



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมในชั้นผิวทาง
แอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการบดทับ

A Study of Effects from Degradation of Aggregate in Asphalt Concrete Pavement
due to Compaction

นามผู้วิจัย นายชนคม บุญรอด

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทย์กุล, M.Eng.)

กรรมการ

(อาจารย์สมักร สันทอง, M.Eng.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์สันติ ชินานูวัฒน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วรากร ไม้เรียง, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อัจจงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ๒๒ เดือน มิถุนายน พ.ศ. ๒๕๔๙

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต
เนื่องจากการบดทับ

A Study of Effects from Degradation of Aggregate in Asphalt Concrete Pavement
due to Compaction

โดย

นายธนกม บุญรอด

เสนอ

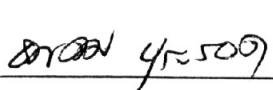
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
พ.ศ. 2549

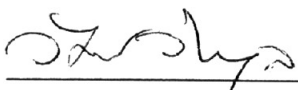
ISBN 974 – 16 – 2639 – 8

ชนคม บุญรอด 2549: การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวม
ในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการบดทับ ปรินญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
ประธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทยกุล, M.Eng. 198 หน้า
ISBN 974 - 16 - 2639 - 8

ศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมในชั้นผิวทางแอสฟัลต์
คอนกรีตเนื่องจากการบดทับ ซึ่งใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 เป็นตัวเชื่อมประสานและใช้หิน
ปูน หินแกรนิตและมวลรวมสแตกเป็นมวลรวม การเปรียบเทียบผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ
เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการบดทับด้วยวิธีมาร์แชลล์โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ 75 ครั้งต่อด้าน
และการบดทับด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 สำหรับช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเปรียบเทียบ
ผลการทดลองในพื้นที่ก่อสร้างเป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวม
เนื่องจากการบดทับด้วยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างที่เปอร์เซ็นต์ความแน่นของการบดทับ
เป็น 98, 97 และ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง และศึกษาผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติ
ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจากการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมเนื่องจากการ
บดทับ

จากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์
คอนกรีตเนื่องจากการบดทับของทั้งสามวิธีมีการเปลี่ยนแปลงขนาดคละในแต่ละช่องลอดโดย
มวลรวมผ่านช่องลอดมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธีการบดทับพบว่า การบดทับโดยมาร์แชลล์
แฮมเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงขนาดคละแต่ละช่องลอดมากที่สุด รองลงมาการบดทับโดยเครื่องบด
ทับแบบโรตารีและการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบ
ระหว่างชนิดของวัสดุมวลรวมพบว่ามวลรวมหินปูนมีการเปลี่ยนแปลงขนาดคละมากที่สุดรองลง
มาคือมวลรวมหินแกรนิตและมวลรวมสแตกตามลำดับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของ
มวลรวมเนื่องจากการบดทับยังคงได้ขนาดคละหลังการบดทับอยู่ในขอบเขตและข้อกำหนด
จึงไม่มีผลกระทบต่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์และคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต


ลายมือชื่อนิติ


ลายมือชื่อประธานกรรมการ

15, 5.4, 49

Thanakom Boonrord 2006: A Study of Effects from Degradation of Aggregate in Asphalt Concrete Pavement due to Compaction. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Watcharin Witayakul, M. Eng. 198 pages. ISBN 974 – 16 – 2639 – 8

Study the effect from degradation of aggregate in asphalt concrete pavement due to compaction. Which, use asphalts grade 60/70 were cement and use the limestone, granite and slag were aggregates. Experiment comparison in a laboratory was the comparison between compaction with the marshall method by the marshall hammer come to 75 blows per side and compaction with superpave level 1 for 4 percent air voids. In the field construction were comparison degradation of aggregate due to compaction with the roller in the field construction as percent density of compaction were 98, 97 and 96 percents of density in the laboratory. And study the effect that have to the property of asphalt concrete mixed because of degradation of aggregate due to compaction

From, the study meets the degradation of aggregate in asphalt concrete pavement due to compaction of three methods have degradation in each sieve by the aggregate pass more and more. When, compare with compaction method meet that the compaction by the marshall hammer has degradation each sieve to the most. Next, the compaction by the gyratory compactor and the compaction by the roller in the field construction respectively. When, compare with a kind of aggregate meets that the limestone has degradation most. Next, the granite and the slag aggregate respectively. Because of, degradation of aggregate due to compaction still get gradation after compaction stay within limits and the regulation then have no affect the asphalt cement content and the property of concrete asphalt.

Thanakom Boonrord

Student's signature

Watcharin Witayakul

Thesis Advisor's signature

15 Aug 106

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทยกุล ประธานกรรมการ อาจารย์สมักร สันทอง กรรมการสาขาวิชาเอก รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ชินานุวัณวิวงศ์ กรรมการสาขาวิชา รองศาสตราจารย์ สันติ อัสวศรีพงษ์ศรีและอาจารย์ ดร. ชูเกียรติ การะเกตุ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย และนายปกรณ์ มลิณะเลข ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบโดยเฉพาะคุณเอกกมลศักดิ์ พรหมมี, คุณพรมมา เทพศรีหา, คุณเผด็จชัย จันทร์กระจ่าง, คุณจรรยา ชัยสายัณห์, คุณวีระศักดิ์ พรหมถาวร, คุณชัยวัฒน์ ศรีดี, คุณนพรัตน์ ขาวเงิน, คุณนาวัน กล่อมมณี และคุณดวงตา พันธุ์แดง ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักวิจัยและพัฒนาทางโดยเฉพาะ ดร. อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช, คุณพรชัย ศิลารมย์, คุณณัฐสิทธิ์ น้าเนือย และขอขอบคุณ คุณสมเดช ศรีพิมายในนามบริษัท Slurry Seal จำกัด คุณสันชัย เจริญพวงและคุณเจริญ สุปัด ในนามบริษัท อุบลสหธรรมขนส่ง (1983) จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้ และขออภัยบุคคลท่านอื่นที่ไม่ได้เอ่ยนาม

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่อุปการะเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และส่งเสริมให้ร่ำเรียนจนประสบความสำเร็จได้มาจนถึงทุกวันนี้ อีกทั้งขอบใจภรรยาและบุตรที่คอยเป็นขวัญกำลังใจให้ผู้เขียนมีความมุ่งมั่นจนประสบความสำเร็จ และขอขอบคุณ คุณธาริ ทฤษณนัม ผู้เป็นแบบอย่างให้กับผู้เขียน

ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะพึงมีเพียงใด ขอมอบแด่ บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่าน

ธนคม บุญรอด
พฤษภาคม 2549

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
ขอบเขตการวิจัย	4
การตรวจเอกสาร	5
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
การศึกษาในอดีตที่เกี่ยวข้อง	34
อุปกรณ์และวิธีการ	38
อุปกรณ์	38
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	67
สรุป	101
ปัญหาและจุดอ่อน	102
ข้อเสนอแนะ	102
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	104
ภาคผนวก	107

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ตัวปรับแก้ค่าเสถียรภาพจากขนาดก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตแบบมาร์แชลล์	12
2 ความเร็วของรถบดในการบดทับ	23
3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความถี่ และจำนวนครั้งการกระแทก	23
4 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของตะกรันเตาหลอม	32
5 การเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ด้วยจำนวนครั้งของการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน	77
6 การเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมหินแกรนิตเนื่องจากการบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ด้วยจำนวนครั้งของการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน	79
7 การเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมสแลกเนื่องจากการบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ด้วยจำนวนครั้งของการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน	81
8 การเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ	83
9 การเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมหินแกรนิตเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ	85
10 การเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมสแลกเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ	87
11 การเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับ ในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	89
12 การเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	91
13 การเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	93
14 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดผลระหว่างมวลรวมหินปูน มวลรวมหินแกรนิต และมวลรวมสแลก เนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์จำนวน 75 ครั้งต่อด้าน	95
15 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดผลระหว่างมวลรวมหินปูน มวลรวมหินแกรนิต และมวลรวมสแลก เนื่องจากการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี สำหรับช่องว่าง 4 เปอร์เซ็นต์	97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
16 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมหินปูน เนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง สำหรับความแน่นของการบดทับเป็น 98, 97 และ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	99
ตารางผนวกที่	
1 ข้อกำหนดของมวลรวม	108
2 ขนาดคละของมวลรวมและปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน	109
3 ขนาดคละของวัสดุอัดแทรก	110
4 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์	110
5 ข้อกำหนดคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์	111
6 ผลการหาขนาดคละรวมของมวลรวมหินปูนสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์	112
7 ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมหินปูนสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์	114
8 การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม	115
9 ผลการทดสอบหา Strength Index ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม	119
10 สูตรส่วนผสมใช้งาน ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม	120
11 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนก่อนบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์	121
12 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์	122
13 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์	123
14 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์	124

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
15 การทดลองหาจำนวนรอบในการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยวิธีชูเปอร์เพฟเพื่อให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์	125
16 อัตราส่วนขนาดกละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนก่อนบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ	129
17 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ	130
18 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ	131
19 อัตราส่วนขนาดกละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนหลังบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ	132
20 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมก่อนบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	133
21 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมก่อนบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	136
22 อัตราส่วนขนาดกละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนก่อนบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	137
23 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	138
24 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	140
25 อัตราส่วนขนาดกละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนหลังบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	141
26 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมก่อนบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	142

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
27 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม ก่อนบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ ของความแน่นในห้องทดลอง	144
28 อัตราส่วนขนาดกละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนก่อนบดทับโดยเครื่องจักร บดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	145
29 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับโดย เครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	146
30 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม หลังบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ ของความแน่นในห้องทดลอง	148
31 อัตราส่วนขนาดกละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนหลังบดทับโดยเครื่องจักร บดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	149
32 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมก่อนบดทับโดย เครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	150
33 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม ก่อนบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ ของความแน่นในห้องทดลอง	153
34 อัตราส่วนขนาดกละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนก่อนบดทับโดยเครื่องจักร บดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	154
35 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับโดย เครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	155
36 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม หลังบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ ของความแน่นในห้องทดลอง	157
37 อัตราส่วนขนาดกละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนหลังบดทับโดยเครื่องจักร บดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	158

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
38 ผลการหาขนาดคละรวมของมวลรวมหินแกรนิตสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์	159
39 ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมหินแกรนิตสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์	161
40 การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวม	162
41 ผลการทดสอบหา Strength Index ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวม	166
42 สูตรส่วนผสมใช้งาน ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวม	167
43 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิตก่อนบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์	168
44 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์	169
45 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์	170
46 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิตหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์	171
47 การทดลองหาจำนวนรอบในการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ เพื่อให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมมีช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์	172
48 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิตก่อนบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ	175
49 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ	176
50 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ	177
51 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิตหลังบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ	178

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
52 ผลการหาขนาดคละรวมของมวลรวมสแลกสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์	179
53 ผลการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมสแลกสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์	181
54 การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ที่ใช้สแลกเป็นมวลรวม	182
55 ผลการทดสอบหา Strength Index ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สแลกเป็นมวลรวม	186
56 สูตรส่วนผสมใช้งาน ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สแลกเป็นมวลรวม	187
57 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมสแลกก่อนบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์	188
58 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สแลกเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์	189
59 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สแลกเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์	190
60 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมสแลกหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์	191
61 การทดลองหาจำนวนรอบในการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ เพื่อให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สแลกเป็นมวลรวมมีช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์	192
62 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมสแลกก่อนบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ	195
63 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สแลกเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ	196
64 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สแลกเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ	197
65 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมสแลกหลังบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ	198

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ	27
2 แสดงกลไกการทำงานและขนาดข้อกำหนดต่างๆที่ใช้กับ เครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ	27
3 อุปกรณ์บดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์	44
4 อุปกรณ์บดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ	45
5 เครื่องจักรบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในพื้นที่ก่อสร้าง	45
6 อุปกรณ์การสกัดแอสฟัลต์คอนกรีต (Centrifugal)	46
7 อุปกรณ์หาขนาดเม็ดของวัสดุมวลรวม	46
8 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของตัวอย่างมวลรวมหินปูน เนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ด้วยการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน	78
9 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิต เนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ด้วยการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน	80
10 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของตัวอย่างมวลรวมสแลก เนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ด้วยการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน	82
11 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของตัวอย่างมวลรวมหินปูน เนื่องจากการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ	84
12 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิต เนื่องจากการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ	86
13 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของตัวอย่างมวลรวมสแลก เนื่องจากการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ	88
14 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของตัวอย่างมวลรวมหินปูน เนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง ด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
15 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของตัวอย่างมวลรวมหินปูน เนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง ด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	92
16 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของตัวอย่างมวลรวมหินปูน เนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง ด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	94
17 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละเนื่องจากการบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์จำนวน 75 ครั้งต่อต้าน ระหว่างมวลรวมหินปูน มวลรวมหินแกรนิต และมวลรวมสแลก	96
18 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี สำหรับช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์ระหว่าง มวลรวมหินปูน มวลรวมหินแกรนิตและมวลรวมสแลก	98
19 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมหินปูน เนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง สำหรับความแน่น ของการบดทับเป็น 98, 97 และ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง	100
ภาพผนวกที่	
1 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนขนาดคละของมวลรวมหินปูนสำหรับออกแบบ แอสฟัลต์คอนกรีต	113
2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์การออกแบบด้วยวิธีมาร์แชลล์ระหว่างคุณสมบัติของ แอสฟัลต์คอนกรีตกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 โดยใช้มวลรวมหินปูน	118
3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศกับจำนวนรอบของการบดทับ มวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับด้วยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี	128
4 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนขนาดคละของมวลรวมหินแกรนิตสำหรับออกแบบ แอสฟัลต์คอนกรีต	160

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์การออกแบบด้วยวิธีมาร์แชลล์ระหว่างคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 โดยใช้มวลรวมหินแกรนิต	165
6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศกับจำนวนรอบของการบดทับมวลรวมหินแกรนิตเนื่องจากการบดทับด้วยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี	174
7 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนขนาดกละ (%) ของมวลรวมแกรนิตสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต	180
8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์การออกแบบด้วยวิธีมาร์แชลล์ระหว่างคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 โดยใช้มวลรวมสแลก	185
9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศกับจำนวนรอบของการบดทับมวลรวมสแลกเนื่องจากการบดทับด้วยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี	194

การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมในชั้นผิวทางแอสฟัลต์ คอนกรีตเนื่องจากการบดทับ

A Study of Effects from Degradation of Aggregate in Asphalt Concrete Pavement due to Compaction

คำนำ

ถนนที่ใช้งานอยู่ในประเทศไทย มากกว่าร้อยละ 80 เป็นถนนที่มีผิวทางชนิดหยุ่นตัว (Flexible Pavement) ส่วนมากผิวทางชนิดนี้จะก่อสร้างด้วยแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) ชนิดผสมร้อน (Hot-Mix) แอสฟัลต์คอนกรีตเป็นวัสดุผสม (Mixture) ระหว่างมวลรวม (Aggregate) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) โดยมีมวลรวมเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 90 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือ 75 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของวัสดุผสม

มวลรวมประกอบด้วยมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ซึ่งอาจมีหรือไม่มีวัสดุอัดแทรก (Mineral Filler) ด้วยก็ได้ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของมวลรวมคือ ขนาดผล (Gradation) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density) หรือความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึม (Absorption) ความแข็ง (Hardness) ความคงทน (Durability) รูปร่างและลักษณะผิว (Shape and Surface Texture) สารที่ไม่พึงประสงค์ (Deleterious Substance) ความแข็งแรงในการบดย่อย (Crushing Strength) และเสถียรภาพต่อสารเคมี (Chemical Stability)

ข้อกำหนดส่วนมากของถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการผสมมวลรวมกับแอสฟัลต์ ต้องมีการกระจายขนาดเม็ดของมวลรวม (Aggregate Gradation) ที่จะให้ได้ส่วนผสมที่แน่นและมีความแข็งแรง นั่นคือจะต้องให้แน่ใจว่ารูปร่างของโค้งการกระจายขนาดเม็ดของมวลรวม (Grading Curve) จะคล้ายกับกราฟแสดงความหนาแน่นสูงสุดของมวลรวมทางทฤษฎีตามสมการความหนาแน่นสูงสุดของฟูลเลอร์ (Fuller Maximum Density Grading Curve) ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดผลของมวลรวม (Gradation of Aggregate) มีความสำคัญเป็นอันมากต่อคุณภาพของถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

การทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแน่นและแข็งแรง นอกจากการคัดเลือกชนิดของมวลรวมและการกระจายขนาดเม็ดของมวลรวมแล้ว แอสฟัลต์คอนกรีตที่ดียังต้องผ่านกระบวนการในการบดทับ (Compaction) ด้วยวิธีการที่เหมาะสมอีกด้วย ซึ่งการบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นมีทั้งในขั้นตอนการออกแบบและขั้นตอนการก่อสร้าง

วิธีการบดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในขั้นตอนการออกแบบ มีด้วยกันหลายวิธีตามวิธีการออกแบบที่ใช้ เช่น การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน วิธีมาร์แชลล์ (Marshall Method) ใช้การบดทับตัวอย่างแบบตกกระทบ (Impact Compaction) การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน วิธีฮวีม (Hveem Method) ใช้การบดทับแบบการนวด (Kneading Compaction) และ การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน วิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 (Superpave Level 1) ใช้การบดทับแบบหมุนอัด (Gyratory Compaction) ส่วนวิธีการบดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในพื้นที่ก่อสร้างจะใช้เครื่องจักรบดทับ (Roller) ที่ขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง ซึ่งอาจประกอบด้วย รถบดล้อเหล็ก 2 ล้อ (Steel-Tired Tandem Roller) รถบดล้อยาง (Pneumatic-Tired Roller) และรถบดสั่นสะเทือน (Vibratory Roller) เป็นต้น

การบดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อให้แน่นและแข็งแรงนั้น ไม่ว่าจะด้วยวิธีใดก็ตามย่อมมีผลกระทบต่อมวลรวมคืออาจทำให้มวลรวมแตกและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวม (Degradation of Aggregate) ซึ่งแต่ละวิธีการบดทับจะทำให้วัสดุมวลรวมแต่ละชนิดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดผลอย่างไร และการเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลต่อคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตอย่างไร

ในการศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวม 3 ชนิด คือ หินปูน (Limestone) หินแกรนิต (Granite) และมวลรวมสแลก (Slag Aggregate) โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดผลเนื่องจากการบดทับในขั้นตอนการออกแบบและขั้นตอนก่อสร้าง ในขั้นตอนการออกแบบ เป็นการเปรียบเทียบระหว่างวิธีมาร์แชลล์ซึ่งใช้วิธีบดทับแบบตกกระทบโดยใช้มาร์แชลล์แฮมเมอร์ (Marshall Hammer) กับวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ 1 ซึ่งใช้วิธีบดทับหมุนอัด โดยใช้เครื่องบดทับแบบไจราทอรี (Gyratory Compactor) ส่วนในขั้นตอนก่อสร้างเป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมก่อนการบดทับ (Before Compaction) กับหลังการบดทับ (After Compaction) ด้วยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งจะทำการทดสอบเฉพาะมวลรวมหินปูน และ

ทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวม

วัตถุประสงค์

ในการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการบดทับ มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนและหลังการบดทับแบบตกกระทบตามวิธีการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตวิธีมาร์แชลล์โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ (Manual Hammer)
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนการบดทับและหลังการบดทับแบบหมุนอัดตามวิธีการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตวิธีชูเปอร์เพฟ ระดับ 1 โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมหินปูนในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนการบดทับและหลังการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างที่ความแน่นในการบดทับเป็น 98, 97 และ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง
4. เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์กับการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี
5. เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมหินปูนในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ กับการบดทับด้วยเครื่องจักรบดทับ (Roller) ที่ 98, 97 และ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง
6. ศึกษาถึงปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่แปรเปลี่ยนไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวม

ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการบดทับ มีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมในชั้นผิวทาง (Wearing Course)
2. วัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษาจะใช้ หินแกรนิต หินปูนและมวลรวมสแลก ซึ่งเป็นตะกรันเตาหลอม (Steel Furnace Slag) ที่มีคุณสมบัติผ่านการทดสอบตามตารางผนวกที่ 1 ข้อกำหนดของมวลรวม
3. อัตราส่วนขนาดผลของมวลรวม ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ และข้อกำหนดอื่นๆให้เป็นไปตามตารางผนวกที่ 2 ขนาดผลของมวลรวมและปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน ตารางผนวกที่ 3 ขนาดผลของวัสดุอัดแทรก และตารางผนวกที่ 4 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์
4. ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 ตามตารางผนวกที่ 5 ข้อกำหนดคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์
5. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมในพื้นที่ก่อสร้างโดยใช้มวลรวมหินปูนในส่วนผสม

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการบดทับ ประกอบด้วย

1. องค์ประกอบของแอสฟัลต์คอนกรีต

แอสฟัลต์คอนกรีต (วัชรินทร์, 2544) หมายถึง วัสดุทำผิวทางที่มีคุณภาพสูง ประกอบด้วย แอสฟัลต์ซีเมนต์ และมวลรวม ผสมกันอย่างร้อน (Hot Mix) ด้วยอุณหภูมิสูงในเครื่องผสม จากนั้นจึงนำไปปูลาดทำผิวทางของถนนในขณะที่ส่วนผสมยังร้อนอยู่ แล้วบดทับให้แน่นและเรียบเป็นถนนลาดยางที่มีผิวทางคุณภาพดี แข็งแรง สีค่อนข้างดำ รับปริมาณจราจรหนาแน่นมากๆได้

1.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์

1.1.1 ความหมาย

แอสฟัลต์ (Asphalt) (วัชรินทร์, 2543) ตามความหมายของ ASTM (The American Society for Testing and Materials) คือ วัสดุประสานสีน้ำตาลแก่ถึงสีดำ มีบิทูเมนเป็นส่วนประกอบหลัก เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือได้จากการกลั่นปิโตรเลียมดิบ

บิทูเมน ตามความหมายของ ASTM หมายถึง สารที่ประกอบด้วยโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbons) มีคุณสมบัติยึดประสาน อยู่ในสถานะของแข็ง กึ่งของแข็ง หรือเหนียวหนืด สีดำหรือค่อนข้างดำละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือได้จากการผลิต

1.1.2 คุณสมบัติของแอสฟัลต์

คุณสมบัติที่สำคัญของแอสฟัลต์ สำหรับจุดประสงค์ในงานด้านวิศวกรรมและการก่อสร้างมี 3 ประการ คือ ความขึ้นเหลว (Consistency) ความบริสุทธิ์ (Purity) และความปลอดภัย (Safety)

ก. ความขึ้นเหลว แอสฟัลต์เป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติกจะค่อยๆเหลวเมื่อได้รับความร้อน ลักษณะเฉพาะตัวโดยความขึ้นเหลวที่อุณหภูมิต่างกัน ความขึ้นเหลวใช้บ่งบอกลำดับความเหลวของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ ซึ่งระบุความขึ้นเหลวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ การระบุและการวัดค่าความขึ้นเหลวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ใช้การทดสอบหาความหนืดหรือการทดสอบค่าเพนิเทรชัน (Penetration)

ข. ความบริสุทธิ์ส่วนประกอบส่วนใหญ่ของแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นปิโตรเมน ซึ่งละลายได้ในคาร์บอนไดซัลไฟด์ แอสฟัลต์จากการกลั่นประกอบด้วยปิโตรเมนบริสุทธิ์เกือบทั้งหมดและมากกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์ละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ สิ่งเจือปนที่มีอยู่เป็นพวกสารเหนียว โดยปกติแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้จากการกลั่นจะไม่มีน้ำหรือความชื้นปนอยู่ อย่างไรก็ตามในการบรรทุกขนส่งอาจมีความชื้นปะปนได้จากภาชนะที่ใช้บรรจุ ถ้าหากมีน้ำปะปนโดยพลั้งเพลอจะทำให้แอสฟัลต์เดือดเป็นฟองเมื่อได้รับความร้อนมากกว่า 100°C (212°F)

ค. ความปลอดภัย การเดือดเป็นฟองของแอสฟัลต์เป็นการเสี่ยงต่อความปลอดภัย ข้อกำหนดมักจะระบุไว้ว่าแอสฟัลต์ต้องไม่เดือดเป็นฟองเมื่อมีอุณหภูมิสูงถึง 175°C (347°F) แอสฟัลต์ซีเมนต์เมื่อได้รับความร้อนจนอุณหภูมิสูงพอ จะมีไอที่ลุกวาบได้เมื่อสัมผัสกับประกายไฟหรือเปลวไฟ แต่อุณหภูมิที่จะทำให้เกิดจุดวาบไฟนี้ มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ทั่วไปในการปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตามเพื่อความแน่ใจว่าความปลอดภัยมีพอไว้เพียงพอ จึงจำเป็นต้องทราบจุดวาบไฟของแอสฟัลต์ที่จะนำมาใช้งานด้วย

1.2 มวลรวม

มวลรวม (วัชรินทร์, 2543) เป็นอนุภาคของแร่ธาตุที่มีเม็ดหยาบ ซึ่งใช้ในการผสมกับวัสดุเชื่อมประสาน (Cementing Agent) ชนิดต่างๆเพื่อให้ได้คอนกรีต หรืออาจจะใช้มวลรวมเพียงอย่างเดียวในการทำเป็นชั้นพื้นทาง (Road Bases) หรือในการถม (Backfill) เป็นต้น คุณสมบัติที่ต้องการของมวลรวมจะขึ้นกับการใช้งานในแต่ละชนิดคุณสมบัติพื้นฐาน และการทดสอบของมวล

รวมจะมีการประยุกต์ให้เข้ากับการใช้งาน วัสดุผสมแอสฟัลต์ที่ใช้ปูลาดถนน โดยทั่วไปจะประกอบด้วยมวลรวมประมาณ 90 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือ 75 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มวลรวมมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมรรถนะของโครงสร้างถนนแบบลาดยาง เพราะเป็นส่วนสำคัญในการทำหน้าที่ยอมรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างถนน

คุณสมบัติที่สำคัญของมวลรวมมีดังนี้

1.2.1 ขนาดผลหรือการวิเคราะห์ห้านาของอนุภาค (Grain Size Analysis) เป็นวิธีที่ใช้กันมากในการทดสอบมวลรวม ข้อกำหนดส่วนมากของงานทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีการผสมมวลรวมกับแอสฟัลต์ ต้องมีการกระจายขนาดเม็ดที่จะให้ได้ส่วนผสมที่แน่น และมีความแข็งแรง นั่นคือจะต้องให้แน่ใจว่า รูปร่างของโค้งการกระจายขนาดของเม็ดมวลรวม (Curve of Aggregate Gradation) จะคล้ายกับกราฟแสดงความหนาแน่นสูงสุดของมวลรวมทางทฤษฎี ตามสมการความหนาแน่นสูงสุดของฟูลเลอร์ (Fuller Maximum Density Equation) การจัดขนาดผลของมวลรวมในการแจกแจงขนาดของอนุภาค แสดงในคำร้อยละของน้ำหนักรวมทั้งหมด การจัดขนาดผลพิจารณาได้จากการร่อนมวลรวมผ่านชุดตะแกรงขนาดต่างๆ แล้วชั่งน้ำหนักมวลรวมส่วนที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละขนาดของชุดตะแกรงนั้น

1.2.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์หรือความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของมวลรวมโดยเฉพาะในการออกแบบส่วนผสมของมวลรวมและแอสฟัลต์จะต้องวัดปริมาณที่ถูกต้องโดยใช้มวลรวมที่มีน้ำหนักตามที่กำหนด

1.2.3 ความแข็ง หรือความต้านทานต่อการสึกกร่อนเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกอันหนึ่ง มวลรวมของผิวทางจะต้องมีลักษณะที่ไม่กลม และไม่มันเงาเนื่องจากการขัดสีของการจราจร เพื่อให้มีความต้านทานต่อการสึกกร่อนได้ดี

1.2.4 ความคงทนหรือความต้านทานต่อการผุกร่อนก็เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่ง การทดสอบกระทำโดยนำตัวอย่างไปแช่ให้อิ่มตัว ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต หรือโซเดียมซัลเฟต จากนั้นนำมาอบแห้งในเตาอบ ทำซ้ำ 5 รอบ แล้วคำนวณหาส่วนที่ผุกร่อน แต่การทดสอบความคงทนนี้ไม่ค่อยเป็นที่ยอมรับ มวลรวมที่ผ่านการทดสอบแล้วบางครั้งอาจจะ

แตกได้เมื่อนำไปใช้งาน ในขณะที่มวลรวมอื่นๆ ที่ไม่ผ่านการทดสอบอาจจะเป็นที่ยอมรับในการใช้งาน

1.2.5 รูปร่างของอนุภาคและลักษณะผิว มีผลต่อความแข็งแรงของอนุภาคมวลรวม แรงยึดเหนี่ยวกับวัสดุเชื่อมประสานและความต้านทานต่อการเคลื่อนตัวของอนุภาคหนึ่งไปบนอนุภาคอื่นๆ อนุภาคที่แบน บางหรือยาว รูปร่างแบบเข็ม จะแตกได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นรูปลูกบาศก์ อนุภาคที่มีเหลี่ยมคมขรุขระจะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่ดีกับวัสดุเชื่อมประสาน มากกว่าอนุภาคของกรวดที่กลมและเรียบ

1.2.6 สารที่ไม่พึงประสงค์ เป็นสารที่เป็นอันตรายประกอบด้วยชนิดต่างๆ ของอนุภาค และสารเคลือบที่อ่อนหรือมีคุณภาพต่ำที่พบบนผิวของอนุภาคของมวลรวม สารที่ไม่พึงประสงค์รวมถึง สารเคลือบจำพวกอินทรีย์ ผุ่น อนุภาคที่ร่วนซุยให้แตกได้ง่าย อนุภาคที่ผุกร่อนในธรรมชาติอนุภาคที่อ่อนและอนุภาคที่มีน้ำหนักเบา สารเหล่านี้อาจจะมีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวของแอสฟัลต์กับมวลรวม หรืออาจจะทำให้แตกในระหว่างการผสมหรือการใช้งาน

1.2.7 ความแข็งแรงในการบดย่อย เป็นแรงอัดที่อนุภาคของมวลรวมสามารถรับได้ก่อนที่จะแตกออก ลักษณะนี้จะไม่มีความสำคัญกับการใช้มวลรวมส่วนใหญ่ เนื่องจากความแข็งแรงของมวลรวมมีค่ามากกว่าของส่วนผสมแอสฟัลต์

1.2.8 เสถียรภาพต่อสารเคมี เป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับองค์ ประกอบทางเคมีของอนุภาคมวลรวม มวลรวมที่ง่ายต่อการหลุดลอก (Stripping) อาจทำให้ผิวของแอสฟัลต์แตกได้

2. การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลล์

การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลล์ (วัชรินทร์, 2543) กำหนดขึ้นโดยบรูซ มาร์แชลล์ (Bruce Marshall) วิศวกรพิทูเมน กรมทางหลวงรัฐมิสซิสซิปปี (The Mississippi State Highway Department) ต่อมา The U.S. Corps of Engineers ได้ศึกษาค้นคว้าวิจัยเพิ่มเติมแล้วปรับปรุงวิธีการและพัฒนาหลักเกณฑ์การออกแบบส่วนผสม จนกระทั่งการทดสอบได้มาตรฐาน และกำหนดเป็นมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1559

วิธีมาร์แชลล์นี้ใช้กับวัสดุผสมถนนลาดยางแบบผสมร้อน ซึ่งประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวมที่มีการจัดขนาดคะแนน หรือละเอียดที่มีขนาดโตสุด 25 มม. (1 นิ้ว) หรือน้อยกว่า วิธีนี้ใช้ได้ทั้งการออกแบบในห้องปฏิบัติการทดลอง และการควบคุมในสนาม ลักษณะสำคัญของการทดสอบวิธีนี้คือ การวิเคราะห์ความหนาแน่นกับโพรงอากาศ และการทดสอบเสถียรภาพกับการไหลของก้อนตัวอย่างวัสดุผสมอัดแน่นของถนนลาดยาง

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete Mix Design) จะต้องเลือกการผสมของวัสดุมวลรวมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Asphalt Concrete) เพื่อให้ได้วัสดุที่เป็นไปตามข้อกำหนดและให้เกิดการประหยัด

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลล์มีการเตรียมตัวอย่าง ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517 (กรมทางหลวง, 2539) มีดังนี้

2.1.1 ทดลองหาขนาดวัสดุชนิดเม็ดหยาบโดย “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง” ตามการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516

2.1.2 ทดลองหาขนาดวัสดุชนิดเม็ดละเอียดโดย “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง” ตามการทดลองที่ ทล.-ท. 205/2517

2.1.3 ทดลองหาความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดหยาบโดย “วิธีการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ” ตามการทดลองที่ ทล.-ท. 207/2517

2.1.4 ทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียดโดย “วิธีการทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุเม็ดละเอียด” ตามการทดลองที่ ทล.-ท. 208/2518

2.1.5 หาอัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมเมื่อรวมกันแล้วได้ขนาดละเอียดตามที่ต้องการ (Blending)

2.1.6 นำวัสดุมวลรวมตามอัตราส่วนที่หาได้จากข้อ 2.1.5 น้ำหนัก 1,200 กรัมสำหรับมวลรวมหินทั่วไปและ 1,400 กรัมสำหรับมวลรวมสแลก (หรือน้ำหนักเมื่อบดทับแล้วตัวอย่างจะหนาประมาณ 6.35 เซนติเมตร (2.5 นิ้ว)) ใส่ในกะละมังเคลือบไปอบในเตาอบให้ได้อุณหภูมิสูงถึง $160 \pm 5^{\circ}$ ซ.

2.1.7 นำแบบสำหรับบดทับและมาร์แชลล์แฮมเมอร์ไปวางบน Hot plate ที่มีอุณหภูมิระหว่าง $90-150^{\circ}$ ซ.

2.1.8 นำแอสฟัลต์ที่จะใช้ผสมไปให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 150° ซ.

2.2 การทดลอง

การทดลองการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517 (กรมทางหลวง, 2539) มีดังนี้

2.2.1 นำกะละมังใส่ตัวอย่างวัสดุมวลรวมจากข้อ 2.1.6 ออกจากเตาอบ แล้วเทวัสดุลงในภาชนะโลหะสำหรับผสมวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์ ใช้เกรียงผสมให้วัสดุมวลรวมแต่ละขนาดคลุกกันให้ทั่วทั้งไว้ให้อุณหภูมิของวัสดุมวลรวมลดลงถึง 150° ซ.

2.2.2 นำภาชนะโลหะที่ได้จากข้อ 2.2.1 ขึ้นตั้งบน Hot plate ใช้เกรียงผสมวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ให้เข้ากันโดยเร็วที่สุด ประมาณ 1 นาที พยายามให้แอสฟัลต์เคลือบวัสดุมวลรวมทุกเม็ด

2.2.3 นำแบบสำหรับบดทับจากข้อ 2.1.7 มาประกอบเข้าที่

2.2.4 เทตัวอย่างวัสดุผสมลงในแบบที่ประกอบแล้ว ใช้เกรียงแซะรอบๆตัวอย่างข้างในแบบประมาณ 15 ครั้ง และแซะเข้าในตัวอย่างอีก 10 ครั้ง ทิ้งไว้ให้อุณหภูมิของตัวอย่างลดลงจนมีอุณหภูมิประมาณ 150° ซ.

2.2.5 วางมาร์แชลล์แฮมเมอร์ลงบนตัวอย่างในแบบ ทำการบดทับตัวอย่างโดยการยกน้ำหนักและปล่อยให้น้ำหนักตกลงบนแผ่นเหล็ก จำนวน 75 ครั้ง (การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต สำหรับถนนที่มีการจราจรชั้น Heavy traffic และ Very heavy traffic)

2.2.6 เมื่อครบจำนวนการบดทับแล้ว ทำการกลับตัวอย่างโดยการกลับแบบ เอาด้านล่าง ขึ้นด้านบน แล้วทำการบดทับเช่นเดียวกับข้อ 2.2.5

2.2.7 ทิ้งตัวอย่างที่บดทับเรียบร้อยแล้วไว้ในแบบ จนกระทั่งอุณหภูมิของตัวอย่าง ลดลงมากกว่า 60°C จึงนำตัวอย่างออกจากแบบ โดยใช้เครื่องดันตัวอย่าง ทิ้งตัวอย่างไว้ใน อากาศธรรมดาไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง จึงนำไปทดสอบขั้นต่อไป

2.2.8 ในปริมาณของการผสมโดยใช้แอสฟัลต์เปอร์เซ็นต์อันหนึ่งอันใด ให้เตรียม ตัวอย่างอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง สำหรับการออกแบบให้ใช้ตัวอย่างแต่ละเปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลต์อย่างน้อย 5 ค่า และค่าต่างกัน 0.5 เปอร์เซ็นต์

2.2.9 ทำการทดสอบหาความแน่นของตัวอย่างโดย

- ก. นำตัวอย่างไปชั่งหาน้ำหนักในอากาศ (d)
- ข. นำตัวอย่างไปแช่น้ำในน้ำธรรมดาประมาณ 5 นาที แล้วนำตัวอย่างขึ้น เช็ด ตัวอย่างให้ผิวแห้ง ชั่งหาน้ำหนักในอากาศ (d_1)
- ค. นำตัวอย่างจากข้อ ข. ไปชั่งหาน้ำหนักในน้ำ (e)

2.2.10 ทำการทดสอบหาค่าเสถียรภาพและการไหล

- ก. นำตัวอย่างที่เสร็จจากการทดลองตามข้อ 2.5.9 แล้วไปแช่น้ำที่มีอุณหภูมิ $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ในอ่างต้มน้ำ
- ข. เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างขึ้นจากอ่างต้มน้ำ เช็ดให้ผิวตัวอย่างแห้งแล้ว นำไปใส่ในแบบทดสอบเสถียรภาพ เพื่อไปทดสอบหาค่าเสถียรภาพและค่าการไหล
- ค. นำแบบทดสอบเสถียรภาพที่ได้จากข้อ ข. ไปวางบนเครื่องทดสอบมาร์แชลล์ ให้แบบทดสอบเสถียรภาพอยู่ใต้ท่อนกด (Piston) ซึ่งติดกับ Proving ring สำหรับอ่านน้ำหนักกด

ง. เดินเครื่องให้แบบทดลองเสถียรภาพเคลื่อนไปสัมผัสกับท่อนกจนกระทั่งเข็มของ dial gauge ที่ติดกับ Proving ring ขยับตัว หยุดเครื่องทำการตั้งเข็มของ dial gauge ที่เลข 0 (ศูนย์)

จ. นำเครื่องวัดการไหลไปวางบนแกนที่ใช้สำหรับทดลองหาการไหล ซึ่งติดกับแบบทดลองเสถียรภาพ ตั้งเข็ม dial gauge ของเครื่องวัดการไหลให้อยู่ที่เลข 0 (ศูนย์) ใช้มือจับเครื่องวัดการไหลให้นิ่งอยู่กับที่

ฉ. เดินเครื่องทดลองมาร์แชลล์ กดแบบทดลองเสถียรภาพ อ่านค่าน้ำหนักสูงสุดที่กดจาก Proving ring เป็นค่าที่อ่านได้ (measured) ซึ่งต้องแก้ไข (adjust) สำหรับตัวอย่างมาตรฐานที่หนา 6.35 เซนติเมตร (2.5 นิ้ว) ด้วยตัวปรับแก้ค่าเสถียรภาพ (Stability Correction Ratios) ตามตารางที่ 1

ช. ขณะที่ทำการทดลองหาค่าเสถียรภาพ เข็ม Dial gauge ของเครื่องวัดการไหลจะเคลื่อนที่ อ่านค่าการไหลจาก Dial gauge ที่น้ำหนักกดสูงสุด

ตารางที่ 1 ตัวปรับแก้ค่าเสถียรภาพจากขนาดก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตแบบมาร์แชลล์

ปริมาตรของก้อนตัวอย่าง (ตร.ซม.)	ความหนาของก้อนตัวอย่าง		ตัวปรับแก้ค่าเสถียรภาพ
	(ซม.)	(นิ้ว)	
200 - 213	2.54	1	5.56
214 - 225	2.70	1 1/16	5.00
226 - 237	2.85	1 1/8	4.55
238 - 250	3.01	1 3/16	4.17
251 - 264	3.18	1 1/4	3.85
265 - 276	3.33	1 5/16	3.57
277 - 289	3.49	1 3/8	3.33
290 - 301	3.65	1 7/16	3.03
302 - 316	3.81	1 1/2	2.78
307 - 328	3.97	1 9/16	2.50
329 - 340	4.13	1 5/8	2.27
341 - 353	4.29	1 11/16	2.08
354 - 367	4.45	1 3/4	1.92
354 - 379	4.60	1 13/16	1.79
380 - 392	4.76	1 7/8	1.67

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ปริมาตรของก้อนตัวอย่าง (ตร.ซม.)	ความหนาของก้อนตัวอย่าง		ตัวปรับแก้ค่าเสถียรภาพ
	(ซม.)	(นิ้ว)	
393 - 405	4.92	1 15/16	1.56
406 - 420	5.08	2	1.47
421 - 431	5.24	2 1/16	1.39
432 - 443	5.40	2 1/8	1.32
444 - 456	5.56	2 3/16	1.25
457 - 470	5.71	2 1/4	1.19
471 - 482	5.87	2 5/16	1.14
483 - 495	6.03	2 3/8	1.09
496 - 508	6.19	2 7/16	1.04
509 - 522	6.35	2 1/2	1.00
523 - 535	6.51	2 9/16	0.96
536 - 546	6.67	2 5/8	0.93
547 - 559	6.83	2 11/16	0.89
560 - 573	6.98	2 3/4	0.86
574 - 585	7.14	2 13/16	0.83
586 - 598	7.30	2 7/8	0.81
599 - 610	7.46	2 15/16	0.78
611 - 625	7.62	3	0.76

หมายเหตุ: 1. ค่าเสถียรภาพของก้อนตัวอย่างที่ได้จากการวัดในการทดลองต้องนำมาปรับค่าด้วยตัวปรับแก้ค่าเสถียรภาพ ซึ่งเทียบจากค่าเสถียรภาพของก้อนตัวอย่างมาตรฐานที่มีความหนา 6.35 ซม. (2 ½ นิ้ว)

2. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับความหนาคิดเทียบจากก้อนตัวอย่างมาตรฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10.16 ซม. (4 นิ้ว)

ที่มา: วัชรินทร์ (2544) และ กรมทางหลวง (2539)

2.3 การคำนวณ

การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลล์มีการคำนวณตามมาตรฐานวิธีการทดลองที่
ทล.-ท. 604/2517 (กรมทางหลวง, 2539) เพื่อหาค่าคุณสมบัติของส่วนผสมหลังบดทับแล้วดังนี้

2.3.1 คำนวณหาค่าแอสฟัลต์ประสิทธิภาพโดยน้ำหนักของส่วนผสม (Effective asphalt
cement by weight of mix) บันทึกเป็นค่า b_1

$$b_1 = b - \frac{x(100 - b)}{100} \quad (1)$$

เมื่อ b = ค่าร้อยละของแอสฟัลต์ในส่วนผสม (% asphalt cement by weight of mix)

x = ค่าร้อยละของแอสฟัลต์ที่เสียไปในการดูดซึมโดยน้ำหนักของมวลรวม (asphalt
lost by absorption)

2.3.2 คำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน (Bulk specific gravity of specimen)
บันทึกเป็นค่า g

$$g = \frac{d}{d_1 - e} \quad (2)$$

เมื่อ d = น้ำหนักของตัวอย่างเมื่อชั่งในอากาศ (weight of specimen in air) มีหน่วยเป็นกรัม
(g.)

d_1 = น้ำหนักของตัวอย่างขณะอิ่มตัวผิวแห้ง (weight of specimen at saturated surface
dry condition) มีหน่วยเป็นกรัม (g.)

e = น้ำหนักของตัวอย่างเมื่อชั่งในน้ำ (weight of saturated specimen immersed in
water) มีหน่วยเป็นกรัม (g.)

