปอร์เซ็นต์ นำค่าที่อ่านได้นี้ไปอ่านค่าความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์ช่องว่างบิทูเมน เปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างมวลรวม ค่าการไหลและค่าเสถียรภาพได้ค่า 2.378กรัม/มิลลิลิตร, 72.65 เปอร์เซ็นต์, 14.57 เปอร์เซ็นต์, 12.10/100 นิ้วและ 2720 ปอนด์. ตามลำดับ

2.2 กำหนดปริมาณวัสดุเชื่อมประสานคงที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ แล้วแทนค่า ส่วนผสมเฉพาะ มวลรวมละเอียด ด้วยจีตะกรันร้อยละ 4, 8, 12, 16 และ 20 ของน้ำหนักรวม ตามลำดับ ดังตารางผนวกที่ 68 และภาพผนวกที่ 5 เลือกค่าร้อยละที่จีตะกรันที่ให้ค่าเสถียรภาพ สูงสุดคือ 3380 ปอนด์

2.3 กำหนดอัตราส่วนผสมจากข้อ 2.2 ที่ได้ค่าเสถียรภาพสูงสุด เมื่อผสมกับขี้ตะกรัน ด้วยการแทนที่มวลรวมละเอียดคือ 8 เปอร์เซ็นต์ นำไปออกแบบส่วนผสมมาร์แชลล์ใหม่ ดังตารางผนวกที่ 69 และภาพผนวกที่ 6 เมื่อพิจารณาช่องว่างโพรงอากาศที่ 4 เปอร์เซ็นต์ อ่านกราฟปริมาณวัสดุเชื่อมประสานได้ 4.97 เปอร์เซ็นต์ นำค่าที่อ่านได้นี้ไปอ่านค่าความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์ช่องว่างบิทูเมน เปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างมวลรวม ค่าการไหล และค่าเสถียรภาพได้ 2.384 กรัม/มิลลิลิตร, 72.20 เปอร์เซ็นต์, 14.39 เปอร์เซ็นต์, 11.31/100 นิ้ว และ 3375 ปอนด์ ตามลำดับ

2.4 ค่าดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าต้านทานการหลุดลอกของแอสฟัลต์คอนกรีต จากก้อนตัวอย่างที่ใช้มวลรวมประเภทหินแกรนิต และที่ใช้ขี้ตะกรัน ด้วยการแทนที่มวลรวมละเอียดที่ 8 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางผนวกที่ 70 และ 71 ตามลำดับ มีค่าร้อยละ 78.9 และ 81.5 ตามลำดับ ซึ่งข้อกำหนดให้ค่าดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 แสดงว่า ขี้ตะกรันเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาผสมแอสฟัลต์คอนกรีตร่วมกับมวลรวมประเภทหินแกรนิต โดยทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีต เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (3.29 เปอร์เซ็นต์)

3. การทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลล์สำหรับหินบะซอลต์

3.1 การทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลล์สำหรับหินบะซอลต์ ตารางผนวกที่ 72 และภาพผนวกที่ 7 เมื่อพิจารณาที่ช่องว่างโพรงอากาศที่ 4 เปอร์เซ็นต์ อ่านกราฟปริมาณวัสดุเชื่อมประสานได้ 5.61 เปอร์เซ็นต์ นำค่าที่อ่านได้นี้ไปอ่านค่าความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์ช่องว่างบิทูเมน เปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างมวลรวม ค่าการไหลและค่าเสถียรภาพได้ค่า 2.474 กรัม/มิลลิลิตร, 74.88 เปอร์เซ็นต์, 15.85 เปอร์เซ็นต์, 11.53/100 นิ้ว และ 2288 ปอนด์ ตามลำดับ

3.2 กำหนดปริมาณวัสดุเชื่อมประสานคงที่ ที่ 5.5 เปอร์เซ็นต์ แล้วแทนค่าส่วนผสมเฉพาะมวลรวมละเอียด ด้วยขี้ตะกรันร้อยละ 4, 8, 12, 16 และ 20 ของน้ำหนักรวม ตามลำดับ ดังตารางผนวกที่ 73 และภาพผนวกที่ 8 เลือกค่าร้อยละที่ขี้ตะกรัน ที่ให้ค่าเสถียรภาพสูงสุดคือ 3530 ปอนด์