2.3.3 คำนวณหาค่าร้อยละของปริมาตรของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (Percent total
volume of effective asphalt cement) ในตัวอย่างที่บดทับแล้ว บันทึกเป็นค่า i

$$i = \frac{b_1 * g}{G_{ag}} \quad (3)$$

เมื่อ G_{ag} = ค่าความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Bulk specific gravity of asphalt cement)

2.3.4 คำนวณหาค่าร้อยละของปริมาตรของมวลรวม (Percent total volume of effective asphalt cement) ในตัวอย่างที่บดทับแล้ว บันทึกเป็นค่า j

$$j = \frac{(100 - b) * g}{G_{ac}} \quad (4)$$

เมื่อ G_{ac} = ค่าความถ่วงจำเพาะทั้งก้อนของมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสม (Bulk specific gravity of blended Aggregate)

2.3.5 คำนวณหาค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Percent air voids) ในตัวอย่างที่บดทับแล้ว บันทึกเป็นค่า AV

$$AV = 100 - i - j \quad (5)$$

2.3.6 คำนวณหาค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Voids in mineral aggregate, V.M.A.) บันทึกเป็นค่า V.M.A.

$$V.M.A. = 100 - j \quad (6)$$

2.3.7 คำนวณหาค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with Asphalt cement, V.F.A) บันทึกเป็นค่า V.F.A.

$$V.F.A. = \frac{100 * i}{j} \quad (7)$$

2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำผลที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีมาร์แชลล์ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

2.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพกับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม

2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม

2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักของส่วนผสมกับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม

2.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของช่องว่างอากาศกับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม

2.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมกับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม

2.4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์กับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม

3. การออกแบบส่วนผสมด้วยระบบซูเปอร์เพฟ

ระบบซูเปอร์เพฟ SUperior PERforming Asphalt PAVEments (วัชรินทร์, 2545) ได้รับการพัฒนาขึ้นมา เพื่อช่วยกำหนดเครื่องมือให้กับวิศวกรและผู้รับเหมาก่อสร้างทาง ที่ต้องการออกแบบถนนลาดยางให้มีสมรรถภาพในการใช้งานดีขึ้นกว่าเดิม ภายใต้สภาวะรุนแรงของอุณหภูมิ และน้ำหนักบรรทุกของการจราจรปริมาณสูงที่กระทำต่อโครงสร้างถนนลาดยางดังกล่าว

3.1 วัตถุประสงค์หลัก โครงการ SHRP (The strategic Highway Research Program) เป็นผู้พัฒนาระบบซูเปอร์เพฟขึ้นมาเป็นโปรแกรมวิจัยทางด้านแอสฟัลต์ โดยมีวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการ คือ

3.1.1 เพื่อสืบค้นหาว่าทำไมผิวทางบางถนนจึงมีสมรรถภาพดี ในขณะที่ถนนอื่นๆไม่ดี

3.1.2 เพื่อพัฒนาการทดสอบทั้งหลายและข้อกำหนดต่างๆ สำหรับวัสดุซึ่งจะช่วยให้ผิวทางลาดยางมีสมรรถภาพดีเยี่ยม และความทนทานเป็นเลิศในการก่อสร้างยุคปัจจุบันนี้

3.1.3 เพื่อทำงานร่วมกับองค์กรต่างๆ และวงการอุตสาหกรรมทั้งหลายในการจัดให้มีข้อกำหนดใหม่ๆ ที่ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

3.2 ข้อเสียที่สำคัญของผิวทางลาดยาง ระบบซูเปอร์เพฟได้กล่าวถึงข้อเสียที่สำคัญของผิวทางลาดยาง 2 ประการคือ

3.2.1 การเสียรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งเป็นผลมาจากส่วนผสมที่ได้จากการผสมแอสฟัลต์กับมวลรวมมีกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) ไม่เพียงพอ

3.2.2 การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Cracking) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อผิวทางแอสฟัลต์หดตัวและหน่วยแรงดึง (Tensile Stress) มีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) ของส่วนผสมแอสฟัลต์ที่นำมาก่อสร้างเป็นผิวทาง

3.3 องค์ประกอบของระบบซูเปอร์เพฟ ระบบซูเปอร์เพฟประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 3 ประการที่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันได้แก่

3.3.1 ข้อกำหนดตัวเชื่อมประสานประเภทแอสฟัลต์

3.3.2 การออกแบบส่วนผสมเชิงปริมาตรและระบบการวิเคราะห์

3.3.3 การทดสอบเชิงวิเคราะห์ของส่วนผสมและระบบการคาดคะเนสมรรถภาพซึ่งรวมถึงคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ ฐานข้อมูลทางด้านภูมิอากาศและสภาพแวดล้อมกับแบบจำลองเชิงสมรรถภาพ

3.4 ระบบการออกแบบส่วนผสมซูเปอร์เพฟ ยึดหลักการใช้สัดส่วนผสม ระหว่างแอสฟัลต์ กับมวลรวมในเชิงปริมาตร และทำการบดทับส่วนผสมในห้องปฏิบัติการ โดยการใช้เครื่องบดทับ แบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ (Superpave Gyrotory Compactor) มีหน้าที่หลักในการทดสอบ ก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเลียนแบบผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงบนถนน เครื่องจะทำการนวด (Kneading) ส่วนผสมเพื่อเลียนแบบการบดทับ ให้เหมือนกับการบดทับในการก่อสร้าง และการ จราจรที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม ระดับและจำนวนการบดทับขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและปริมาณ การจราจรที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในภาคสนาม ณ สถานที่ก่อสร้าง

3.5 ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมระบบซูเปอร์เพฟ ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมระบบ ซูเปอร์เพฟเชิงปริมาตรมีดังนี้

3.5.1 เลือกแอสฟัลต์และมวลรวมตามข้อกำหนดของระบบซูเปอร์เพฟ

3.5.2 หาค่าสัดส่วนของมวลรวมขนาดต่างๆ ให้ได้ตามข้อกำหนดของการจัดขนาดคละ ตามวิธีการของระบบซูเปอร์เพฟ

3.5.3 ผสมแอสฟัลต์กับสัดส่วนของมวลรวมและนำไปอบในเตาอบเพื่อทำให้ส่วน ผสมมีอายุมากขึ้น เป็นการทำให้ได้อายุเพื่อเลียนแบบสภาพการใช้งานในสนาม ที่ต้องเผชิญกับ สภาพภูมิอากาศร้อน

3.5.4 บดทับก้อนตัวอย่างและวิเคราะห์เชิงปริมาตรของส่วนผสม

3.5.5 หาสัดส่วนของส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด เพื่อใช้เป็นโครงสร้างมวลรวมออก แบบ

3.5.6 บดทับก้อนตัวอย่างของโครงสร้างมวลรวมออกแบบ ที่ปริมาณต่างๆ ของวัสดุ ประสานประเภทแอสฟัลต์ แล้ววิเคราะห์เชิงปริมาตร เพื่อหาค่าปริมาณแอสฟัลต์บรรจุในการ ออกแบบ

4. การบดทับก้อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

วิธีการบดทับ (Compaction Methods) (Blankenship et al., 1994) มีอยู่ 3 วิธีที่ใช้อยู่เป็นประจำในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่

4.1 การบดทับแบบตกระแทก เป็นวิธีที่เก่าแก่มาของการบดทับในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Compaction) ในปี ค.ศ. 1920 Hubbard and Field ได้ใช้ Proctor Hammer มาใช้ในการบดทับส่วนผสมแอสฟัลต์ โดยยืมวิธีการมาจากปฏิบัติการธรณีเทคนิค (Geotechnical Field) ต่อมาในปี ค.ศ. 1930 บรูซ มาร์แชลล์ ได้เริ่มพัฒนาการออกแบบส่วนผสมโดยวิธีมาร์แชลล์ ได้นำวิธีการบดทับแบบตกระแทกจากวิธีการของ Hubbard field Method มาใช้ ยกเว้นผิวหน้าของเครื่องบดทับถูกทำให้เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางแบบ (Mold) เท่านั้น ต่อมาวิธีมาร์แชลล์ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการออกแบบทางหลวง โดยจำนวนการตกระแทก (Number of Blows) ที่ใช้ในแต่ละด้านของตัวอย่าง (35, 50, และ 75 blows) ขึ้นกับระดับการจราจรโดยทั่วไป ระดับพลังงานสูง (Blows) ใช้สำหรับระดับการจราจรสูง สาเหตุที่ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างแตกต่างกัน ก็เนื่องมาจากความหลากหลายของมาร์แชลล์แฮมเมอร์ เช่น Mechanical Hammer, Rotating Hammer, และ Manual Hammer

4.2 การบดทับแบบการนวด เป็นวิธีการบดทับอีกวิธีหนึ่งนอกเหนือจากวิธีมาร์แชลล์ เมื่อฮวีม (Hveem) ได้พัฒนาวิธีการออกแบบส่วนผสมขึ้นในปี ค.ศ. 1930 และ ค.ศ. 1940 ได้เลือกใช้วิธีการบดทับ โดยอ้างอิงการบดทับด้วยการนวด ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้แรงทะลุผ่านของ Roughly Triangular-Shaped Foot ทับไปบนผิวหน้าของตัวอย่างเท่านั้น การกระทืบ (Tamps) ใช้อย่างสม่ำเสมอบนผิวหน้าของก้อนตัวอย่างจนสิ้นสุดการบดทับ

4.3 การบดทับแบบหมุนอัด ถูกพัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ. 1930 ในมลรัฐเท็กซัส ขบวนการบดทับประกอบด้วยการใช้แรงในแนวตั้งพร้อมกับการหมุนแบบ (Gyrating the Mold) ให้เคลื่อนที่ไปด้านหน้าและด้านหลัง การบดทับแบบหมุนอัดเหมือนกันกับ California Kneading Compaction ใช้กระบวนการกระทำการนวด (Kneading Action) บนก้อนตัวอย่าง การกระทำการนวดมีมูลเหตุมาจากการหมุน (Gyrating) ก้อนตัวอย่างทำมุมกับแนวราบ ด้วยมุมการหมุน (Angle of Gyration) หลากหลายที่กระทำกับเครื่องบดทับซึ่งอยู่ในช่วง 1.00 ถึง 6.00

5. การบดทับในขั้นตอนการก่อสร้าง

5.1 เครื่องจักรบดทับ

เครื่องจักรบดทับทุกชนิดจะต้องเป็นแบบขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง ต้องมีน้ำหนักและคุณสมบัติอื่นๆ ถูกต้องตามที่ได้ระบุไว้ในรายละเอียดที่กำหนดสำหรับเครื่องจักรบดทับแต่ละชนิด น้ำหนักในการบดทับของเครื่องจักรบดทับแต่ละชนิดจะต้องเหมาะสมกับชนิดและลักษณะของส่วนผสม ความหนาของชั้นที่ปู ขั้นตอนการบดทับและอื่นๆ ตามมาตรฐานงานทางที่ ทล.-ม. 408/2532 (กรมทางหลวง, 2539) รายละเอียดของเครื่องจักรบดทับชนิดต่างๆ มีดังนี้

5.1.1 รถบดล้อเหล็ก 2 ล้อ (Steel-Tired Tandem Roller) ต้องมีขนาดน้ำหนักไม่น้อยกว่า 8 ตัน และสามารถเพิ่มน้ำหนักได้จนมีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 10 ตัน จะต้องมีน้ำหนักต่อความกว้างของล้อรถบดไม่น้อยกว่า 37.9 กิโลกรัมต่อเซนติเมตร รถบดจะต้องอยู่ในสภาพดีสามารถขับเคลื่อน เดินหน้าและถอยหลังได้ การขับเคลื่อนไปข้างหน้า การหยุด และการถอยหลังจะต้องเรียบสม่ำเสมอ ล้อเหล็กทั้ง 2 ล้อ จะต้องตรงแนว ที่ผิวล้อเหล็กจะต้องเรียบไม่เป็นร่องลึกเป็นหลุมหรือเป็นรอยบุ๋ม สลักยึดล้อและลูกปืนล้อต้องไม่สึกหรอมากเกินไปจนทำให้ล้อหลวม ต้องมีถังน้ำ มีระบบฉีดน้ำ มีอุปกรณ์คราดผิวล้อเหล็กและแผ่นวัสดุสำหรับซึมซับน้ำและเกลี่ยกระจายน้ำสำหรับเลี้ยงล้อรถบดที่ใช้การได้ดีและถูกต้องตามที่ต้องการ เพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตติดล้อขณะบดทับ

5.1.2 รถบดล้อยาง (Pneumatic-Tired Roller) ต้องมีขนาดน้ำหนักไม่น้อยกว่า 10 ตัน และสามารถเพิ่มน้ำหนักได้ มีล้อยางไม่น้อยกว่า 9 ล้อ ล้อรถบดต้องเป็นชนิดผิวหน้าเรียบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขอบล้อไม่น้อยกว่า 500 มิลลิเมตร มีผิวหน้าล้อยางกว้างไม่น้อยกว่า 225 มิลลิเมตร มีขนาดและจำนวนชั้นผ้าใบเท่ากันทุกล้อ ส่วนล้อและเพลาคือตัวขับเคลื่อนได้อิสระอย่างน้อย 1 แกว มีแรงอัดที่ผิวหน้าสัมผัสของล้อรถบดขณะบดอัดไม่มากกว่า 620 กิโลพาสคัล (90 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และต้องมีถังน้ำ มีระบบฉีดน้ำ มีอุปกรณ์คราดผิวล้อยางและแผ่นวัสดุสำหรับซึมซับน้ำ และเกลี่ยกระจายน้ำสำหรับเลี้ยงล้อรถบดที่ใช้ได้ดีและถูกต้องตามที่ต้องการ เพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตติดล้อขณะบดทับ รถบดล้อยางขณะใช้งานต้องมีความดันลมยางเท่ากันทุกล้อ โดยอนุญาตให้มีความดันลมยางแต่ละล้อแตกต่างกันได้ไม่เกิน 35 กิโลพาสคัล (5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

5.1.3 รถบดสันสะเทือน (Vibratory Roller) ต้องมีขนาดน้ำหนักไม่น้อยกว่า 4 ตัน สำหรับชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความไม่เกิน 35 มิลลิเมตร และต้องมีขนาดน้ำหนักไม่น้อยกว่า 6 ตัน สำหรับชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาไม่เกิน 35 มิลลิเมตร และต้องมีขนาดน้ำหนักไม่น้อยกว่า 6 ตัน สำหรับชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาดั้งแต่ 40 มิลลิเมตรขึ้นไป โดยอาจเป็นแบบสันสะเทือนล้อเดียวหรือสองล้อก็ได้ ต้องมีความถี่การสันสะเทือน (Frequency) ไม่น้อยกว่า 33 เฮิรตซ์ (2,000 รอบต่อนาที) และมีระยะเดิน (Amplitude) ระหว่าง 0.20-0.80 มิลลิเมตร มีน้ำหนักต่อความกว้างของล้อรถบดไม่น้อยกว่า 22 กิโลกรัมต่อเซนติเมตร รถบดจะต้องอยู่ในสภาพดี สามารถบดทับโดยการเดินหน้าและถอยหลังได้ การขับเคลื่อนไปข้างหน้า การหยุด และการถอยหลังจะต้องเรียบสม่ำเสมอ ล้อทั้ง 2 ล้อ จะต้องตรงแนว ที่ผิวล้อเหล็กจะต้องเรียบ ไม่สึกเป็นหลุมหรือเป็นรอยบุ๋ม สลักล้อและลูกปืนล้อต้องไม่สึกหรอมากเกินไป จนทำให้ล้อหลวม ต้องมีถังน้ำ มีระบบฉีดน้ำ มีอุปกรณ์คราดผิวล้อและแผ่นวัสดุสำหรับซึมซับน้ำและเกลี่ยกระจายน้ำเลี้ยงล้อรถบดเพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตติดล้อขณะบดทับ มีระบบการสันสะเทือนที่อยู่ในสภาพดี

5.2 การบดทับชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีต

การบดทับชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นต้องใช้เครื่องจักรบดทับที่ถูกต้องและมีจำนวนเพียงพอที่จะอำนวยให้การก่อสร้างชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตดำเนินไปได้โดยปกติไม่ติดขัดหรือหยุดชะงัก เครื่องจักรบดทับต่างๆ ก่อนนำไปใช้งานจะต้องผ่านการตรวจสอบ ตรวจสอบปรับให้เหมาะสมตามรายการและวิธีการตามที่กรมทางหลวงกำหนด และอนุญาตให้ใช้ได้จากนายช่างผู้ควบคุมงาน

การบดทับต้องกระทำทันทีหลังจากการปูส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และเริ่มบดทับขณะที่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตยังร้อนอยู่ โดยมีอุณหภูมิระหว่าง 120-150 °ซ. (248-302 °ฟ.) เมื่อบดทับแล้วจะต้องได้ชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความแน่น ความเรียบสม่ำเสมอได้ระดับและความลาดตามแบบ ไม่มีรอยแตก รอยเคลื่อนตัวเป็นแอ่ง รอยคลื่น รอยล้อรถบด หรือความเสียหายของผิวชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตอื่นๆ

5.3 หลักการบดทับชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ในเบื้องต้นให้บดทับรอยต่อต่างๆ ก่อนโดยทันที ต่อจากนั้นก็ให้บดทับขั้นต้น (Initial or Breakdown Rolling) โดยให้รถบดทับตามหลังเครื่องปูให้ใกล้ชิดเครื่องปูมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และในการบดทับชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่กำลังบดทับต้องไม่มีรอยแตก ไม่มีส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตติดล้อรถบด ต่อไปเป็นการบดทับชั้นกลาง (Intermediate Rolling) โดยให้บดทับตามทิศการบดทับในขั้นต้นให้ใกล้ชิดที่สุดเท่าที่สามารถจะทำได้ และต้องดำเนินการขณะที่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตยังมีอุณหภูมิเหมาะสมที่จะทำให้ได้ความแน่นตามที่กำหนด ต่อจากนั้นเป็นการบดทับขั้นสุดท้าย (Finish Rolling) ซึ่งจะต้องดำเนินการขณะที่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตยังมีอุณหภูมิเหมาะสมที่รถบดจะสามารถบดรอยล้อรถบดในการบดทับที่ผ่านมาได้เรียบร้อยแล้ว

5.4 ความเร็วของรถบดในการบดทับ

ในการบดทับรถบดจะต้องวิ่งด้วยความเร็วต่ำและสม่ำเสมอ ความเร็วสูงสุดที่ใช้ในการบดทับขึ้นอยู่กับชนิดของรถบด อุณหภูมิ ชนิด ลักษณะ และความหนาของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ขั้นตอนการบดทับและปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ความเร็วสูงสุดในการบดทับสำหรับรถบดล้อเหล็กแบบไม่สันสะเทือน รถบดล้อเหล็กแบบสันสะเทือนซึ่งบดทับโดยไม่สันสะเทือน และรถบดล้อยาง ในการบดทับขั้นตอนต่างๆควรเป็นไปตามตารางที่ 2

ความเร็วสูงสุดของการบดทับสำหรับรถบดสันสะเทือนที่มีความถี่ในการสันสะเทือนใดๆ ขึ้นอยู่กับระยะกระแทกของล้อรถบด (Impact Spacing) ซึ่งตามปกติระยะการกระแทกของล้อรถบดจะน้อยกว่าความหนาของชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดทับแล้ว ในการบดทับระยะกระแทกของล้อรถบดไม่ควรน้อยกว่า 10 ครั้งต่อระยะทาง 300 มิลลิเมตร (หรือ 33 ครั้งต่อระยะทาง 1 เมตร) ที่รถบดเคลื่อนตัวไป สำหรับความเร็วที่เหมาะสมในการบดทับของรถบดสันสะเทือนที่ความถี่การสันสะเทือนใดๆ ที่ใช้ และระยะกระแทกของล้อรถบดที่กำหนด ควรจะเป็นไปตามตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ความเร็วของรถบดในการบดทับ

ชนิดของรถบด	ความเร็วของรถบดในการบดทับ					
	การบดทับขั้นต้น		การบดทับขั้นกลาง		การบดทับขั้นสุดท้าย	
	กม./ชม.	ไมล์/ชม.	กม./ชม.	ไมล์/ชม.	กม./ชม.	ไมล์/ชม.
รถบดล้อเหล็กชนิด 2 ล้อ	3	2	5	3	5*	3*
รถบดล้อยาง	5	3	5	3	8	5
รถบดสันสะเทือน**	4-5	2.5-3	4-5	2.5-3	-	-

* รวมถึงรถบดสันสะเทือนบดทับโดยไม่สันสะเทือน

** ดูตารางที่ 7 ประกอบ

ที่มา: กรมทางหลวง (2539)

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความถี่ และจำนวนครั้งการกระแทก

ความถี่การสันสะเทือน เฮิร์ตซ์(รอบต่อนาที)		จำนวนครั้งการกระแทกต่อระยะ 1 เมตร				
30 (1800)		45.0	33.8	27.0	22.5	19.3
33 (2000)		50.0	37.5	30.0	25.0	21.4
37 (2200)		55.0	41.3	33.0	27.5	23.6
40 (2400)		45.0	33.8	27.0	22.5	19.3
43 (2600)		65.0	48.8	39.0	32.5	27.9
47 (2800)		70.0	52.5	42.0	35.0	30.0
50 (3000)		75.0	56.3	45.0	37.5	32.1
ความเร็วรถบด	กม./ชม	2.4	3.2	4.0	4.8	5.6
	ม./นาที	40.0	53.3	66.7	80.0	93.3

หมายเหตุ: ตัวอักษรหนาคือช่วงที่ควรใช้

ที่มา: กรมทางหลวง (2539)

5.5 การบดทับขั้นต้น

ภายหลังจากที่ได้บดทับรอยต่อต่างๆ เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ดำเนินการบดทับขั้นต้นเมื่อ ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 120°C . (248°F .) การบดทับให้ใช้ได้ทั้งรถบดล้อ เหล็กแบบไม่สันสะเทือนหรือรถบดสันสะเทือน การบดทับให้เริ่มบดทับจากขอบชั้นทางแอสฟัลต์ คอนกรีตด้านต่ำ หรือขอบชั้นทางด้านนอกไปหาขอบชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตด้านสูงหรือขอบชั้น ทางด้านใน

การบดทับโดยใช้รถบดสันสะเทือน ควรใช้ความถี่การสั่นสะเทือนและระยะเดินของ ล้อรถบดให้เหมาะสม ความถี่การสั่นสะเทือนควรอยู่ระหว่าง 33-50 เฮิรตซ์ (2,000-3,000 รอบต่อ นาที) และระยะเดินของล้อรถบดควรอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 มิลลิเมตร สำหรับการบดทับขั้นผิวทางหรือ ผิวไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีตควรใช้ค่าความถี่การสั่นสะเทือนด้านสูงและใช้ค่าระยะเดินด้านต่ำ แต่ ถ้าเป็นชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ใช่ชั้นผิวทางและมีความหนามากกว่า 50 มิลลิเมตร อาจใช้ ค่าความถี่การสั่นสะเทือนด้านต่ำ และใช้ค่าระยะเดินด้านสูงได้ อย่างไรก็ตามการใช้ค่าความถี่การ สั่นสะเทือนและค่าระยะเดินของรถบดในการบดทับ ให้พิจารณาจากผลการทำแปลงทดลอง

5.6 การบดทับขั้นกลาง

ให้เริ่มดำเนินการบดทับเมื่อชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 95°C . (203°F .) การบดทับขั้นกลางควรดำเนินการตามรูปแบบการบดทับขั้นต้น โดยให้บดทับตามหลัง การบดทับขั้นต้นให้ใกล้ขีดที่สุด และให้บดทับโดยต่อเนื่องไปจนกว่าจะได้ความแน่นตามที่กำหนด และสม่ำเสมอทั่วทั้งแปลงที่ก่อสร้าง

การบดทับขั้นกลางตามปกติให้ใช้รถบดล้อเป็นหลัก โดยเฉพาะชั้นผิวทางและผิว ไหล่ทางแอสฟัลต์คอนกรีต ให้ปรับน้ำหนักรถบดและความดันลมยางเพื่อให้ได้แรงอัดที่ผิวหน้า สัมผัสของล้อรถบดที่เหมาะสมกับชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่กำลังบดทับ

5.7 การบดทับขั้นสุดท้าย

มีจุดประสงค์เพื่อลบรอยล้อรบกที่ผิวหน้าและทำให้ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอเท่านั้น ทั้งนี้ให้เริ่มดำเนินการเมื่อชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 66°C . (150°F .) โดยให้ใช้รถบดล้อเหล็กแบบไม่สันสะเทือนหรือใช้รถบดสันสะเทือนแต่บดทับโดยสันสะเทือนเท่านั้น

6. เครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ

เครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ เป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมระดับ 1 ระบบซูเปอร์เพฟ ซึ่งใช้สำหรับกระบวนการ การบดทับก้อนตัวอย่าง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

6.1 ความเป็นมาของเครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ

เครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ (บุญพล, 2546) เนื่องด้วยจุดประสงค์การวิจัยของ SHRP ที่ต้องการพัฒนาวิธีบดทับตัวอย่างในห้องปฏิบัติการทดลอง โดยเลียนแบบสภาพการบดทับที่เกิดขึ้นจริงในสนาม ซึ่งเครื่องมือบดทับที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่สามารถตอบสนองจุดประสงค์นี้ได้ เครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟจึงถูกสร้างขึ้นตามจุดประสงค์ดังกล่าวพื้นฐาน ของเครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟมาจากเครื่องบดทับแบบหมุนเทกซัส (Texas Gyrotory Compactor) ซึ่งถูกดัดแปลง เพื่อให้ใช้ได้กับทฤษฎีบดทับแบบหมุนฝรั่งเศส (French Gyrotory Compactor) เครื่องบดทับแบบหมุนเทกซัสที่ถูกดัดแปลงนี้บดทับก้อนตัวอย่างได้เสมือนจริงตรงตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ได้สำเร็จ จากเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างที่มีขนาด 6 นิ้ว จึงเหมาะสมที่จะใช้บรรจุส่วนผสมที่มีขนาดมวลรวมใหญ่ที่สุดได้ถึง 50 มม. ผู้วิจัยของ SHRP จึงได้ดัดแปลงเครื่องบดทับแบบหมุนเทกซัส โดยทำการปรับมุมการหมุนให้ต่ำลง ลดความเร็วของการหมุนให้ช้าลง และเพิ่มความสามารถในการบันทึกความสูงของก้อนตัวอย่างให้ตรงกับเวลาที่เกิดขึ้นจริง

6.2 ส่วนประกอบของเครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ

เครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ ภาพที่ 1 แสดงส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

6.2.1 โครงคานยึด (Reaction Frame), ฐานหมุนได้ (Rotating Base) และมอเตอร์ (Motor)

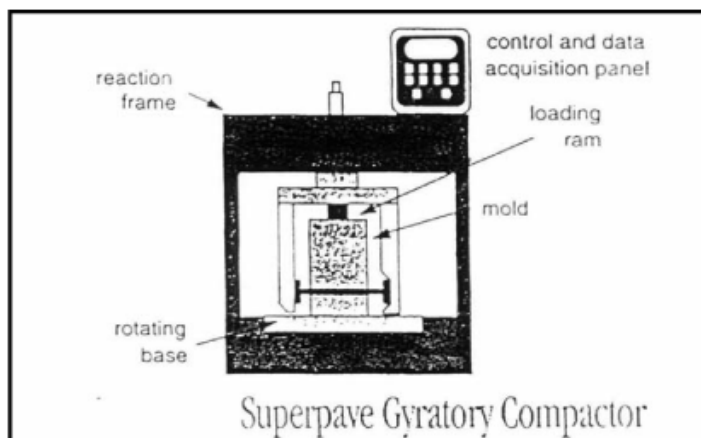
6.2.2 ระบบแรงกระทำ (Loading System), แรงกระทำที่เครื่องกระทำ (Loading Ram) และเครื่องวัดแรงดัน (Pressure Gauge)

6.2.3 เครื่องวัดค่าความสูง (Height Measuring) และระบบบันทึกข้อมูล (Recording System)

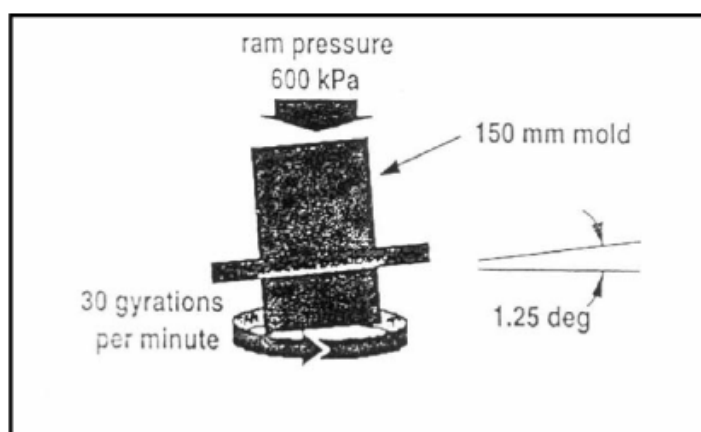
6.2.4 แบบเหล็ก (Mold) และแผ่นเหล็กรองฐาน (Base Plate)

6.3 การทำงานของเครื่องกดทับแบบไฮดรอลิกของระบบซูเปอร์เพฟ

เมื่อเครื่องกดทับแบบไฮดรอลิกของระบบซูเปอร์เพฟเริ่มทำงานจะมีแรงกดไปปะทะกับโครงคานยึดและเกิดแรงกระทำที่เครื่องกระทำเพื่อทำให้เกิดแรงกด 600 กิโลปาสกาล (kPa) กดทับบนก้อนตัวอย่าง เครื่องวัดแรงดันทำการวัดค่าจากแรงกระทำที่เครื่องกระทำเพื่อควบคุมแรงกดให้คงที่ตลอดช่วงการกดทับ ดังภาพที่ 2 ซึ่งแสดงกลไกของเครื่องกดทับแบบไฮดรอลิกของระบบซูเปอร์เพฟ แบบเหล็ก (Mold) ของเครื่องกดทับแบบไฮดรอลิกของระบบซูเปอร์เพฟมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 100 มม. และ 150 มม. มีแผ่นเหล็กรองฐานอยู่ข้างล่างภายในแบบเหล็ก ตลอดช่วงการกดทับฐานหมุนของเครื่องกดทับแบบไฮดรอลิกของระบบซูเปอร์เพฟจะหมุนด้วยอัตราคงที่ที่ 30 รอบต่อนาที โดยที่ตำแหน่งการกดทับทำมุม 1.25 องศาตลอดช่วงการกดทับ เครื่องกดทับแบบไฮดรอลิกของระบบซูเปอร์เพฟจะวัดค่าความสูงของก้อนตัวอย่างตลอดช่วงในการกดทับ ดังนั้นความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างสามารถประมาณค่าออกมาได้ในระหว่างการกดทับ เพราะารู้ค่ามวลของส่วนผสมที่เทใส่ในแบบเหล็ก และรู้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแบบเหล็ก ค่าต่าง ๆ เหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์หาความสัมพันธ์ได้



ภาพที่ 1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ
ที่มา : Asphalt Institute (1996)



ภาพที่ 2 แสดงกลไกการทำงานและขนาดข้อกำหนดต่างๆที่ใช้กับเครื่องบดทับแบบไจราทอรีของ
ระบบซูเปอร์เพฟ

ที่มา : Asphalt Institute (1996)

7. การหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยวิธีการสกัดออกจากส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

การหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยวิธีการสกัดออกจากส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures) (Larson, 1963) โดยวิธีการสกัดออกด้วยเครื่อง Centrifugal (The Centrifugal Extraction Method) เป็นวิธีการตรวจสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ และมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งจะกล่าวถึงอย่างละเอียดในภายหลัง

8. หินที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย

8.1 ความหมาย

หิน (จุฑามาศ, 2519) หมายถึงสารแข็งที่ประกอบเป็นเปลือกโลก (Crust) ซึ่งเป็นสารผสมของแร่ตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไป เปลือกโลกประกอบด้วยหิน 3 ชนิด ได้แก่ หินอัคนี หินชั้น และหินแปร

8.1.1 หินอัคนี (Igneous Rock) เป็นหินที่เกิดจากการเย็นตัวและแข็งตัวของสาร ละลาย หลอมเหลวภายในโลกที่เรียกว่าแมกมา (Magma) หินอัคนีแบ่งตามวิธีการเกิดได้เป็น 2 พวก คือ หินอัคนีที่เย็นตัวภายนอกเปลือกโลก (Extrusive Igneous Rock; Volcanic Rock) หมายถึง หินอัคนีที่เกิดจากการเย็นตัวของแมกมาที่ขึ้นมาสู่ผิวโลก แร่จะตกผลึกเย็นตัวแข็งเร็วมาก ผลึกแร่จะมีขนาดเล็กมาก เนื้อหินจะมีลักษณะเนียนเป็นแก้ว นอกจากนั้นแมกมา ที่ขึ้นมาสู่ผิวโลกมักจะมีก๊าซและสารระเหิดอยู่ด้วย เมื่อออกมาเย็นตัวภายนอกส่วนที่เป็นก๊าซจะขยายตัวกระจายไปในอากาศ เมื่อแข็งตัวเป็นหินก็จะเกิดมีรูพรุนอยู่ทั่วไป เช่น หินบะซอลท์ (Basalt) และอีกพวกหนึ่งคือหินอัคนีที่เย็นตัวภายในเปลือกโลก (Intrusive Igneous Rock; Plutonic Rock) หมายถึงหินอัคนีที่เกิดจากการเย็นตัวของแมกมาภายในเปลือกโลก แร่จะตกผลึกเย็นตัวอย่างช้าๆ ผลึกแร่จึงหยาบและมีลักษณะเป็นเหลี่ยมเกาะประสานตัวกันอย่างแน่น เช่น หินแกรนิต

8.1.2 หินชั้น (Sedimentary Rock) คือหินที่เกิดจากการทับถม (Sedimentation or Deposition) และแข็งตัว (Lithification) ของกรวด เศษหิน ทราย ดิน หรือซากของพืช และสัตว์ หรือเกิดจากการตกตะกอน (Precipitation) ของสารละลายจากน้ำ เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีหรือการระเหยของน้ำ การเกิด (Origin) ของหินชั้นมี 3 แบบ คือ

ก. Detrial Origin เกิดจากการสีกกร่อนผุพัง (Weathering and Erosion) ของหินเดิมเช่น กรวด ดินทราย เป็นต้น เมื่อเศษหิน ดินทราย กรวดต่างๆ ถูกพัดพาไปตามทางจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำก็จะถูกขัดสีไปตลอดทางโดยอาจจะครูดถูกับพื้นท้องน้ำ หรือกระทบกระแทกกันเองทำให้สึกหรอไปบ้างและสุดท้ายก็ตกจมอยู่ ณ ที่ใดที่หนึ่งนานๆเข้าตะกอนใหญ่ก็ทับถมซ้อนลงไปมากขึ้น

ข. Chemical Origin เกิดจากการตกตะกอน (Precipitation) โดยกรรมวิธีทางเคมี คือแร่ธาตุบางชนิดที่อยู่ในหินอาจจะถูกชะละลายปนไปกับน้ำจนเกิดเป็นสารละลายในธรรมชาติ เมื่อมีความเข้มข้น และอุณหภูมิพอเหมาะก็จะตกตะกอน เช่น หินปูน เป็นต้น

ค. Biochemical Origin เกิดจากซากพืชและสัตว์ คือ พืชและสัตว์บางชนิดเมื่อตายลงก็ทับถมไปกับตะกอนอื่นๆ ด้วย จนกลายเป็นหิน

8.1.3 หินแปร (Metamorphic Rock) เป็นหินที่เกิดจากหินเดิม ซึ่งอาจจะเป็นหินชั้น หรือหินอัคนีก็ได้ที่เปลี่ยนแปลงสภาพไป เนื่องจากได้รับความร้อน ความกดดัน การเคลื่อนไหวของเปลือกโลก และปฏิกิริยาเคมีของของเหลวและก๊าซ ผลจากการแปรสภาพ จะทำให้ลักษณะเนื้อหิน ส่วนประกอบและโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป การเกิดของหินแปรมี 2 แบบคือ

ก. Thermal Metamorphism or Contact Metamorphism

ข. Regional Metamorphism or Dynamicthermal Metamorphism

8.2 หินที่นิยมนำมาใช้เป็นมวลรวม

หินชนิดต่างๆที่มีอยู่ในประเทศไทยจะมีอยู่เพียง 3 ชนิดที่นิยมนำมาใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้แก่

8.2.1 หินแกรนิต เป็นหินพวก Intrusive Igneous Rock ลักษณะเนื้อหินอาจจะหยาบมาก (Phaneritic) จนถึงเนื้อดอก (Porphyritic) แต่ส่วนมากเนื้อสม่ำเสมอจนถึงละเอียด ผลึกแร่เกาะกันแน่นเห็นได้ชัด ดูโดยทั่วไปเป็นหินสีอ่อนเพราะแร่ส่วนใหญ่เป็นแร่ Felspar และ Quartz แร่สีดำน้อยและไม่สำคัญมีกระจายอยู่เท่านั้น แร่ประกอบหินที่จำเป็นอย่างยิ่งได้แก่ Felspar พวก Orthoclase และแร่ Quartz แร่ Felspar เห็นได้ชัดมาก มีลักษณะขุ่นสีขาวนวลหรือชมพู ผิวแตกเรียบ ผิดกับแร่ Quartz ซึ่งใสคล้ายแก้วและผิวแตกขรุขระแร่ที่ไม่จำเป็นอย่างยิ่งได้แก่ Biotite มีสีดำหรือน้ำตาลแก่ เกือบดำ ลอกเป็นแผ่นได้จะฝังกระจายอยู่ในเนื้อหินถ้ามีสีขาวเรียกว่าแร่ Muscovite หินแกรนิต อาจมีแร่ทั้งสองอย่างนี้หรืออย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้ นอกจากนี้ก็ยังมีแร่ Hornblende แร่ Tourmaline ซึ่งจะมีหรือไม่มีก็ได้มีสีดำเช่นกัน แหล่งที่พบในประเทศไทยทางเหนือมีหลายแห่ง เพื่อกแกรนิต

โผล่ตั้งแต่เชิงเขาจนถึงคาบได้แก่ คอยสุเทพและคอยอินทนนท์ ทางใต้แถบบริเวณเขตแดนไทย-พม่า เทือกแกรนิตเป็นแนวยาวตลอด ที่เป็นเนินเตี้ยๆ ก็มีเช่นจังหวัดสงขลาและหาดใหญ่ และที่สูงมากเช่นที่จังหวัดยะลาตอนราธิวาส ทางตะวันออกพบที่น้ำตกพรู จังหวัดจันทบุรี ระยอง และชลบุรี หินแกรนิตแข็งและเหนียว ทนทานต่อการสึกกร่อนผุพังเนื้อหินเป็นดอกตูสวยงามนำมาทำหินประดับ ใช้ปูพื้นหรือฝังในผนังภายนอกอาคาร ใช้เป็นหินก่อสร้างและทำอนุสาวรีย์

8.2.2 หินบะซอลท์ เป็นหินพวก Extrusive Igneous Rock ลักษณะเนื้อแน่น ละเอียด ส่วนมากมีรูพรุน รูพรุนเนื่องจากก๊าซที่ปนอยู่ในลาวา (Lava) ที่เย็นตัวแข็งบนผิวโลกเกิดในลักษณะเป็น Dike หรือเป็นชั้น เนื่องมาจาก ลาวาอ่อนองทับซ้อนกันไป สืบต่อกันเกือบดำสนิท แร่ประกอบ หินที่สำคัญ คือแร่ Felspar, Pyroxene, Olivine พบมากที่จังหวัดจันทบุรี กาญจนบุรี บุรีรัมย์ ศรีสะเกษ แพร่ ลำปาง เป็นหินที่ทำพลอยดี มีราคา กระจก Corundum สีต่างๆ ได้แก่ ทับทิมสีแดง บุษราคัมไทยสีเหลือง ไพฑูริย์สีน้ำเงิน นอกจากนี้ก็มีพลอยราคาถูกพวกเทพาย โกเมน และนิลเป็นต้น หินบะซอลท์ใช้ทำถนนได้

8.2.3 หินปูน จัดเป็นหินชั้นชนิดหนึ่งที่มีเนื้อแน่นละเอียด ทึบ สีต่างๆ กัน มีขาว เทา แดง ดำ ประกอบไปด้วยแร่ Calcite ซึ่งทดสอบง่ายๆ โดยใช้กรดเกลือหดยคจะมีปฏิกิริยาเกิดเป็นฟองฟู ภูเขาหินปูนพบเห็นได้ง่าย มีลักษณะเป็นหน้าผาสูงชัน ยอดยกแหลม เป็นหินที่ระเบิดและย่อยง่าย จึงนิยมนำมาใช้ทำถนน และก่อสร้างบ้านเรือน ในประเทศไทยมีอยู่ทั่วไป

9. ตะกรันเหล็ก

9.1 ความเป็นมาของตะกรันเหล็ก

ตะกรันเหล็ก (Steel Slag) (ศรัณยา, 2544) เป็นสารประกอบที่ถูกขจัดออกมาในรูปของตะกอนโลหะ จากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ตะกรันเตาถลุง (Blast Furnace Slag) และ ตะกรันเตาหลอม (Steel Furnace Slag)

9.1.1 ตะกรันเตาถลุง เป็นผลพลอยได้มาจากอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก ซึ่งใช้แร่เหล็ก ถ่านโค้ก หินปูนและโดโลไมท์เป็นวัตถุดิบในการถลุงที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1650 องศาเซลเซียส ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่มีมากในก๊าซที่เกิดการสันดาป จะทำหน้าที่รีดิวซ์แร่เหล็ก เมื่อ

เหล็กถูกรีดิวซ์จะเคลื่อนลงมาส่วนล่างของเตาส่วน Fluxing Stone ซึ่งประกอบด้วยหิน ปูน และ โดโลไมท์จะสลายกลายเป็นแคลเซียมและแมกนีเซียมออกไซด์ ร่วมกับซิลิกาและอลูมินาของแร่ เหล็ก เกิดเป็นตะกรันรวมกันอยู่ในรูปหลอมละลายลอยอยู่บนเนื้อเหล็ก ชนิดของตะกรันเตาถลุง การ เย็นตัวมีผลกับคุณสมบัติของตะกรันเตาถลุง ที่อุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียส ตะกรันเตา ถลุงจะถูกส่งออกจากเตาหลอมและแยกประเภทต่างๆ ตามการเย็นตัวดังนี้

ก. Bank Slag เกิดจากการขนตะกรันเตาถลุงไปเก็บไว้ในถัง แล้วจึงเทตะกรัน เตาถลุงบนพื้นที่ที่มีขอบกั้น จนเกิดการเย็นตัวและแข็งตัว

ข. Ladle-to-pit Slag เกิดจากการเทตะกรันเตาถลุงที่หลอมเหลว ออกจากถัง ขนาดใหญ่ ไปในเบ้าหรือหลุมที่เตรียมไว้ โดยถังขนาดใหญ่มีความจุประมาณ 5-10 ตัน ถูขนส่ง โดยทางรถไฟเพื่อนำไปเทในหลุมที่มีขนาดกว้าง 50-90 ฟุต ยาว 350-1300 ฟุต ลึก 8-20 ฟุต

ค. Ball Slag เกิดจากการเย็นตัวของตะกรันเตาถลุง ในถังขนาดใหญ่ ในช่วง เวลา 14-24 ชั่วโมง จนกระทั่งมีรูปร่างค่อนข้างกลม และ Ball slag ยังต้องใช้เวลาเย็นตัวอีกเป็น อาทิตย์ เพื่อให้แกนกลางแข็งก่อนที่จะนำไปใช้งาน

ง. Direct-to-pit Slag เกิดจากการเทตะกรันเตาถลุงหลอมเหลวไปตามราง เพื่อ ไปยังเบ้าหลอม ที่อยู่ใกล้กับเบ้าหลอม และเร่งการเย็นตัวโดยฉีดน้ำไปยังผิวของตะกรันเตาถลุงที่ ร้อน

9.1.2 ตะกรันเตาหลอม เป็นผลพลอยได้ จากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้า โดยการ นำเหล็กดิบ เศษเหล็ก หินปูน (CaO) และโดโลไมท์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิต ใส่เข้าไปในเตาซึ่ง มี 2 แบบที่ใช้กันคือ การผลิตด้วยเตาออกซิเจน และการผลิตด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า

ก. การผลิตด้วยเตาออกซิเจน (Oxygen Process) เมื่อใส่วัตถุดิบต่างๆ แล้วเป่า ออกซิเจนความดันสูงเข้าไปในเตา ออกซิเจนจะเข้าไปรวมตัวกับสารมลทินต่างๆ เช่น คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส ฟอสฟอรัสและเหล็กบางส่วน ในรูปของออกไซด์หลอมเหลว และไปรวมตัวกับ หินปูนและโดโลไมท์ เกิดเป็นตะกรันเตาหลอมขึ้นโดยใช้เวลาประมาณ 30-40 นาที

ข. การผลิตด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Process) ไฟฟ้าจะทำให้เกิดความร้อนและการหลอมเหลว หินปูนจะหลอมปกคลุมน้ำเหล็กที่กำลังหลอมเหลว และควบคุมการกำจัดมลทินต่างๆ คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส จะค่อยๆถูกกำจัดออกไป อยู่ในรูปของตะกรันเตาหลอม โดยใช้เวลาประมาณ 40-50 นาที

ปัจจุบันการผลิตตะกรันเตาหลอมจากแหล่งผลิตที่จังหวัดชลบุรี และจังหวัดสระบุรี มีกำลังการผลิตประมาณ 400,000 ตันต่อปี และสามารถผลิตได้สูงถึง 1,200,000 ตันต่อปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตซึ่งขึ้นกับอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก สภาพเศรษฐกิจ

ตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของตะกรันเตาหลอม

สารประกอบ	% โดยน้ำหนัก
Calcium Oxide CaO	25-30
Iron Oxide FeO ₃	20-25
Silicon Dioxide SiO ₂	10-20
Magnesium Oxide MgO	5-10
Manganese Sesqui-Oxide MnO ₄	5-6
Aluminium Oxide Al ₂ O ₃	5-6

ที่มา: ศรีธนา (2544)

9.2 ขบวนการผลิตตะกรันเตาหลอมในประเทศไทย

ตะกรันเตาหลอม (Siam and Chonburi, n.d.) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้เพิ่มขึ้นจากอุตสาหกรรมการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าในการผลิตเหล็ก ในขณะการหลอมเศษเหล็กสแลกที่มีความหนาแน่นต่ำจะลอยอยู่ด้านบนของโลหะ แต่การแยกตัวนั้นไม่สามารถเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ จึงทำให้ยังมีโลหะปะปนอยู่ในสแลก ซึ่งสแลกที่หลอมเหลวจะถูกทำให้เย็นตัวลง แล้วจึงนำเข้ากระบวนการคัดแยกโลหะที่ปะปนอยู่เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

สแลกที่คัดแยกโลหะแล้วจะถูกนำเข้ากระบวนการบด และคัดแยกขนาดให้มีขนาด และมวลคละที่เหมาะสมตามความต้องการต่อไป

สแลกที่ถูกนำออกจากเตาหลอมเหล็กที่มีโลหะปนอยู่ ซึ่งถูกเรียกว่า “Skull” จะถูกนำไปย่อย เพื่อแยกโลหะออกจากสแลกโดยการทุบด้วยลูกเหล็ก ลูกเหล็กจะถูกยกขึ้น โดยใช้ระบบแม่เหล็กไฟฟ้าของรถเครน และจะปล่อยให้ตกลงมากระแทกกับก้อน Skull นี้

หลังจากนั้นสแลกจะถูกส่งเข้ากระบวนการ โดยใช้รถดั๊กดินขนาดใหญ่ ในระหว่างการส่งเข้ากระบวนการนี้อาจมีรถเครนติดแม่เหล็ก คัดแยกโลหะที่แตกออกจากสแลกจากขั้นตอนการทุบด้วยเหล็กด้วย

ในระหว่างกระบวนการการผลิต จะมีแม่เหล็กขนาดเล็กอีก 2-3 จุด เพื่อใช้คัดแยกโลหะออกจากสแลกในขณะบดและคัดขนาด ทั้งนี้โลหะที่ได้จะคัดขนาดเช่นกัน เพื่อนำไปใช้ในแต่ละส่วนการหลอมของโรงงานหลอมเหล็กต่อไป

ในกระบวนการผลิตสแลกขนาดตะแกรงคัดแยกขนาดของสแลกสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน และมาตรฐานการก่อสร้าง

การควบคุมผลกระทบทับกับสิ่งแวดล้อม เป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการผลิต ดังนั้นการควบคุมความชื้นของสแลกโดยใช้น้ำเป็นปัจจัยหลักนั้นสามารถช่วยลดปริมาณฝุ่นทั้งในขณะขนย้าย และระหว่างกระบวนการผลิตได้เป็นอย่างดี

9.3 มวลรวมสแลก

มวลรวมสแลก (Slag Aggregate) (สิทธิศักดิ์และสมักร, 2545) เป็นวัสดุประเภท Synthetic ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการหลอมเหล็ก แล้วถูกนำมาย่อยให้มีขนาดคละตามต้องการ แล้วนำไปใช้เป็นวัสดุมวลรวมในงานก่อสร้างเช่น ใช้เป็นวัสดุในชั้นรองพื้นทาง ชั้นพื้นทาง หรือ ชั้นผิวทาง

มวลรวมที่เกิดจากการสังเคราะห์ (Synthetic Aggregate) คือวัสดุที่ไม่ได้จากการทำเหมืองหินและส่วนมากมักเป็นวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเช่น Blast Furnace Slag ซึ่งมวลรวมเหล่านี้มักทำให้ Hot Mix Asphalt (HMA) มีลักษณะทางพฤติกรรมแบบพิเศษ และในบางครั้งก็ใช้เป็นองค์ประกอบ ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความต้านทานต่อการฉีกของ HMA

การศึกษาในอดีตที่เกี่ยวข้อง

1. การนำซูเปอร์เพฟไปใช้ในงานควบคุมคุณภาพในการก่อสร้าง

ใน ค.ศ. 1995 Anderson et al. กล่าวถึงการนำซูเปอร์เพฟไปใช้ในงานควบคุมคุณภาพในการก่อสร้าง ซึ่งจะเป็นการประเมินตั้งแต่การบดทับด้วยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ ในห้องปฏิบัติการและยังเปรียบเทียบกับวิธีมาร์แชลล์ ผลที่ได้พบว่าอย่างน้อยที่สุดเครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟเป็นเครื่องมือที่ใช้ควบคุมงานในสนามได้ดีพอๆกับเครื่องมือบดทับในวิธีของมาร์แชลล์ แต่การบดทับด้วยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟนั้นจะช่วยให้ได้ก้อนตัวอย่างที่มีความแตกต่างกันของแต่ละตัวอย่างลดน้อยลง หรือมีความแปรปรวนเกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่างน้อยกว่า

ใน ค.ศ. 1995 Harman et al. ได้กล่าวถึงการนำเครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟไปใช้ในการควบคุมคุณภาพงานในสนามเช่นเดียวกัน การใช้เครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟจะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเมื่อนำไปใช้ในการออกแบบคุณสมบัติทางด้านปริมาณและการควบคุมคุณภาพของงานในสนาม ขณะที่เครื่องบดทับด้วยวิธีมาร์แชลล์ไม่ได้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพนัก

3. การเปรียบเทียบวิธีการบดทับก้อนตัวอย่างโดยวิธีมาร์แชลล์กับการบดทับก้อนตัวอย่างโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ

ใน พ.ศ. 2542 ชยธินันท์ ได้กล่าวเปรียบเทียบวิธีการบดทับก้อนตัวอย่างโดยวิธีมาร์แชลล์กับการบดทับก้อนตัวอย่างโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีของระบบซูเปอร์เพฟ ว่าการบดทับก้อนตัวอย่างโดยวิธีมาร์แชลล์ยังมีข้อบกพร่องและขีดจำกัดอยู่หลายประการคือ

3.1 การบดทับก้อนตัวอย่าง โดยการกระแทกของก้อนน้ำหนักรุนแรง แตกต่างจากลักษณะการบดทับผิวทางในสนามโดยรอบอย่างสิ้นเชิง ส่งผลให้การออกแบบคลาดเคลื่อนได้

3.2 ความสม่ำเสมอในการบดทับค่อนข้างต่ำเนื่องจากใช้แรงงานคน จึงมีความคลาดเคลื่อนสูง

3.3 มีขีดจำกัดในขนาดของแบบหล่อ ทำให้ไม่สามารถออกแบบส่วนผสม โดยใช้วัสดุมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ได้

3.4 มีความแปรปรวนของผลการบดทับค่อนข้างสูง

4. การมีคุณภาพต่ำลงของมวลรวม

ใน พ.ศ. 2520 สนิท ได้ทำการศึกษาถึงการมีคุณภาพต่ำลงของมวลรวม (Degradation ของวัสดุ Soil Aggregate Type) โดยให้ความหมายของคำว่า “Degradation” หมายถึง การลดชั้น ลดชั้น การทำให้เลวลง หรือการทำให้ของมีคุณภาพต่ำลง

4.1 มูลเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมมีดังนี้

4.1.1 Disintegration หมายถึงการแยกตัวและการแตกย่อยของเม็ดวัสดุขณะทำงาน มี 2 ชนิดคือ

ก. Segregation คือการแยกตัวของขนาดวัสดุ มีการกระจายอยู่อย่างไม่เป็นสัดส่วน หรือการผสมไม่เข้ากัน ในลักษณะเช่นนี้จะทำให้คุณภาพของวัสดุไม่แน่นอน สม่ำเสมอ บางจุดอาจจะดีกว่าในขณะที่บางจุดอาจจะเลวกว่าเดิมมาก

ข. Mechanical Decomposition ในที่นี้หมายถึงการแตกย่อยหรือการแตกป่นของเม็ดวัสดุอันเนื่องมาจากการใช้พลังงาน (Energy) ในการบดทับ มากน้อยขึ้นกับความแข็งแรงของเม็ดวัสดุ และพลังงานที่ใช้

4.1.2 Process or Treatment หมายถึงขบวนการทำงาน ซึ่งถ้าไม่สม่ำเสมอในการปรุงแต่งวัสดุ เป็นต้นว่า ผสมน้ำเปียกไปบ้าง แห้งไปบ้าง หรือเป็นการให้พลังงานในการบดทับไม่สม่ำเสมอที่ดี ย่อมจะทำให้กำลังการรับน้ำหนักของวัสดุผิดแผกไปจากเดิม และอาจกลายเป็นจุดอ่อนภายหลังได้

4.1.3 Water อันได้แก่ น้ำฝน น้ำใต้ดิน และน้ำข้างทาง ได้เพิ่มปริมาณน้ำในโครงสร้าง ซึ่งจะทำให้กำลังการรับน้ำหนักและอายุการใช้งานลดลง

4.1.4 Chemical Decomposition ปฏิกิริยาทางเคมีบางอย่าง อาจจะทำให้วัสดุเสื่อมสลายได้ แต่โดยทั่วไป กว่าที่จะเกิดขึ้นได้ต้องใช้เวลาานานมาก

การ Disintegration เนื่องจากการบดทับ หรือ Mechanical Decomposition เนื่องจากการก่อสร้างทางโดยทั่วไปแล้ว การใช้เครื่องจักรและเครื่องมือในการบดทับส่วนใหญ่จะมีประสิทธิภาพสูง เมื่อบดทับแล้วจะทำให้มีการแตกป่นของวัสดุเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม และการแตกป่นที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่ทราบว่าจะทำให้วัสดุมีคุณภาพดีหรือเลวลง

6. ผลการทดลองผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนโดยใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวม

ใน พ.ศ. 2545 สิริศักดิ์ และ สมักร ได้ทำการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเตาหลอม เป็นวัสดุมวลรวมกับแอส ฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินชนิดต่างๆที่ใช้ในการก่อสร้างถนนอยู่ในปัจจุบัน(หินบะซอลท์ หินปูน และหินแกรนิต) เป็นวัสดุมวลรวม และใช้ AC 60/70 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยวิธีมาร์แชลล์ได้สรุปผลการทดลองดังนี้

6.1 แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวม จะให้ค่าเสถียรภาพสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนหรือหินแกรนิตเป็นวัสดุมวลรวม นั่นคือ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมจะมีความคงทนดีกว่า มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมทั่วไป

6.2 แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ตะกรันหลักเป็นวัสดุรวมจะให้ค่า VMA ที่สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนและหินแกรนิตในส่วนของหินบะซอลต์จะมีค่าใกล้เคียงกัน

6.3 แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ตะกรันหลักเป็นวัสดุรวมจะให้ค่า VFB และค่า Flow ที่สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูน หินแกรนิต และหินบะซอลต์

6.4 มวลรวมชนิดตะกรันหลักจะให้ค่าบ่งชี้ว่ามีความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid Resistance) ซึ่งใช้การทดลองหาค่า Polished Stone Value (PSV) ทั้งที่ทำการทดลองจากในห้องทดลองและการหาค่าที่ได้จากการใช้งานจริงในการทำแปลงทดสอบที่สูงกว่ามวลรวมชนิดอื่นๆ ดังนั้นการใช้ตะกรันหลักมาเป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต จึงเป็นการเพิ่มค่าความต้านทานต่อการลื่นไถลให้กับงานผิวทางประเภทนี้ด้วย

6.5 มวลรวมตะกรันหลัก เป็นมวลรวมที่นำไปใช้ในงานแอสฟัลต์คอนกรีตและงานผิวทางชนิดอื่นๆ ได้เป็นอย่างดีเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานให้นานขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุ

1.1 แอสฟัลต์เกรด 60/70 ที่ผ่านการทดสอบตามตารางผนวกที่ 5

1.2 มวลรวมใช้ 3 ชนิดที่มีคุณสมบัติผ่านการทดสอบตามตารางผนวกที่ 1 และมีอัตราส่วนขนาดกะของมวลรวมเป็นไปตามตารางผนวกที่ 2 และตารางผนวกที่ 3 ดังนี้

1.2.1 หินแกรนิต จากโรงโม่ บริษัทเหมืองวังไผ่ จำกัด จ. สงขลา

1.2.2 หินปูน จากโรงโม่หิน ศิลามหานคร จ. ชลบุรี

1.2.3 มวลรวมสแลก ซึ่งเป็นมวลรวมสแลกเตาหลอม จากโรงโม่บริษัท สยามสตีลมิลล์ เซอร์วิสเซส จำกัด จ.ชลบุรี

2. อุปกรณ์ทดสอบคุณภาพมวลรวม

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบมวลรวมหยาบ

2.1.1 อุปกรณ์การทดสอบความสึกหลอ (Abrasion Test) หรือ ความแข็งแรง โดยเครื่อง Los Angeles Abrasion ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 202/2518 หรือ AASHTO T96 -77 หรือ ASTM C 131-81

2.1.2 อุปกรณ์การทดลองหาขนาดกะของมวลรวมหยาบ (Gradation Test) ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 หรือ AASHTO T 85 หรือ ASTM C 136-84A

2.1.3 อุปกรณ์การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 207/2517 หรือ AASHTO T 85-77 หรือ ASTM C 127-84

2.1.4 อุปกรณ์การทดสอบความคงทนตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 213/2531 หรือ AASHTO T 104 -77 หรือ ASTM C 88-83

2.1.5 อุปกรณ์การทดสอบหาค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 210/2518

2.1.6 อุปกรณ์การทดสอบหาค่าดัชนีความยาว (Elongation Index) ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 211/2518

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบมวลรวมละเอียด

2.2.1 อุปกรณ์การทดสอบหาขนาดเม็ดของมวลรวมละเอียดแบบล้าง (Washed Sieve Analysis) ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 205/2517 หรือ AASHTO T 85-78 หรือ ASTM C 136-84A

2.2.2 อุปกรณ์การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 209/2517 หรือ AASHTO T 104-77 หรือ ASTM C 88-83

2.2.3 อุปกรณ์การทดสอบทรายผสม ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 203/2515 หรือ AASHTO T 176-73 หรือ ASTM D2419-74

3. อุปกรณ์ออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์

อุปกรณ์ออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517 (กรมทางหลวง, 2543) ประกอบด้วย

3.1 กระดาษเคลือบ หรือภาชนะโลหะที่มีขอบสูงประมาณ 7 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างขอบประมาณ 25 เซนติเมตร สำหรับใส่วัสดุมวลรวม

3.2 ภาชนะโลหะมีขอบสูงประมาณ 15 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างขอบประมาณ 30 เซนติเมตร สำหรับใช้ผสมวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์

3.3 เตาอบที่สามารถให้อุณหภูมิสูงถึง 250°C . สำหรับให้ความร้อนแก่มวลรวม

3.4 เตาแบบ Hot plate ที่สามารถให้อุณหภูมิได้สูงถึง 200°C . สำหรับให้ความร้อนแอสฟัลต์และเครื่องมือที่ใช้ในการบดทับ

3.5 เตาแก๊ส (Gas stove) ใช้สำหรับให้ความร้อนแก่แอสฟัลต์

3.6 หม้อโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 เซนติเมตร สำหรับใส่แอสฟัลต์เพื่อให้ความร้อน

3.7 ช้อนผสมหรือเกรียง (Mixing Spoon or Trowel) ใช้สำหรับผสมมวลรวมกับแอสฟัลต์

3.8 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) มีก้านเป็นโลหะ สามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง 200°C .

3.9 เครื่องชั่ง (Balance)สามารถชั่งน้ำหนักได้ถึง 5 กิโลกรัม มีความละเอียดถึง 1 กรัม สำหรับชั่งวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์

3.10 เครื่องชั่งสามารถชั่งน้ำหนักได้ถึง 2 กิโลกรัม มีความละเอียดถึง 0.1 กรัม สำหรับชั่งแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดทับแล้ว

3.11 อ่างต้มน้ำ (Boiling Water Bath) มีตะแกรงลวดสำหรับวางแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดทับแล้ว สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการ

3.12 แท่นรองการบดทับ (Compaction Pedestal) ประกอบด้วยฐานไม้ขนาด 20*20*45 เซนติเมตร มีแผ่นโลหะขนาดประมาณ 30*30*2.5 เซนติเมตร ติดตั้งอยู่ที่ขอบบนของฐานไม้ ฐานไม้ควรเป็นไม้ที่มีความแน่นแห้ง 0.65-0.80 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร แผ่นเหล็กต้องยึดแน่นกับฐานไม้

3.13 แบบสำหรับบดทับ (Compaction Mold) ประกอบด้วยแผ่นฐาน (Base Plate) แบบหล่อ (Mold) และ ปลอกขยาย (Collar Extension) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10.16 เซนติเมตร (4 นิ้ว) และมีความสูงประมาณ 7.62 เซนติเมตร (3 นิ้ว)

3.14 ค้อนบดทับ (Marshall Hammer) ประกอบด้วยแผ่นเหล็กกลมหนา 1.27 เซนติเมตร (1.27 นิ้ว) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.842 เซนติเมตร (3.875 นิ้ว) ติดกับก้านเหล็กซึ่งมีค้อนน้ำหนัก 5.45 กิโลกรัม (10 ปอนด์) สำหรับปล่อยน้ำหนักลงบนแผ่นเหล็กวงกลม ในขณะที่การบดทับให้มีระยะตกกระทบของค้อนน้ำหนักเท่ากับ 45.72 เซนติเมตร (18 นิ้ว)

3.15 ที่จับแบบ (Mold Holder) ใช้บังคับให้แบบสำหรับบดทับอยู่ในขณะทำการบดทับ

3.16 เครื่องดันตัวอย่าง (Extruder Jack)

3.17 ถุงมือกันความร้อนชนิดใยหิน (Asbestos)

3.18 ถุงมือกันความร้อนชนิดหนังหรือยาง สำหรับหยิบตัวอย่างที่แช่ในน้ำ

3.19 เครื่องทดสอบมาร์แชลล์ (Marshall Testing Machine) ใช้สำหรับทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) เป็นเครื่องกดที่สามารถรับแรงกดได้ไม่น้อยกว่า 3,000 กิโลกรัม (6,000 ปอนด์) เป็นแบบจุดด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า อัตราเร็วของมอเตอร์ที่หมุนจะต้องทำให้ฐานหรือท่อนกดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 เซนติเมตรต่อวินาที (ประมาณ 2 นิ้วต่อวินาที) เครื่องกดนี้จะต้องมี Proving ring อ่านค่าแรงกดหรือเครื่องกดอื่นใดที่มีคุณสมบัติเท่า

3.20 แบบทดลองเสถียรภาพ (Stability mold) สำหรับใส่ตัวอย่างทดลองหาค่าเสถียรภาพ

3.21 เครื่องวัดการไหล (Flow Meter) เพื่อหาค่าการไหล ซึ่งค่าการไหลคือค่าการเคลื่อนตัวทั้งหมดหรือค่าความเครียด (Total Movement or Strain) ในหน่วยของ 1/100 นิ้ว ซึ่งจะเกิดขึ้นในระหว่างไม่มีแรงและมีแรงสูงสุดในช่วงการทดสอบหาค่าเสถียรภาพ

4. อุปกรณ์บดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์บดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในห้องปฏิบัติการ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามวิธีการทดลองดังนี้

4.1 อุปกรณ์บดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ ตามมาตรฐานการทดลอง AASHTO T 245 หรือ ASTM D 1559 หรือ ทล.-ท. 604/2517 ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้มาร์แชลล์แฮมเมอร์ชนิดใช้แรงคน ที่สำนักวิศวกรรมและตรวจสอบ กรมทางหลวงเป็นอุปกรณ์หลัก คูภาพที่ 3

4.2 อุปกรณ์บดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ ตามมาตรฐานการทดลอง AASHTO TP4 ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องบดทับแบบไฮดรอลิกหรือ Servopac ที่สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวงเป็นอุปกรณ์หลัก คูภาพที่ 4

5. อุปกรณ์บดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในพื้นที่ก่อสร้าง

อุปกรณ์ที่ใช้บดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในพื้นที่ก่อสร้าง อ้างตามมาตรฐานที่ ทล.-ม. 408/2532 “มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete or Hot-Mix Asphalt)” ซึ่งจะกล่าวเฉพาะอุปกรณ์บดทับและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเท่านั้น (กรมทางหลวง, 2539) ซึ่งประกอบด้วย

5.1 เครื่องจักรบดทับ เครื่องจักรบดทับทุกชนิดจะต้องเป็นแบบขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง ต้องมีน้ำหนักและคุณสมบัติอื่นๆ ถูกต้องตามที่ได้ระบุไว้ในรายละเอียดที่กำหนดสำหรับเครื่องจักรบดทับแต่ละชนิด คูภาพที่ 5

5.1.1 รถบดล้อเหล็กชนิด 2 ล้อ ไม่น้อยกว่า 1 คัน หรือ รถบดล้อเหล็กชนิด 2 ล้อ ไม่น้อยกว่า 2 คัน ในกรณีที่ไม่มียานพาหนะบดสันสะเทือน

5.1.2 รบดล้อย่าง ไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง

5.1.3 รบดสั้นสะเทือน 1 ครั้ง

6. อุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดกะของมวลรวม

อุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดกะของมวลรวม ประกอบด้วยอุปกรณ์สำหรับแยกแอสฟัลต์และมวลรวมออกจากตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตหลังบดทับ และอุปกรณ์หาขนาดเม็ดมวลรวมทั้งก่อนบดทับและหลังบดทับ ดังนี้

6.1 อุปกรณ์การสกัดแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแยกแอสฟัลต์และมวลรวมออกจากตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตโดยอ้างอิงวิธีการตามมาตรฐานการ ทดลอง ASTM Designation : D 2172 , AASHTO : T164 (Standard Test Methods For Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures) และ Experiment 13.1 : Extraction Tests on Asphalt Concrete โดยวิธีการสกัดออกด้วยเครื่อง Centrifugal (The Centrifugal Extraction Method) ใน Portland Cement and Asphalt Concretes โดย Thomas D. Larson (Thomas, 1963) ประกอบด้วย

6.1.1 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบ 5-Kg balance, ชั่งได้ละเอียดถึง 0.1 g

6.1.2 เตาอบ แผ่นให้ความร้อน

6.1.3 เครื่อง Centrifugal อาจเป็นแบบใช้ไฟฟ้าหรือแบบใช้แรงคนหมุนก็ได้ ใน การศึกษานี้ใช้แบบแรงคนหมุน คูภาพที่ 6

6.1.4 ตัวกระทำ (Reagent) หรือสารทำละลาย (Solvent) ได้แก่ Ammonium Carbonate Solution, Methylene Chloride, 1,1,1-Trichloroethane, Trichloroethylene และ Terpene-Extractant ในที่นี้ใช้ Trichloroethylene

6.1.5 Fused silica dish

6.1.6 Bottles and graduated cylinder

6.1.7 กระดาษกรองวงแหวน (Filter rings)

6.2 อุปกรณ์หาขนาดเม็ดของวัสดุ เป็นอุปกรณ์หาขนาดเม็ดมวลรวมทั้งก่อนบดทับ และหลังบดทับโดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดลอง AASHO : T 27, ASTM : C136 และการทดลองที่ ทล.-ท.204/2516 กรมทางหลวง คูภาพที่ 7 ประกอบด้วย

6.2.1 ตะแกรงร่อน (Sieve) มีขนาดช่องผ่านจากใหญ่ลงไปหาเล็กดังนี้ ขนาด 1 นิ้ว, $\frac{3}{4}$ นิ้ว, $\frac{1}{2}$ นิ้ว, $\frac{3}{8}$ นิ้ว, เบอร์ 4, เบอร์ 8, เบอร์ 16, เบอร์ 30, เบอร์ 50, เบอร์ 100, เบอร์ 200, และถาดรอง (Pan) พร้อมเครื่องเขย่า

6.2.2 เครื่องชั่งสามารถชั่งได้ละเอียด 0.2% ของตัวอย่างทั้งหมด

6.2.3 แปรงลวดทองเหลือง แปรงพลาสติก และแปรงขน สำหรับทำความสะอาดตะแกรง

6.2.4 อุปกรณ์อื่นๆ ที่จำเป็น เช่น เครื่องแบ่งตัวอย่าง เตาอบ กะละมังสำหรับใส่ตัวอย่าง ที่ล้างบนตะแกรงเพื่อชั่งน้ำหนัก



ภาพที่ 3 อุปกรณ์บดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์



ภาพที่ 4 อุปกรณ์บดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ



ภาพที่ 5 เครื่องจักรบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในพื้นที่ก่อสร้าง



ภาพที่ 6 อุปกรณ์การสกัดแอสฟัลต์คอนกรีต (Centrifugal)



ภาพที่ 7 อุปกรณ์หาขนาดเม็ดของมวลรวม

วิธีการ

1. จำนวนตัวอย่าง

1.1 การออกแบบส่วนผสม แอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์

หินปูน	15 ตัวอย่าง (5*3)
หินแกรนิต	15 ตัวอย่าง (5*3)
มวลรวมสแลก	15 ตัวอย่าง (5*3)

1.2 การหาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมเนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ด้วยวิธีมาร์แชลล์

หินปูน	5 ตัวอย่าง
หินแกรนิต	5 ตัวอย่าง
มวลรวมสแลก	6 ตัวอย่าง

1.3 การหาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยวิธีชูเปอร์เฟระดับ 1 มีขั้นตอนหลักอยู่ 2 ขั้นตอน คือ

1.3.1 ขั้นตอนการทดลองหาจำนวนรอบในการบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีเพื่อให้ได้ก้อนตัวอย่างที่มีช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์

หินปูน	15 ตัวอย่าง (5*3)
หินแกรนิต	12 ตัวอย่าง (4*3)
มวลรวมสแลก	12 ตัวอย่าง (4*3)

1.3.2 ขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมเนื่องจากการบดทับด้วยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับที่ได้ในขั้นตอน 1.3.1

หินปูน	6 ตัวอย่าง
หินแกรนิต	5 ตัวอย่าง
มวลรวมสแลก	5 ตัวอย่าง

1.4 การหาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมเนื่องจากการบดทับด้วยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง โดยเก็บตัวอย่างก่อนบดอัด ที่โรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต และเก็บตัวอย่างหลังบดอัด บริเวณพื้นที่ก่อสร้าง โดยเก็บตัวอย่างเฉพาะมวลรวมหินปูนเท่านั้น ดังนี้

1.4.1 ที่ความแน่นของการบดทับในพื้นที่ก่อสร้างเป็น 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง จำนวน 24 ตัวอย่าง ($5*4 + 4*1$)

1.4.2 ที่ความแน่นของการบดทับในพื้นที่ก่อสร้างเป็น 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง จำนวน 16 ตัวอย่าง ($4*4$)

1.4.3 ที่ความแน่นของการบดทับในพื้นที่ก่อสร้างเป็น 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง จำนวน 22 ตัวอย่าง ($4*3 + 5*2$)

2. การตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวม

การตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวมนั้นแยกออกเป็นการตรวจสอบมวลรวมหยาบ และการตรวจสอบมวลรวมละเอียด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การตรวจสอบมวลรวมหยาบ

2.1.1 ขนาดผลทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล. – ท. 204/ 2516 หรือ AASHTO T85 หรือ ASTM C136 - 84A ขนาดผลของมวลรวมหยาบจะทำการทดสอบหาขนาดเม็ดของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่านมาหรือที่ค้างตะแกรงขนาดต่างๆ กับมวลรวมทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = \frac{R}{T} * 100 \quad (8)$$

เมื่อ	P	=	เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก
	R	=	มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด
	T	=	มวลของตัวอย่างทั้งหมด

2.1.2 ความถ่วงจำเพาะ ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล. – ท. 207/2517 หรือ ASHTO T 85–77 หรือ ASTM C127-84 ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมชนิดเม็ดหยาบ (ขนาดโตกว่าเบอร์ 4) แบบทั้งก้อน (Bulk specific Gravity) แบบปรากฏ (Apparent specific Gravity) และปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ (Water Absorption) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Bulk specific gravity} = \frac{B}{B - C} \quad (9)$$

$$\text{Apparent specific gravity} = \frac{A}{A - C} \quad (10)$$

$$\text{Water Absorption} = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (11)$$

เมื่อ	A	=	มวลของมวลรวมอบแห้งชั่งในอากาศ มีหน่วยเป็นกรัม
	B	=	มวลของมวลรวมผิวแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม
	C	=	มวลของมวลรวมชั่งในน้ำ มีหน่วยเป็นกรัม

2.1.3 ความคงทน ทำการทดสอบตามการทดลองตามการทดลองที่ ทล. – ท. 213/ 2531 หรือ AASHTO T 104-77 หรือ ASTM C 88–83 โดยการหาความคงทนของมวลรวมหยาบ เพื่อหาความต้านทานต่อการแตก หรือการแยกของมวลรวมในสารละลายอิมัลชัน โซเดียมซัลเฟตหรือแมกนีเซียมซัลเฟต เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการช่วยพิจารณาค่าความคงทนของมวลรวมที่ถูกกระทำโดยดินฟ้าอากาศ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Actual loss} = \text{Mass of test fraction before test} - \text{Mass of test fraction after test} \quad (12)$$

$$\text{Actual percentage loss} = \frac{\text{Actual loss}}{\text{Mass of test fraction before test}} * 100 \quad (13)$$

$$\text{Weighted percentage loss} = \frac{\text{Actual percentage loss} * \text{Retained of original sample}}{100} \quad (14)$$

$$\text{Total percentage loss} = \text{Summation of weight percentage loss} \quad (15)$$

2.1.4 ดัชนีความแบน ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล. – ท. 210/2518 เป็นการหา มวลของมวลรวมที่มีความหนาของด้านแบนที่น้อยกว่า 3/5 เท่าของขนาดเฉลี่ยของมวลรวมนั้น โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับมวลของมวลรวมที่นำมาทดสอบสำหรับข้อกำหนดของทางหลวง ค่าดัชนีความแบนต้องมีค่าไม่มากกว่าร้อยละ 30 ซึ่งค่าดัชนีความแบนจะคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Flakiness Index} = \frac{X}{X + Y} * 100 \quad (16)$$

เมื่อ X = น้ำหนักมวลรวมของตัวอย่างส่วนที่ลอดผ่านช่องวัดความหนาทุกช่อง มีหน่วยเป็นกรัม

Y = น้ำหนักมวลรวมของตัวอย่างส่วนที่ค้างช่องวัดความหนาทุกช่องมี หน่วยเป็นกรัม

2.1.5 ดัชนีความยาว ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล.-ท. 211/2518 เป็นการหา มวลของมวลรวมที่มีความยาวของส่วนยาวมากกว่า 1.8 เท่าของความหนาเฉลี่ยของมวลรวม โดยคิด เป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับมวลที่นำมาทำการทดสอบ สำหรับข้อกำหนดของกรมทางหลวง ค่าดัชนี ความยาวต้องมีค่าไม่มากกว่าร้อยละ 30 ซึ่งค่าดัชนีความยาวจะคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Elongation Index} = \frac{Y}{X + Y} * 100 \quad (17)$$

เมื่อ X = น้ำหนักของมวลรวมของตัวอย่างส่วนที่ลอดช่องวัดความยาวทุกช่อง มี หน่วยเป็นกรัม

Y = น้ำหนักของมวลรวมของตัวอย่างส่วนที่ค้างช่องวัดความยาวทุกช่องมี หน่วยเป็นกรัม

2.1.6 ความสึกหรอของมวลรวมหยาบโดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ทำการทดสอบตามการทดลองตามที่ ทล.-ท. 202/2515 หรือ AASHTO T 96-77 หรือ ASTM C131-81 เป็นการทดสอบหาค่าการสึกหรอของมวลรวมหยาบว่ามีความต้านทานต่อการขัดสีและการกระแทกของ เครื่องจักรบดทับความแน่นดีหรือไม่ โดยกรมทางหลวงยอมให้ค่าการสึกหรอของมวลรวมชั้นผิวทางไม่เกินร้อยละ 40 ในการคำนวณค่าการสึกหรอสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Abrasion} = \frac{(A - B)}{A} * 100 \quad (18)$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดลอง มีหน่วยเป็นกรัม
B = น้ำหนักตัวอย่างที่ค้างตะแกรงเบอร์ 12 มีหน่วยเป็นกรัม

2.2 การตรวจสอบมวลรวมละเอียด

2.2.1 ขนาดคละ ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล.-ท. 205/2517 หรือ AASHTO T 85-78 หรือ ASTM C 136-84A ขนาดคละของมวลรวมละเอียด จะทำการทดสอบหาขนาดเม็ดของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่านมา หรือที่ค้างตะแกรงขนาดต่างๆ กับมวลรวมทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$P = \frac{R}{T} * 100 \quad (19)$$

เมื่อ P = เปอร์เซนต์ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก
R = มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด มีหน่วยเป็นกรัม
T = มวลของตัวอย่างทั้งหมด มีหน่วยเป็นกรัม

2.2.2 ความถ่วงจำเพาะ ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล.-ท. 209/2518 หรือ AASHTO T 104-77 หรือ ASTM C 88-83 เป็นการหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดที่มีอนุภาคละเอียดกว่าเบอร์ 4 ทั้งแบบทั้งก้อน (Bulk specific gravity) แบบปรากฏ (Apparent specific gravity) และหาปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้ออนุภาคของมวลรวม (Water absorption) การทดสอบ

จะต้องทำการแยกมวลรวมละเอียดนี้ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ล้างตะแกรงเบอร์ 200 กับส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วทำการคำนวณจากสมการดังนี้

ก. Bulk specific gravity

$$GB(t^{\circ}C) = \frac{B * dt}{A + W_2 - W_1} \quad (20)$$

$$GB(30^{\circ}C) = \frac{GB(t^{\circ}C)}{0.9957} \quad (21)$$

ข. Apparent specific gravity

$$GA(t^{\circ}C) = \frac{B * dt}{B + W_2 - W_1} \quad (22)$$

$$GA(30^{\circ}C) = \frac{GA(t^{\circ}C)}{0.9957} \quad (23)$$

$$\text{ค. Water absorption} = \frac{(A - B)}{B} * 100 \quad (24)$$

เมื่อ A = น้ำหนักของมวลรวมที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม
 B = น้ำหนักของมวลรวมที่อบแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม
 dt = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิทดลอง มีหน่วยเป็นกรัม/มิลลิลิตร
 W1 = น้ำหนักของฟลิกโนมิเตอร์ + มวลรวม + น้ำ มีหน่วยเป็นกรัม
 W2 = น้ำหนักของฟลิกโนมิเตอร์ + น้ำ มีหน่วยเป็นกรัม

สำหรับวัสดุมวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 นั้น ไม่สามารถหาค่าความถ่วงจำเพาะแบบทั้งก้อนได้ เพราะไม่สามารถทำให้ผิวนอกของมวลรวมแห้ง โดยที่ยังมีความชื้นอยู่ภายในได้ (เนื่อง จากมวลรวมนั้นมีความเป็นพลาสติกมาก)

2.2.3 ค่าทรายสมมูล ทำการทดสอบตามการทดลองที่ ทล.-ท. 203/2515 หรือ AASHTO T 176-73 หรือ ASTM D 2419-74 เป็นการทดสอบเพื่อหาสัดส่วนระหว่างฝุ่นหรือวัสดุประเภทดินเหนียวกับมวลรวมเม็ดหยาบจำพวกกรวดหรือทรายที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งได้กำหนดค่าต่ำสุดของทรายที่ใช้ ต้องมีค่าต้องไม่น้อยกว่า 50 % โดยหาได้จากสมการ

$$SE = \frac{\text{Sand reading}}{\text{Clay reading}} * 100 \quad (25)$$

เมื่อ SE = ทรายสมมูล (Sand Equivalent)

3. การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ (วัชรินทร์, 2544 และ Asphalt Institute, 1969) เป็นวิธีการหาค่าคุณสมบัติต่างๆของแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ เสถียรภาพ การไหล ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ หน่วยน้ำหนัก ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม ค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ ในส่วนผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์กับมวลรวมชนิดต่างๆ เพื่อนำไปหาค่าร้อยละของแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อกำหนดเป็นสูตรส่วนผสมใช้งาน (Job-Mix Formula) ซึ่งกระบวนการในการทดสอบโดยวิธีมาร์แชลล์ มีดังต่อไปนี้

3.1 วิธีการทดสอบผสมและการบดทับ

3.1.1 เตรียมมวลรวม โดยตัวอย่างมวลรวมจะต้องผ่านการทดสอบและเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด จากนั้นนำมวลรวมที่ผสมกันได้ขนาดตามต้องการ จำนวน 1,200 กรัม ยกเว้นมวลรวมสเกล 1,400 กรัม ไปอบในเตาอบ หรือใส่กระโถนเผาบนเตาแก๊ส ให้ได้อุณหภูมิประมาณ 180°C.