3.3 กำหนดอัตราส่วนผสมจากข้อ 3.2 ที่ได้ค่าเสถียรภาพสูงสุด เมื่อผสมกับจีตะกรัน ด้วยการแทนที่มวลรวมละเอียดคือ 8 เปอร์เซ็นต์ นำไปออกแบบส่วนผสมมาร์แชลล์ใหม่ ดังตารางผนวกที่ 74 และภาพผนวกที่ 9 เมื่อพิจารณาช่องว่างโพรงอากาศที่ 4 เปอร์เซ็นต์ อ่านกราฟปริมาณวัสดุเชื่อมประสานได้ 5.26 เปอร์เซ็นต์ นำค่าที่อ่านได้นี้ไปอ่านค่าความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์ช่องว่างบิทูเมน เปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างมวลรวม ค่าการไหล และค่าเสถียรภาพได้ 2.484 กรัม/มิลลิลิตร, 73.50 เปอร์เซ็นต์, 15.10 เปอร์เซ็นต์, 11.50/100 นิ้ว และ 3177 ปอนด์ ตามลำดับ

3.4 ค่าดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าต้านทานการหลุดลอกของแอสฟัลต์คอนกรีต จากก้อนตัวอย่างที่ใช้มวลรวมประเภทหินบะซอลท์ และที่จีตะกรัน ด้วยการแทนที่มวลรวมละเอียดที่ 8 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางผนวกที่ 75 และ 76 ตามลำดับ มีค่าร้อยละ 77.1 และ 78.3 ตามลำดับ ซึ่งข้อกำหนดให้ค่าดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 แสดงว่า จีตะกรันเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ร่วมกับ มวลรวมประเภทหินบะซอลท์ โดยทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีต เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (1.60 เปอร์เซ็นต์)

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตของหินปูน หินแกรนิต หินบะซอลท์ และจีตะกรัน แทนที่มวลรวมละเอียดระดับ 8 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวม

ระดับทดแทนหิน ด้วยจีตะกรัน (%)	หินปูน			หินแกรนิต			หินบะซอลท์		
	0 %	8 %	ผล, %	0 %	8 %	ผล, %	0 %	8 %	ผล, %
Ac by Wt. of Agg, %	5.13	4.95	ลดลง 2.94	5.03	4.97	ลดลง 1.19	5.61	5.26	ลดลง 6.23
Density, gm./ml	2.472	2.475	เพิ่ม 0.12	2.378	2.384	เพิ่ม 0.25	2.474	2.484	เพิ่ม 0.40
VFB , %	73.97	73.05	ลดลง 1.24	72.65	72.20	ลดลง 0.62	74.88	73.50	ลดลง 1.84
VMA , %	15.20	14.68	ลดลง 3.42	14.57	14.39	ลดลง 1.23	15.85	15.10	ลดลง 4.73

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ระดับทดแทนหิน ด้วยซีตะกรัน (%)	หินปูน			หินแกรนิต			หินบะซอลท์		
	0 %	8 %	ผล, %	0 %	8 %	ผล, %	0 %	8 %	ผล, %
Flow , 1/100 inch	12.20	12.32	เพิ่ม 0.98	12.10	11.31	ลดลง 6.53	11.53	11.50	ลดลง 0.26
Stability , lbs	2482	3653	เพิ่ม 47.18	2720	3375	เพิ่ม 24.08	2288	3177	เพิ่ม 38.85
Strength index , %	75.9	76.6	เพิ่ม 0.93	78.9	81.5	เพิ่ม 3.29	77.1	78.3	เพิ่ม 1.60

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทางด้านราคา

การเปรียบเทียบทางด้านราคาระหว่างมวลรวมชนิดหินปูนกับซีตะกรัน โดยกำหนดให้ใช้สร้างถนนลาดยาง ผิวทาง 2 ช่องจราจร กว้างช่องละ 3.50 เมตร และไหล่ทางข้างละ 2 เมตร ความหนาผิวทาง 0.10 เมตร เป็นระยะทางรวม 10 กิโลเมตร ซีตะกรันจากแหล่งวัตถุดิบ ณ จังหวัดสมุทรปราการ ขนส่งไปยังโรงโม่หินเพื่อบดย่อยที่จังหวัดสระบุรี โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้