3.1.2 นำแบบหล่อและมาร์แชลล์แฮมเมอร์ไปให้ความร้อน เพื่อความสะดวกในการบดทับซึ่งจะไม่ทำให้แอสฟัลต์ติดแบบหล่อและมาร์แชลล์แฮมเมอร์

3.1.3 ให้อุณหภูมิแก่แอสฟัลต์ซีเมนต์ ประมาณ 150°C. โดยเตาแก๊ส

3.1.4 เมื่อมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ มีอุณหภูมิตามต้องการแล้ว นำมาผสมกัน โดยในการผสมกันแต่ละครั้ง จะต้องผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 เปอร์เซ็นต์ ของ น้ำหนักของมวลรวม ซึ่งในแต่ละคำร้อยละจะใช้ทำตัวอย่าง 3 ก้อน การผสมให้ใช้เกียงกวาน มวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้เข้ากันในขณะที่มีอุณหภูมิสูง 150°ซ.

3.1.5 นำแบบบดทับ มาประกอบเข้าที่แท่นรองการบดทับ

3.1.6 ใส่ตัวอย่างที่ผสมแล้วในข้อ 3.1.4 ลงในแบบบดทับ ใช้เกรียงแซะตัวอย่าง 15 ครั้งในขณะที่ส่วนผสมยังคงมีอุณหภูมิ 150°ซ. เพื่อให้มวลรวมแน่นและจัดเรียงตัวกันให้ดีใน เบื้องต้น

3.1.7 บดทับตัวอย่างด้วยมาร์แชลล์แฮมเมอร์โดยการยกตุ้มน้ำหนัก 10 ปอนด์ แล้ว ปล่อยโดยมีระยะตกกระทบของตุ้มน้ำหนักเท่ากับ 18 นิ้ว ตกกระทบบนแผ่นเหล็กวงกลมจำนวน 75 ครั้ง

3.1.8 กลับด้านก้อนตัวอย่าง บดทับเหมือนข้อ 3.1.7 อีก 75 ครั้ง

3.1.9 หลังจากการบดทับเสร็จแล้วนำแบบหล่อซึ่งบรรจุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ยังร้อนอยู่ ออกจากแท่นรองการบดทับปล่อยให้ตัวอย่างเย็นตัวในอากาศรอจนกระทั่งก้อนตัวอย่างไม่เกิดการ เปลี่ยนรูปซึ่งเป็นผลมาจากการเอาตัวอย่างออกจากแบบหล่อ หากต้องการให้ตัวอย่างเย็นเร็วขึ้นอาจ ใช้พัดลม

3.1.10 เอาตัวอย่างออกจากแบบหล่อ โดยเครื่องดันตัวอย่าง วางไว้บนที่ราบและเรียบ จนกว่าจะพร้อมทดสอบต่อไป

3.2 วิธีการทดสอบหาความแน่น

3.2.1 ชั่งตัวอย่างในอากาศ บันทึกเป็นค่า d

3.2.2 นำตัวอย่างแช่ในน้ำธรรมดา 5 นาที แล้วเช็ดผิวให้แห้ง ชั่งในอากาศ บันทึกเป็นค่า d_1

3.2.3 นำตัวอย่างชั่งในน้ำ บันทึกเป็นค่า e

3.2.4 คำนวณหาค่าความแน่นจากสมการที่ (2)

3.3 วิธีการทดสอบหาค่าเสถียรภาพและการไหล

3.3.1 นำตัวอย่างที่หาความหนาแน่นเสร็จแล้วไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60°C . เป็นเวลา 30 นาทีในอ่างต้มน้ำ

3.3.2 เช็ดผิวตัวอย่างให้แห้ง นำไปใส่ในแบบที่ใช้สำหรับทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Testing Head)

3.3.3 นำแบบที่บรรจุตัวอย่างแล้ว ไปวางบนเครื่องกดหาค่าเสถียรภาพ

3.3.4 เดินเครื่องให้แบบเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับท่อนกดจนกระทั่งเข็มของเกว็ด (Dial Indicator) ที่ติดกับวงแหวนวัดแรง (Proving Ring) ชยับตัวให้หยุดเครื่องตั้งเข็มเกว็ดให้อยู่ที่เลขศูนย์ (0)

3.3.5 นำเครื่องวัดการไหล (Flow meter) วางบนแกนสำหรับการทดสอบหาค่าการไหล (Marked Guide Rod) ตั้งเข็มของเครื่องวัดการไหลให้อยู่ที่เลขศูนย์ (0)

3.3.6 เดินเครื่องกดตัวอย่างจนตัวอย่างเสียหาย จุดที่เสียหายคือค่าอ่านน้ำหนักสูงสุด (The Maximum Load Reading) เมื่อปรับแก้ด้วยค่าปรับแก้จะได้ค่าเสถียรภาพมาร์แชลล์ (Marshall Stability Value) พร้อมกันนั้นอ่านค่าเกว็ดของเครื่องวัดการไหล และจดบันทึกเป็นค่าการไหล (The Flow Value) ซึ่งจะมีหน่วยเป็น $1/100$ นิ้ว ตัวอย่างเช่นถ้าตัวอย่างเสียรูปไป 0.15 นิ้ว ค่าการไหลจะเป็น 15

3.4 วิธีการคำนวณหาค่าคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต

3.4.1 หาค่าแอสฟัลต์ประสิทธิภาพโดยน้ำหนักของส่วนผสม จากสมการที่ (1)

3.4.2 หาค่าความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน จากสมการที่ (2)

3.4.3 หาค่าร้อยละของปริมาตรของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ จากสมการที่ (3)

3.4.4 หาค่าร้อยละของปริมาตรของมวลรวม จากสมการที่ (4)

3.4.5 หาค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ จากสมการที่ (5)

3.4.6 หาค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม จากสมการที่ (6)

3.4.7 หาค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ จากสมการที่ (7)

3.5 วิธีการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ นำค่าที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 3.4 ในแต่ละส่วนผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของมวลรวม ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าเสถียรภาพกับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม (Stability vs. Asphalt Content)

3.5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม (Flow vs. Asphalt Content)

3.5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศกับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม (Percent Air Voids vs. Asphalt Content)

3.5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมกับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม (Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) vs. Asphalt Content)

3.5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์กับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม (Percent Voids Filled with Asphalt (VFA) vs. Asphalt Content)

3.5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าหน่วยน้ำหนักของส่วนผสมกับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม (Unit Weight of Total Mix vs. Asphalt Content)

3.6 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างๆที่ทำการทดลอง กับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวมเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งในการศึกษานี้เลือกค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวมที่ 4 เปอร์เซนต์ ช่องว่างอากาศ (Asphalt Content Providing 4 Percent Air Voids) ซึ่งเป็นค่ากลางของข้อกำหนด

4. วิธีการหาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมเนื่องจากการบดทับด้วยวิธีมาร์แชลล์

เมื่อเลือกสัดส่วนผสมของมวลรวมกับปริมาณแอสฟัลต์คอนกรีตแล้ว ต่อไปเป็นขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมเนื่องจากการบดทับด้วยวิธีมาร์แชลล์ โดยใช้ Manual Marshall Hammer มีขั้นตอนดังนี้

4.1 เตรียมมวลรวมตามสัดส่วนผสมที่ออกแบบ จำนวน 5 ตัวอย่าง น้ำหนักตัวอย่างละ 1,200 กรัม ยกเว้นมวลรวมสแลก 1,400 กรัม

4.2 นำมวลรวมแต่ละตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอน 4.1 มาทำการหาขนาดผลก่อนการบดทับตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง” คำนวณหาขนาดเม็ดของมวลรวมได้จากสมการที่ (8)

4.3 นำมวลรวมแต่ละตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนที่ 4.2 มาทำการผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เลือกในขั้นตอนการออกแบบมาดำเนินการผสมและบดทับตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517 “วิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์”

4.4 นำตัวอย่างแต่ละตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนบดทับ มาทดลองหาความแน่น เสถียรภาพ และการไหลตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517 “วิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์”

4.5 ตรวจสอบผลการทดลองแต่ละตัวอย่างว่าผ่านข้อกำหนดที่วางไว้หรือไม่ หากไม่ผ่านต้องทำการทดลองตัวอย่างเพิ่มเพื่อทดแทนตัวอย่างที่ไม่ผ่านก่อนไปทำการสกัดออกโดยวิธีการสกัดออกด้วยเครื่อง Centrifugal

4.6 นำตัวอย่างที่ผ่านข้อกำหนด มาทำการทดลองการสกัดแอสฟัลต์คอนกรีต ตามขั้นตอนที่ 7 ซึ่งจะกล่าวถึงในในภายหลัง

4.7 นำมวลรวมแต่ละตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอน 4.6 มาทำการหาขนาดผลหลังการบดทับตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 “วิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง” คำนวณหาขนาดเม็ดของมวลรวมได้จากสมการที่ (8)

4.8 นำค่าขนาดผลที่ทดลองได้ในขั้นตอนที่ 4.2 และ 4.7 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมแต่ละก้อนตัวอย่าง

5. การหาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมจากการบดทับด้วยวิธีซูเปอร์เพพระดับ 1

เป็นการหาการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของมวลรวมเนื่องจากการบดทับด้วยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี โดยใช้ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตตามสูตรส่วนผสมใช้งาน ในขั้นตอนที่ 3 มีรายละเอียดดังนี้

5.1 ขั้นตอนทดลองหาจำนวนรอบบดทับที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาณช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์ เป็นขั้นตอนทดลองบดทับ (Trial and Error) เพื่อหาจำนวนรอบของการบดทับด้วยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี ให้ได้ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ

เปรียบเทียบกับกรบดทับ โดยวิธีมาร์แชลล์ด้วยมาร์เล็แฮมเมอร์มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างโดยเครื่องมือ Servopac Gyrotory Compactor (กรมทางหลวง, 2544) ดังนี้

5.1.1 เตรียมวัสดุมวลรวมตามสัดส่วนผสมที่เลือกไว้ในขั้นตอนที่ 3 จำนวน 3 ตัวอย่าง นำหนักตัวอย่างละ 1,200 กรัม ยกเว้นมวลรวมสแลก 1,400 กรัม

5.1.2 ให้ความร้อนกับมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ จนได้อุณหภูมิ 150°C .

5.1.3 นำมวลรวมที่อุณหภูมิได้ตามต้องการแล้ว มาทำเป็นปล้องคล้ายภูเขาไฟแล้วเทแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามปริมาณสูตรผสมที่ออกแบบ ตามขั้นตอนที่ 3 ทำการผสมให้เข้ากันโดยให้แอสฟัลต์เคลือบมวลรวมให้ทั่ว

5.1.4 นำส่วนผสมที่ได้ใส่ถาด แล้วนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

5.1.5 ทำซ้ำขั้นตอนเดิมตั้งแต่ต้น เพื่อเตรียมตัวอย่างก่อนต่อไป ระยะห่างในการเตรียมแต่ละก้อนจะห่างกันประมาณ 20 นาที ซึ่งจะพอดีกับการทำงานของเครื่อง ในการบดทับแต่ละครั้ง

5.1.6 เมื่อได้เวลาที่กำหนด นำส่วนผสมไปตรวจสอบว่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ใช้บดทับหรือไม่ (150°C) ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าหรือต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้บดทับให้นำส่วนผสมไปเข้าเตาอบอีกเตาอบเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิของส่วนผสมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการบดทับ (เข้าเตาอบเป็นเวลาประมาณ 30 นาที) ขณะเดียวกันให้นำแบบหล่อเข้าเตาอบเพื่อให้ได้อุณหภูมิในการบดทับ (150°C) เช่นเดียวกัน

5.1.7 เมื่อถึงเวลาให้นำแบบหล่อ และตัวอย่างออกจากเตาอบ ใส่กระดาษรองลงไปบนแบบหล่อ ใส่ตัวอย่าง แล้วตามด้วยกระดาษรองวางทับด้านบน นำไปติดตั้งที่เครื่องพร้อมที่จะบดทับ

5.1.8 ก่อนเดินเครื่อง กดปุ่ม “MOULD LOWER” และ “MOULD LOCK” ตามลำดับ ใส่ค่าต่างๆที่จำเป็นในโปรแกรม ตรวจสอบค่าแรงดันและมุมในการบดอัด เท่ากับ 600 K pa

$\pm 18 \text{ Kpa}$ และ $1.25^\circ \pm 0.02^\circ$ ตามลำดับ โดยกำหนดค่า Total Gyration เท่ากับ 100 รอบ (ซึ่งค่า 100 รอบนี้จะเป็นค่ากลางๆ สำหรับการออกแบบด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ)แล้วจึงเริ่มเดินเครื่องดูรายละเอียดใน “คู่มือการเตรียมตัวอย่างโดยเครื่องมือ Servopac Gyrotory Compaction” (กรมทางหลวง, 2544)

5.1.9 หลังจากบดทับเสร็จแล้ว ดันตัวอย่างออกจากแบบหล่อ ลอกกระดาษรองออกจากตัวอย่าง และทำสัญลักษณ์ที่ก้อนตัวอย่างให้เรียบร้อย จากนั้นทำการบดทับตัวอย่างก้อนต่อไป

5.1.10 ทำการบดทับก้อนตัวอย่างอีก 2 ตัวอย่าง โดยกำหนดค่า Total Gyration เท่ากับ 100 รอบ

5.1.11 นำตัวอย่างที่ได้ในขั้นตอนที่ 5.1.9 และ 9.1.10 ไปทดสอบหาค่าความแน่น ตามขั้นตอนที่ 3.4 จะได้ค่าเฉลี่ยปริมาณช่องว่างอากาศ ที่จำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ

5.1.12 เตรียมตัวอย่างตามขั้นตอน 5.1.1 ถึงขั้นตอน 5.1.9 โดยในขั้นตอนที่ 5.1.8 ให้กำหนดค่า Total Gyration เป็นค่า 25, 50, 75, 125, 150, 175 และ 200 รอบหรือแล้วแต่ความเหมาะสม โดยบดทับค่าละ 3 ตัวอย่าง รวม 12 ตัวอย่าง (ประมาณ 4 ค่า) ทั้งนี้ควรกำหนดค่าจำนวนรอบของการบดทับที่สามารถเขียนกราฟหาค่าจำนวนรอบของการบดทับที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์ได้

5.1.13 นำตัวอย่างที่ได้ในขั้นตอนที่ 5.1.12 ไปทดสอบหาค่าความแน่นตามขั้นตอนที่ 3.4 จะได้ค่าปริมาณช่องว่างอากาศ ที่แต่ละจำนวนรอบของการบดทับ (Number of Gyration)

5.1.14 นำค่าจำนวนรอบบดทับ และปริมาณช่องว่างอากาศ แต่ละชุดตัวอย่างไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างอากาศกับจำนวนรอบบดทับ จะได้ค่าจำนวนรอบบดทับที่ปริมาณช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์

5.2 ขั้นตอนการหาการเปลี่ยนแปลงขนาดคละเนื่องจากการบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาณช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์

5.2.1 เตรียมวัสดุมวลรวมตามสัดส่วนผสม ตามสูตรผสมที่ออกแบบตามขั้นตอนที่ 3 จำนวน 5 ตัวอย่าง น้ำหนักตัวอย่างละ 1,200 กรัม ยกเว้นมวลรวมสแลก 1,400 กรัม

5.2.2 นำมวลรวมแต่ละตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอน 5.2.2 มาทำการหาขนาดคละก่อนการบดทับ ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 คำนวณหาขนาดเม็ดของวัสดุได้จากสมการที่ 3

5.2.3 ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 5.1.2 ถึง 5.1.9 ยกเว้นขั้นตอน 5.1.8 ให้กำหนดค่า Total Gyrations เท่ากับค่าจำนวนรอบของการบดทับที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาณช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซนต์ ตามขั้นตอน 5.1.14

5.2.4 นำตัวอย่างแต่ละตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนบดทับตามขั้นตอน 5.2.3 มาทดลองหาความแน่น เสถียรภาพ และการไหล ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517

5.2.5 ตรวจสอบผลการทดลองในขั้นตอน 5.2.4 แต่ละตัวอย่างว่าผ่านข้อกำหนดที่วางไว้หรือไม่ หากไม่ผ่านข้อกำหนดต้องทำการทดลองตัวอย่างเพิ่ม เพื่อทดแทนตัวอย่างที่ไม่ผ่านก่อนไปทำการทดลองการสกัดแอสฟัลต์คอนกรีต

5.2.6 นำตัวอย่างที่ผ่านข้อกำหนด มาทำการทดลองการสกัดแอสฟัลต์คอนกรีตตามขั้นตอนที่ 7

5.2.7 นำมวลรวมแต่ละตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอน 5.2.5 มาทำการหาขนาดคละหลังการบดทับตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 คำนวณหาขนาดเม็ดของมวลรวมได้จากสมการที่ 3

5.2.8 นำค่าขนาดคละที่ทดลองได้ในขั้นตอนที่ 5.2.2 และ 5.2.7 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมแต่ละก้อนตัวอย่างเนื่องจากการบดทับด้วยเครื่องบดทับแบบโจราทอรี

6. การเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมเนื่องจากการบดทับด้วยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง

เป็นการเก็บตัวอย่างในพื้นที่ก่อสร้าง ณ สายทางที่ใช้แอสฟัลต์คอนกรีตเป็นผิวจราจร โดยเก็บตัวอย่างเฉพาะชั้นผิวทาง ซึ่งแต่ละชุดตัวอย่างประกอบด้วยตัวอย่าง ก่อนการบดทับ โดยเก็บตัวอย่างที่โรงงานผสม และตัวอย่างหลังบดทับ โดยเก็บตัวอย่างในพื้นที่ก่อสร้าง

6.1 การเก็บตัวอย่างก่อนบดทับด้วยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง มีขั้นตอนดังนี้

6.1.1 เมื่อได้รับคำขอ (Order) จากพื้นที่ก่อสร้างโรงงานผสม จะทำการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ตามสูตรผสมที่ออกแบบโดยมีวิธีการตามมาตรฐานที่ ทล.-ม. 408/ 2532 (กรมทางหลวง, 2539) เก็บส่วนผสมไว้ที่ยังพักส่วนผสม

6.1.2 รถบรรทุก รับส่วนผสมจากยังพักส่วนผสมตามจำนวนที่ต้องการโดยน้ำหนักบรรทุกไม่เกินข้อกำหนด

6.1.3 รถบรรทุกเคลื่อนที่มาที่จุดตรวจ เจ้าหน้าที่วัดอุณหภูมิแอสฟัลต์คอนกรีตในรถตักแอสฟัลต์คอนกรีตใส่ถังเหล็ก ประมาณ 4,000 กรัม จดหมายเลขประจำรถหรือป้ายทะเบียน

6.1.4 แบ่งแอสฟัลต์คอนกรีต สำหรับบดทับโดยวิธีมาร์แชลล์ จำนวน 2 ตัวอย่าง น้ำหนักตัวอย่างละประมาณ 1,300 กรัม และอีก 1 ตัวอย่าง สำหรับการทดลองการสกัดด้วยเครื่อง Centrifugal ประมาณ 1,300 กรัม

6.1.5 นำตัวอย่างที่ผ่านการบดทับโดยวิธีมาร์แชลล์ทั้ง 2 ตัวอย่าง ในขั้นตอน 6.1.4 ไปทดสอบหาความแน่นตามขั้นตอน 3.2 ทดสอบหาค่าเสถียรภาพและการไหลตามขั้นตอน 3.3 และคำนวณหาค่าคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตตามขั้นตอน 3.4

6.1.6 นำตัวอย่างอีก 1 ตัวอย่างที่เตรียมไว้ในขั้นตอน 6.1.4 ทำการทดลองการสกัดแอสฟัลต์คอนกรีต ในขั้นตอนที่ 7 ซึ่งจะกล่าวถึงในภายหลัง

6.1.7 นำตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอน 6.1.6 ทำการทดสอบหาขนาดคล่องก่อนการบดทับ ด้วยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 คำนวณหาขนาดเม็ดของมวลรวมได้จากสมการที่ 3

6.2 การเก็บตัวอย่างหลังบดทับด้วยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง มีขั้นตอนดังนี้

6.2.1 เมื่อทราบหมายเลขรถหรือป้ายทะเบียนตามขั้นตอนที่ 6.1.3 รอจนถึงคิวที่รถบรรทุกคันนั้นเทแอสฟัลต์คอนกรีตใส่กระบะบรรจุส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตของเครื่องปู และเครื่องปูเคลื่อนที่ไปข้างหน้า กำหนดตำแหน่งจุดเริ่ม บันทึกเวลา รอจนกระทั่งรถบรรทุกคันต่อไปเทแอสฟัลต์คอนกรีตใส่กระบะบรรจุส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และเครื่องปูเคลื่อนที่ไปข้างหน้า กำหนดตำแหน่งจุดสิ้นสุด บันทึกเวลา

6.2.2 เครื่องจักรบดทับเข้าบดทับตามมาตรฐานที่ทล.-ม. 408/2532 (กรมทางหลวง, 2539) บันทึกเวลาที่เครื่องจักรบดทับเริ่มเข้าบดทับ บันทึกประเภทของเครื่องจักรบดทับ บันทึกจำนวนเที่ยวบดทับ และเวลาสิ้นสุดการบดทับ ร่างภาพบริเวณพื้นที่ที่กำหนด กำหนดตำแหน่งพื้นที่การปูเช่น จุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด ช่องจราจร เพื่อกำหนดตำแหน่งเจาะตัวอย่างในภายหลัง

6.2.3 กำหนดตำแหน่งเจาะตัวอย่างประมาณ 2 จุดภายในพื้นที่ที่กำหนด

6.2.4 เจาะตัวอย่างด้วยเครื่องเจาะตัวอย่างที่สามารถใช้เจาะตัวอย่าง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรได้อย่างเรียบร้อย จำนวน 2 ตัวอย่าง

6.2.5 นำตัวอย่างมาทำความสะอาด ตรวจสอบความหนา วัดเส้นผ่านศูนย์กลาง

6.2.6 ทดสอบหาความแน่นตามขั้นตอน 3.2 และคำนวณหาค่าคุณสมบัติของแอส ฟัลต์คอนกรีตตามขั้นตอน 3.4

6.2.7 นำตัวอย่างในขั้นตอน 6.2.6 ใส่ถาดโลหะ แล้วนำเข้าเตาอบให้ความร้อนเพื่อให้ตัวอย่างอ่อนตัว นำถาดออกจากเตาอบแยกแอสฟัลต์คอนกรีตบริเวณรอยตัดทิ้งไป ส่วนที่เหลือเกลี่ยให้แยกตัวเป็นชั้นเล็กๆ

6.2.8 นำตัวอย่างในขั้นตอน 6.2.7 ทำการทดลองการสกัดแอสฟัลต์คอนกรีตตามขั้นตอนที่ 7

6.2.9 นำตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอน 6.2.8 ทำการทดสอบหาขนาดผลของมวลรวมหลังการบดทับ ด้วยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง ตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 กำหนดหาขนาดเม็ดของวัสดุได้จากสมการที่ 3

7. การทดลองการสกัดแอสฟัลต์คอนกรีต

โดยทั่วไปแล้วประเภทของอุปกรณ์การทดสอบการสกัด เปลี่ยนแปลงไปตามกรรมวิธีการทดสอบการสกัด และประเภทของการศึกษา บนข้อกำหนดของแต่ละพื้นที่ แต่ในที่นี้ใช้ตามข้อกำหนดของ AASHTO T 164-97 โดยใช้วิธีการสกัดด้วยเครื่องสกัด ที่ใช้กำลังเหวี่ยงออกจากศูนย์กลาง (Thomas, 1963) ซึ่งกรมทางหลวง ประเทศไทยใช้อยู่ โดยมีรายละเอียดวิธีปฏิบัติดังนี้

7.1 ชั่งน้ำหนักภาชนะกลม (Bowl) พร้อมกระดาศกรองวงแหวน (Filter Ring) ซึ่งตัดแต่งขอบกระดาศให้พอดีกับขอบภาชนะกลม บันทึกเป็น Weight of Bowl + Filter Ring

7.2 นำก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเข้าเตาอบหรือบนแผ่นให้ความร้อนจนกระทั่งก้อนตัวอย่างสามารถแบ่งออกเป็นชิ้นเล็กๆได้

7.3 นำตัวอย่างที่เย็นแล้วใส่ลงในภาชนะกลม

7.4 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างพร้อมภาชนะกลมและกระดาศกรอง บันทึกเป็น Weigh of Bowl + Filter Ring + Sample

7.5 หักน้ำหนักในข้อ 7.4 ด้วยน้ำหนักในข้อ 7.1 จะได้น้ำหนักของตัวอย่าง เป็น Weight of Sample บันทึกเป็น W_1

7.6 ติดตั้งภาชนะกลมในเครื่อง Centrifuge เอาเครื่องอุด (Stopper) ออก เติมน้ำแล้วทำให้ท่วมตัวอย่าง รอจนสารตัวทำละลายย่อยสลาย (Digest) แอสฟัลต์ออกจากมวลรวม (ทิ้งไว้

ประมาณ 1 ชั่วโมง) วางกระดาษกรองบนขอบของภาชนะกลม วางแผ่นโลหะที่มีรูสำหรับใส่เดือย
ทับกระดาษกรองให้เข้าที่แล้วขันลงให้แน่น ปิดฝาครอบล็อกให้แน่น

7.7 วางขวดเปล่าหรือขันโลหะที่ทนต่อสารทำละลายและความร้อนไว้ที่รางทางออก (Outlet Spout) เพื่อรองรับสารตัวทำละลายที่ผสมกับมวลขนาดเล็กที่ออกมาจากเครื่อง Centrifuge

7.8 เริ่มเดินเครื่องและเพิ่มความเร็วจนสารตัวทำละลายไหลออกมา หมุนเครื่องต่อเนื่องจนกระทั่งเข้าใกล้ความเร็วสูงสุด และสารตัวทำละลายหยุดไหลออกมา

7.9 หยุดเครื่อง เติมสารตัวทำละลายลงไปประมาณ 200 มิลลิลิตร

7.10 ทำขั้นตอนที่ 7.8 และ 7.9 ซ้ำไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง (โดยสังเกตสีของสารละลายที่ไหลออกมาซึ่งจะเป็นสีเหลืองซีดๆ)

7.11 เมื่อเห็นว่าสีของสารตัวทำละลายเป็นสีเหลืองซีดๆ แสดงว่าสารตัวทำละลายได้สกัดเอาแอสฟัลต์ออกจากมวลรวมดีแล้ว ก็ให้หยุดขั้นตอนที่ 7.10 เปิดฝารอบออก เอาแผ่นโลหะทับกระดาษออก นำภาชนะกลมพร้อมมวลรวมที่ผ่านการสกัดแล้ว (Extracted Aggregate) และกระดาษกรองออกจากเครื่อง นำเข้าเตาอบอบด้วยอุณหภูมิ 140 °ฟ. จนน้ำหนักคงที่ เอาออกจากเตาอบ ชั่งน้ำหนักจะได้ Weight of Bowl + Filter Ring + Weight of extracted Aggregate

7.12 หักน้ำหนักในข้อ 7.11 ด้วยน้ำหนักในข้อ 7.1 จะได้ Weight of Extracted Aggregate บันทึกเป็น W_2

7.13 นำภาชนะที่ใส่สารละลายที่ผ่านการสกัดแล้วในข้อ 7.7 มาอุ่นให้เป็นไอ และจุดให้ลุกเป็นไฟด้วยเตาถ่านจนส่วนที่เหลือตกตะกอนเป็นก้อน รอจนเย็น ชั่งน้ำหนัก เมื่อหักน้ำหนักที่ได้ด้วยน้ำหนักภาชนะจะได้ Weight of Ash in Extract บันทึกเป็น W_3

7.14 กำหนดหาเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ในส่วนผสมได้โดยสมการ

$$\% \text{Bitumen Content by Weight of Aggregate} = \frac{W_1 * W_2 * W_3}{W_2 + W_3} * 100 \quad (26)$$

7.15 ค่าที่ได้ในข้อ 7.14 นั้นต้องทำการปรับแก้ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการสกัด ด้วยค่าปรับแก้ (Correction) ที่ได้มาจากขั้นตอนการ Calibrate เครื่อง Centrifugal จึงจะได้ Percent Bitumen Content by Correction ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมอยู่ในก้อนตัวอย่างที่แท้จริง

ในการ Calibrate เครื่อง Centrifugal นั้น วิธีปฏิบัติเหมือนที่กล่าวมาแล้วข้างต้นตั้งแต่ข้อ 7.1 ถึง 7.14 เพียงแต่ในขั้นตอนการ Calibrate เครื่อง Centrifugal จะรู้น้ำหนักของมวลรวม และเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ก่อนผ่านการทดสอบการสกัด และเมื่อมาถึงในขั้นตอนข้อ 7.14 เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์จะขาดหายไปในช่วงขั้นตอนการสกัด เมื่อห้กเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ที่รู้ค่าแล้วด้วยเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ที่ได้หลังจากผ่านวิธีการสกัดจะได้ค่าปรับแก้ (Correction) ที่นำมาใช้ในขั้นตอนข้อ 7.15 ซึ่งในขั้นตอนการ Calibrate เครื่อง Centrifugal นั้นจะใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง

7.16 น้ำหนักของมวลรวม (Weight of Aggregate) ที่แท้จริงได้จากการรวมน้ำหนักในข้อ 7.12 และ 7.13 บันทึกเป็น ($W_2 + W_3$)

7.17 ค่าน้ำหนักในข้อ 7.16 นำไปใช้ในขั้นตอนการหาขนาดกะของมวลรวมต่อไป

ผลและวิจารณ์

1. การตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวม

ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวมทั้งสามชนิดได้แก่หินปูนแสดงผลในตารางผนวกที่ 6 และ 7 หินแกรนิตแสดงผลในตารางผนวกที่ 38 และ 39 และมวลรวมสเลกแสดงผลในตารางผนวกที่ 52 และ 53 ซึ่งมวลรวมทั้งสามชนิดผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมทางหลวงดังแสดงในตารางผนวกที่ 1, 2 และ 3 ทุกประการ

2. การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ โดยใช้หินปูน หินแกรนิต และสเลกเป็นมวลรวมได้ผลการทดลองดังนี้

2.1 แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม เมื่อได้สัดส่วนผสมของมวลรวมหินปูนดังแสดงในตารางผนวกที่ 6 แล้ว ได้เตรียมตัวอย่างมวลรวมเพื่อทดลองผสมเป็นชุดๆละสามตัวอย่าง มีน้ำหนักตัวอย่างละ 1,200 กรัม ซึ่งทั้งหมดคือชุดรวม 12 ตัวอย่าง โดยใช้ปริมาณแอสฟัลต์เป็น 4.50, 5.00, 5.50 และ 6.00 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวม เมื่อผสมและบดทับตามวิธีมาร์แชลล์แล้ว ทำการวัดคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง ได้แก่วความหนาแน่น ช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม เสถียรภาพ การไหล และสัดส่วนระหว่างปริมาตรของแอสฟัลต์ ประสิทธิภาพต่อช่องว่างของมวลรวมหินที่บดอัด แสดงผลการทดลองในตารางผนวกที่ 8 นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Density vs. %AC, Stability vs. %AC, %Air voids vs. %AC, % VFA vs. %AC, Flow vs. %AC และ %VMA vs. %AC ดังแสดงในภาพผนวกที่ 2 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแต่ละค่าแล้วได้เลือกสูตรผสมใช้งานโดยใช้ปริมาณแอสฟัลต์เป็น 5.03 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวม ความหนาแน่น 2.436 กรัมต่อมิลลิกรัม ค่าเสถียรภาพ 2,170 ปอนด์ ค่าการไหล 12.0 (0.12") ช่องว่างอากาศ 4.0 เปอร์เซ็นต์ ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม 14.9 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 10 และนำผลที่ได้ไปทำการทดลองหา Strength Index ได้ผลการทดลอง Soaked/Unsoaked เป็น 75.4 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 9 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ผ่านเกณฑ์กำหนดของกรมทางหลวงดังแสดงในตารางผนวกที่ 4 ทุกประการ

2.2 แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวม เมื่อได้สัดส่วนผสมของมวลรวม หินแกรนิต ดังแสดงตารางผนวกที่ 38 แล้ว ได้เตรียมตัวอย่างมวลรวมเพื่อทดลองผสมเป็นชุดๆ ละ สามตัวอย่าง มีน้ำหนักตัวอย่างละ 1,200 กรัม ซึ่งทั้งหมดสี่ชุดรวม 12 ตัวอย่าง โดยใช้ปริมาณ แอสฟัลต์เป็น 4.50, 5.00, 5.50, และ 6.00 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวม เมื่อผสมและบดทับตาม วิธีมาร์แชลล์แล้ว ทำการวัดคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง ได้แก่ ความหนาแน่น ช่องว่าง อากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม เสถียรภาพ การไหล และสัดส่วนระหว่างปริมาตรของ แอสฟัลต์ประสิทธิผลต่อช่องว่างของมวลรวมหินที่บดอัด แสดงผลการทดลองในตารางผนวกที่ 40 นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Density vs. %AC, Stability vs. %AC, %Air voids vs. %AC, % VFA vs. %AC, Flow vs. %AC และ %VMA vs. %AC ดังแสดงใน ภาพผนวกที่ 5 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแต่ละค่าแล้ว ได้เลือกสูตรผสมใช้งานโดยใช้ปริมาณ แอสฟัลต์เป็น 5.09 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวม ความหนาแน่น 2.351 กรัมต่อมิลลิกรัม ค่า เสถียรภาพ 2,870 ปอนด์ ค่าการไหล 12.2 (0.122") ช่องว่างอากาศ 4.0 เปอร์เซ็นต์ ช่องว่างระหว่าง อนุภาคของมวลรวม 14.5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 42 และนำผลที่ได้ไปทำการทดลอง หา Strength Index ได้ผลการทดลอง Soaked/Unsoaked เป็น 81.5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตาราง ผนวกที่ 41 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ผ่านเกณฑ์กำหนดของกรมทางหลวงดังแสดงในตารางผนวกที่ 4 ทุกประการ

2.3 แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สแลกเป็นมวลรวม เมื่อได้สัดส่วนผสมของมวลรวมสแลกดัง แสดงตารางผนวกที่ 52 แล้ว ได้เตรียมตัวอย่างมวลรวมเพื่อทดลองผสมเป็นชุดๆ ละสามตัวอย่าง มี น้ำหนักตัวอย่างละ 1,400 กรัม ทั้งหมดสี่ชุดรวม 12 ตัวอย่าง โดยใช้ปริมาณแอสฟัลต์เป็น 4.50, 5.00, 5.50 และ 6.00 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวม เมื่อผสมและบดทับตามวิธีมาร์แชลล์แล้ว ทำการวัด คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง ได้แก่ ความหนาแน่น ช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่าง อนุภาคของมวลรวม เสถียรภาพ การไหล และสัดส่วนระหว่างปริมาตรของแอสฟัลต์ประสิทธิผล ต่อช่องว่างของมวลรวมหินที่บดอัด แสดงผลการทดลองในตารางผนวกที่ 54 นำผลการทดลองที่ ได้มาเขียนแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Density vs. %AC, Stability vs. %AC, %Air voids vs. %AC, % VFA vs. %AC, Flow vs. %AC และ %VMA vs. %AC ดังแสดงในภาพผนวกที่ 8 เมื่อ พิจารณาความสัมพันธ์ของแต่ละค่าแล้ว ได้เลือกสูตรผสมใช้งานโดยใช้ปริมาณแอสฟัลต์เป็น 5.1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักมวลรวม ความหนาแน่น 2.854 กรัมต่อมิลลิกรัม ค่าเสถียรภาพ 4,060 ปอนด์ ค่าการไหล 12.2 (0.122") ช่องว่างอากาศ 4.0 เปอร์เซ็นต์ ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม 14.5

เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 56 และนำผลที่ได้ไปทำการทดลองหา Strength Index ได้ผลการทดลอง Soaked/Unsoaked เป็น 81.5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 55 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ผ่านเกณฑ์กำหนดของกรมทางหลวงดังแสดงในตารางผนวกที่ 4 ทุกประการ

จากผลการทดลองที่ได้ในขั้นตอนออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์จะได้สูตรผสมใช้งานของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมทั้งสามชนิด โดยใช้ช่องว่างอากาศเป็น 4.0 เปอร์เซ็นต์

3. การเปลี่ยนแปลงขนาดกะของมวลรวมเนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ ด้วยวิธีมาร์แชลล์

3.1 หาขนาดกะของมวลรวมก่อนบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ เตรียมตัวอย่างตามสูตรผสมใช้งานของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูน หินแกรนิต และ สแลกเป็นมวลรวม โดยเตรียมตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างต่อมวลรวมแต่ละชนิดเป็นอย่างน้อย ทำการทดลองตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 เพื่อหาขนาดกะของมวลรวมก่อนบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ สำหรับมวลรวมหินปูนแสดงผลการทดลองในตารางผนวกที่ 11 สำหรับมวลรวมหินแกรนิตแสดงผลการทดลองในตารางผนวกที่ 43 และสำหรับมวลรวมสแลกแสดงผลการทดลองในตารางผนวกที่ 57 ซึ่งตัวอย่างแต่ละตัวอย่างของแต่ละชนิดมวลรวมผ่านข้อกำหนดบน (Upper Limit) และข้อกำหนดล่าง (Lower Limit) ของขนาดกะของแต่ละชนิดของมวลรวม

3.2 วัดคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง ทำการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตและบดทับก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐานการทดลอง ทล.-ท. 604/2517 บดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์จำนวน 75 ครั้งต่อด้าน ทำการวัดคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง ได้แก่ความหนาแน่น ช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม เสถียรภาพ การไหล และสัดส่วนระหว่างปริมาตรของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพต่อช่องว่างของมวลรวมหินที่บดอัด โดยมวลรวมหินปูนดูผลการทดลองในตารางผนวกที่ 12 มวลรวมหินแกรนิตดูผลการทดลองในตารางผนวกที่ 44 มวลรวมสแลกดูผลการทดลองในตารางผนวกที่ 58 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ผ่านเกณฑ์กำหนดของสูตรผสมใช้งานทุกประการ

3.3 ทดลองการสกัด นำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพแล้วไปทดลองการสกัด ซึ่งเป็นขั้นตอนแยกมวลรวมออกจากวัสดุเชื่อมประสานคือแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยเครื่อง

Centrifugal ตามข้อกำหนดของ AASHTO T 164-97 คู่มือการทดลองของมวลรวมหินปูนในตาราง
ผนวกที่ 13 มวลรวมหินแกรนิตในตารางผนวกที่ 45 และมวลรวมสแลกในตารางผนวกที่ 59 ซึ่ง
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้หลังจากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนจากปริมาณซีเมนต์ในขั้นตอนการ
ผสมเพียงเล็กน้อย

3.4 หาขนาดคละของมวลรวมหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ นำมวลรวมที่ผ่าน
ขั้นตอนการสกัดของตัวอย่างแต่ละก้อนมาทำการทดลองตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท.
204/2516 เพื่อหาขนาดคละของมวลรวมหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ คู่มือการทดลอง
ตัวอย่างมวลรวมหินปูนในตารางผนวกที่ 14 คู่มือการทดลองตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิตในตาราง
ผนวกที่ 46 คู่มือการทดลองตัวอย่างมวลรวมสแลกในตารางผนวกที่ 60

3.5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมเนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์
แฮมเมอร์ด้วยจำนวนครั้งการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน หลังจากทดลองจนได้ขนาดคละของมวล
รวมทั้งก่อนบดทับและหลังบดทับของตัวอย่างแต่ละก้อนแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบการ
เปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมเนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ด้วยจำนวนครั้งการ
บดทับ 75 ครั้งต่อด้าน คู่มือการเปรียบเทียบของมวลรวมหินปูนในตารางที่ 5 และ ภาพที่ 8 จะได้
การเปลี่ยนแปลงขนาดคละเฉลี่ยตะแกรงช่องลอด $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", #4, #8, #16, #30, #50, #100 และ
#200 เป็น 0.00, 1.53, 2.31, 4.39, 4.57, 3.80, 3.45, 3.27, 2.81 และ 2.21 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็น
ได้ว่าค่าเฉลี่ยขนาดคละของมวลรวมหลังการบดทับ ช่องลอด #8, #16, #30, #50, และ #200 เกิน
ข้อกำหนดบนของมวลรวมหินปูนแต่ยังอยู่ในข้อกำหนดของกรมทางหลวง มวลรวมหินแกรนิตใน
ตารางที่ 6 และ ภาพที่ 9 จะได้การเปลี่ยนแปลงขนาดคละเฉลี่ยตะแกรงช่องลอด $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", #4,
#8, #16, #30, #50, #100 และ #200 เป็น 0.00, 1.14, 1.83, 3.65, 3.44, 2.58, 1.77, 1.52, 1.11 และ
0.67 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยขนาดคละของมวลรวมหลังการบดทับ ช่องลอด #16
เกินข้อกำหนดบนของมวลรวมหินแกรนิตแต่ยังอยู่ในข้อกำหนดของกรมทางหลวง มวลรวมสแลก
ในตารางที่ 7 และ ภาพที่ 10 จะได้การเปลี่ยนแปลงขนาดคละเฉลี่ยตะแกรงช่องลอด $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ",
#4, #8, #16, #30, #50, #100 และ #200 เป็น 0.00, 0.79, 1.33, 2.98, 2.57, 1.78, 1.39, 1.32, 1.06 และ
0.55 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยขนาดคละของมวลรวมหลังการบดทับทุกช่องลอด
อยู่ในข้อกำหนดบนของมวลรวมสแลกและข้อกำหนดของกรมทางหลวง

4. การเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบโจราทอรีด้วย

วิธีซูเปอร์เพล

4.1 หาจำนวนรอบของการบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีที่ให้ปริมาณช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซนต์ มวลรวมหินปูนได้จำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ คูผลการทดลองในตารางผนวกที่ 15 และภาพผนวกที่ 3 มวลรวมหินแกรนิตได้จำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ คูผลการทดลองในตารางผนวกที่ 47 และภาพผนวกที่ 6 มวลรวมสแลกได้จำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ คูผลการทดลองในตารางผนวกที่ 61 และภาพผนวกที่ 9

4.2 การหาขนาดกะของมวลรวมก่อนบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี เตรียมตัวอย่างมวลรวมชนิดละ 5 ตัวอย่างเป็นอย่างน้อย ทำการทดลองตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 เพื่อหาขนาดกะของมวลรวมก่อนบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี สำหรับมวลรวมหินปูนแสดงผลการทดลองในตารางผนวกที่ 16 สำหรับมวลรวมหินแกรนิตแสดงผลการทดลองในตารางผนวกที่ 48 และสำหรับมวลรวมสแลกแสดงผลการทดลองในตารางผนวกที่ 62 ซึ่งตัวอย่างแต่ละตัวอย่างของแต่ละชนิดมวลรวมผ่านข้อกำหนดบน และข้อกำหนดล่าง ของขนาดกะของแต่ละชนิดของมวลรวม

4.3 วัดคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง ทำการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตและบดทับก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐานการทดลอง AASHTO TP4 โดยกำหนดจำนวนรอบของการบดทับสำหรับมวลรวมหินปูนเป็น 100 รอบ มวลรวมหินแกรนิตเป็น 55 รอบ และมวลรวมสแลกเป็น 135 รอบ หลังจากบดทับแล้วนำก้อนตัวอย่างแต่ละตัวอย่างมาหาค่าทางกายภาพเช่น ความหนาแน่น ค่าเสถียรภาพ ค่าการไหล ช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม คูผลการทดลองของมวลรวมหินปูนในตารางผนวกที่ 17 มวลรวมหินแกรนิตในตารางผนวกที่ 49 มวลรวมสแลกในตารางผนวกที่ 63 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ผ่านเกณฑ์กำหนดของสูตรผสมใช้งาน

4.4 ทดลองการสกัด นำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพแล้วไปทดลองการสกัด คูผลการทดลองของมวลรวมหินปูนในตารางผนวกที่ 18 มวลรวมหินแกรนิตในตารางผนวกที่ 50 และมวลรวมสแลกในตารางผนวกที่ 64 ซึ่งปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้หลังจากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนจากปริมาณซีเมนต์ในขั้นตอนการผสมเพียงเล็กน้อย

4.5 การหาขนาดคละของมวลรวมหลังบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี นำมวลรวมที่ผ่านขั้นตอนการสกัดของตัวอย่างแต่ละก้อนมาทำการทดลองตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 เพื่อหาขนาดคละของมวลรวมหลังบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี คูผลการทดลองตัวอย่างมวลรวมหินปูนในตารางผนวกที่ 19 คูผลการทดลองตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิตในตารางผนวกที่ 51 คูผลการทดลองตัวอย่างมวลรวมสแลกในตารางผนวกที่ 65

4.6 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมเนื่องจากการบดทับเครื่องบดทับแบบไจราทอรีสำหรับช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์ สำหรับมวลรวมหินปูนด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ คูผลการทดลองในตารางที่ 8 และ ภาพที่ 11 จะได้การเปลี่ยนแปลงขนาดคละเฉลี่ยตะแกรงช่องลอด $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", #4, #8, #16, #30, #50, #100 และ #200 เป็น 0.00, 0.87, 2.25, 2.83, 2.93, 2.44, 2.65, 2.83, 2.80 และ 2.44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยขนาดคละของมวลรวมหลังการบดทับ ช่องลอด #200 เกินข้อกำหนดบนของมวลรวมหินปูนแต่ยังอยู่ในข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหินแกรนิตเป็นมวลรวมด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ คูผลการทดลองในตารางที่ 9 และ ภาพที่ 12 จะได้การเปลี่ยนแปลงขนาดคละเฉลี่ยตะแกรงช่องลอด $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", #4, #8, #16, #30, #50, #100 และ #200 เป็น 0.00, 0.27, 1.41, 1.97, 2.05, 1.74, 1.51, 1.52, 1.13 และ 0.40 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยขนาดคละของมวลรวมหลังการบดทับทุกช่องลอดอยู่ในข้อกำหนดบนของมวลรวมหินแกรนิตและข้อกำหนดของกรมทางหลวง สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สแลกเป็นมวลรวมด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ คูผลการทดลองในตารางที่ 10 และ ภาพที่ 13 จะได้การเปลี่ยนแปลงขนาดคละเฉลี่ยตะแกรงช่องลอด $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", #4, #8, #16, #30, #50, #100 และ #200 เป็น 0.00, 0.13, 0.84, 1.51, 0.92, 1.04, 1.03, 0.79, 0.67 และ 0.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยขนาดคละของมวลรวมหลังการบดทับทุกช่องลอดอยู่ในข้อกำหนดบนของมวลรวมสแลกและข้อกำหนดของกรมทางหลวง

5. การเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับ

ในพื้นที่ก่อสร้าง

การหาค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการทดลองของโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และในพื้นที่ก่อสร้าง ตามมาตรฐานที่ ทล.-ม. 408/2532 ในการศึกษานี้จะทำการทดลองเฉพาะมวลรวม

หินปูนเท่านั้น โดยทำการทดลองการเปลี่ยนแปลงขนาดคละเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างด้วย 98, 97 และ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

5.1 การจัดเตรียมตัวอย่างก่อนบดทับ เป็นการจัดเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตในห้องทดลอง โดยเก็บตัวอย่างส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจากรถบรรทุกที่โรงงานผสมก่อนขนส่งออกยังสถานที่ก่อสร้าง

5.1.1 วัดคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง เมื่อเก็บตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตจากรถบรรทุกมาแล้วแบ่งส่วนผสมออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งสำหรับทดลองตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517 จำนวน 2 ก้อนตัวอย่างต่อ 1 ชุดตัวอย่าง เพื่อหาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตว่าเป็นไปตามข้อกำหนดตามสูตรผสมใช้งานหรือไม่ แสดงผลการทดลองสำหรับ 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลองในตารางผนวกที่ 20 สำหรับ 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลองในตารางผนวกที่ 26 สำหรับ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลองในตารางผนวกที่ 32

5.1.2 ทดลองการสกัด นำแอสฟัลต์คอนกรีตอีกส่วนหนึ่งนำมาทดสอบการสกัด ตามข้อกำหนดของ AASHTO T 164-97 เพื่อหาอัตราส่วนผสมระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวมที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์คอนกรีต คูผลการทดลองการสกัดสำหรับ 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ในตารางผนวกที่ 21 สำหรับ 97 เปอร์เซ็นต์ของการบดทับในห้องทดลองในตารางผนวกที่ 27 สำหรับ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลองในตารางผนวกที่ 33

5.1.3 การหาขนาดคละของมวลรวมก่อนบดทับ นำมวลรวมที่ได้หลังจากการทดสอบการสกัด มาทดลองหาขนาดคละของมวลรวมก่อนบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 ได้ผลการทดสอบสำหรับ 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ในตารางผนวกที่ 22 สำหรับ 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง ในตารางผนวกที่ 28 สำหรับ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง ในตารางผนวกที่ 34 ซึ่งตัวอย่างแต่ละตัวอย่างของแต่ละเปอร์เซ็นต์ของการบดทับผ่านข้อกำหนดบน และข้อกำหนดล่าง ของสูตรผสมใช้งานของแต่ละชนิดมวลรวมและข้อกำหนดของกรมทางหลวง

5.2 การจัดเตรียมตัวอย่างหลังบดทับ เป็นการเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตในพื้นที่ก่อสร้าง โดยจะเก็บก้อนตัวอย่าง ณ จุดที่กำหนดของชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตในพื้นที่ก่อสร้างหลังบดทับเสร็จเรียบร้อยแล้ว

5.2.1 วัตถุประสงค์ทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง หลังจากบดทับในพื้นที่ก่อสร้างแล้วเสร็จก็นำเครื่องเจาะตัวอย่างที่สามารถเจาะตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรได้อย่างเรียบร้อย ทำการเจาะตัวอย่างแอสฟัลต์ที่ผ่านการบดทับแล้วบริเวณจุดที่กำหนดจำนวน 2 ก้อนตัวอย่าง นำตัวอย่างไปยังห้องทดลองที่โรงงานผสมทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของแต่ละก้อนตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักในอากาศ ชั่งน้ำหนักในน้ำ และชั่งน้ำหนักเปียกผิวแห้ง คำนวณหาค่าความหนาแน่นเพื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของตัวอย่างที่ได้ก่อนการบดทับ ผลการทดลองสำหรับ 98 เปอร์เซนต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ผลดังตารางผนวกที่ 23 โดยเปรียบเทียบความหนาแน่นกับตารางผนวกที่ 20 สำหรับ 97 เปอร์เซนต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ผลดังตารางผนวกที่ 29 โดยเปรียบเทียบความหนาแน่นกับตารางผนวกที่ 26 สำหรับ 96 เปอร์เซนต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ผลดังตารางผนวกที่ 35 โดยเปรียบเทียบความหนาแน่นกับตารางผนวกที่ 32

5.2.2 ทดลองการสกัด หลังจากชั่งน้ำหนักและร่อนก้อนตัวอย่างแห้งแล้วนำก้อนตัวอย่างทั้งสองก้อนเข้าเตาอบเพื่อให้ก้อนตัวอย่างอ่อนตัวจนสามารถแผ่ออกเป็นชิ้นเล็กๆ ได้ เอาตัวอย่างออกจากเตาอบคัดแยกส่วนผสมบริเวณที่เป็นรอยตัดเนื่องจากเครื่องเจาะออกทิ้งไป ส่วนที่เหลือนำไปทดสอบการสกัด ตามข้อกำหนดของ AASHTO T 164-97 เพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์และมวลรวม ผลการทดสอบการสกัดหลังการบดทับด้วยเครื่องจักรบดทับ สำหรับ 98 เปอร์เซนต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ผลดังตารางผนวกที่ 24 สำหรับ 97 เปอร์เซนต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ผลดังตารางผนวกที่ 30 สำหรับ 96 เปอร์เซนต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ผลดังตารางผนวกที่ 36

5.2.3 การหาขนาดผลของมวลรวมก่อนบดทับ นำมวลรวมที่ได้หลังจากการทดลองการสกัดมาทดลองหาขนาดผลหลังการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในสนามตามวิธีการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 สำหรับ 98 เปอร์เซนต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ผลดังตารางผนวกที่ 25 สำหรับ 97 เปอร์เซนต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ผลดังตารางผนวกที่ 31 สำหรับ 96 เปอร์เซนต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ผลดังตารางผนวกที่ 37

5.3 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมเนื่องจากการบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง หลังจากทดลองจนได้ขนาดคละของมวลรวมทั้งก่อนบดทับและหลังบดทับเนื่องจากเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง สำหรับ 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ผลดังตารางที่ 11 และภาพที่ 14 จะได้การเปลี่ยนแปลงขนาดคละเฉลี่ยตะแกรงช่องลอด $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", #4, #8, #16, #30, #50, #100 และ #200 เป็น 0.00, 1.17, 1.21, 0.84, 0.58, 0.73, 0.67, 0.72, 0.81 และ 0.54 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สำหรับ 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ผลดังตารางที่ 12 และภาพที่ 15 จะได้การเปลี่ยนแปลงขนาดคละเฉลี่ยตะแกรงช่องลอด $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", #4, #8, #16, #30, #50, #100 และ #200 เป็น 0.00, 0.93, 0.84, 0.50, 0.46, 0.59, 0.37, 0.20, 0.32 และ 0.28 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สำหรับ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลองได้ผลดังตารางที่ 13 และภาพที่ 16 จะได้การเปลี่ยนแปลงขนาดคละเฉลี่ยตะแกรงช่องลอด $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", #4, #8, #16, #30, #50, #100 และ #200 เป็น 0.00, 0.63, 0.56, 0.34, 0.38, 0.33, 0.17, 0.12, 0.07 และ 0.04 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยขนาดคละของมวลรวมหลังการบดทับทุกช่องลอดอยู่ในข้อกำหนดบนของมวลรวมหินปูนและข้อกำหนดของกรมทางหลวง

6. เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต **เนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ระหว่างมวลรวมหินปูน หินแกรนิตและสแลก**

ในการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละมวลรวมหินปูน มวลรวมหินแกรนิต และมวลรวมสแลก เนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์จำนวน 75 ครั้งต่อด้าน ดูตารางที่ 14 และภาพที่ 17 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกันในแต่ละช่องลอดมวลรวมหินปูนมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดรองลงมาก็คือมวลรวมหินแกรนิตและมวลรวมสแลกตามลำดับ ซึ่งมวลรวมหินปูนมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ช่องลอด #8 เท่ากับ 4.57 เปอร์เซ็นต์ มวลรวมหินแกรนิตมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ช่องลอด #4 เท่ากับ 3.65 เปอร์เซ็นต์ และมวลรวมสแลกมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ช่องลอด #4 เท่ากับ 2.98 เปอร์เซ็นต์

7. เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี

ในการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละมวลรวมหินปูน มวลรวมหินแกรนิต และมวลรวมสแลก เนื่องจากการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีที่ช่องว่างอากาศ 4 % คูตารางที่ 15 และภาพที่ 18 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกันในแต่ละช่องลวดมวลรวมหินปูนมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดรองลงมาคือมวลรวมหินแกรนิตและมวลรวมสแลกตามลำดับ ซึ่งมวลรวมหินปูนมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ช่องลวด #8 เท่ากับ 2.93 เปอร์เซ็นต์ มวลรวมหินแกรนิตมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ช่องลวด #8 เท่ากับ 2.05 เปอร์เซ็นต์ และมวลรวมสแลกมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ช่องลวด #4 เท่ากับ 1.51 เปอร์เซ็นต์

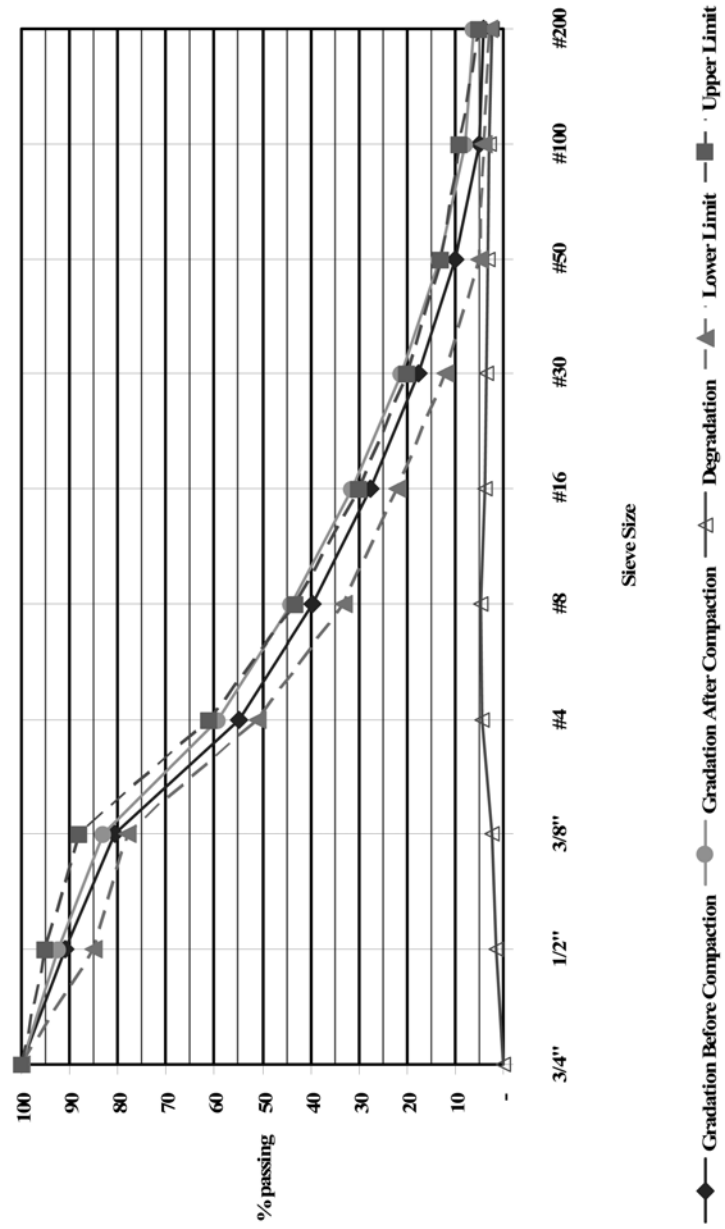
8. เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมหินปูนในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง คูตารางที่ 16 และภาพที่ 19 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกันในแต่ละช่องลวดมวลรวมหินปูนที่ความแน่นในพื้นที่ก่อสร้างเป็น 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลองมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดรองลงมาคือ 97 เปอร์เซ็นต์และ 96 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งที่ 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ช่องลวด 3/8" เท่ากับ 1.21 เปอร์เซ็นต์ ที่ 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ช่องลวด 1/2" เท่ากับ 0.93 เปอร์เซ็นต์ และที่ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ช่องลวด 1/2" เท่ากับ 0.63 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงขนาดของมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ด้วยจำนวนครั้งของการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน

Sieve Size	Average Gradation		Degradation (%)	Tolerant Limit	
	Before Compaction (%)	After Compaction (%)		Lower	Upper
3/4"	100.00	100.00	0.00	100	100
1/2"	90.86	92.39	1.53	85	95
3/8"	80.68	82.99	2.31	78	88
#4	54.79	59.18	4.39	51	61
#8	39.47	44.04	4.57	33	43
#16	27.64	31.44	3.80	22	30
#30	17.68	21.13	3.45	12	20
#50	10.06	13.33	3.27	5	13
#100	4.97	7.78	2.81	4	9
#200	3.98	6.19	2.21	3	5

Percent Degradation of Limestone Aggregate due to Compaction by Marshall Hammer

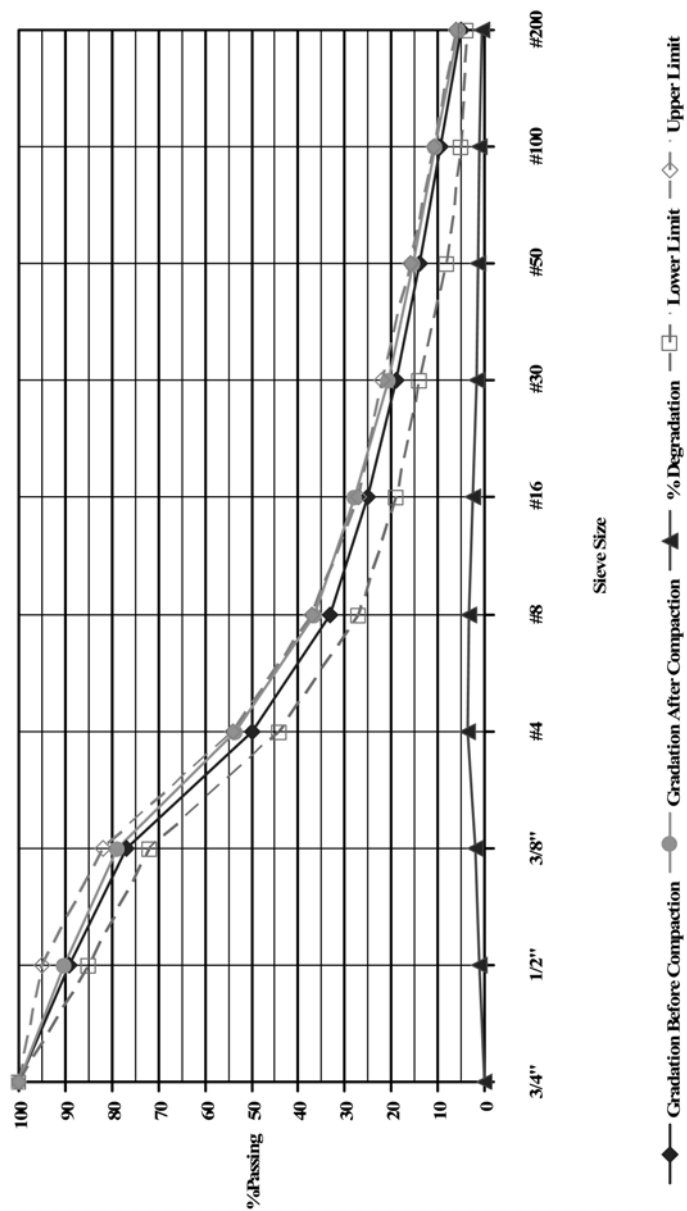


ภาพที่ 8 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของตัวอย่างมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์
ด้วยการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน

ตารางที่ 6 การเปลี่ยนแปลงขนาดของมวลรวมหินแกรนิตเนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ด้วยจำนวนครั้งของการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน

Sieve Size	Average Gradation		Degradation (%)	Tolerant Limit	
	Before Compaction (%)	After Compaction (%)		Lower	Upper
3/4"	100.00	100.00	0.00	100	100
1/2"	89.15	90.29	1.14	85	95
3/8"	76.97	78.80	1.83	72	82
#4	49.73	53.38	3.65	44	54
#8	33.01	36.45	3.44	27	37
#16	25.19	27.77	2.58	19	27
#30	18.81	20.58	1.77	14	22
#50	13.84	15.36	1.52	8	16
#100	9.45	10.56	1.11	5	11
#200	4.89	5.56	0.67	4	6

Percent Degradation of Granite Aggregate due to Compaction by Marshall Hammer

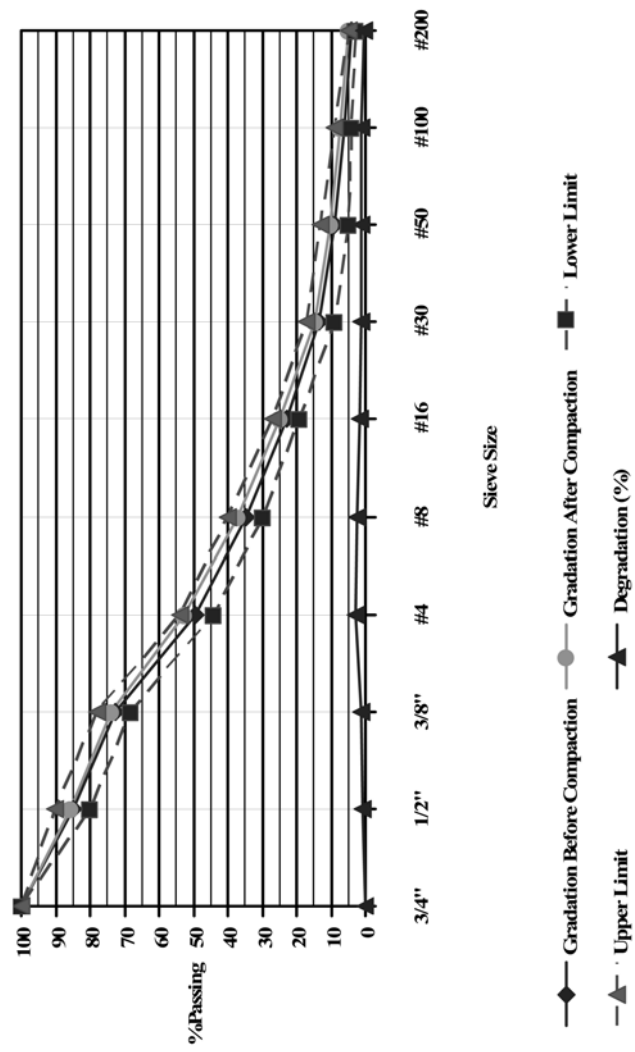


ภาพที่ ๑ แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิตเนื่องจากการบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์
ด้วยการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน

ตารางที่ 7 การเปลี่ยนแปลงขนาดของมวลรวมสแลกเนื่องจากการบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ด้วยจำนวนครั้งของการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน

Sieve Size	Average Gradation		Degradation (%)	Tolerant Limit	
	Before Compaction (%)	After Compaction (%)		Lower	Upper
3/4"	100.00	100.00	0.00	100	100
1/2"	85.10	85.89	0.79	80	90
3/8"	72.71	74.04	1.33	68	78
#4	49.49	52.47	2.98	44	54
#8	34.65	37.22	2.57	30	40
#16	23.03	24.81	1.78	19	27
#30	13.45	14.84	1.39	9	17
#50	8.83	10.15	1.32	5	13
#100	6.22	7.28	1.06	4	9
#200	4.28	4.83	0.55	3	5

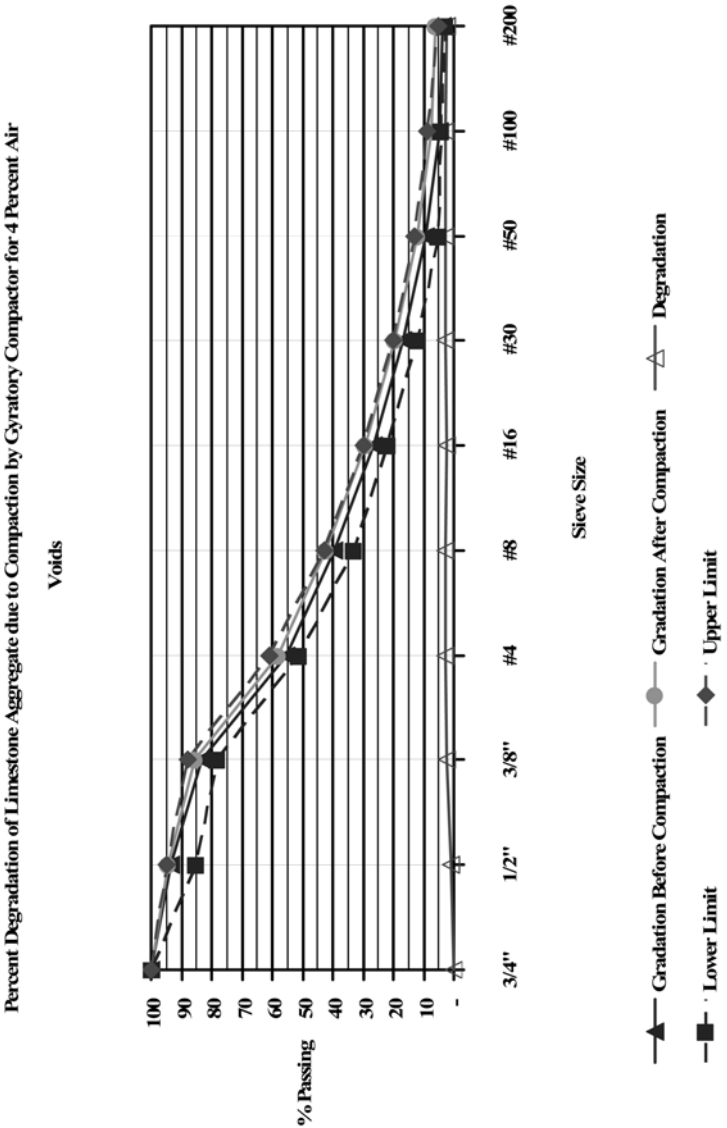
Percent Degradation of Slag Aggregate due to Compaction by Marshall Hammer



ภาพที่ 10 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดกะของตัวอย่างมวลรวมสแลกเนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์
ด้วยการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน

ตารางที่ 8 การเปลี่ยนแปลงขนาดของมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ

Sieve Size	Average Gradation		Degradation (%)	Tolerant Limit	
	Before Compaction (%)	After Compaction (%)		Lower	Upper
3/4"	100.00	100.00	0.00	100	100
1/2"	93.69	94.56	0.87	85	95
3/8"	83.32	85.57	2.25	78	88
#4	55.16	57.99	2.83	51	61
#8	39.42	42.35	2.93	33	43
#16	26.71	29.15	2.44	22	30
#30	16.72	19.37	2.65	12	20
#50	9.27	12.10	2.83	5	13
#100	4.75	7.55	2.80	4	9
#200	3.62	6.06	2.44	3	5

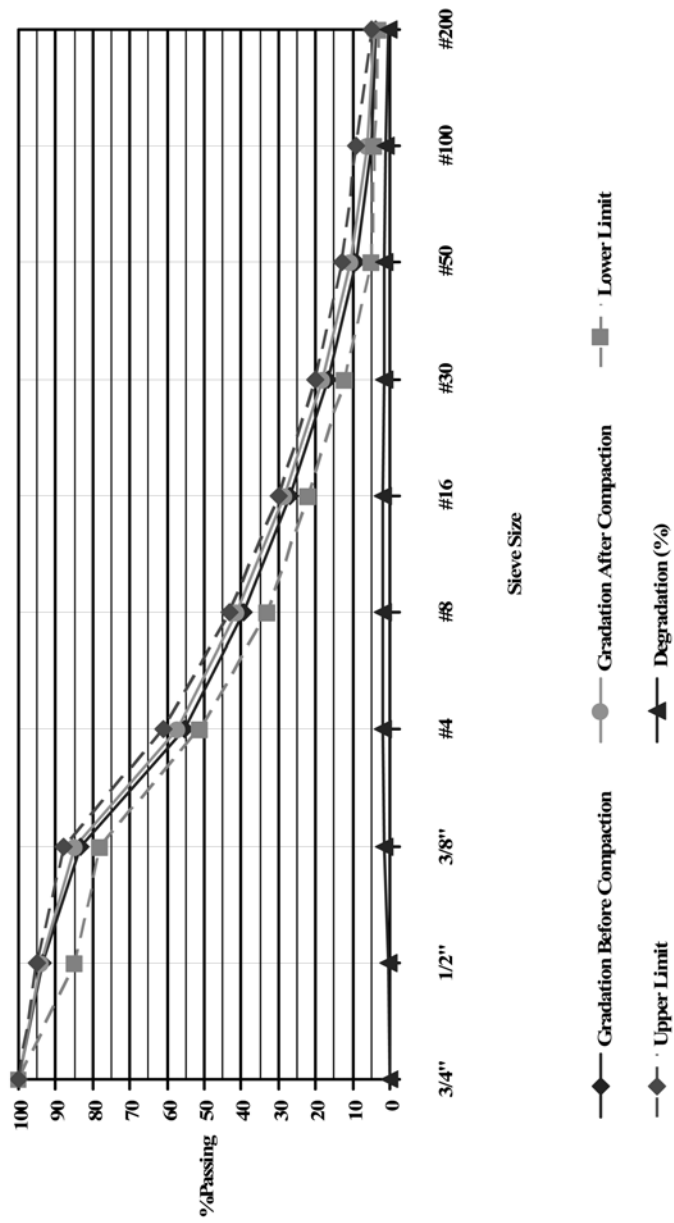


ภาพที่ 11 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของตัวอย่างมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบแจรทอร์ ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ

ตารางที่ 9 การเปลี่ยนแปลงขนาดของมวลรวมหินแกรนิตเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบโรตารีด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ

Sieve Size	Average Gradation		Degradation (%)	Tolerant Limit	
	Before Compaction (%)	After Compaction (%)		Lower	Upper
3/4"	100.00	100.00	0.00	100	100
1/2"	93.69	93.96	0.27	85	95
3/8"	83.32	84.73	1.41	78	88
#4	55.16	57.13	1.97	51	61
#8	39.42	41.47	2.05	33	43
#16	26.71	28.45	1.74	22	30
#30	16.72	18.23	1.51	12	20
#50	9.27	10.79	1.52	5	13
#100	4.75	5.88	1.13	4	9
#200	3.62	4.02	0.40	3	5

Percent Degradation of Granite Aggregate due to Compaction by Gyratory Compactor for 4 Percent Air Voids

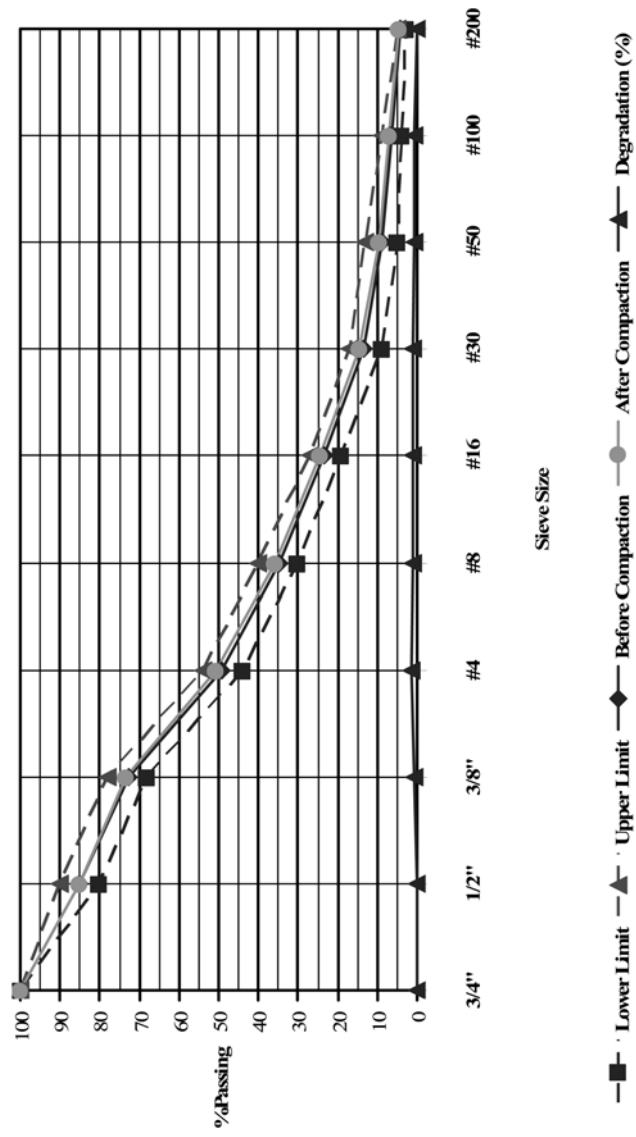


ภาพที่ 12 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดกะของตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิตเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ

ตารางที่ 10 การเปลี่ยนแปลงขนาดผละของมวลรวมสแลกเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอร์รี่ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ

Sieve Size	Average Gradation		Degradation (%)	Tolerant Limit	
	Before Compaction (%)	After Compaction (%)		Lower	Upper
3/4"	100.00	100.00	0.00	100	100
1/2"	85.03	85.16	0.13	80	90
3/8"	72.52	73.36	0.84	68	78
#4	49.27	50.78	1.51	44	54
#8	34.79	35.71	0.92	30	40
#16	23.28	24.32	1.04	19	27
#30	13.50	14.53	1.03	9	17
#50	8.94	9.73	0.79	5	13
#100	6.36	7.03	0.67	4	9
#200	4.43	4.60	0.17	3	5

Percent Degradation of Slag Aggregate due to Compaction by Gyratory Compactor for 4 Percent Air Voids

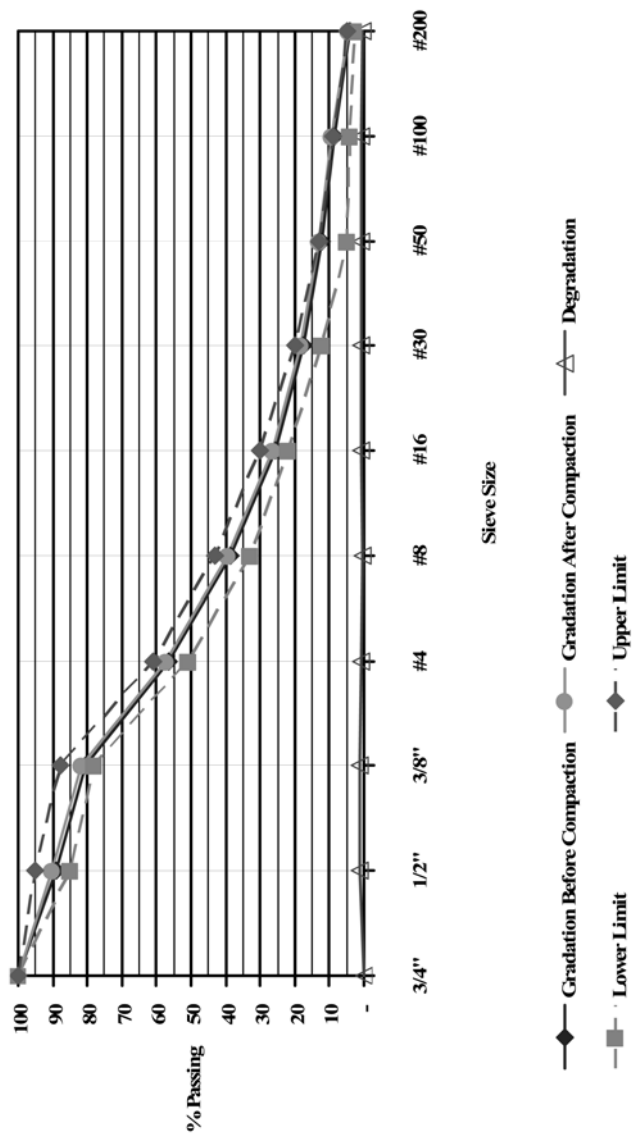


ภาพที่ 13 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของตัวอย่างมวลรวมสแลกเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี
ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ

ตารางที่ 11 การเปลี่ยนแปลงขนาดของมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
 ด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Sieve Size	Average Gradation		Degradation (%)	Tolerant Limit	
	Before Compaction (%)	After Compaction (%)		Lower	Upper
3/4"	100.00	100.00	0.00	100	100
1/2"	88.92	90.09	1.17	85	95
3/8"	80.61	81.82	1.21	78	88
#4	56.34	57.18	0.84	51	61
#8	38.70	39.28	0.58	33	43
#16	25.56	26.29	0.73	22	30
#30	17.51	18.18	0.67	12	20
#50	12.37	13.09	0.72	5	13
#100	8.66	9.47	0.81	4	9
#200	4.03	4.57	0.54	3	5

Percent Degradation of Limestone Aggregate due to Compaction by Roller for 98 Percent Density

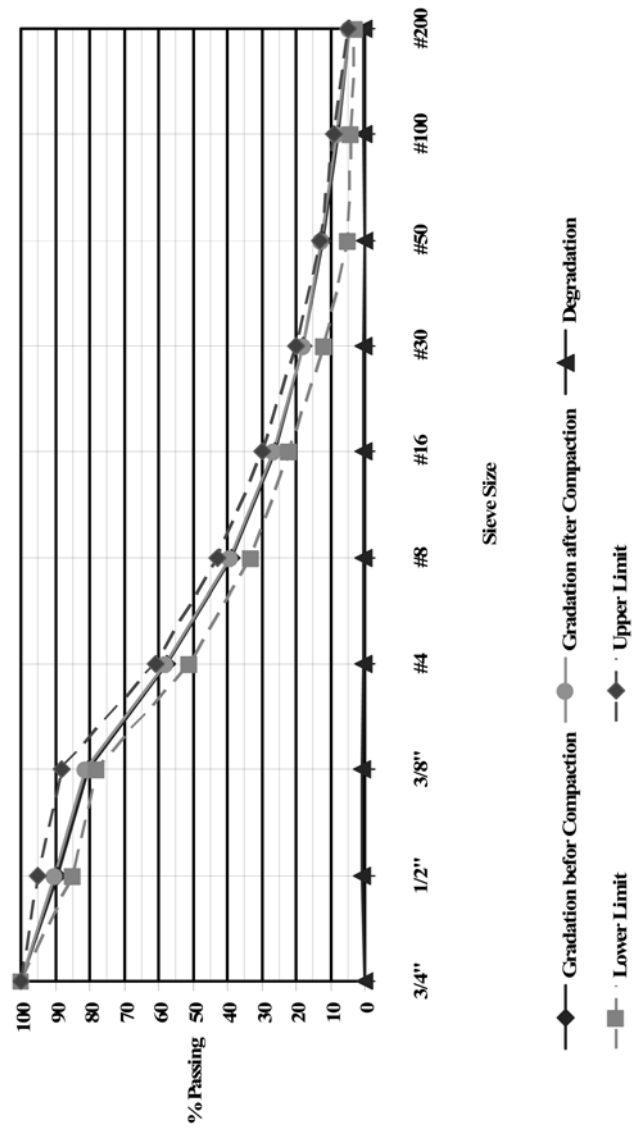


ภาพที่ 14 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของตัวอย่างมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

ตารางที่ 12 การเปลี่ยนแปลงขนาดผละของมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
 ด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Sieve Size	Average Gradation		Degradation (%)	Tolerant Limit	
	Before Compaction (%)	After Compaction (%)		Lower	Upper
3/4"	100.00	100.00	0.00	100	100
1/2"	89.35	90.28	0.93	85	95
3/8"	80.54	81.38	0.84	78	88
#4	57.47	57.97	0.50	51	61
#8	38.81	39.27	0.46	33	43
#16	25.94	26.53	0.59	22	30
#30	17.76	18.13	0.37	12	20
#50	12.28	12.48	0.20	5	13
#100	7.87	8.19	0.32	4	9
#200	4.39	4.67	0.28	3	5

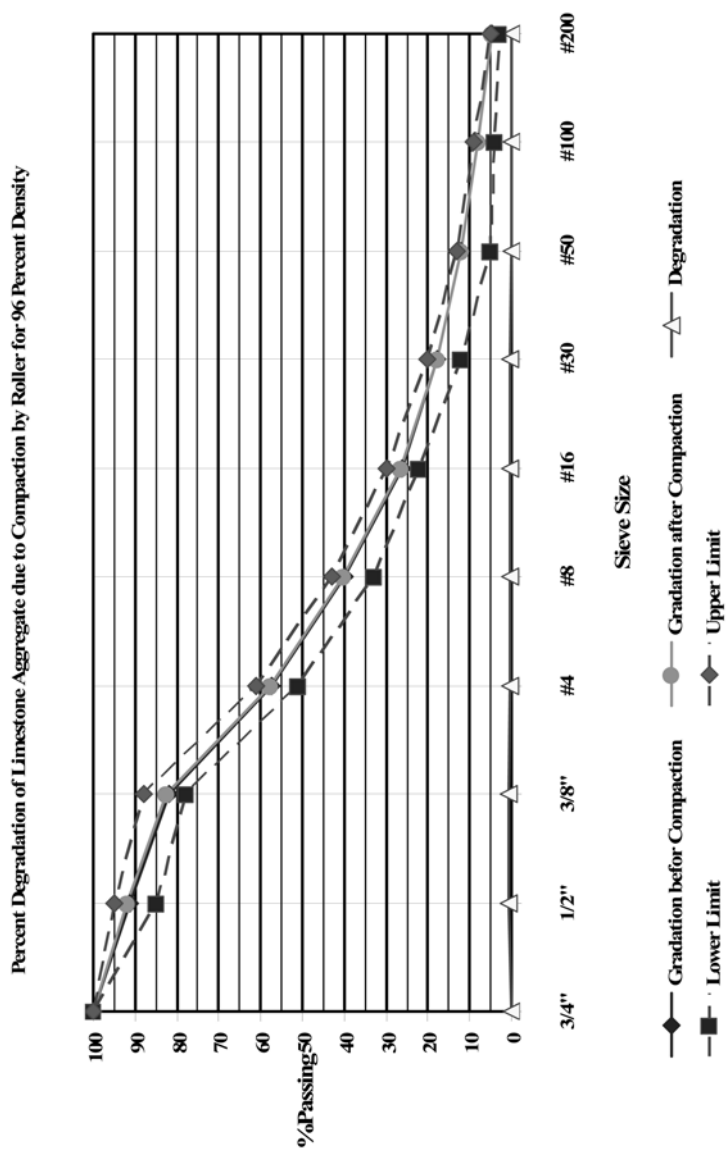
Percent Degradation of Limestone Aggregate due to Compaction by Roller for 97 Percent Density



ภาพที่ 15 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดผลของตัวอย่างมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

ตารางที่ 13 การเปลี่ยนแปลงขนาดของมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
 ด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

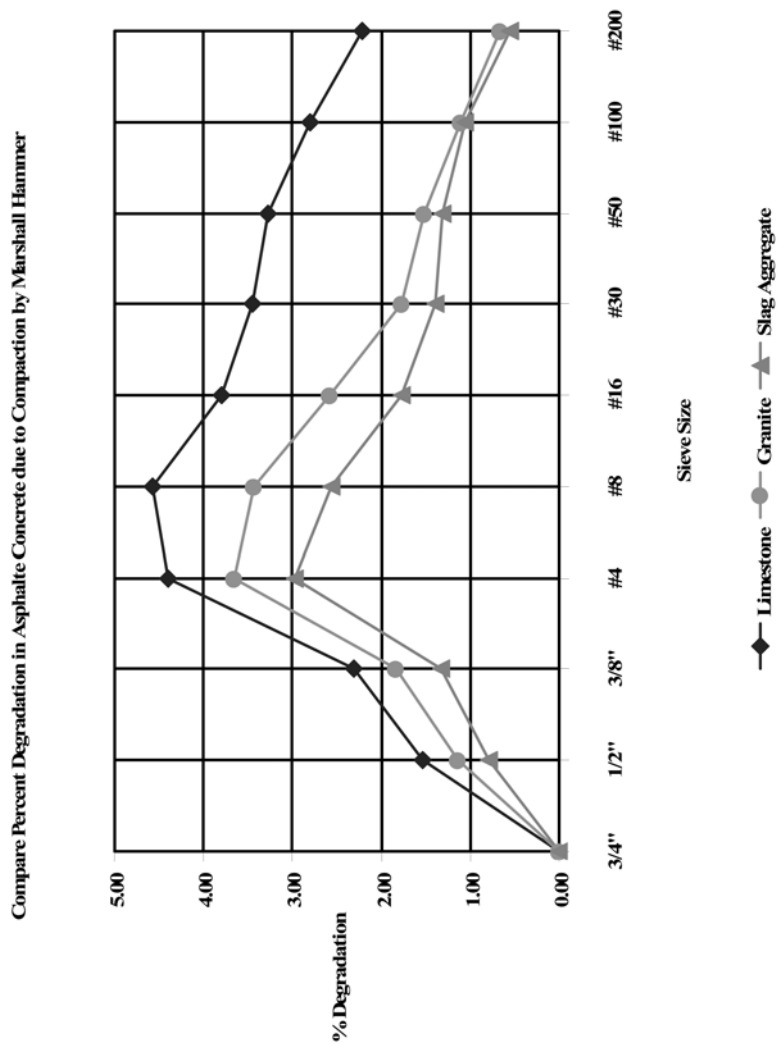
Sieve Size	Average Gradation		Degradation (%)	Tolerant Limit	
	Before Compaction (%)	After Compaction (%)		Lower	Upper
3/4"	100.00	100.00	0.00	100	100
1/2"	91.25	91.88	0.63	85	95
3/8"	81.85	82.41	0.56	78	88
#4	57.40	57.74	0.34	51	61
#8	39.99	40.37	0.38	33	43
#16	26.31	26.64	0.33	22	30
#30	17.67	17.84	0.17	12	20
#50	11.96	12.08	0.12	5	13
#100	8.14	8.21	0.07	4	9
#200	4.57	4.61	0.04	3	5



ภาพที่ 16 แผนภูมิแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวอย่างมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง ด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละระหว่างมวลรวมหินปูน มวลรวมหินแกรนิต และมวลรวมสแลกเนื่องจากการบดทับ
โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์จำนวน 75 ครั้งต่อด้าน

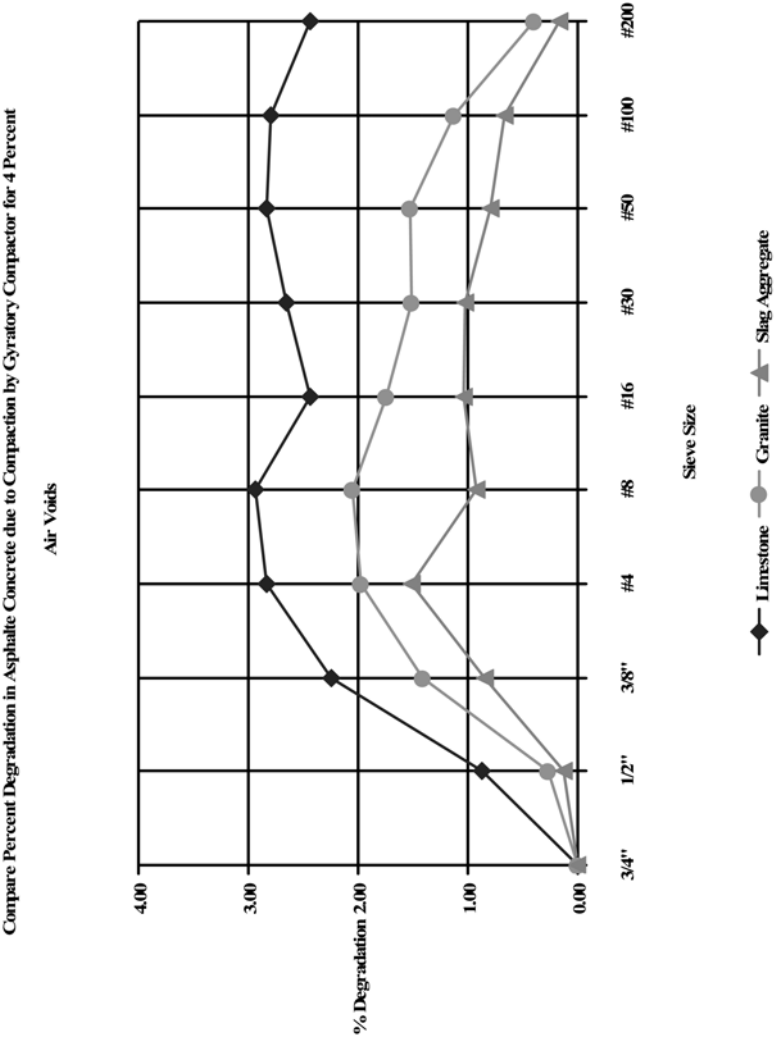
Sieve Size	% Degradation Of Aggregate in Asphalt Concrete due to Compaction by Marshall Hammer		
	Limestone	Granite	Slag Aggregate
3/4"	0.00	0.00	0.00
1/2"	1.53	1.14	0.79
3/8"	2.31	1.83	1.33
#4	4.39	3.65	2.98
#8	4.57	3.44	2.57
#16	3.80	2.58	1.78
#30	3.45	1.77	1.39
#50	3.27	1.52	1.32
#100	2.81	1.11	1.06
#200	2.21	0.67	0.55



ภาพที่ 17 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดตะแกรงจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์จำนวน 75 ครั้งต่อต้านระหว่างมวลรวมหินปูน มวลรวมหินแกรนิตและมวลรวมสแลก

ตารางที่ 15 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละระหว่างมวลรวมหินปูน มวลรวมหินแกรนิต และมวลรวมสแลกเนื่องจากการบดทับ
 โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรัสสำหรับช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์

Sieve Size	% Degradation Of Aggregate in Asphalt Concrete due to Compaction by Gyratory Compactor for 4 % Air Voids		
	Limestone (100 Gyrations)	Granite (55 Gyrations)	Slag Aggregate (135 Gyrations)
3/4"	0.00	0.00	0.00
1/2"	0.87	0.27	0.13
3/8"	2.25	1.41	0.84
#4	2.83	1.97	1.51
#8	2.93	2.05	0.92
#16	2.44	1.74	1.04
#30	2.65	1.51	1.03
#50	2.83	1.52	0.79
#100	2.80	1.13	0.67
#200	2.44	0.40	0.17

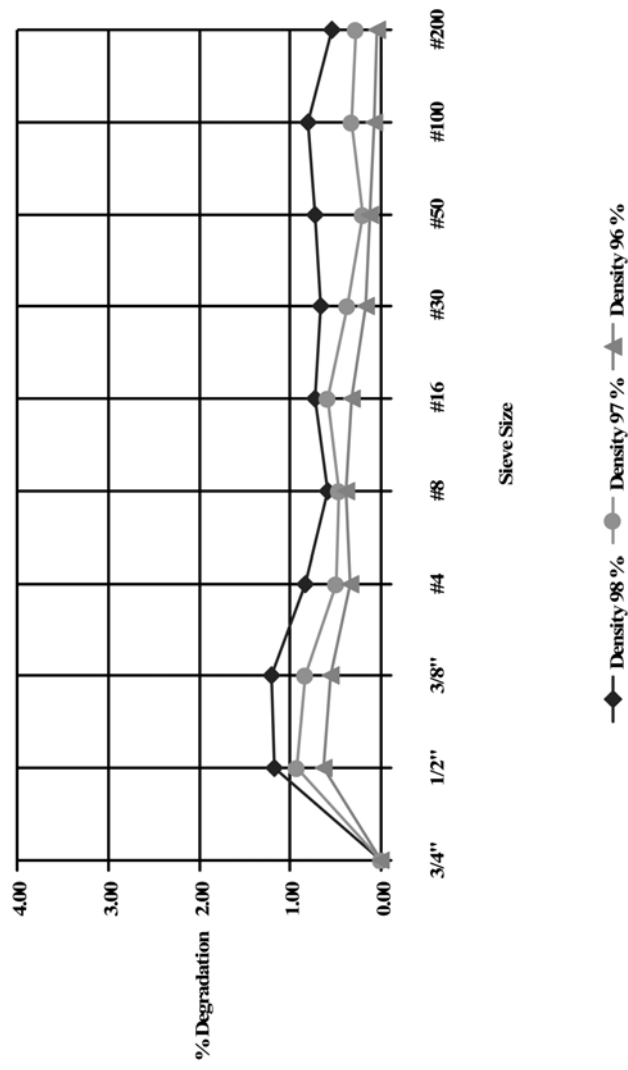


ภาพที่ 18 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดผลเนื่องจากการบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบ จีราทอรีสำหรับช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างมวลรวมหินปูน มวลรวมหินแกรนิตและมวลรวมสแลก

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดของมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
 สำหรับความแน่นของการบดทับเป็น 98, 97 และ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Sieve Size	% Degradation Of Limestone Aggregate in Asphalt Concrete due to Compaction in field of Construction		
	Density 98 %	Density 97 %	Density 96 %
3/4"	0.00	0.00	0.00
1/2"	1.17	0.93	0.63
3/8"	1.21	0.84	0.56
#4	0.84	0.50	0.34
#8	0.58	0.46	0.38
#16	0.73	0.59	0.33
#30	0.67	0.37	0.17
#50	0.72	0.20	0.12
#100	0.81	0.32	0.07
#200	0.54	0.28	0.04

Compare Percent Degradation of Limestone Aggregate in Asphalt Concrete due to Compaction by
Roller in Field of Construction



ภาพที่ 19 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดกะของมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
สำหรับความแน่นของการบดทับเป็น 98, 97 และ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

สรุป

1. การเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนและหลังการบดทับตามวิธีมาร์แชลล์โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ (Manual Hammer) ด้วยจำนวนการบดทับ 75 ครั้งต่อด้าน มีการเปลี่ยนแปลงขนาดคละในแต่ละตะแกรงโดยมวลรวมมีเปอร์เซ็นต์ผ่านช่องลอดของแต่ละตะแกรงมากขึ้น ซึ่งมวลรวมหินปูนมีการเปลี่ยนแปลงขนาดคละแต่ละตะแกรงมากที่สุด รองลงมาคือมวลรวมหินแกรนิตและมวลรวมสแลกตามลำดับ
2. การเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนการบดทับและหลังการบดทับตามวิธีซูเปอร์เพพ ระดับ 1 โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรีที่ทำให้ก้อนตัวอย่างมีช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดคละในแต่ละตะแกรงโดยมวลรวมมีเปอร์เซ็นต์ผ่านช่องลอดของแต่ละตะแกรงมากขึ้น ซึ่งมวลรวมหินปูนมีการเปลี่ยนแปลงขนาดคละแต่ละตะแกรงมากที่สุด รองลงมาคือมวลรวมหินแกรนิตและมวลรวมสแลกตามลำดับ
3. การเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมหินปูนในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนการบดทับและหลังการบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างที่ความแน่นของการบดทับเป็น 98, 97 และ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง มีการเปลี่ยนแปลงขนาดคละในแต่ละตะแกรงโดยมวลรวมมีเปอร์เซ็นต์ผ่านช่องลอดของแต่ละตะแกรงมากขึ้น ซึ่งที่ความแน่นของการบดทับในพื้นที่ก่อสร้างเป็น 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลองมีการเปลี่ยนแปลงขนาดคละแต่ละตะแกรงมากที่สุด รองลงมาคือความแน่นของการบดทับในพื้นที่ก่อสร้างเป็น 97 เปอร์เซ็นต์ และ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลองตามลำดับ
4. การเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์เปรียบเทียบกับบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี มวลรวมทั้งสามชนิดมีค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดคละเนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์มากกว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดคละเนื่องจากการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี
5. การเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมหินปูนในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์เปรียบเทียบกับบดทับด้วยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้างที่ความแน่นในการบดทับเป็น 98, 97 และ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง การ

เปลี่ยนแปลงขนาดคละเนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์มีค่ามากกว่าเนื่องจากการบดทับด้วยเครื่องจักรบดทับที่ความแน่นในการบดทับเป็น 98, 97 และ 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

6. เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมแต่ละชนิดในแต่ละวิธีบดทับยังคงให้ขนาดคละของมวลรวมหลังบดทับอยู่ในขอบเขตของขนาดคละและข้อกำหนดของกรมทางหลวง การเปลี่ยนแปลงขนาดคละเนื่องจากการบดทับจึงไม่มีผลกระทบต่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์และคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต

ปัญหาและจุดอ่อน

1. เนื่องจากต้องทำการทดลองหลายขั้นตอนเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวม ผู้ศึกษาจำเป็นต้องเรียนรู้วิธีการ ขั้นตอน ข้อพึงระวังและข้อแนะนำจากผู้ชำนาญงานก่อนจึงจะเริ่มทำการทดลองจริงได้
2. อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ทำการทดลองมีจำนวนจำกัดและราคาแพงจำเป็นต้องระมัดระวังและรอบคอบในการทดลองแต่ละครั้ง ซึ่งในบางครั้งต้องอาศัยเจ้าหน้าที่ที่ชำนาญงาน
3. การเก็บตัวอย่างในพื้นที่ก่อสร้างจำเป็นต้องประสานงานกับเจ้าหน้าที่ของเจ้าของงานและผู้รับเหมาและทำความเข้าใจถึงวิธีการทำงาน และหมายกำหนดการในการทำงานแต่ละครั้ง ซึ่งในบางครั้งการทำงานไม่สามารถเป็นไปตามหมายกำหนดการอันเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ต้องใช้ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดลองการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมหินบะซอลต์เพิ่ม
2. ควรมีการเก็บตัวอย่างในพื้นที่ก่อสร้างสำหรับมวลรวมหินแกรนิต หินบะซอลต์ และมวลรวมสแลก

3. ควรเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละเนื่องจากการบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์ระหว่าง Machine Hammer กับ Manual Hammer

4. ในการศึกษาการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตในแต่ละครั้งควรจะมีการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดคละของมวลรวมด้วย

5. ในการจัดสัดส่วนขนาดคละของมวลรวมในขั้นตอนการออกแบบควรคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดคละเนื่องจากการบดทับด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม. 2539. **มาตรฐานงานทาง STANDARDS FOR HIGHWAY CONSTRUCTION**. โรงพิมพ์ชุมนุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด., กรุงเทพฯ.

_____ 2543. **มาตรฐานวิธีการทดลอง STANDARD TEST METHODS**.
โรงพิมพ์องค์การรับส่งสินค้าและพัสดุภัณฑ์ (ร.ส.พ.), กรุงเทพฯ.

_____ 2544. **คู่มือการเตรียมตัวอย่างโดยเครื่องมือ Servopac Gyratory Compactor**.
ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, กรุงเทพฯ.

จุฬามาศ รอดคลองตัน. 2519. **หินและการแบ่งลักษณะหิน (Rock and Rock Identification)**.
ว.ว. 2/2519. กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

ชยธันว์ พรหมสร. 2542. **Superpave Gyratory Compactor: ทางเลือกใหม่ในการออกแบบส่วนผสมและควบคุมคุณภาพในระหว่างการก่อสร้างผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ต้องการคุณภาพในการใช้งาน**. การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง ประจำปีงบประมาณ 2543: 91-100.

บุญพล มีไชโย. 2546. **ความสัมพันธ์ระหว่างการออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์กับวิธีซูเปอร์เพฟ ระดับ1**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วัชรินทร์ วิทยกุล. 2543. **แอสฟัลต์เทคโนโลยีสำหรับถนนลาดยาง**.
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____ 2544. **การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนวิธีมาร์แชลล์**.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วัชรินทร์ วิทยกุล. 2545. แอสฟัลต์ระบบซูเปอร์เพฟ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2547. การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตซูเปอร์เพฟ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สนิท ขศสมบัติ. 2520. **Degradation ของวัสดุ Soil-Aggregate Type.**
เอกสารประกอบการบรรยายงานสัมมนาเจ้าหน้าที่กองวิเคราะห์วิจัยปี 2520.
กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ

สิทธิศักดิ์ อัสพรหมธาดา และ สมักร สันทอง. 2545. ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนโดยใช้ตะกรันหลักเป็นวัสดุมวลรวม. รายงานฉบับที่ วพ. 192. ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทางกรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

ศรัณยา เฉชะพรหมพันธ์. 2544. การศึกษาการนำตะกรันเตาหลอมมาทดแทนวัสดุมวลรวมของผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Anderson, R.M., R.D. Bosley, and P.A. Creamer, 1995. **Quality Management of HMA Construction Using Superpave Equipment: A Case Study.** Transportation Research Record Vol. 1513: 18-24

Asphalt Institute, The. 1969. **Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix types. Manual Series No. 2 (MS-2).** Third Edition. U.S.A.

_____. 1996. **Superpave Mix Design. Superpave Ser. No. 2 (SP-2).** Lexington.

Harman, T.P., J.D. Angelo and J.R. Bukowski, 1995. **Evaluation of SUPERPAVE Gyrotory Compaction in the Field Management of Asphalt Mixes: Four Simulation Studies.** Transportation Research Record Vol. 1513: 1-8.

Phillip B. B., K. C. MahBoub and G. A. Huber. 1994. **Retional Method for Laboratory Compaction of Hot-Mix Asphalt**. Transportation Research Record No.1454. Transportation Research Record National Research Council. National Academy Press Washington, D.C. pp. 144 - 153

Siam S. M. S. Co. and Chonburi S. M. S. Co. n.d. **“Slag Aggregate, Material of Choice.”** (เอกสารประชาสัมพันธ์ของบริษัท). Siam Steel Mill Services Co. ม.ป.ท.

The American Association of State Highway and Transportation Officials. 1986. **Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing**. Fourteenth Edition. The American Association of State Highway And Transportation Officials. Washington, D.C.

The American Society for Testing and Materials. 1981. **1981 Annual Book of ASTM Standards**. American Society for Testing And Materials. Easton, Md., U.S.A.

Thomas D. L. 1963. **Portland Cement and Asphalt Concretes**. McGRAW-HILL BOOK COMPANY, New York.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ข้อกำหนดของมวลรวม

รายการ	ข้อกำหนดกรมทางหลวง
มวลรวมหยาบ	
ความแข็งแรง (Toughness)	ความสึกหรอไม่เกินร้อยละ 40
หรือความสึกหรอ (Abrasion)	
ความคงทน (Soundness)	ส่วนที่ไม่คงทน (Loss) ไม่เกินร้อยละ 9
มวลรวมละเอียด	
ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent)	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50
ความคงทน (Soundness)	ส่วนที่ไม่คงทน (Loss) ไม่เกินร้อยละ 9

ที่มา : มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต ทล. – ม. 408/ 2532 กรมทางหลวง (2539)

ตารางผนวกที่ 2 ขนาดคละของมวลรวมและปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน

ขนาดที่ใช้เรียก	มิลลิเมตร (นิ้ว)	12.5 (½)
สำหรับชั้นทาง		Wearing Course
ความหนาของชั้นทาง (มิลลิเมตร)		40-70
ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร (นิ้ว)		ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละ โดยมวล
37.5 (1 ½)		
25.0 (1)		
19.0 (¾)		100
12.5 (1/2)		80-100
9.5 (3/8)		-
4.75 (เบอร์ 4)		44-74
2.36 (เบอร์ 8)		28-58
1.18 (เบอร์ 16)		-
0.600 (เบอร์ 30)		-
0.300 (เบอร์ 50)		5-21
0.150 (เบอร์ 100)		-
0.075 (เบอร์ 200)		2-10
ปริมาณแอสฟัลต์ ร้อยละ โดยมวลของมวลรวม		3.0-7.0

ที่มา : มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต ทล. – ม. 408/ 2532 กรมทางหลวง (2539)

ตารางผนวกที่ 3 ขนาดตะแกรงของวัสดุอัดแทรก

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

ที่มา : มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต ทล. – ม. 408/ 2532 กรมทางหลวง (2539)

ตารางผนวกที่ 4 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์

รายการ	ชั้นผิวทาง
จำนวนครั้งการบดอัดแต่ละด้านของก้อนตัวอย่าง (ครั้ง)	75
เสถียรภาพ (ปอนด์) (Stability)	1,800
การไหล 0.25 มม. (0.01 นิ้ว) (Flow)	8-16
เปอร์เซ็นต์โพรงอากาศ (Percent Air Voids)	3-5
เปอร์เซ็นต์โพรงระหว่างมวลรวม (VMA)	>14.0
เสถียรภาพ/การไหล (Lbs/0.01in)	>160
เปอร์เซ็นต์ดัชนีของความแข็งแรง (Strength Index)	>75

ที่มา : มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต ทล. – ม. 408/ 2532 กรมทางหลวง (2539)

ตารางผนวกที่ 5 ข้อกำหนดคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์

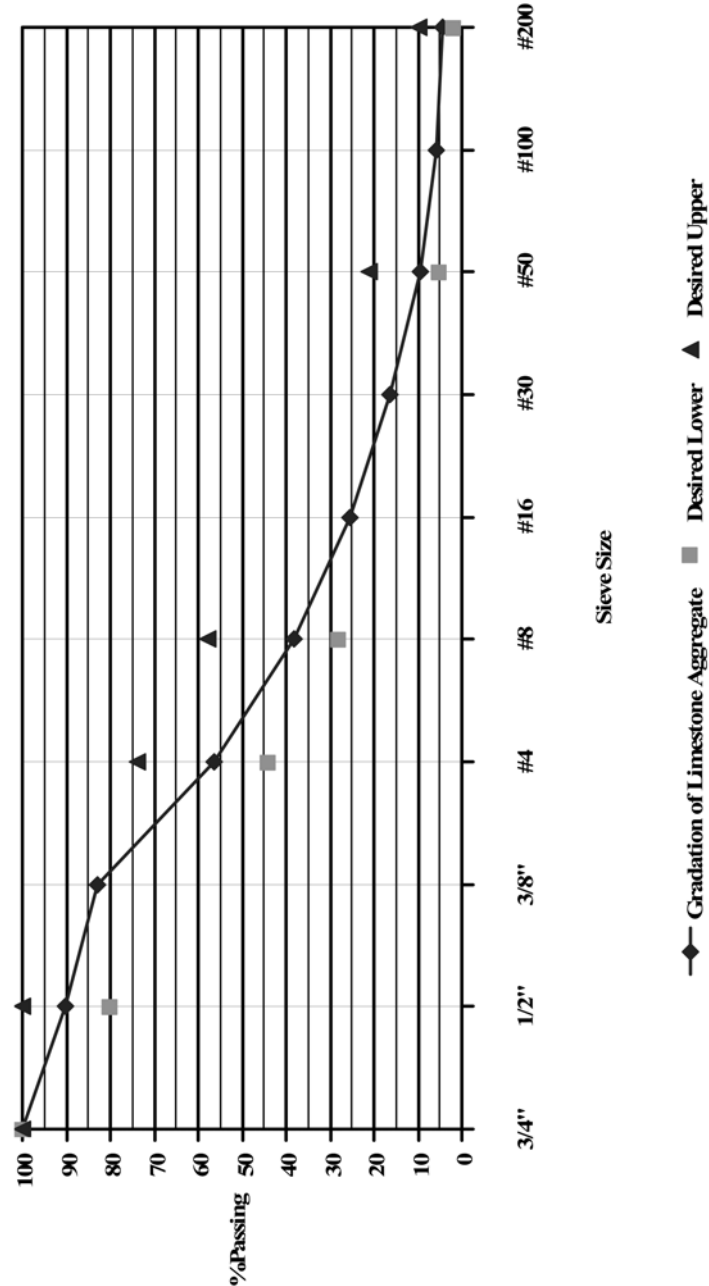
Property		Penetration		Test Method
		Grade		
		60-70		
		Min.	Max.	
Penetration at 25 C (77F),100g,5 S	0.1 mm.	60	70	ทล.-ท. 403/2518
Flash point (Cleveland open cup	Degrees(F)	230	-	ทล.-ท. 406/2519
		(450)		
Ductility at 25 C (77F), 5 cm.Per min	cm.	100	-	ทล.-ท. 405/2519
Solubility in trichloroethylene	percent	99.0	-	ทล.-ท. 409/2520
Thin-Film oven test,3.2 mm.163 C(325F),5 hour				AASHTO T 179
Loss on heating percent	percent	-	0.8	
Penetration of residue	percent of original	54	-	
Ductility of residue at 25C(77F),5 cm.min	cm.	50	-	
Loss on heating, 163C (325F), 5 hour	percent	-	0.8	ทล.-ท. 404/2518

ที่มา : ข้อกำหนดที่ ทล. – ก. 401/ 2531 กรมทางหลวง (2543)

ตารางผนวกที่ 6 ผลการหาขนาดผลรวมของมวลรวมหินปูนสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์

ชนิดวัสดุ	หินปูน	แอสฟัลต์คอนกรีตชั้น	Wearing Course			
แหล่งวัสดุ	โรงโม่หินสิลามหานคร กม. 99+150 (L.T.) 3.0 กม. ทางหลวงหมายเลข 3 สายชลบุรี – พัทยา ต. ห้วยกะปิ อ. เมือง จ. ชลบุรี					
Sieve Size	HOT BIN					Tolerant Limit
	% Passing					
	Lime/Cement	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Comb'd. Desired
3/4"				100	100	100
1/2"				97.8	27.3	80-100
3/8"			100	71.5	4.6	-
# 4		100	45.3	6.0	1.1	44-74
# 8		83.4	6.7	2.8		28-58
# 16		56.7	2.4			-
# 30	100	35.6	1.0			-
# 50	99.8	20.1				5-21
# 100	96.6	11.2				-
# 200	86.0	8.0				2-10
Mix Proportion	1	42	27	17	13	

Gradation of Limestone Aggregate for Design Asphalt Concrete by Marshall Method



ภาพผนวกที่ 1 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนขนาดผละของมวลรวมหินปูนสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางผนวกที่ 7 ผลการทดสอบคุณสมบัติรวมหินปูนสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์

Description	Filler	Hot Bin 1				Hot Bin 2	Hot Bin 3	Hot Bin 4	Total
		Passing #200	Retain #200	Total					
Mix Proportion	(%)	1	-	-	42	27	17	13	100
Bulk Specific Gravity	-	-	2.706	2.711	2.723	2.735	2.742	2.723	
Apparent Specific Gravity	2.749	2.770	2.773	2.773	2.767	2.771	2.771	2.771	
Effective Specific Gravity	-	-	-	-	-	-	-	-	2.741
Water Absorption	(%)	-	0.89	-	0.60	0.48	0.37	-	
Flakiness index	(%)				61	37	24	41	
Elongation	(%)				9	33	29	24	
Asphalt Absorption	(%)								0.25
Los Angeles Abrasion	(%)	Aggregate 3/4"	=	26.8					
Soundness	(% Wt. Loss)	Aggregate 3/4"	=	0.8	, Fine Aggregate	=	4.2		
Sand Equivalent	(%)	Fine Aggregate	=	55	, Hot Bin 1	=	69		

ตารางผนวกที่ 8 การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ที่ใช้หินปูเป็นมวลรวม

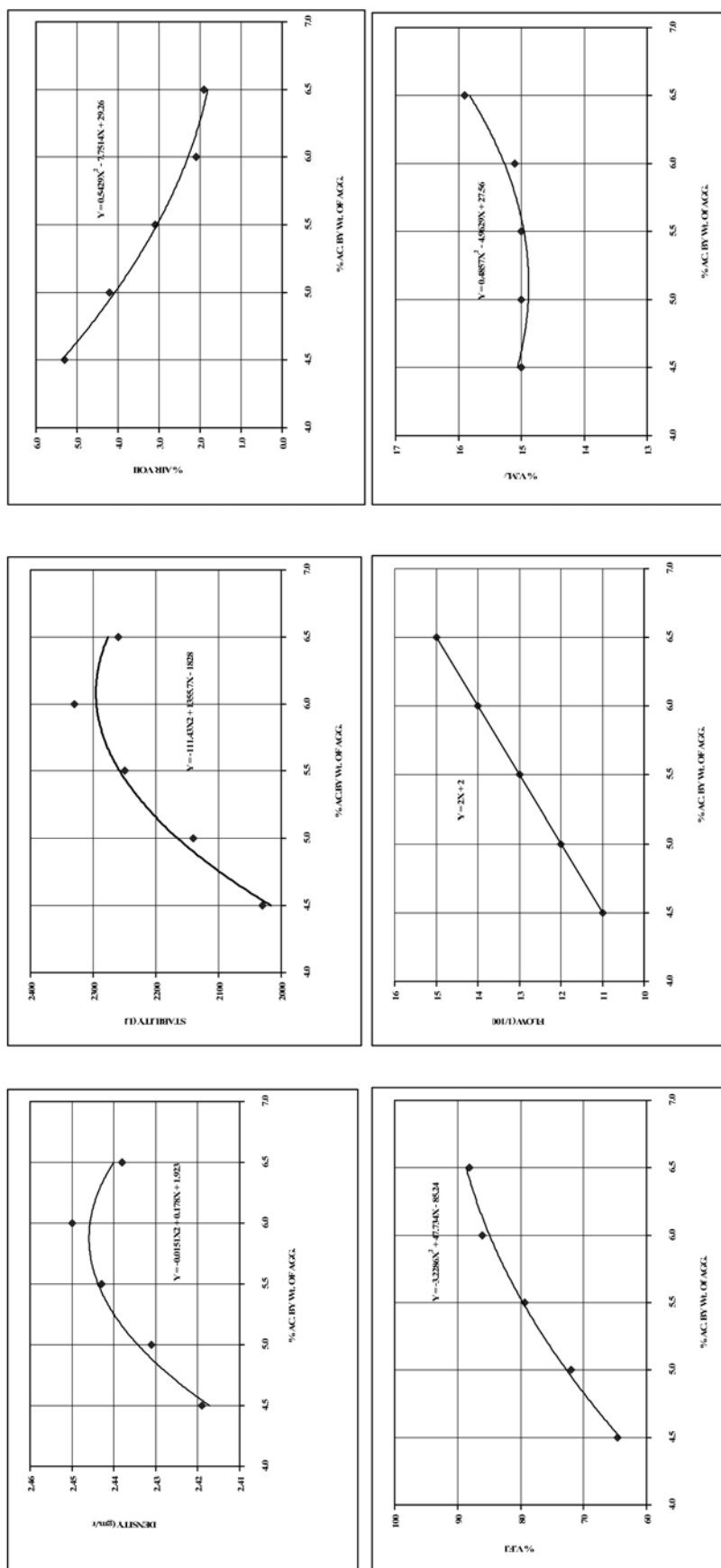
Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
1	4.50	2 1/2	1236.1	1237.2	726.6	510.6	2.421	5.3	14.9	64.7	2030	11
	4.50	2 1/2	1243.7	1244.8	730.7	514.1	2.419	5.3	15.0	64.4	2020	12
	4.50	2 1/2	1240.2	1241.3	728.2	513.1	2.417	5.4	15.1	64.0	2050	11
							2.419	5.3	15.0	64.4	2030	11
2	5.00	2 1/2	1242.6	1243.5	732.8	510.7	2.433	4.1	14.9	72.4	2170	12
	5.00	2 1/2	1243.5	1244.7	733.0	511.7	2.430	4.2	15.0	71.8	2110	12
	5.00	2 1/2	1243.9	1244.8	732.7	512.1	2.429	4.3	15.0	71.6	2140	13
							2.431	4.2	15.0	72.0	2140	12

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
3	5.50	2 1/2	1254.7	1255.6	742.8	512.8	2.447	2.9	14.8	80.5	2250	13
	5.50	2 1/2	1246.3	1247.4	736.7	510.7	2.440	3.1	15.1	79.1	2250	14
	5.50	2 1/2	1258.2	1259.3	744.3	515.0	2.443	3.0	15.0	79.7	2260	13
							2.443	3.0	14.9	79.8	2250	13
4	6.00	2 1/2	1252.4	1253.5	741.9	511.6	2.448	2.2	15.2	85.7	2310	14
	6.00	2 1/2	1254.8	1255.7	744.0	511.7	2.452	2.0	15.0	86.7	2340	15
	6.00	2 1/2	1255.5	1256.4	744.0	512.4	2.450	2.1	15.1	86.2	2350	14
							2.450	2.1	15.1	86.2	2330	14

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
5	6.50	2 1/2	1262.8	1264.1	746.4	517.7	2.439	1.9	15.9	88.3	2270	15
	6.50	2 1/2	1261.2	1262.2	744.3	517.9	2.435	2.0	16.0	87.4	2230	16
	6.50	2 1/2	1264.5	1265.3	747.2	518.1	2.441	1.8	15.8	88.7	2290	14
							2.438	1.9	15.9	88.1	2260	15



ภาพผนวกที่ 2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์การออกแบบ โดยวิธีมาร์แชลระหว่างคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 โดยใช้มวลรวมหินปูน

ตารางผนวกที่ ๑ ผลการทดสอบหา Strength Index ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
SOAKED												
1	5.03	2 9/16	1253.6	1256.5	731.5	525.0	2.388	5.8	16.5	64.2	4450	23
2	5.03	2 9/16	1252.8	1253.9	728.8	525.1	2.386	6.0	16.5	63.9	4410	27
3	5.03	2 9/16	1253.8	1256.5	725.9	530.6	2.363	6.9	17.4	60.3	4440	25
4	5.03	2 9/16	1255.8	1257.0	730.7	526.3	2.386	6.0	16.6	63.9	4460	25
							2.381	5.7	16.7	65.9	4440	25
UNSOAKED												
1	5.03	2 9/16	1250.0	1251.9	727.0	524.9	2.381	6.1	16.9	63.5	5920	18
2	5.03	2 1/2	1251.1	1253.2	730.7	522.5	2.394	5.6	16.4	65.6	5890	18
3	5.03	2 3/16	1248.5	1252.0	724.3	527.7	2.366	6.7	17.4	61.3	5830	20
4	5.03	2 3/16	1251.2	1255.2	729.9	525.3	2.382	6.1	16.9	63.5	5900	20
							2.381	5.7	16.9	65.9	5890	19
Strength Index = Soaked * 100 / Unsoaked = 75.4 %												

ตารางผนวกที่ 10 สูตรส่วนผสมใช้งานของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม

Description		Mixture	Tolerant Limit
Design Asphalt Content	(% By Weight of Aggregate)	5.03	± 0.3 %
Marshall Density	Gm./Ml.	2.436	2.427 – 2.443
Marshall Air Voids	%	4.0	3.4 – 4.7
Voids in Mineral Aggregate	%	14.9	> 14
Voids Filled with Asphalt	%	72.7	69 - 77
Marshall Stability	lbs.	2170	> 2000
Marshall Flow	0.01"	12.0	11 - 13
Marshall Stability/Marshall Flow	Lbs./0.01"	180	> 160
Strength Index	%	75.4	> 75
Percent Compaction ≥ 98 % of Daily Marshall Compaction Density			

ตารางผนวกที่ 11 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนก่อนบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์

Simple No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Pan No. LM1	100.00	88.90	79.98	55.43	40.46	27.58	17.33	9.73	4.80	4.09
Pan No. LM2	100.00	89.49	82.05	57.38	40.51	28.49	18.38	10.55	5.30	4.11
Pan No. LM3	100.00	91.61	81.84	56.08	39.62	27.41	17.48	10.01	5.02	4.05
Pan No. LM6	100.00	90.01	80.24	54.60	40.08	27.70	17.71	9.99	4.97	3.90
Pan No. LM7	100.00	93.29	79.30	50.48	36.69	27.00	17.51	10.03	4.74	3.75
Average	100.00	90.86	80.68	54.79	39.47	27.64	17.68	10.06	4.97	3.98
Stdev.	0.00	1.75	1.21	2.62	1.60	0.55	0.41	0.30	0.22	0.15

ตารางผนวกที่ 12 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
Pan No. LM1	5.03	2 1/2	1258.4	1259.1	742.4	516.7	2.435	4.0	14.9	73.2	2150	11
Pan No. LM2	5.03	2 1/2	1258.2	1258.9	742.2	516.7	2.435	4.0	14.9	73.2	2140	12
Pan No. LM3	5.03	2 1/2	1258.9	1259.5	742.5	517.0	2.435	4.0	14.9	73.2	2140	12
Pan No. LM6	5.03	2 1/2	1259.1	1259.5	742.5	517.0	2.435	4.0	14.9	73.2	2140	11
Pan No. LM7	5.03	2 1/2	1258.8	1259.7	742.7	517.0	2.435	4.0	14.9	73.2	2150	13

ตารางผนวกที่ 13 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูเป็นมวลรวมหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์

Extraction	Simple No.					
	Pan No. LM1	Pan No. LM2	Pan No. LM3	Pan No. LM6	Pan No. LM7	
Weight of Bowl + Filtering	397.0 (gm)	398.1	397.3	397.1	397.1	
Weight of Bowl + Filtering + Sample	1653.4 (gm)	1654.1	1654.5	1654.1	1654.0	
Weight of Sample.....W1	1256.4 (gm)	1256.0	1257.2	1257.0	1256.9	
Weight of Bowl + Filter Ring + Weight of Extraction Aggregate	1589.5 (gm)	1587.1	1587.0	1587.3	1587.2	
Weight of Extraction Aggregate.....W2	1192.5 (gm)	1189.0	1189.7	1190.2	1190.1	
Weight of Ash in Extract.....W3	6.5 (gm)	9.5	9.9	9.3	9.2	
Bitumen Content by Weight of Aggregate ($W_3 - W_2 - W_1$)*100/($W_2 + W_3$)	4.79 (%)	4.80	4.80	4.97	4.80	
Correction	0.23 (%)	0.23	0.23	0.23	0.23	
Bitumen Content by Correction	5.02 (%)	5.03	5.03	5.02	5.03	

ตารางผนวกที่ 14 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์

Simple No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Pan No. LM1	100.00	90.63	81.97	59.82	44.94	31.33	20.89	12.98	7.60	6.18
Pan No. LM2	100.00	91.13	84.64	61.86	45.20	32.27	21.90	13.92	8.13	6.42
Pan No. LM3	100.00	93.17	83.71	60.03	43.88	31.01	20.58	12.97	7.50	5.99
Pan No. LM6	100.00	92.42	82.91	59.08	44.80	31.94	21.29	13.47	7.96	6.42
Pan No. LM7	100.00	94.60	81.73	55.12	41.37	30.65	21.02	13.31	7.71	5.93
Average	100.00	92.39	82.99	59.18	44.04	31.44	21.13	13.33	7.78	6.19
Stddev.	0.00	1.60	1.21	2.49	1.57	0.66	0.50	0.39	0.26	0.23

ตารางผนวกที่ 15 การทดลองหาจำนวนรอบในการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบปัลลาทอร์ด้วยวิธีซูเปอร์เพฟเพื่อให้แอสฟัลต์คอนกรีต
ที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมมีช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์

Simple No.	Number of Gyrations	Ac. by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (ML)	Density (gm/ML)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)
LG50-1	50	5.03	2 9/16	1258.9	1267.7	745.2	522.5	2.409	5.1	15.8	67.7
LG50-2	50	5.03	2 1/2	1258.7	1267.5	745.1	522.4	2.409	5.1	15.8	67.7
LG50-3	50	5.03	2 9/16	1259.0	1267.8	745.3	522.5	2.410	4.9	15.7	68.8
								2.409	5.0	15.8	68.1
LG75-1	75	5.03	2 1/2	1258.6	1267.4	748.1	519.3	2.424	3.9	15.1	71.1
LG75-2	75	5.03	2 1/2	1259.0	1267.8	748.4	519.4	2.424	4.5	15.7	71.1
LG75-3	75	5.03	2 9/16	1259.0	1267.8	748.3	519.5	2.423	4.8	15.9	70.6
								2.424	4.4	15.6	70.9