1. ราคาวัสดุและค่าขนส่ง ณ. โรงโม่หินที่ จ.สระบุรี
2. จำเป็นต้องขนส่งซีตะกรันไป จ. สระบุรี เพื่อบดย่อย ระยะทางไป - กลับ 250 กิโลเมตร
3. ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับล้างซีตะกรัน บริเวณโรงโม่หิน
4. ค่าบดย่อยเป็นไปตามสัดส่วนของค่า Los Angeles Abrasion
5. ไม่มีค่าใช้จ่ายสำหรับ ซีตะกรันและค่าตัดจากโรงหล่อเหล็ก

ก. หาน้ำหนักขี้ตะกรันที่ใช้

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณหินปูนที่ใช้} &= 11 \times 10 \times 1000 \times 0.10 = 11,000 \text{ ลบ.ม.} \\
 \text{ความถ่วงจำเพาะหินปูน (จากตารางผนวกที่ 62)} &= 2.773 \\
 \text{น้ำหนักหินปูน} &= 11,000 / 2.773 = 3,967 \text{ ตัน} \\
 \text{อัตราการใช้ขี้ตะกรันทดแทนหินปูนระดับ 8% ให้ผลดีที่สุด} \\
 \text{ดังนั้น น้ำหนักขี้ตะกรันที่ใช้} &= 8\% \times \text{น้ำหนักหินปูน} \\
 &= 3967 \times 0.08 = 318 \text{ ตัน}
 \end{aligned}$$

ข. ค่าใช้จ่ายสำหรับขี้ตะกรัน

1. ค่าล้างขี้ตะกรัน

ปัจจุบันมีวิธีล้างทำความสะอาดด้วยเครื่อง 2 ชนิด คือ

- 1) เครื่องล้างขี้ตะกรัน ซึ่งสร้างขึ้นเฉพาะราคา 40,000 – 50,000 บาท
 - 2) คัดแปลงเครื่องล้างทราย ราคาประมาณ 20,000 บาท
- เลือกกรณี คัดแปลงเครื่องล้างทราย

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าใช้จ่ายในการใช้เครื่องคัดต้น} &= \text{ราคาเครื่องล้างทราย} / \text{น้ำหนักขี้ตะกรันที่ใช้} \\
 &= 20,000 / 318 \text{ บาท/ตัน} \\
 &= 63 \text{ บาท/ตัน}
 \end{aligned}$$

2. ค่าขนส่ง

- ค่าเช่ารถ 10 ล้อ = 2,000 บาท/วัน (ขนส่งวันละ 2 เที่ยว)

- ค่าเชื้อเพลิง 3 ก.ม./ลิตร (ณ. ราคา 25 บาท / ลิตร)

รถ 10 ล้อ สามารถขนส่งได้ 15 ตัน/เที่ยว

$$\text{ค่าเช่ารถ} = 2,000 \text{ บาท/วัน}$$

$$\text{ค่าเชื้อเพลิง } 250 \times 2 \times (25 / 3) = 4,166 \text{ บาท/วัน}$$

$$\text{ค่าใช้จ่ายรวม} = 6,166 \text{ บาท/วัน}$$

$$\text{ค่าใช้จ่ายสำหรับค่าขนส่ง} = \text{ค่าใช้จ่ายรวม} / \text{น้ำหนักขี้ตะกรันที่ขนส่ง}$$

$$\text{ส่งได้ต่อวัน} = 6,166 / (15 \times 2) = 205 \text{ บาท/ตัน}$$

3. ค่าบดย่อย

เนื่องจากไม่เคยมีการบดย่อยจีตะกฐันมาก่อน จึงใช้เปรียบเทียบราคา โดยอาศัยค่า

Los Angeles Abrasion เป็นข้อมูล

เมื่อ ค่า Los Angeles Abrasion ของจีตะกฐัน (ตามตารางผนวกที่ 1) = 57.10%

เมื่อค่า Los Angeles Abrasion ของหินปูน (ตามตารางผนวกที่ 13) = 31.7%

จากข้อมูลโรงโม่ ค่าบดย่อยหิน = 70 บาท/ตัน

ค่าใช้จ่ายค่าบดย่อยจีตะกฐัน = $70 \times (31.70 / 57.1)$ = 39 บาท/ตัน

ตารางที่ 8 สรุปค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบทางด้านราคา

รายการ	ค่าล้าง	ค่าขนส่ง	ค่าระเบิด	ค่าบดย่อย	ค่าดำเนินการ	รวม
หินปูน	-	-	30	70	10	110
จีตะกฐัน	63	205	-	39	10	317

สรุปค่าใช้จ่ายทางด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมวิเคราะห์ ให้เห็นว่าการนำจีตะกฐันมาเป็นมวลรวมละเอียด มีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก เพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งเป็นระยะทางที่ไกลและค่าล้างทำความสะอาด ในอัตราส่วน $317/110=2.80$ เท่า

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

ผลการทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ ที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ใช้มวลรวม 3 ชนิด ได้แก่ หินปูน หินแกรนิต และหินบะซอลท์ เมื่อนำจีตะกรัน แทนที่มวลรวมละเอียด ปริมาณ 4, 8, 12, 16, และ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวมทั้งหมด เมื่อพิจารณาค่าช่องว่างโพรงอากาศที่ 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่ากลาง (ตามมาตรฐาน 3 – 5 %) พบว่าการใช้จีตะกรัน แทนที่มวลรวมละเอียดที่ระดับ 8 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวมของมวลรวมทั้งหมด ให้ผลดีที่สุด ในหินทั้ง 3 ชนิด คือ ทำให้ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ปริมาณลดลงเล็กน้อย ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ช่องว่างบิทูเมนลดลง โพรงระหว่างมวลรวมลดลง ค่าดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์เพิ่มขึ้น ค่าการไหลอยู่ในข้อกำหนด ซึ่งคุณสมบัติทุกรายการอยู่ในข้อกำหนดของผิวทางทั้งสิ้น นอกจากนี้พบว่า ยังได้ค่าเสถียรภาพสูงกว่าการใช้หินล้วนอย่างชัดเจน โดยสูงกว่าหินปูน หินแกรนิตและหินบะซอลท์เท่ากับ 47.18 , 24.08 และ 38.85 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สรุป จีตะกรันเป็นวัสดุที่สามารถนำไปใช้งานได้ สามารถเพิ่มเสถียรภาพของผิวทางชนิดแอสฟัลต์คอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยให้ผิวดนเกิดร่องล้อหรือเปลี่ยนรูปร่างลดลง เมื่อใช้ทดแทนมวลรวมละเอียดที่ระดับ 8 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรวมของมวลรวมทั้งหมด

ข้อเสนอแนะ

1. ผลที่ได้จากการทดสอบเป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ และอยู่ภายในขอบเขตของวิทยานิพนธ์เท่านั้น ก่อนที่จะนำไปใช้งานก่อสร้างผิวทางจริง ควรทำการศึกษาและทดสอบด้านพฤติกรรมอื่น ๆ ให้กว้างขวางเพิ่มมากขึ้น
2. ส่วนผสมของจีตะกรันและมวลรวมของหินชนิดต่าง ๆ ที่นำมาใช้ต้องขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของมวลรวมนั้นด้วย การเปลี่ยนแปลงแหล่งมวลรวมจำเป็นต้องออกแบบหาสัดส่วน และปริมาณของจีตะกรันที่เหมาะสมด้วยเสมอ

3. ภายใต้ขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้ เมื่อนำจีตะกรัน ทดแทนมวลรวมละเอียด ที่ค่าความแตกต่างช่วงละ 4 เปอร์เซนต์ ที่ค่า 8 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมด จะได้ค่าเสถียรภาพสูงสุด แต่ในทางปฏิบัติอาจกำหนดช่วงค่าความแตกต่างให้มีความแคบขึ้นอีก โดยอาศัยประโยชน์จากค่าเปอร์เซนต์ที่เหมาะสมที่สุดจาก
4. ในทางปฏิบัติความสะอาดของมีความสำคัญมาก จึงจำเป็นต้องล้างให้สะอาดเนื่องจาก มีความสกปรก เพราะขณะที่โรงงานหลอมเหล็กหล่อเทจีตะกรันระหว่างกระบวนการหลอมเหล็กทิ้ง จะถูกปะปนกับทราย ดิน โดยเฉพาะถ่านโค้กที่ต้องล้างออกด้วยการร่อนในน้ำ
5. การนำไปใช้ในทางปฏิบัติการมีการพิจารณา ถึงค่าใช้จ่ายตั้งแต่การรวบรวม จีตะกรัน การล้างทำความสะอาด การบดให้มีความละเอียด การลำเลียงขนส่ง นำมาพิจารณา ประกอบด้วย
6. เพื่อการศึกษาครอบคลุม ควรทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยการนำจีตะกรัน มาทดแทน มวลรวมหยาบ (ยูนิตอื่น 2, 3, 4)
7. ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมทางด้านมลภาวะและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากจีตะกรันเป็นกากอุตสาหกรรม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ��ชวาล เศรษฐบุตร. 2541. คู่มือทดสอบหิน ทราญและคอนกรีต. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุ, กรุงเทพฯ.
- ��ชชาญ วรณัศน์. 2530. ��้ถ้ำลอยสำหรับเป็นวัสดุอัดแทรกในคอนกรีตแอสฟัลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ณรงค์ ภูหลาบ. 2529. แอสฟัลต์เทคโนโลยี. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- นิรชร นกแก้ว. 2539. การศึกษาการใช้ถ้ำหนักลิไนต์แทนมวลรวมละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ประยูร เตะะจินดา. 2527. การใช้เม็ดดินเผาเป็นวัสดุมวลรวมในงานผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีชา ไกรศิริเดช. 2521. การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเม็ดดินผสมทรายเผา หินปูนเผา ถ้ำว ตะกรันเตาถลุง และตะกรันเตาหลอม เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุผิวทาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยะ ปิยศิริติกุล. 2521. การศึกษาถึงเสถียรภาพของวัสดุผสมทรายกับยางมะตอยโดยวิธีของ มาร์แชล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วัชรินทร์ วิทยกุล. 2528. แอสฟัลต์เทคโนโลยีและการปฏิบัติงานก่อสร้าง เล่มที่1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- _____. 2529. คู่มือปฏิบัติการวัสดุแอสฟัลต์และแอสฟัลต์ติกคอนกรีต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วัชรินทร์ วิทยกุล. 2537. วัสดุการทาง. ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2544. การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน. วิสิมาร์เชลล์มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศรัญญา เดชะพรหมพันธ์. 2544. การศึกษาการนำตะกั่วแทนเตาหลอมมาทดแทนวัสดุมวลรวม ของ
ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมพงษ์ ชีไรสง. 2542. การศึกษาปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสม
เพิ่มในแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด Pen 60/70 และใช้เถ้าลอยลิกไนต์แทนมวลรวมละเอียดใน
แอสฟัลต์คอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมศักดิ์ จีระวุฒิโรจน์. 2537. การนำความร้อนทั้งของเตาผิวโปล่ากลับมาใช้ใหม่.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สำนักงานวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง. 2542. การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และวิจัย ประจำปี
งบประมาณ 2542. บทความทางวิชาการ สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง,
กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง. 2543. มาตรฐานวิธีการทดลอง. กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

สิทธิศักดิ์ อัสวพรหมธาดา และ สมักร สันทอง. 2545. ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนโดยใช้
ตะกั่วหลักเป็นวัสดุมวลรวม. บทความทางวิชาการ ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง,
กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

_____. ม.ป.ป. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแอสฟัลต์คอนกรีตและตัวอย่างการออกแบบผิวทาง
แอสฟัลต์คอนกรีต. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

เอนก เปียลัดดา. 2530. เสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้ยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ 60/70 และ 80/100. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

American Association of State Highway and Transportation Officials. 1978. **Standard Specification for Transportation Materials and Method of Sampling and Testing.** Part II. The American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C., U.S.A.

American Society for Testing and Material. 1986. **Annual Book of ASTM Standard.** Vol.o4.03. American Society for Testing and Materials, Easton, Maryland, U.S.A.

Hosking, R. 1992. **Road Aggregate and Skidding.** HMSO., London.

Hunter, R. N. 1995. **Bituminous Mixtures in road Construction.** Thomas Telford Services Ltd., New York.

Khatri, M.A., D.F. Martinez., F.M. Bayomy. and W.T. Tang. 1993. **Performance Evaluation of Asphalt Mixtures with Gasified Slah as Fine Aggregate. in Waller, H.F. Used of Waste Materials in Hot-Mix Asphalt.** ASTM., Philadellpia.

Meininger, R.C. 1992. **Effects of Aggregate and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance.** ASTM., Philadelphia.

Stapler, W.T., J.S. Stone. and H.D. Chose. 1970. **A Skid Resistance Study of Georgia Pavements.** Department Research, GHD Research Project No. 6201, Georgia.

Willam, A. and P.E. Snylvies. 1972. Use of Material Filler to Improve Poor Aggregate for Plantmix Pavement. Idaho Department of Highways. Boise, Idaho.