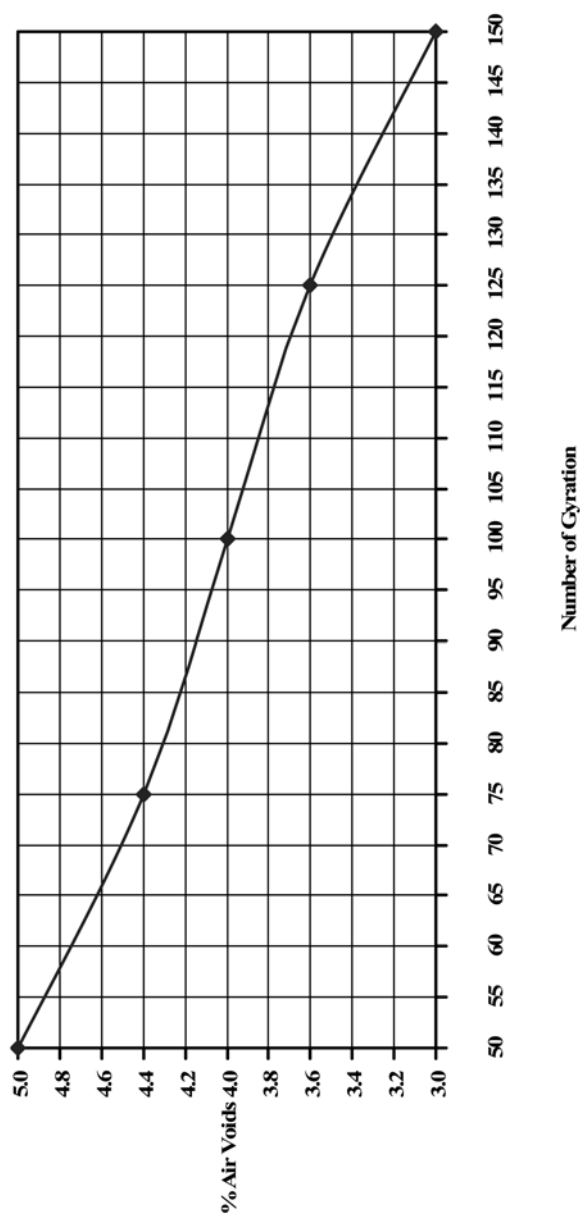
ตารางผนวกที่ 15 (ต่อ)

Simple No.	Number of Gyration	Ac. by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (MI)	Density (gm/MI)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)
LG100-1	100	5.03	2 1/2	1258.9	1267.7	750.8	516.9	2.435	4.0	14.9	73.2
LG100-2	100	5.03	2 1/2	1258.7	1267.5	750.7	516.8	2.436	3.9	14.8	73.6
LG100-3	100	5.03	2 1/2	1259.3	1268.1	751.0	517.1	2.435	4.0	14.9	73.2
								2.435	4.0	14.9	73.3
LG125-1	125	5.03	2 1/2	1259.4	1268.2	753.2	515.0	2.445	3.6	15.0	75.2
LG125-2	125	5.03	2 1/2	1258.9	1267.7	752.9	514.8	2.445	3.6	15.1	75.2
LG125-3	125	5.03	2 1/2	1259.0	1267.8	753.0	515.9	2.448	3.6	14.5	75.2
								2.439	3.6	14.5	75.2

ตารางผนวกที่ 15 (ต่อ)

Simple No.	Number of Gyration	Ac. by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)
LG150-1	150	5.03	2 1/2	1259.1	1267.9	756.2	511.7	2.461	3.0	14.0	78.6
LG150-2	150	5.03	2 1/2	1258.8	1267.6	756.0	511.6	2.461	3.0	14.0	78.6
LG150-3	150	5.03	2 1/2	1258.6	1267.4	755.9	511.5	2.461	3.0	14.0	78.6
								2.461	3.0	14.0	78.6

Relationship between Air Voids and Number of Gyration of Limestone Aggregate due to
Compaction by Gyratory Compactor



ภาพผนวกที่ 3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศกับจำนวนรอบของการบดทับมวลรวมหินปูนเนื่องจากการบดทับด้วย
เครื่องบดทับแบบไจราทอรี

ตารางผนวกที่ 16 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนก่อนบดทับโดยเครื่องดทับแบบไจราทอร์ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ

Simple No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Pan No. LG1	100.00	94.55	82.92	56.07	39.84	26.92	16.96	9.74	4.92	3.89
Pan No. LG2	100.00	95.55	82.53	54.40	39.70	27.49	17.60	10.05	4.89	3.67
Pan No. LG3	100.00	92.52	83.91	56.80	40.25	27.42	17.38	9.86	4.97	3.80
Pan No. LG4	100.00	94.04	85.00	54.14	37.59	24.75	14.72	7.20	4.34	3.21
Pan No. LG5	100.00	91.80	82.25	54.39	39.73	26.98	16.92	9.50	4.63	3.55
Average	100.00	93.69	83.32	55.16	39.42	26.71	16.72	9.27	4.75	3.62
Stdev.	0.00	1.52	1.13	1.20	1.05	1.13	1.15	1.17	0.26	0.26

ตารางผนวกที่ 17 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบ ไซราทอรี
ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (lm)	Vol. (ml)	Density (gm/ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
Pan No. LG1	5.03	2 1/2	1258.6	1267.4	750.6	516.8	2.435	4.0	14.9	73.2	4730	26
Pan No. LG2	5.03	2 1/2	1259.3	1268.1	751.0	517.1	2.435	4.0	14.9	73.2	4600	25
Pan No. LG3	5.03	2 1/2	1259.1	1267.9	750.9	517.0	2.435	4.0	14.9	73.2	4600	27
Pan No. LG4	5.03	2 1/2	1258.4	1267.2	750.5	516.7	2.435	4.0	14.9	73.2	4310	24
Pan No. LG5	5.03	2 1/2	1259.0	1267.8	750.8	517.0	2.435	4.0	14.9	73.2	4290	26

ตารางผนวกที่ 18 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ

Extraction	Simple No.				
	Pan No. LG1	Pan No. LG2	Pan No. LG3	Pan No. LG4	Pan No. LG5
Weight of Bowl + Filtering	398.5	460.8	397.6	460.3	398.3
Weight of Bowl + Filtering + Sample	1655.1	1716.7	1653.7	1716.8	1654.3
Weight of Sample.....W1	1256.6	1255.9	1256.1	1256.5	1256.0
Weight of Bowl + Filter Ring + Weight of Extraction Aggregate	1588.6	1647.7	1586.4	1650.8	1586.4
Weight of Extraction Aggregate.....W2	1190.1	1186.9	1188.8	1190.5	1188.1
Weight of Ash in Extract.....W3	8.9	11.5	9.8	8.6	10.5
Bitumen Content by Weight of Aggregate ($W_3 - W_2 - W_1$)*100/($W_2 + W_3$)	4.80	4.80	4.80	4.79	4.79
Correction	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Bitumen Content by Correction	5.03	5.03	5.03	5.02	5.02

ตารางผนวกที่ 19 อัตราส่วนขนาดกละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนหลังบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบ เจริญธรรมด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 100 รอบ

Simple No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Pan No. LG1	100.00	95.45	85.07	58.80	42.77	29.68	20.06	13.12	7.84	6.45
Pan No. LG2	100.00	96.50	84.70	57.03	42.54	29.93	20.29	12.89	7.67	6.13
Pan No. LG3	100.00	93.30	85.97	60.02	43.27	29.89	20.00	12.65	7.84	6.29
Pan No. LG4	100.00	95.02	87.29	56.91	40.23	26.84	16.98	9.62	6.87	5.38
Pan No. LG5	100.00	92.52	84.84	57.21	42.94	29.44	19.48	12.21	7.54	6.07
Average	100.00	94.56	85.57	57.99	42.35	29.15	19.37	12.10	7.55	6.06
Stdev.	0.00	1.62	1.08	1.37	1.21	1.31	1.36	1.43	0.40	0.41

ตารางผนวกที่ 20 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมก่อนบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 98 เปรอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
LR98_1_3	5.03	2 1/2	1242.7	1251.4	741.1	510.3	2.435	4.0	14.9	73.2	2140	12
LR98_1_4	5.03	2 1/2	1250.0	1258.8	745.5	513.3	2.435	4.0	14.9	73.2	2110	13
							2.435	4.0	14.9	73.2	2130	13
LR98_2_3	5.03	2 1/2	1244.2	1252.9	742.0	510.9	2.433	4.0	15.0	73.2	2110	11
LR98_2_4	5.03	2 1/2	1246.1	1254.8	743.1	511.7	2.435	4.0	15.0	73.2	2140	11
LR98_2_5	5.03	2 1/2	1244.9	1253.6	742.5	511.1	2.436	3.9	15.0	73.6	2140	11
							2.436	4.0	15.0	73.3	2130	11

ตารางผนวกที่ 20 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
LR98_3_3	5.01	2 1/2	1253.7	1262.5	747.8	514.7	2.436	4.0	14.8	73.0	2200	13
LR98_3_4	5.01	2 1/2	1245.9	1254.6	743.0	511.6	2.435	4.1	14.9	72.5	2170	12
LR98_3_5	5.01	2 1/2	1248.5	1257.2	744.6	512.6	2.436	4.0	14.8	73.0	2210	13
							2.436	4.0	14.8	72.8	2190	13
LR98_4_3	5.02	2 1/2	1247.8	1256.5	744.2	512.3	2.436	4.0	14.8	73.0	2120	11
LR98_4_4	5.02	2 1/2	1248.2	1256.9	744.4	512.5	2.436	4.0	14.8	73.0	2160	12
LR98_4_5	5.02	2 1/2	1245.9	1254.6	743.0	511.6	2.435	4.1	14.9	72.5	2160	11
							2.436	4.0	14.8	72.8	2150	11

ตารางผนวกที่ 20 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
LR98_5_3	5.03	2 1/2	1245.3	1254.0	742.5	511.5	2.435	4.0	14.9	73.2	2190	13
LR98_5_4	5.03	2 1/2	1247.3	1256.0	743.8	512.2	2.435	4.0	14.9	73.2	2160	12
LR98_5_5	5.03	2 1/2	1248.2	1256.9	744.4	512.5	2.436	3.9	14.8	73.6	2210	13
							2.436	4.0	14.9	73.3	2190	13

ตารางผนวกที่ 21 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมก่อนบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
 ด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Extraction	Simple No.				
	LR98_1	LR98_2	LR98_3	LR98_4	LR98_5
Weight of Bowl + Filterring	1695.8	1696.0	1696.5	1696.0	1695.7
Weight of Bowl + Filterring + Sample	2608.5	2609.2	2608.1	2608.2	2609.2
Weight of Sample..... W1	912.7	913.2	911.6	912.2	913.5
Weight of Bowl + Filter Ring + Weight of Extraction Aggregate	2559.6	2561.2	2559.2	2560.4	2559.2
Weight of Extraction Aggregate..... W2	863.8	865.2	862.7	864.4	863.5
Weight of Ash in Extract..... W3	7.1	6.2	7.3	6.1	8.2
Bitumen Content by Weight of Aggregate ($W_3 - W_2 - W_1$)*100/($W_2 + W_3$)	4.80	4.80	4.78	4.79	4.80
Correction	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Bitumen Content by Correction	5.03	5.03	5.01	5.02	5.03

ตารางผนวกที่ 22 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนก่อนบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Sample No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
LR98_1	100.00	91.19	80.23	56.87	41.08	27.37	18.78	13.26	9.12	4.50
LR98_2	100.00	88.98	80.62	55.81	37.33	24.39	16.15	10.77	6.94	3.00
LR98_3	100.00	87.09	80.12	56.78	39.09	25.85	17.66	12.32	8.38	4.00
LR98_4	100.00	89.73	82.29	56.81	38.77	25.40	17.49	12.78	9.52	4.56
LR98_5	100.00	87.60	79.79	55.42	37.26	24.78	17.47	12.74	9.33	4.07
Average	100.00	88.92	80.61	56.34	38.70	25.56	17.51	12.37	8.66	4.03
Stdev.	0.00	1.65	0.98	0.68	1.56	1.16	0.93	0.96	1.05	0.63

ตารางผนวกที่ 23 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ให้ห้ระบุเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (cm)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	%Compaction
LR98_1_A	5.03	5.5	984.5	985.6	572.9	412.6	2.386	6.0	16.6	63.9	
LR98_1_B	5.03	5.3	955.1	956.4	555.8	400.3	2.386	6.0	16.6	63.9	
							2.386	6.0	16.6	63.9	98
LR98_2_A	5.02	6.4	1122.5	1123.6	653.3	470.3	2.387	5.9	16.5	64.2	
LR98_2_B	5.02	5.3	980.2	981.2	570.4	410.8	2.386	6.0	16.6	63.9	
							2.387	6.0	16.6	64.1	98
LR98_3_C	5.03	5.2	877.5	878.4	510.6	367.8	2.386	6.0	16.6	63.9	
LR98_3_D	5.03	5.6	950.4	951.4	553.2	398.2	2.387	5.9	16.5	64.2	
							2.387	6.0	16.6	64.1	98

ตารางผนวกที่ 23 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (cm)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (MI)	Density (gm/MI)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	%Compaction
LR98_4_A	5.02	5.8	1171.8	1173.0	681.9	491.1	2.386	6.0	16.6	63.9	
LR98_4_B	5.02	5.8	1088.5	1089.6	633.5	456.1	2.387	5.9	16.5	64.2	
							2.387	6.0	16.6	64.1	98
LR98_5_A	5.02	5.7	1027.2	1028.2	597.8	430.4	2.387	5.9	16.5	64.2	
LR98_5_B	5.02	5.9	1080.6	1081.7	628.8	452.9	2.386	6.0	16.6	63.9	
							2.387	6.0	16.6	64.1	98

ตารางผนวกที่ 24 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Extraction	Simple No.				
	LR98_1	LR98_2	LR98_3	LR98_4	LR98_5
Weight of Bowl + Filtering	(gm) 1695.8	1696.3	1696.4	1696.1	1696.0
Weight of Bowl + Filtering + Sample	(gm) 2603.5	2595.8	2598.6	2594.4	2574.9
Weight of Sample.....W1	(gm) 907.7	899.5	902.2	898.3	878.9
Weight of Bowl + Filler Ring + Weight of Extraction Aggregate	(gm) 2552.6	2548.4	2549.9	2546.9	2527.0
Weight of Extraction Aggregate..... W2	(gm) 856.8	852.1	853.5	850.8	831.0
Weight of Ash in Extract..... W3	(gm) 9.3	6.3	7.4	6.4	7.7
Bitumen Content by Weight of Aggregate ($W_3-W_2-W_1$)*100/(W_2+W_3)	(%) 4.80	4.79	4.80	4.79	4.79
Correction	(%) 0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Bitumen Content by Correction	(%) 5.03	5.02	5.03	5.02	5.02

ตารางผนวกที่ 25 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนหลังบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
 ด้วย 98 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Sample No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
LR98_1	100.00	93.03	81.15	57.83	41.69	27.81	19.06	13.84	9.88	5.25
LR98_2	100.00	89.74	81.64	56.71	38.27	25.23	17.13	11.92	8.23	3.67
LR98_3	100.00	87.26	81.65	57.68	39.38	26.84	18.41	12.97	9.45	4.93
LR98_4	100.00	91.94	83.59	57.71	39.48	25.74	18.01	13.37	10.14	4.85
LR98_5	100.00	88.47	81.09	55.98	37.60	25.81	18.31	13.37	9.65	4.10
Average	100.00	90.09	81.82	57.18	39.28	26.29	18.18	13.09	0.47	4.57
Stddev.	0.00	2.39	1.02	0.81	1.56	1.03	0.70	0.73	0.74	0.65

ตารางผนวกที่ 26 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมก่อนบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 97 เปรอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
LR97_1_3	5.02	2 1/2	1245.0	1253.7	742.6	511.1	2.436	4.0	14.8	73.0	2110	11
LR97_1_4	5.02	2 1/2	1242.7	1251.4	741.2	510.2	2.436	4.0	14.8	73.0	2090	11
							2.436	4.0	14.8	73.0	2100	11
LR97_2_3	5.02	2 1/2	1246.6	1255.3	743.5	511.8	2.436	4.0	14.8	73.0	2110	11
LR92_2_4	5.02	2 1/2	1246.8	1255.5	743.6	511.9	2.436	4.0	14.8	73.0	2100	11
							2.436	4.0	14.8	73.0	2110	11

ตารางผนวกที่ 26 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
LR97_3_3	5.03	2 1/2	1243.0	1251.7	741.3	510.4	2.435	4.0	14.9	73.2	2190	11
LR97_3_4	5.03	2 1/2	1242.2	1250.9	740.8	510.1	2.435	4.0	14.9	73.2	2210	12
							2.435	4.0	14.9	73.2	2200	12
LR97_4_3	5.03	2 1/2	1243.8	1252.5	741.8	510.7	2.435	4.0	14.9	73.2	2120	11
LR97_4_4	5.03	2 1/2	1247.1	1255.8	743.8	512.0	2.436	3.9	14.8	73.6	2110	11
							2.436	4.0	14.9	73.4	2120	11

ตารางผนวกที่ 27 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูเป็นมวลรวมก่อนบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
 ด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Extraction	Simple No.			
	LR97_1	LR97_2	LR97_3	LR97_4
Weight of Bowl + Filterring	(gm)	1699.9	1695.7	1696.1
Weight of Bowl + Filterring + Sample	(gm)	2609.8	2607.9	2608.8
Weight of Sample.....W1	(gm)	909.9	912.2	912.7
Weight of Bowl + Filter Ring + Weight of Extraction Aggregate	(gm)	2560.6	2556.9	2558.8
Weight of Extraction Aggregate.....W2	(gm)	860.7	861.2	862.7
Weight of Ash in Extract.....W3	(gm)	7.6	9.3	8.2
Bitumen Content by Weight of Aggregate	(%)	4.79	4.79	4.80
$(W_3 - W_2 - W_1) * 100 / (W_2 + W_3)$				
Correction	(%)	0.23	0.23	0.23
Bitumen Content by Correction	(%)	5.02	5.02	5.03

ตารางผนวกที่ 28 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนก่อนบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Simple No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
LR97_1	100.00	89.90	80.50	58.03	35.29	23.48	16.41	11.49	7.66	4.10
LR97_2	100.00	90.09	82.41	57.98	40.83	26.39	17.67	12.82	8.34	4.48
LR97_3	100.00	88.79	78.53	57.12	39.88	28.10	19.88	13.42	8.06	4.96
LR97_4	100.00	88.61	80.71	56.76	39.23	25.79	17.07	11.37	7.42	4.01
Average	100.00	89.35	80.54	57.48	38.81	25.94	17.76	12.28	7.87	4.39
Stdev.	0.00	0.76	1.59	0.63	2.44	1.91	1.51	1.01	0.41	0.43

ตารางผนวกที่ 29 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (cm)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	%Compaction
LR97_1_A	5.03	4.6	820.3	821.1	474.0	347.1	2.363	6.9	17.4	60.3	
LR97_1_B	5.03	5.4	922.0	922.9	532.8	390.1	2.363	6.9	17.4	60.3	
							2.363	6.9	17.4	60.3	97
LR97_2_A	5.02	6.3	1092.2	1093.3	631.1	462.2	2.363	6.9	17.4	60.3	
LR97_2_B	5.02	6.1	1084.4	1085.5	626.6	458.9	2.363	6.9	17.4	60.3	
							2.363	6.9	17.4	60.3	97
LR97_3_A	5.02	5.0	791.3	792.1	457.2	334.9	2.363	6.9	17.4	60.3	
LR97_3_B	5.02	5.0	886.8	887.7	512.4	375.3	2.363	6.9	17.4	60.3	
							2.363	6.9	17.4	60.3	97

ตารางผนวกที่ 29 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt.		Height of Specimen (cm)	Wt.in		Wt. SSD (gm)	Wt. in		Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air		VMA (%)	VFA (%)	%Compaction
	Aggregate (%)			Air (gm)			Water (Gm)				Voids (%)				
LR97_4_A	5.02		5.5	986.7		987.7	570.2		417.5	2.363	6.9		17.4	60.3	
LR97_4_B	5.02		5.1	876.7		877.6	506.6		371.0	2.363	6.9		17.4	60.3	
										2.363	6.9		17.4	60.3	97

ตารางผนวกที่ 30 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 97 เปอร์เซนต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Extraction	Simple No.			
	LR97_1	LR97_2	LR97_3	LR97_4
Weight of Bowl + Filtrering	(gm) 1696.0	1696.4	1695.9	1696.4
Weight of Bowl + Filtrering + Sample	(gm) 2593.4	2603.0	2605.3	2599.3
Weight of Sample.....W1	(gm) 897.4	906.6	909.4	902.9
Weight of Bowl + Filter Ring + Weight of Extraction Aggregate	(gm) 2545.1	2553.8	2556.3	2551.7
Weight of Extraction Aggregate.....W2	(gm) 849.1	857.4	860.4	855.3
Weight of Ash in Extract.....W3	(gm) 7.2	7.8	7.4	6.3
Bitumen Content by Weight of Aggregate	(%) 4.80	4.79	4.79	4.79
$(W_3 - W_2 - W_1) * 100 / (W_2 + W_3)$				
Correction	(%) 0.23	0.23	0.23	0.23
Bitumen Content by Correction	(%) 5.03	5.02	5.02	5.02

ตารางผนวกที่ 31 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนหลังบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 97 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Simple No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
LR97_1	100.00	90.93	81.20	58.77	35.74	24.21	16.59	11.60	7.93	4.31
LR97_2	100.00	90.89	83.32	58.37	41.47	26.92	17.90	13.04	8.64	4.76
LR97_3	100.00	89.62	79.49	57.63	40.27	28.57	20.37	13.65	8.48	5.38
LR97_4	100.00	89.67	81.50	57.12	39.58	26.43	17.65	11.59	7.70	4.23
Average	100.00	90.28	81.38	57.97	39.27	26.53	18.13	12.48	8.19	4.67
Stdev.	0.00	0.73	1.57	0.74	2.48	1.80	1.60	1.04	0.45	0.53

ตารางผนวกที่ 32 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูเป็นมวลรวมก่อนบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 96 เมอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
LR96_1_3	5.02	2 1/2	1244.0	1252.7	741.9	510.8	2.435	4.0	14.9	73.0	2100	11
LR96_1_4	5.02	2 1/2	1243.2	1251.9	741.4	510.5	2.435	4.0	14.9	73.0	2100	11
							2.435	4.0	14.9	73.0	2100	11
LR96_2_3	5.02	2 1/2	1244.9	1253.6	742.5	511.1	2.436	4.0	14.8	73.2	2090	11
LR96_2_4	5.02	2 1/2	1243.5	1252.2	741.6	510.6	2.435	4.0	14.9	73.0	2090	11
							2.436	4.0	14.8	73.1	2090	11

ตารางผนวกที่ 32 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) lbs.	Flow (1/100")
LR96_3_3	5.03	2 1/2	1244.0	1252.7	741.9	510.8	2.435	4.0	14.9	73.1	2090	11
LR96_3_4	5.03	2 1/2	1243.1	1251.8	741.4	510.4	2.436	4.0	14.8	73.3	2100	11
							2.436	4.0	14.8	73.2	2100	11
LR96_4_3	5.03	2 1/2	1248.6	1257.3	744.7	512.6	2.436	4.0	14.8	73.3	2120	12
LR96_4_4	5.03	2 1/2	1246.4	1255.1	743.3	511.8	2.435	4.0	14.9	73.1	2120	12
LR96_4_5	5.03	2 1/2	1245.2	1253.9	742.6	511.3	2.435	4.0	14.9	73.1	2110	11
							2.435	4.0	14.9	73.1	2120	12

ตารางผนวกที่ 32 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
LR96_5_1	5.03	2 1/2	1246.9	1255.6	743.6	512.0	2.435	4.0	14.9	73.1	2200	13
LR96_5_2	5.03	2 1/2	1250.3	1259.1	745.7	513.4	2.435	4.0	14.9	73.1	2170	12
LR96_5_3	5.03	2 1/2	1245.2	1253.9	742.6	511.3	2.435	4.0	14.9	73.1	2210	13
							2.435	4.0	14.9	73.1	2190	13

ตารางผนวกที่ 33 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูเป็นมวลรวมก่อนบดทับโดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Extraction	Simple No.				
	LR96_1	LR96_2	LR96_3	LR96_4	LR96_5
Weight of Bowl + Filtering	(gm)	1695.9	1695.8	1696.2	1696.3
Weight of Bowl + Filtering + Sample	(gm)	2609.8	2607.4	2609.4	2608.8
Weight of Sample.....W1	(gm)	913.9	911.6	913.2	912.5
Weight of Bowl + Filter Ring + Weight of Extraction Aggregate	(gm)	2559.1	2560.9	2560.8	2559.9
Weight of Extraction Aggregate.....W2	(gm)	863.2	865.1	864.6	863.6
Weight of Ash in Extract.....W3	(gm)	8.9	4.8	6.8	7.1
Bitumen Content by Weight of Aggregate	(%)	4.79	4.79	4.80	4.80
$(W_3 - W_2 - W_1) * 100 / (W_2 + W_3)$					
Correction	(%)	0.23	0.23	0.23	0.23
Bitumen Content by Correction	(%)	5.02	5.02	5.03	5.03

ตารางผนวกที่ 34 อัตราส่วนขนาดตะลະ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนก่อนบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ยกก่อสร้าง
ด้วย 96 เปรอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Sample No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
LR96_1	100.00	91.08	82.69	59.01	40.81	27.07	18.49	12.90	8.76	4.17
LR96_2	100.00	93.13	81.37	55.29	40.51	27.88	19.22	12.05	8.46	4.66
LR96_3	100.00	91.11	82.11	60.28	40.97	26.69	17.52	12.38	8.43	4.64
LR96_4	100.00	93.40	83.23	56.58	38.90	25.18	16.51	11.12	7.60	4.50
LR96_5	100.00	87.55	79.85	55.85	38.76	24.71	16.59	11.33	7.45	4.90
Average	100.00	91.25	81.85	57.40	39.99	26.31	17.67	11.96	8.14	4.57
Stddev.	0.00	2.34	1.31	2.15	1.07	1.33	1.18	0.74	0.58	0.27

ตารางผนวกที่ 35 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (cm)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	% Compaction
LR96_1_A	5.02	5.4	916.4	917.3	525.5	391.8	2.339	7.2	18.0	59.9	
LR96_1_B	5.02	5.6	922.3	923.2	528.8	394.4	2.338	7.9	18.6	57.5	
							2.339	7.6	18.3	58.7	96
LR96_2_A	5.03	5.8	1005.3	1006.3	576.4	430.4	2.336	7.0	17.8	60.7	
LR96_2_B	5.03	4.9	811.2	812.0	465.1	346.9	2.338	9.1	19.6	53.8	
							2.337	8.0	18.7	57.3	96
LR96_3_A	5.03	6.4	1109.2	1110.3	636.0	474.3	2.339	8.0	18.7	57.4	
LR96_3_B	5.03	6.1	1099.4	1100.5	630.4	470.1	2.339	6.5	17.4	62.7	
							2.339	7.2	18.1	60.1	96

ตารางผนวกที่ 35 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (cm)	Wt.in		Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)		VMA (%)	VFA (%)	% Compaction
			Air (gm)						(%)	(%)			
LR96_4_A	5.02	6.1	1081.2		1082.3	620.0	462.3	2.339	7.8	18.2	57.2		
LR96_4_B	5.02	5.9	975.9		976.9	559.6	417.3	2.339	7.8	18.2	57.2		
								2.339	7.8	18.2	57.2		96
LR96_5_A	5.03	4.9	812.0		812.8	465.6	347.2	2.339	7.8	18.2	57.3		
LR96_5_B	5.03	5.1	915.4		916.3	524.9	391.4	2.339	7.8	18.2	57.3		
								2.339	7.8	18.2	57.3		96

ตารางผนวกที่ 36 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 96 เบอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Extraction	Simple No.				
	LR96_1	LR96_2	LR96_3	LR96_4	LR96_5
Weight of Bowl + Filtering	(gm)	1696.0	1695.9	1696.6	1696.2
Weight of Bowl + Filtering + Sample	(gm)	2605.8	2604.8	2606.3	2596.9
Weight of Sample.....W1	(gm)	909.8	908.9	909.7	900.7
Weight of Bowl + Filter Ring + Weight of Extraction Aggregate	(gm)	2556.2	2557.8	2555.4	2547.8
Weight of Extraction Aggregate.....W2	(gm)	860.2	861.9	858.8	851.6
Weight of Ash in Extract.....W3	(gm)	8.0	5.4	9.2	7.9
Bitumen Content by Weight of Aggregate $(W_3 - W_2 - W_1) * 100 / (W_2 + W_3)$	(%)	4.79	4.80	4.80	4.79
Correction	(%)	0.23	0.23	0.23	0.23
Bitumen Content by Correction	(%)	5.02	5.03	5.03	5.02

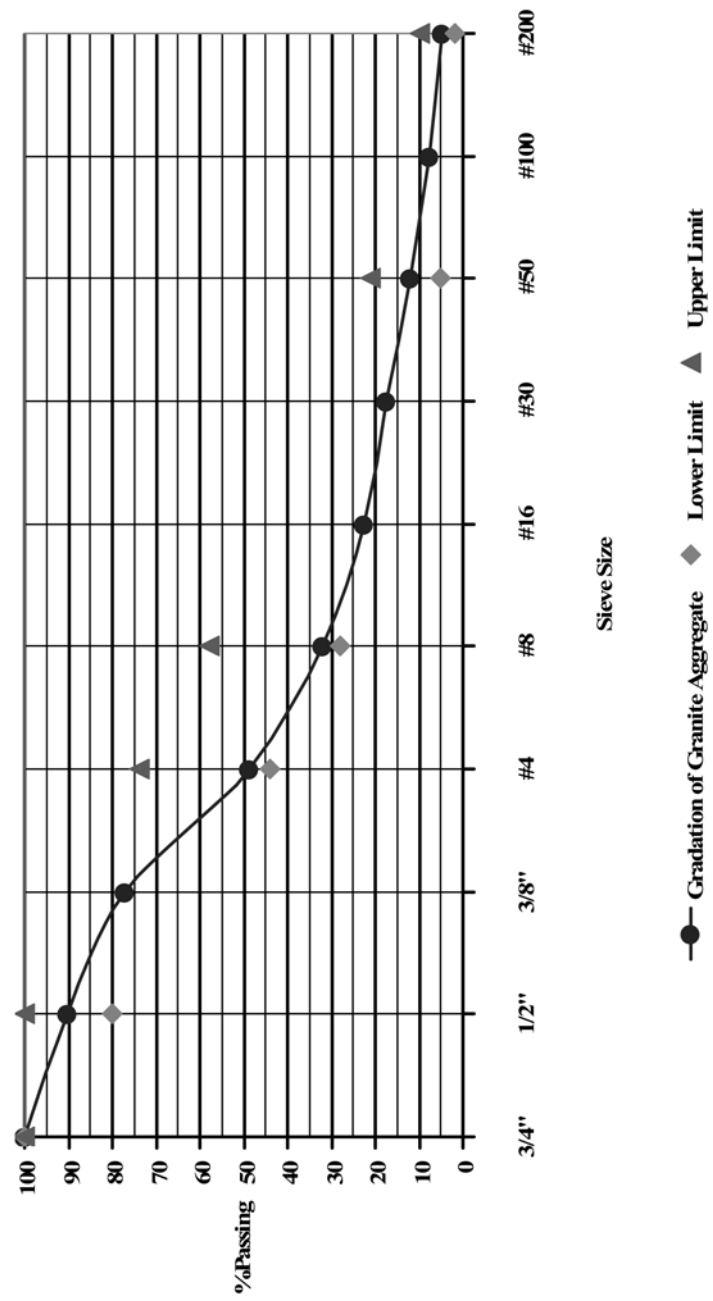
ตารางผนวกที่ 37 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินปูนหลังบดทับ โดยเครื่องจักรบดทับในพื้นที่ก่อสร้าง
ด้วย 96 เปอร์เซ็นต์ของความแน่นในห้องทดลอง

Sample No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
LR96_1	100.00	91.76	83.51	59.29	41.32	27.47	18.63	13.03	8.82	4.18
LR96_2	100.00	93.66	82.19	55.59	40.74	28.22	19.45	12.11	8.57	4.73
LR96_3	100.00	91.92	82.39	60.54	41.46	27.08	17.67	12.55	8.49	4.72
LR96_4	100.00	94.00	83.57	57.08	39.20	25.40	16.69	11.29	7.67	4.51
LR96_5	100.00	88.09	80.40	56.20	39.12	24.99	16.73	11.40	7.49	4.94
Average	100.00	91.88	82.41	57.74	40.37	26.64	17.84	12.08	8.21	4.61
Stdev.	0.00	2.35	1.29	2.10	1.14	1.38	1.20	0.74	0.59	0.29

ตารางผนวกที่ 38 ผลการหาขนาดผลรวมของมวลรวมหินแกรนิตสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์

ชนิดวัสดุ	หินแกรนิต	แอสฟัลต์คอนกรีตชั้น	Wearing Course					
แหล่งวัสดุ	โรงโม่ บริษัทเหมืองวังไผ่ จำกัด กม. 1+850 (L.T.) 5.70 กม. ทางหลวงหมายเลข 4087 ตอน แยกเข้าควนเม็ด – บ้านควนเม็ด							
Sieve Size	HOT BIN					Comb'd.	Desired	Tolerant Limit
	% Passing							
	Lime/Cement	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4			
3/4"				100	100	100	100	100
1/2"				100	89.4	31.7	90.2	80-100
3/8"		100	99.8	25.2	2.7	77.0	-	72-82
# 4		97.2	22.2	1.1	0.3	48.7	44-74	44-54
# 8		73.6	0.7	0.2		31.9	28-58	27-37
# 16		52.6				22.6	-	19-27
# 30		41.0				17.6	-	14-22
# 50		27.6				11.9	5-21	8-16
# 100		18.0				7.7	-	5-11
# 200		11.3				4.9	2-10	4-6
Mix Proportion		43	30	15	12			

Gradation of Granite Aggregate for Design Asphalt Concrete by Marshall Method



ภาพผนวกที่ 4 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนขนาดของมวลรวมหินแกรนิตสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางผนวกที่ 39 ผลการทดสอบคุณสมบัติมวลรวมหินแกรนิตสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์

Description	Filler	Hot Bin 1					Total	Hot Bin 2	Hot Bin 3	Hot Bin 4	Total
		Passing #200	Retain #200								
Mix Proportion	(%)	-	-	43	30	15	12	100			
Bulk Specific Gravity	-	-	2.594	2.602	2.621	2.626	2.632	2.723			
Apparent Specific Gravity	-	2.666	2.655	2.656	2.654	2.654	2.657	2.771			
Effective Specific Gravity	-	-	-	-	-	-	-	2.741			
Water Absorption	(%)	-	0.88	-	0.48	0.41	0.35	-			
Flakiness index	(%)				30	13	9	20			
Elongation	(%)				4	21	12	11			
Asphalt Absorption	(%)							0.31			
Los Angeless Abrasion	(%)	Aggregate 3/4"	=	21.1							
Soundness	(% Wt. Loss)	Aggregate 3/4"	=	0.6	, Fine Aggregate	=	3.5				
Sand Equivalent	(%)	Fine Aggregate	=	73	, Hot Bin 1	=	75				

ตารางผนวกที่ 40 การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวม

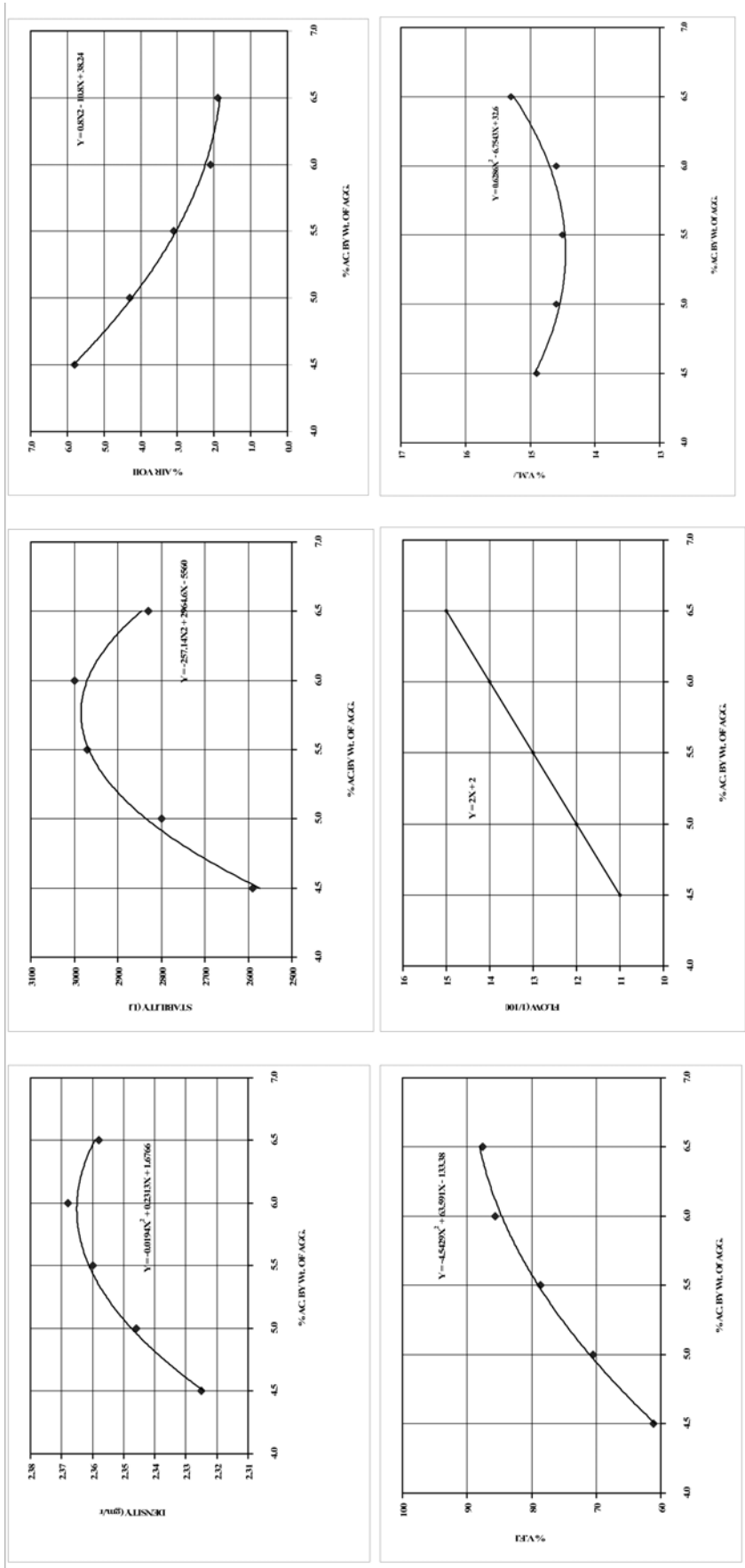
Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (cm)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (MI)	Density (gm/MI)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
1	4.50	6.51	1241.3	1243.2	708.2	535.0	2.320	6.0	15.1	60.4	2560	10
	4.50	6.51	1242.4	1243.7	709.6	534.1	2.326	5.7	14.9	61.5	2620	11
	4.50	6.51	1241.3	1245.3	712.2	533.1	2.328	5.7	14.8	61.8	2590	11
							2.325	5.8	14.9	61.2	2590	11
2	5.00	6.67	1246.2	1248.2	716.8	531.4	2.345	4.3	14.6	70.4	2860	12
	5.00	6.51	1247.0	1246.8	715.3	531.5	2.346	4.3	14.6	70.6	2790	12
	5.00	6.51	1249.5	1251.6	179.0	532.6	2.346	4.3	14.6	70.6	2760	12
							2.346	4.3	14.6	70.5	2800	12

ตารางผนวกที่ 40 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (cm)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
3	5.50	6.51	1250.0	1251.9	721.8	530.1	2.358	3.2	14.5	78.3	2990	14
	5.50	6.51	1252.2	1254.1	723.5	530.6	2.360	3.1	14.5	78.7	2910	13
	5.50	6.51	1250.3	1252.0	722.4	529.6	2.361	3.0	14.4	78.9	3000	13
							2.360	3.1	14.5	78.6	2970	13
4	6.00	6.51	1254.9	1257.7	727.3	530.4	2.366	2.2	14.6	85.4	2990	14
	6.00	6.51	1250.6	1253.2	725.3	527.9	2.369	2.1	14.5	85.5	3050	14
	6.00	6.51	1257.2	1258.1	727.6	530.5	2.370	2.0	14.5	85.5	2970	14
							2.368	2.1	14.6	85.4	3000	14

ตารางผนวกที่ 40 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (cm)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
5	6.50	6.51	1262.6	1266.3	730.2	536.1	2.355	2.0	15.4	87.0	2750	16
	6.50	6.51	1259.2	1261.2	727.6	533.6	2.360	1.8	15.3	88.1	2800	15
	6.50	6.51	1260.8	1263.2	728.7	534.5	2.359	1.9	15.3	87.8	2930	15
							2.358	1.9	15.3	87.6	2830	15



ภาพผนวกที่ 5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์การออกแบบโดยวิธีมาร์แชลระหว่างคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 โดยใช้มวลรวมหินแกรนิต

ตารางผนวกที่ 41 ผลการทดสอบหา Strength Index ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวม

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (cm)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
SOAKED												
1	5.09	6.83	1247.8	1252.1	703.6	548.5	2.275	7.1	17.2	58.9	6440	26
2	5.09	6.83	1246.5	1249.4	700.2	549.2	2.270	7.3	17.4	58.1	6270	24
3	5.09	6.67	1244.7	1251.1	706.1	545.0	2.284	6.7	16.9	60.3	6380	24
4	5.09	6.83	1246.8	1250.0	701.3	548.7	2.272	7.2	17.3	58.5	6450	26
							2.275	7.1	17.2	59.0	6390	25
UNSOAKED												
1	5.09	6.67	1246.3	1250.8	705.7	545.1	2.286	6.6	16.8	60.7	7800	20
2	5.09	6.83	1246.9	1251.4	701.2	550.2	2.266	7.4	17.5	57.6	7860	15
3	5.09	6.67	1247.8	1250.5	706.5	544.0	2.294	6.3	16.5	61.9	7790	14
4	5.09	6.83	1242.5	1249.1	698.5	550.6	2.257	7.8	17.9	56.3	7890	18
							2.276	7.0	17.2	59.1	7840	17
Strength Index = Soaked * 100 / Unsoaked = 81.5 %												

ตารางผนวกที่ 42 สูตรส่วนผสมใช้งานของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวม

Description		Mixture	Tolerant Limit
Design Asphalt Content	(% By Weight of Aggregate)	5.09	± 0.3 %
Marshall Density	Gm./Ml.	2.351	2.339 – 2.359
Marshall Air Voids	%	4.0	3.3 – 4.8
Voids in Mineral Aggregate	%	14.5	> 14
Voids Filled with Asphalt	%	73	69-79
Marshall Stability	lbs.	2,870	> 2,700
Marshall Flow	0.01”	12.2	11 - 13
Marshall Stability/Marshall Flow	Lbs./0.01”	235.2	> 160
Strength Index	%	81.5	> 75
Percent Compaction ≥ 98 % of Daily Marshall Compaction Density			

ตารางผนวกที่ 43 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิตก่อนบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์

Simple No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Pan No. GM1	100.00	88.76	76.53	50.52	32.63	24.86	18.19	13.15	9.17	5.70
Pan No. GM2	100.00	89.70	76.48	49.85	32.69	24.67	18.24	13.58	9.75	5.14
Pan No. GM3	100.00	90.16	77.88	49.84	34.07	26.42	20.11	15.32	9.71	4.59
Pan No. GM4	100.00	88.00	78.03	48.02	32.34	24.45	17.87	13.07	9.12	4.82
Pan No. GM5	100.00	89.11	75.95	50.40	33.34	25.57	19.66	14.07	9.49	4.21
Average	100.00	89.15	76.97	49.73	33.01	25.19	18.81	13.84	9.45	4.89
Stdev.	0.00	0.84	0.93	1.00	0.69	0.80	1.00	0.92	0.29	0.56

ตารางผนวกที่ 44 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์

SimpleNo.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
Pan No. GM1	5.09	2 5/8"	1258.6	1259.5	723.6	535.9	2.349	4.0	14.5	72.4	2970	11
Pan No. GM2	5.09	2 5/8"	1257.7	1258.6	723.1	535.5	2.349	4.0	14.5	72.4	3000	12
Pan No. GM3	5.09	2 5/8"	1258.4	1259.3	723.5	535.8	2.349	4.0	14.5	72.4	3010	12
Pan No. GM4	5.09	2 5/8"	1257.9	1258.8	723.3	535.5	2.349	4.0	14.5	72.4	2950	11
Pan No. GM5	5.09	2 5/8"	1257.6	1258.5	723.3	535.2	2.350	4.0	14.5	72.4	3050	13

ตารางผนวกที่ 45 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์

Extraction	Simple No.				
	Pan No. GM1	Pan No. GM2	Pan No. GM3	Pan No. GM4	Pan No. GM5
Weight of Bowl + Filterring	352.1	352.3	352.2	352.0	352.2
Weight of Bowl + Filterring + Sample	1608.5	1608.0	1608.2	1607.8	1607.8
Weight of Sample..... W1	1256.4	1255.7	1256.0	1255.8	1255.6
Weight of Bowl + Filter Ring + Weight of Extraction Aggregate	1546.2	1546.0	1545.9	1545.1	1546.2
Weight of Extraction Aggregate..... W2	1194.1	1193.7	1193.7	1193.1	1194.0
Weight of Ash in Extract..... W3	4.8	4.6	5.0	5.2	4.2
Bitumen Content by Weight of Aggregate ($W_3 - W_2 - W_1$) * 100 / ($W_2 + W_3$)	4.80	4.79	4.78	4.80	4.79
Correction	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Bitumen Content by Correction	5.03	5.02	5.01	5.03	5.02

ตารางผนวกที่ 46 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิตหลังบดทับโดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์

Simple No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Pan No. GM1	100.00	89.90	78.48	54.33	36.11	27.63	19.95	14.63	10.38	6.25
Pan No. GM2	100.00	90.67	78.05	53.34	35.97	27.45	19.90	15.16	10.79	5.90
Pan No. GM3	100.00	91.25	79.90	53.13	37.46	28.71	21.95	16.67	10.80	5.10
Pan No. GM4	100.00	89.25	79.76	51.81	35.89	26.84	19.76	14.46	10.28	5.67
Pan No. GM5	100.00	90.38	78.04	54.26	36.85	28.23	21.34	15.88	10.55	4.88
Average	100.00	90.29	78.81	53.38	36.45	27.77	20.58	15.36	10.56	5.56
Stdev.	0.00	0.76	0.86	1.03	0.68	0.72	1.00	0.92	0.24	0.57

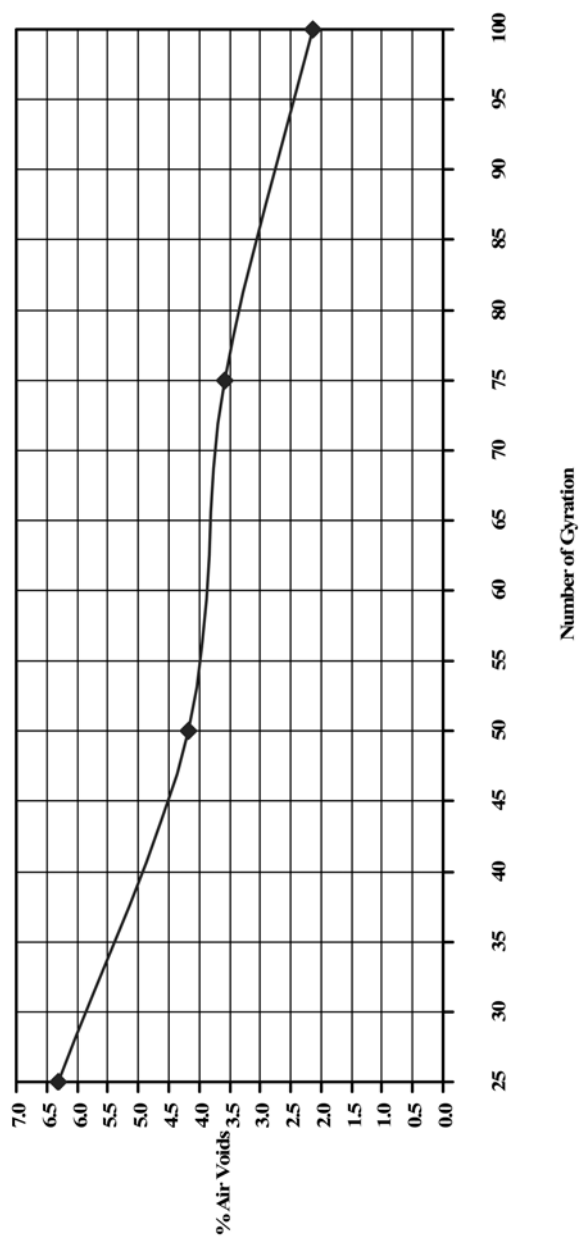
ตารางผนวกที่ 47 การทดสอบหาจำนวนรอบในการบดทับโดยเครื่องบดทับแบบไจราทอร์ด้วยวิธีซูเปอร์เพฟเพื่อให้เอสพีลดคอนกรีต
 ที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมมีช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์

Simple No.	Number of Gyrations	Ac. by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (MI)	Density (gm/MI)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)
GG25-1	25	5.09	2 5/8	1251.4	1256.4	710.2	546.2	2.291	6.4	16.6	61.4
GG25-2	25	5.09	2 5/8	1249.2	1254.2	709.0	545.2	2.291	6.4	16.6	61.4
GG25-3	25	5.09	2 5/8	1250.4	1255.4	709.6	545.8	2.291	6.4	16.6	61.4
								2.291	6.4	16.6	61.4
GG50-1	50	5.09	2 9/16	1253.9	1256.2	722.0	534.2	2.347	4.1	14.6	71.9
GG50-2	50	5.09	2 9/16	1252.4	1254.7	721.1	533.6	2.347	4.1	14.6	71.9
GG50-3	50	5.09	2 9/16	1252.3	1254.6	721.1	533.5	2.347	4.1	14.6	71.9
								2.347	4.1	14.6	71.9

ตารางผนวกที่ 47 (ต่อ)

Simple No.	Number of Gyration	Ac. by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (MI)	Density (gm/MI)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)
GG75-1	75	5.09	2 9/16	1247.4	1249.7	721.0	528.7	2.359	3.6	14.1	74.5
GG75-2	75	5.09	2 9/16	1247.4	1249.7	721.0	528.7	2.359	3.6	14.1	74.5
GG75-3	75	5.09	2 9/16	1246.0	1248.3	720.2	528.1	2.359	3.6	14.1	74.5
								2.359	3.6	14.1	74.5
GG100-1	100	5.09	2 9/16	1253.2	1253.5	730.3	523.2	2.395	2.1	12.8	83.6
GG100-2	100	5.09	2 9/16	1250.8	1251.1	728.9	522.2	2.395	2.1	12.8	83.6
GG100-3	100	5.09	2 9/16	1253.4	1253.7	730.4	523.3	2.395	2.1	12.8	83.6
								2.395	2.1	12.8	83.6

Relationship between Air Voids and Number of gyration of Granite due to Compaction
by Gytratory Compactor



ภาพผนวกที่ 6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศกับจำนวนรอบของการบดทับมวลรวมหินแกรนิตเนื่องจากการบดทับด้วยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี

ตารางผนวกที่ 48 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิตก่อนบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบ ไจราทอรี
ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ

Simple No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Pan No. GG1	100.00	94.55	82.92	56.07	39.84	26.92	16.96	9.74	4.92	3.89
Pan No. GG2	100.00	95.55	82.53	54.40	39.70	27.49	17.60	10.05	4.89	3.67
Pan No. GG3	100.00	92.52	83.91	56.80	40.25	27.42	17.38	9.86	4.97	3.80
Pan No. GG4	100.00	94.04	85.00	54.14	37.59	24.75	14.72	7.20	4.34	3.21
Pan No. GG5	100.00	91.80	82.25	54.39	39.73	26.98	16.92	9.50	4.63	3.55
Average	100.00	93.69	83.32	55.16	39.42	26.71	16.72	9.27	4.75	3.62
Stdev.	0.00	1.52	1.13	1.20	1.05	1.13	1.15	1.17	0.26	0.27

ตารางผนวกที่ 49 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบป๊อราทอร์รี่
 ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (lm)	Vol. (ml)	Density (gm/ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
Pan No. GG1	5.09	2 5/8	1258.6	1260.7	724.8	535.9	2.349	4.0	14.5	72.4	3410	21
Pan No. GG2	5.09	2 5/8	1257.8	1259.9	724.4	535.5	2.349	4.0	14.5	72.4	3420	22
Pan No. GG3	5.09	2 5/8	1258.2	1260.3	724.6	535.7	2.349	4.0	14.5	72.4	3430	22
Pan No. GG4	5.09	2 5/8	1257.9	1260.0	724.4	535.6	2.349	4.0	14.5	72.4	3410	22
Pan No. GG5	5.09	2 5/8	1258.1	1260.2	724.6	535.6	2.349	4.0	14.5	72.4	3390	21

ตารางผนวกที่ 50 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบ ไซราทอรี ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ

Extraction	Simple No.				
	Pan No. GG1	Pan No. GG2	Pan No. GG3	Pan No. GG4	Pan No. GG5
Weight of Bowl + Filterring	352.4	352.1	352.5	352.3	352.0
	(gm)				
Weight of Bowl + Filterring + Sample	1608.8	1607.9	1608.5	1607.9	1608.0
	(gm)				
Weight of Sample.....W1	1256.4	1255.8	1256.0	1255.6	1256.0
	(gm)				
Weight of Bowl + Filter Ring + Weight of Extraction Aggregate	1545.0	1541.7	1541.8	1542.1	1545.5
	(gm)				
Weight of Extraction Aggregate.....W2	1192.6	1189.6	1189.3	1189.8	1193.5
	(gm)				
Weight of Ash in Extract.....W3	6.3	8.8	9.2	8.5	5.1
	(gm)				
Bitumen Content by Weight of Aggregate	4.80	4.79	4.80	4.78	4.79
	(%)				
$(W_3 - W_2 - W_1) * 100 / (W_2 + W_3)$					
Correction	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
	(%)				
Bitumen Content by Correction	5.03	5.02	5.03	5.01	5.02
	(%)				

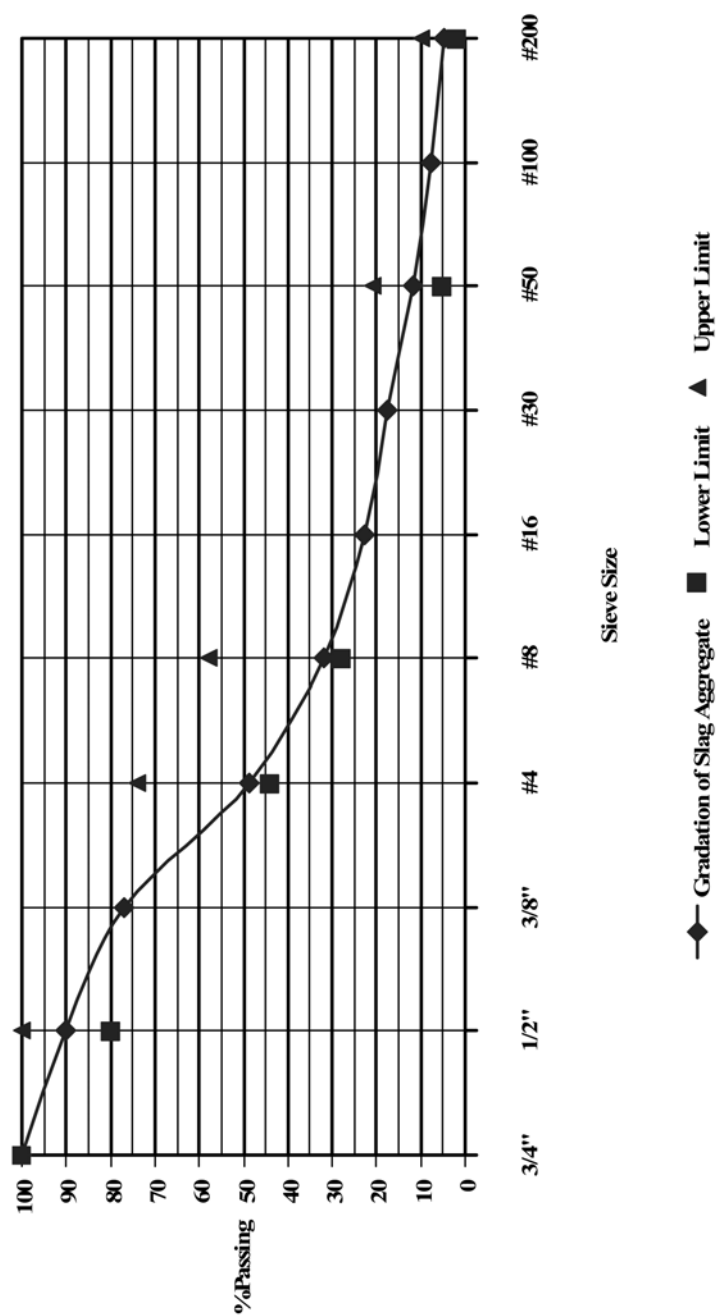
ตารางผนวกที่ 51 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมหินแกรนิตหลังบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี
ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 55 รอบ

Simple No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Pan No. GG1	100.00	94.74	84.38	57.86	41.72	28.40	18.54	11.48	5.97	4.35
Pan No. GG2	100.00	95.88	83.87	56.58	41.82	29.44	19.14	11.26	6.10	3.99
Pan No. GG3	100.00	92.70	85.38	58.70	42.15	29.08	18.72	12.08	6.38	4.19
Pan No. GG4	100.00	94.24	86.25	56.02	39.74	26.54	16.54	8.45	5.52	3.73
Pan No. GG5	100.00	92.27	83.78	56.47	41.91	28.79	18.17	10.67	5.41	3.86
Average	100.00	93.96	84.73	57.13	41.47	28.45	18.23	10.79	5.88	4.02
Stdev.	0.00	1.48	1.06	1.11	0.98	1.13	1.00	1.40	0.41	0.25

ตารางผนวกที่ 52 ผลการหาขนาดผลรวมของมวลรวมสแลกสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์

ชนิดวัสดุ	มวลรวมสแลก	แอสฟัลต์คอนกรีตชั้น	Wearing Course					
แหล่งวัสดุ	โรงโม่บริษัทสยามสตีลผลิตภัณฑ์เซอร์วิส จำกัด 40 หมู่ 8 นิคมอุตสาหกรรมชลบุรี(บ่อวิน) อ.ศรีราชา จ. ชลบุรี กม. 91+600 RT.							
	Offset 4.0 กม. ทางหลวงหมายเลข 331							
	HOT BIN							
Sieve	% Passing							
Size	Lime/Cement	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Comb'd.	Desired	Tolerant Limit
3/4"					100	100	100	100
1/2"				100	25.0	85.0	80-100	80-90
3/8"			100	62.4	2.2	72.5	-	68-78
# 4		100	37.0	1.2	0.3	49.2	44-74	44-54
# 8		80.3	0.9	0.2		34.7	28-58	30-40
# 16		53.7	0.6			23.2	-	19-27
# 30		31.1				13.4	-	9-17
# 50		20.5				8.8	5-21	5-13
# 100		14.4				6.2	-	4-9
# 200		10.0				4.3	2-10	3-5
Mix Proportion		43	16	21	20			

Gradation of Slag Aggregate for Design Asphalt Concrete by Marshall Method



ภาพผนวกที่ 7 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนขนาดละเอียดของมวลรวมสแลกสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางผนวกที่ 53 ผลการทดสอบคุณสมบัติรวมสแลกสำหรับออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์

Description	Filler	Hot Bin 1				Hot Bin 2	Hot Bin 3	Hot Bin 4	Total
		Passing #200	Retain #200	Total					
Mix Proportion	(%)			43	16	21	20	100	
Bulk Specific Gravity			3.058	3.106	3.329	3.342	3.369	3.239	
Apparent Specific Gravity		3.615	3.593	3.595	3.591	3.589	3.609	3.596	
Effective Specific Gravity								3.293	
Water Absorption	(%)		4.85		2.19	2.06	1.97		
Flakiness index	(%)				30	7	3	10	
Elongation	(%)				11	1	5	5	
Asphalt Absorption	(%)							0.52	
Los Angeles Abrasion	(%)	Aggregate ¾"	=	21.6					
Soundness	(% Wt. Loss)	Aggregate ¾"	=	0.6		, Fine Aggregate	=	3.4	
Sand Equivalent	(%)	Fine Aggregate	=	71		, Hot Bin 1	=	73	

ตารางผนวกที่ 54 การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์ที่ใช้สแลกเป็นมวลรวม

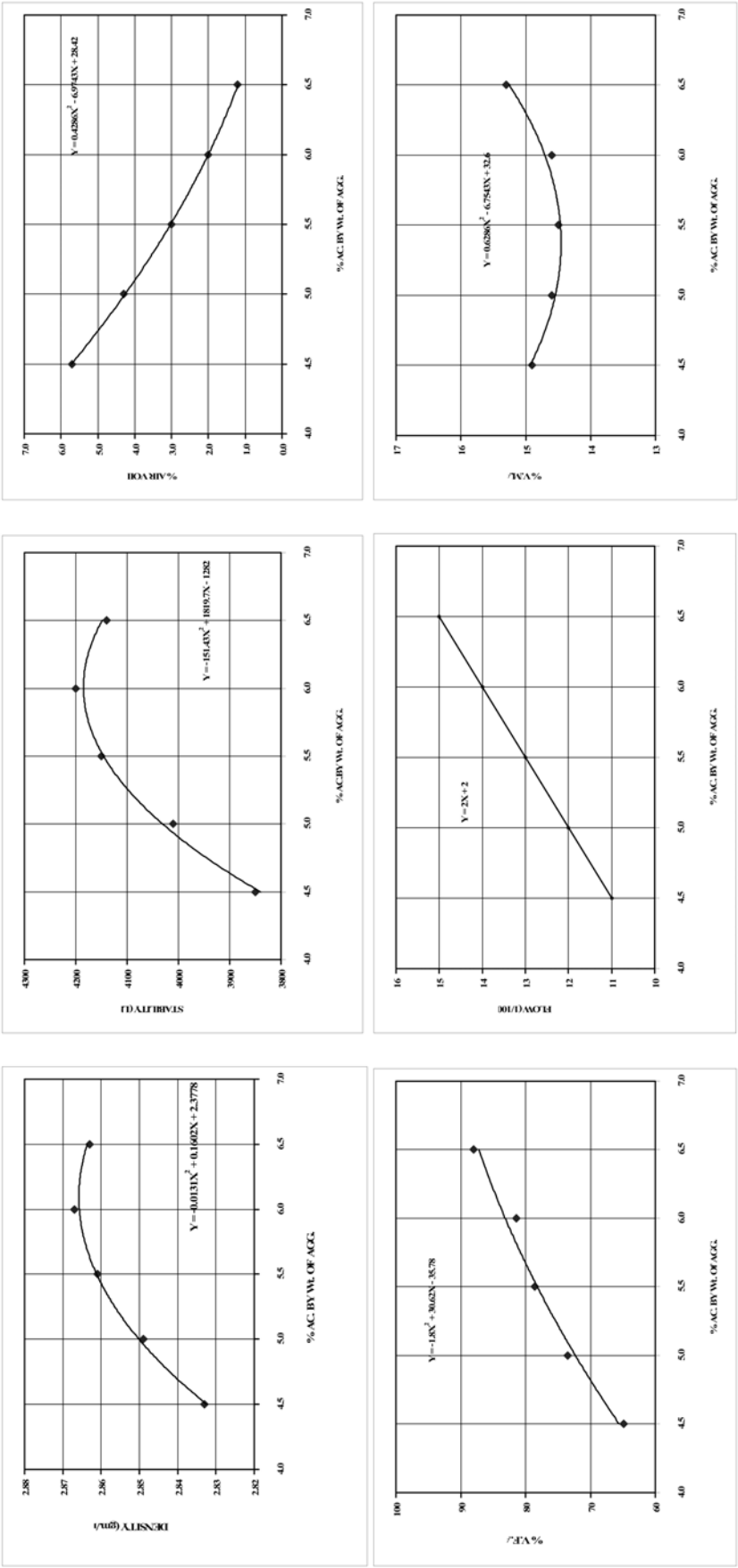
Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (cm)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
1	4.50	6.35	1451.0	1452.9	940.1	512.8	2.830	5.8	16.4	64.4	3840	10
	4.50	6.35	1452.5	1454.0	941.3	512.7	2.833	5.7	16.3	64.9	3890	11
	4.50	6.19	1430.8	1432.7	928.1	504.6	2.836	5.6	16.2	65.3	3820	12
							2.833	5.7	16.3	64.9	3850	11
2	5.00	6.35	1455.4	1456.5	945.9	510.6	2.850	4.3	16.2	73.6	4100	12
	5.00	6.35	1457.1	1458.3	946.9	511.4	2.849	4.3	16.2	73.5	3930	12
	5.00	6.35	1456.0	1457.2	946.0	511.2	2.848	4.3	16.3	73.3	4000	11
							2.849	4.3	16.2	73.5	4010	12

ตารางผนวกที่ 54 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
3	5.50	6.19	1443.2	1444.1	940.1	504.0	2.863	3.0	16.2	81.8	4200	13
	5.50	6.35	1454.5	1455.7	946.8	508.9	2.858	3.1	16.4	80.9	4190	12
	5.50	6.35	1464.1	1465.3	953.7	511.6	2.862	3.0	16.3	81.5	4060	13
							2.861	3.0	16.3	81.4	4150	13
4	6.00	6.35	1466.2	1467.0	955.2	511.8	2.865	2.0	16.6	87.7	4120	14
	6.00	6.19	1457.7	1458.3	951.0	507.3	2.873	1.7	16.3	89.3	4350	13
	6.00	6.35	1467.3	1468.0	955.3	512.7	2.862	2.1	16.6	87.2	4130	14
							2.867	2.0	16.5	88.0	4200	14

ตารางผนวกที่ 54 (ต่อ)

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
5	6.50	6.35	1469.7	1470.5	956.2	514.3	2.858	1.4	17.2	91.7	4130	15
	6.50	6.35	1472.3	1473.1	958.9	514.2	2.863	1.2	17.0	92.7	4180	14
	6.50	6.35	1465.6	1466.3	955.2	511.1	2.868	1.1	16.9	93.6	4120	15
							2.863	1.2	17.0	92.7	4140	15



ภาพผนวกที่ 8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์การออกแบบ โดยวิธีมาร์แชลระหว่างคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 โดยใช้มวลรวมเสถก

ตารางผนวกที่ 55 ผลการทดสอบหา Strength Index ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สเกลเป็นมวลรวม

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (cm)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (MI)	Density (gm/MI)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
SOAKED												
1	5.10	6.51	1461.5	1466.7	932.6	534.1	2.736	7.9	19.6	59.7	7210	32
2	5.10	6.67	1462.3	1467.2	931.2	536.0	2.728	8.2	19.9	58.8	6820	32
3	5.10	6.67	1461.1	1465.9	930.4	535.5	2.728	8.2	19.9	58.8	6890	29
4	5.10	6.67	1465.2	1469.0	932.2	536.8	2.730	8.1	19.8	59.1	7100	34
2.731								8.1	19.8	59.1	7010	32
UNSOAKED												
1	5.10	6.67	1463.0	1467.7	930.9	536.8	2.725	8.3	19.9	58.3	7520	29
2	5.10	6.67	1462.3	1467.2	931.7	535.5	2.731	8.1	19.8	59.1	8360	27
3	5.10	6.51	1463.5	1467.1	932.1	535.0	2.736	7.9	19.6	59.7	9020	26
4	5.10	6.67	1460.3	1465.5	930.0	535.5	2.727	8.2	19.9	58.8	8760	28
2.730								8.1	19.8	59.0	8420	28
Strength Index = Soaked * 100 / Unsoaked = 83.3 %												

ตารางผนวกที่ 56 สูตรส่วนผสมใช้งานของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สเกลเป็นมวลรวม

Description		Mixture	Tolerant Limit
Design Asphalt Content	(% By Weight of Aggregate)	5.1	± 0.3 %
Marshall Density	Gm./Ml.	2.854	2.845 – 2.861
Marshall Air Voids	%	4.0	3.3 – 4.8
Voids in Mineral Aggregate	%	14.5	> 14
Voids Filled with Asphalt	%	74	70 - 77
Marshall Stability	lbs.	4060	> 3800
Marshall Flow	0.01"	12.2	11 - 13
Marshall Stability/Marshall Flow	Lbs./0.01"	333	> 160
Strength Index	%	83.3	> 75
Percent Compaction ≥ 98 % of Daily Marshall Compaction Density			

ตารางผนวกที่ 5Z อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมสแตกก่อนบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์

Simple No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Pan No. SM2	100.00	85.46	73.19	49.50	34.49	23.02	13.41	8.61	6.03	4.13
Pan No. SM3	100.00	84.97	72.93	50.39	34.38	22.17	13.45	8.85	6.07	4.03
Pan No. SM5	100.00	85.02	72.54	49.28	34.79	23.30	13.51	8.95	6.34	4.40
Pan No. SM6	100.00	84.93	72.39	49.13	34.63	23.11	13.34	8.74	6.15	4.24
Pan No. SM7	100.00	85.11	72.60	49.30	34.80	23.28	13.51	8.94	6.36	4.44
Pan No. SM8	100.00	85.12	72.59	49.31	34.81	23.27	13.49	8.91	6.35	4.44
Average	100.00	85.10	72.71	49.49	34.65	23.03	13.45	8.83	6.22	4.28
Stdev.	0.00	0.19	0.30	0.46	0.18	0.43	0.07	0.13	0.15	0.17

ตารางผนวกที่ 58 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สแลกเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์

Simple No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (Ml)	Density (gm/Ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
Pan No. SM2	5.10	2 1/2	1469.2	1470.5	955.2	515.3	2.851	4.0	16.2	75.3	4180	11
Pan No. SM3	5.10	2 1/2	1468.8	1470.1	954.9	515.2	2.851	4.0	16.2	75.3	4130	12
Pan No. SM5	5.10	2 1/2	1468.6	1469.9	954.8	515.1	2.851	4.0	16.2	75.3	4070	12
Pan No. SM6	5.10	2 1/2	1468.6	1469.9	954.8	515.1	2.851	4.0	16.2	75.3	4150	13
Pan No. SM7	5.10	2 1/2	1468.6	1469.9	954.8	515.1	2.851	4.0	16.2	75.3	4100	11
Pan No. SM8	5.10	2 1/2	1468.7	1470.0	954.9	515.2	2.851	4.0	16.2	75.3	4180	11

ตารางผนวกที่ 59 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สแตกเป็นมวลรวมหึ่งบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์

Extraction	Simple No.							
	Pan No. SM2	Pan No. SM3	Pan No. SM5	Pan No. SM6	Pan No. SM7	Pan No. SM8		
Weight of Bowl + Filtering	353.5 (gm)	353.4	353.7	353.2	353.2	352.2		
Weight of Bowl + Filtering + Sample	1821.3 (gm)	1820.9	1821.2	1820.4	1820.5	1819.3		
Weight of Sample.....W1	1467.8 (gm)	1467.5	1467.5	1467.2	1467.3	1467.1		
Weight of Bowl + Filter Ring + Weight of Extraction Aggregate	1746.9 (gm)	1744.1	1745.7	1744.0	1743.4	1745.3		
Weight of Extraction Aggregate.....W2	1393.4 (gm)	1390.7	1392.0	1390.8	1390.2	1393.1		
Weight of Ash in Extract.....W3	6.4 (gm)	8.8	7.6	8.7	9.1	6.1		
Bitumen Content by Weight of Aggregate ($W_3 - W_2 - W_1$)*100/($W_2 + W_3$)	4.86 (%)	4.86	4.85	4.84	4.86	4.85		
Correction	0.23 (%)	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23		
Bitumen Content by Correction	5.09 (%)	5.09	5.08	5.07	5.09	5.08		

ตารางผนวกที่ 60 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมสแตกหลังบดทับ โดยมาร์แชลล์แฮมเมอร์

Simple No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Pan No. SM2	100.00	86.12	74.56	52.46	36.86	24.90	14.90	10.02	7.21	4.73
Pan No. SM3	100.00	85.81	74.28	53.32	36.78	23.69	14.72	9.95	6.89	4.51
Pan No. SM5	100.00	85.92	73.84	51.93	37.41	24.80	14.82	10.32	7.39	5.02
Pan No. SM6	100.00	85.48	73.64	52.15	37.58	25.02	14.85	10.19	7.25	4.81
Pan No. SM7	100.00	85.93	73.82	52.41	37.56	25.22	14.90	10.21	7.51	5.03
Pan No. SM8	100.00	86.09	74.08	52.53	37.11	25.19	14.83	10.22	7.39	4.87
Average	100.00	85.89	74.04	52.47	37.22	24.81	14.84	10.15	7.28	4.83
Stdev.	0.00	0.23	0.34	0.47	0.35	0.57	0.07	0.14	0.22	0.20

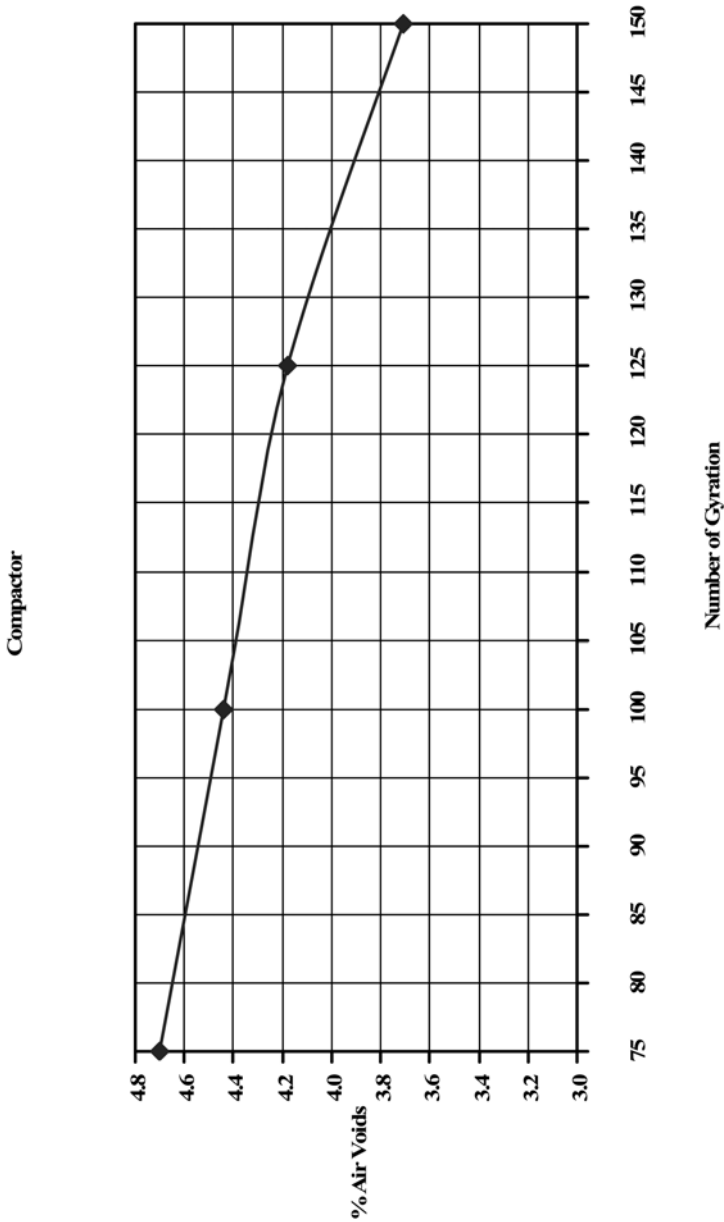
ตารางผนวกที่ 61 การทดลองหาจำนวนรอบในการบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบโจราทอร์ด้วยวิธีซูเปอร์เพฟเพื่อให้แอสฟัลต์คอนกรีต
ที่ใช้สแลกเป็นมวลรวมมีช่องว่างอากาศ 4 เปอร์เซ็นต์

Simple No.	Number of Gyration	Ac. by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (MI)	Density (gm/MI)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)
SG75-1	75	5.10	2 1/2	1463.2	1466.9	950.0	516.9	2.831	4.7	16.8	72.0
SG75-2	75	5.10	2 1/2	1444.6	1448.2	937.9	510.3	2.831	4.7	16.8	72.0
SG75-3	75	5.10	2 1/2	1453.9	1457.5	944.0	513.5	2.831	4.7	16.8	72.0
								2.831	4.7	16.8	72.0
SG100-1	100	5.10	2 1/2	1468.3	1472.0	955.1	516.9	2.841	4.4	16.5	73.3
SG100-2	100	5.10	2 1/2	1460.6	1464.3	950.1	514.2	2.841	4.4	16.5	73.3
SG100-3	100	5.10	2 1/2	1465.8	1469.5	953.5	516.0	2.841	4.4	16.5	73.3
								2.841	4.4	16.5	73.3

ตารางผนวกที่ 61 (ต่อ)

Simple No.	Number of Gyration	Ac. by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (Gm)	Vol. (MI)	Density (gm/MI)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)
SG125-1	125	5.10	2 1/2	1470.6	1474.3	957.9	516.4	2.849	4.1	16.3	74.8
SG125-2	125	5.10	2 1/2	1467.2	1470.9	955.6	515.3	2.836	4.2	16.4	74.4
SG125-3	125	5.10	2 1/2	1461.6	1465.3	952.0	513.3	2.842	4.2	16.4	74.4
								2.843	4.2	16.4	74.5
SG150-1	150	5.10	2 1/2	1467.9	1471.6	958.7	512.9	2.862	3.7	15.9	76.7
SG150-2	150	5.10	2 1/2	1469.3	1473.8	959.6	513.4	2.862	3.7	15.9	76.7
SG150-3	150	5.10	2 1/2	1466.8	1470.5	958.0	512.5	2.862	3.7	15.9	76.7
								2.862	3.7	15.9	76.7

Relationship between Air voids and Number of Gyration of Slag Aggregate due to Compaction by Gyrotory



ภาพผนวกที่ ๑ แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศกับจำนวนรอบของการบดทับมวลรวมหินแกรนิต
เนื่องจากการบดทับด้วยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี

ตารางผนวกที่ 62 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมสแตกก่อนบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี
ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ

Sample No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Pan No. SG4	100.00	85.03	72.50	49.24	34.73	23.24	13.47	8.90	6.32	4.34
Pan No. SG5	100.00	85.03	72.54	49.30	34.83	23.31	13.55	9.01	6.41	4.52
Pan No. SG7	100.00	85.03	72.53	49.28	34.81	23.27	13.48	8.92	6.35	4.43
Pan No. SG8	100.00	84.90	72.46	49.21	34.72	23.19	13.37	8.79	6.19	4.24
Pan No. SG9	100.00	85.12	72.53	49.24	34.73	23.22	13.48	8.90	6.33	4.37
Pan No. SG11	100.00	85.09	72.58	49.36	34.89	23.42	13.63	9.11	6.58	4.67
Average	100.00	85.03	72.52	49.27	34.79	23.28	13.50	8.94	6.36	4.43
Stdev.	0.00	0.08	0.04	0.05	0.07	0.08	0.09	0.11	0.13	0.15

ตารางผนวกที่ 63 คุณสมบัติของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สเกลเป็นมวลรวมแห้งบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบ ไซราทอรี
ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ

Sample No.	Ac by Wt. Aggregate (%)	Height of Specimen (in)	Wt.in Air (gm)	Wt. SSD (gm)	Wt. in Water (m)	Vol. (ml)	Density (gm/ml)	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (Adj) (lbs.)	Flow (1/100")
Pan No. SG4	5.10	2 1/2	1468.5	1472.7	957.9	514.8	2.853	4.0	16.2	75.3	4560	24
Pan No. SG5	5.10	2 1/2	1468.8	1473.1	958.1	515.0	2.852	4.0	16.2	75.2	4560	27
Pan No. SG7	5.10	2 1/2	1468.7	1473.0	958.1	514.9	2.852	4.0	16.2	75.2	4540	25
Pan No. SG8	5.10	2 1/2	1468.5	1472.7	957.9	514.8	2.853	4.0	16.2	75.3	4530	26
Pan No. SG9	5.10	2 1/2	1468.6	1472.9	958.0	514.9	2.852	4.0	16.2	75.2	4530	24
Pan No. SG11	5.10	2 1/2	1468.0	1472.2	957.6	514.6	2.853	4.0	16.2	75.3	4550	24

ตารางผนวกที่ 64 ผลการทดสอบการสกัดของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้สแลกเป็นมวลรวมหลังบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบใบไจราทอรี ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ

Extraction	Simple No.										
	Pan No. SG4	Pan No.SG5	Pan No. SG7	Pan No. SG8	Pan No. SG9	Pan No. SG11					
Weight of Bowl + Filterring	(gm)	353.3	353.5	353.1	353.4	353.2	353.5				
Weight of Bowl + Filterring + Sample	(gm)	1820.3	1820.7	1820.8	1820.7	1820.5	1820.4				
Weight of Sample..... W1	(gm)	1467.0	1467.2	1467.7	1467.3	1467.3	1466.9				
Weight of Bowl + Filter Ring + Weight of Extraction Aggregate	(gm)	1745.7	1747.0	1746.1	1746.4	1744.1	1743.1				
Weight of Extraction Aggregate..... W2	(gm)	1392.4	1393.5	1393.0	1393.0	1390.9	1389.6				
Weight of Ash in Extract..... W3	(gm)	6.7	6.0	6.7	6.4	8.4	9.6				
Bitumen Content by Weight of Aggregate ($W_3 - W_2 - W_1$)*100/($W_2 + W_3$)	(%)	4.85	4.84	4.86	4.85	4.86	4.84				
Correction	(%)	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23				
Bitumen Content by Correction	(%)	5.08	5.07	5.09	5.08	5.09	5.07				

ตารางผนวกที่ 65 อัตราส่วนขนาดคละ (%) ของตัวอย่างมวลรวมสเลกหลังบดทับ โดยเครื่องบดทับแบบไจราทอรี
ด้วยจำนวนรอบของการบดทับ 135 รอบ

Sample No.	Sieve Size									
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Pan No. SG4	100.00	85.11	73.42	50.87	35.67	24.32	14.61	9.77	6.93	4.52
Pan No. SG5	100.00	85.14	73.47	50.79	35.62	24.23	14.43	9.88	7.14	4.67
Pan No. SG7	100.00	85.09	73.28	50.73	35.66	24.39	14.33	9.60	7.03	4.58
Pan No. SG8	100.00	85.12	73.32	50.71	35.84	24.17	14.54	9.53	6.85	4.37
Pan No. SG9	100.00	85.30	73.31	50.79	35.72	24.38	14.53	9.75	6.89	4.58
Pan No. SG11	100.00	85.22	73.37	50.79	35.70	24.38	14.71	9.85	7.36	4.88
Average	100.00	85.16	73.36	50.78	35.71	24.32	14.53	9.73	7.03	4.60
Stdev.	0.00	0.08	0.07	0.06	0.08	0.09	0.13	0.14	0.19	0.17

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

1. ประวัติส่วนตัว

- 1.1 ชื่อ นายธนคม บุญรอด
- 1.2 วัน เดือน ปีเกิด 30 สิงหาคม พ.ศ. 2508
- 1.3 สถานที่เกิด จังหวัดสมุทรสงคราม
- 1.4 ประวัติการศึกษา

	คุณวุฒิ	ปี พ.ศ ที่จบ	ชื่อสถานศึกษา
1.4.3	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (แผนกวิชาช่างสำรวจ)	2529	วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ
1.4.2	บริหารธุรกิจบัณฑิต (การจัดการงานก่อสร้าง)	2537	ม. สุโขทัยธรรมมาธิราช
1.4.3	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมโยธา)	2541	ม. เทคโนโลยีมหานคร

2. ประวัติการรับราชการ

ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง วิศวกรโยธา 5 กลุ่มงานออกแบบทาง สำนักสำรวจและออกแบบ
กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม