



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาแนวโน้มการใช้วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม
ใน งานฝีมือทางแอสฟัลท์คอนกรีตเพื่อลดปัญหาความเสียหายที่
เกิดจากความชื้นในชั้นผิวทางแอสฟัลท์ในประเทศไทย

โดย ผ.ศ. ดร. กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

เดือนกันยายน พ.ศ. 2552

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาแนวโน้มการใช้วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม
ใน งานฝีมือทางแอสฟัลท์คอนกรีตเพื่อลดปัญหาความเสียหายที่
เกิดจากความชื้นในชั้นผิวทางแอสฟัลท์ในประเทศไทย

ผู้วิจัย ผ.ศ. ดร. กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

1. ชื่อโครงการ

(ภาษาไทย) การศึกษาแนวโน้มการใช้วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมในงาน
ผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตเพื่อลดปัญหาความเสียหายที่เกิดจาก
ความชื้นในชั้นผิวทางแอสฟัลท์ในประเทศไทย

(ภาษาอังกฤษ) Potential Use of Industrial By-Products in Moisture Damage
Resistance of Hot Mix Asphalt Pavement in Thailand

2. คณะนักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์

ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ) KUNNAWEE KANITPONG

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

สถานที่ทำงาน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีแห่ง
เอเชีย

ตู้ ป.ณ. 4 อ่าเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

โทรศัพท์ 0-2524-5513 โทรสาร 0-2524-5509

โทรศัพท์มือถือ 0-1558-2694 E-mail kanitpon@ait.ac.th

ที่อยู่(ที่บ้าน) 230/16 ซอยลาดพร้าว 1 ถนนลาดพร้าว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ
รหัสไปรษณีย์ 10900

โทรศัพท์ 0-2513-3470

3. สาขาวิชาที่ทำการวิจัย วิศวกรรมทางที่เน้นทางด้านการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์ คอนกรีต

4. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันปริมาณที่เพิ่มขึ้นของขยะอุตสาหกรรม (Industrial Waste) ประเภทต่างๆ ได้นำไปสู่กระบวนการคิดและแนวทางที่จะนำเอาขยะอุตสาหกรรมและของเสียเหล่านั้น กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ให้ได้มากที่สุด โดยขยะอุตสาหกรรมจะถูกเปลี่ยนเป็นวัสดุผลิตภัณฑ์ (Industry By-Products) ที่สามารถนำมาใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติ เพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากรธรรมชาติของประเทศและลดการเกิดมลพิษให้กับประเทศชาติได้มากที่สุด

ที่ผ่านมาในอุตสาหกรรมการก่อสร้างต่างๆ โดยเฉพาะงานคอนกรีต ได้มีการศึกษา นำขยะอุตสาหกรรม และวัสดุธรรมชาติมาใช้อย่างแพร่หลาย อาทิเช่น นำเถ้าลอย (Fly Ash) มาใช้เป็นสารผสมทดแทนซีเมนต์ หรือการนำผงซีเมนต์จากกระบวนการผลิตซีเมนต์ (Cement Kiln Dust) มาใช้เป็นสารแข็งตัวแทนปูนซีเมนต์ในการทำให้พื้นดินบริเวณที่เป็นโคลนน้ำมันแข็งตัว หรือการใช้ ทรายกรวดเหล็กที่ได้จากการผลิตเหล็ก หรือถลุงเหล็ก (Slag) เป็นสารผสมซีเมนต์ (Cement Admixture) หรือการนำเอาคอนกรีตเก่าที่ใช้แล้ว (Reclaimed Concrete Material or Demolition Waste) มาใช้เป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีตใหม่หรือนำเอาไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางสำหรับการก่อสร้างถนน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับอุตสาหกรรมการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์ในประเทศไทย กลับปรากฏว่าได้มีความพยายามน้อยมากในการนำขยะอุตสาหกรรมเหล่านี้มาใช้ในงานผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต ทั้งๆที่งานผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตเป็นงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ต้องใช้งบประมาณของประเทศจำนวนมากในแต่ละปีทั้งในด้านการก่อสร้างและการบำรุงรักษา ในมุมมองทางด้านวิศวกรรมการก่อสร้างผิวทาง วัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมที่น่ากลับมาใช้ในการก่อสร้างผิวทาง ควรจะก่อให้เกิดผลดีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของผิวทางด้วย อย่างไรก็ตามขยะอุตสาหกรรมในประเทศไทย มีมากมายหลายประเภท และแต่ละประเภทก็มีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่แตกต่างกันที่จะถูกเลือกนำมาใช้ในการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์ เพื่อที่จะค้นหาขยะอุตสาหกรรมชนิดที่มีแนวโน้มว่าจะนำมาใช้ในผิวทางแอสฟัลท์ วิศวกร นักวิจัย ผู้ผลิต และผู้กำหนดมาตรฐานในการก่อสร้าง จะต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมทางวิศวกรรมของวัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมชนิดต่างๆ ที่จะประยุกต์ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ได้อย่างไร และควรมีข้อกำหนดหรือข้อจำกัดอะไรบ้าง ในการเลือกใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เหล่านี้ในงานผิวทางแอสฟัลท์

จากข้อมูลที่ได้จากกรมทางหลวง ผิวทางในประเทศไทย ถูกสร้างโดยใช้วัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตถึง 80% ของผิวทางทั้งหมด ได้มีการระบุดินเพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้างผิวทางเป็น

จำนวนมาก หินที่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ วัสดุจำพวกหินปูน (Limestone) และ หินแกรนิต (Granite) ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด และมีราคาค่อนข้างสูง ปัญหาที่สำคัญของการใช้วัสดุจำพวกหินปูน คือ หินชนิดนี้มีความแข็งแรงไม่มากนัก และมักจะเกิดการสึกกร่อนได้ง่าย เมื่อได้รับการเสียดสีกับยางรถยนต์ ทำให้ลดความเสียดทานระหว่างยางรถยนต์กับผิวถนน อาจก่อให้เกิดการลื่นไถลและเกิดอุบัติเหตุได้โดยง่าย [1] ส่วนปัญหาหลักของการใช้วัสดุจำพวกหินแกรนิต คือ หินชนิดนี้มีลักษณะของแร่วิทยา (Mineralogy) ที่เป็นแบบ Hydrophilic คือการชอบน้ำเป็นพิเศษ และจะเกิดการจับตัวกับน้ำได้ดีกว่าการจับตัวกับแอสฟัลท์ซีเมนต์ ซึ่งจะทำให้แอสฟัลท์ซีเมนต์หลุดลอก (stripping) ออกจากผิวของวัสดุมวลรวมได้โดยง่าย เป็นผลให้วัสดุผสมแอสฟัลท์คอนกรีต เกิดความเสียหายได้อย่างรวดเร็วเมื่อเจอกับสภาพผิวทางที่เปียกชื้นหรือมีปริมาณน้ำฝนไหลผ่านลงสู่ชั้นผิวทางจำนวนมาก ปัญหานี้เป็นที่รู้จักกันดีและถูกเรียกว่า ปัญหาความเสียหายของผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตอันเนื่องมาจากความชื้น (Moisture Damage Problem) [2, 3, 4]

ปัญหาที่เกิดจากความชื้นในชั้นผิวทางแอสฟัลท์ เป็นปัญหาหลักอย่างหนึ่งที่พบมากในประเทศไทย ซึ่งเป็นบริเวณที่มีฝนตกชุกในทุกปี ความชื้นเหล่านี้สามารถก่อให้เกิดความเสียหายแก่ถนนผิวทางแอสฟัลท์เป็นอย่างมาก ซึ่งอาจเกิดจากการหลุดลอก (Stripping) หรือการอ่อนตัวของแอสฟัลท์ ออกจากผิวของ วัสดุมวลรวม เป็นผลให้เกิดการสูญเสียความคงทนในการรองรับน้ำหนักบรรทุกจากการจราจร [5] ความเสียหายเนื่องมาจากความชื้นนี้ ได้นำไปสู่ความสูญเสียทางด้านงบประมาณในการปรับปรุงซ่อมแซมถนนในแต่ละปีเป็นจำนวนมหาศาล ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาหาวิธีการแก้ไขหรือลดความเสียหายของถนนอันเนื่องมาจากความชื้น วิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหา ก็คือ การใช้สารผสมเพิ่ม (Additive) ในส่วนผสมของวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตเพื่อลดปัญหาการหลุดลอกของแอสฟัลท์จากผิวของวัสดุมวลรวมอันเนื่องมาจากความชื้น

จากปัญหาทั้งหมดที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้น จึงมีความจำเป็นในการศึกษานำวัสดุที่เป็นขยะอุตสาหกรรมที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ในงานก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นการนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมเพื่อทดแทนวัสดุธรรมชาติ อาทิเช่น ตะกรันเหล็ก (Furnace Slag) หรือคอนกรีตเก่า (Reclaimed Concrete or Demolition Waste) ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณของประเทศในด้านการก่อสร้าง หรือการนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่ม (Additive) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ และเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุผสมแอสฟัลท์คอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น อาทิเช่น ถ้ำลอย (Fly Ash) หรือผงซีเมนต์

จากกระบวนการผลิตซีเมนต์ (Cement Kiln Dust) เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณในด้านการบำรุงรักษาผิวทาง เพราะสามารถนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงทนทาน ลดความเสียหาย และช่วยยืดอายุการใช้งานของผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต

แม้ว่าขยะอุตสาหกรรมที่ถูกกล่าวถึงในเบื้องต้นจะถูกนำมาใช้ได้ดีในงานก่อสร้างอื่นๆ และมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต การศึกษาถึงปริมาณที่พอเหมาะ และวิธีการในการเลือกนำมาใช้ในวัสดุผสมแอสฟัลท์ก็มีความสำคัญอย่างยิ่ง ผลงานจากโครงการวิจัยนี้จึงถูกคาดหวังว่าจะสามารถนำเสนอความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ขยะอุตสาหกรรมที่ไม่เคยถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตมาก่อนในประเทศไทย กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ใน 2 รูปแบบ คือ 1) นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนแทนวัสดุมวลรวม และ 2) นำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุผสมแอสฟัลท์ โดยจะแยกการพิจารณาออกเป็น 2 รูปแบบของการใช้งานและจะนำเสนอแนะแนวทางการใช้ขยะอุตสาหกรรมประเภทที่ถูกระบุว่า จะสามารถนำไปสู่คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมแอสฟัลท์ที่ดีขึ้นได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติของวัสดุผสมแอสฟัลท์ในการต้านทานความเสียหายอันเนื่องมาจากความชื้นในชั้นผิวทางของประเทศไทย

5. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ขยะอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ในวัสดุผสมแอสฟัลท์ที่ใช้สำหรับการ ก่อสร้างผิวทาง โดยถูกแบ่งแยกออกเป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้
 - 1.1 ศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลท์คอนกรีต ที่ใช้ขยะอุตสาหกรรมประเภทที่มีแนวโน้มว่า จะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุมวลรวม อาทิเช่น ตะกรันเหล็ก คอนกรีตเก่า และ cement kiln dust โดยใช้แอสฟัลท์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 เป็นวัสดุเชื่อมประสานในแอสฟัลท์คอนกรีต และศึกษาเปรียบเทียบกับวัสดุผสมแอสฟัลท์ที่ใช้วัสดุธรรมชาติเป็นวัสดุมวลรวม อาทิเช่น หินปูนและหินแกรนิต
 - 1.2 ศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลท์คอนกรีตที่ใช้หินปูนและหินแกรนิตเป็นวัสดุมวลรวมและมี การใช้ขยะอุตสาหกรรมประเภทที่มีแนวโน้มว่า จะสามารถนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่ม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุผสมแอสฟัลท์ภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น อาทิเช่น ถั่วลอย และ cement kiln dust โดยเปรียบเทียบกับวัสดุผสมแอสฟัลท์ที่ไม่ได้ใช้สารผสมเพิ่ม เพื่อแก้ไขปัญหาความเสียหายอันเนื่องมาจากความชื้น

2. ศึกษาผลการออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลท์คอนกรีต ที่ใช้ขยะอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เป็นวัสดุมวลรวมหรือสารผสมเพิ่ม โดยเปรียบเทียบกับแอสฟัลท์คอนกรีตที่ถูกออกแบบและใช้อยู่โดยทั่วไปในประเทศไทย
3. ศึกษาผลการเปรียบเทียบทางราคา ระหว่างแอสฟัลท์คอนกรีต ที่ใช้ขยะอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เป็นวัสดุมวลรวมหรือสารผสมเพิ่ม และแอสฟัลท์คอนกรีตที่ผลิตโดยวัสดุธรรมชาติและไม่ได้ใช้สารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ

6. ระเบียบวิธีวิจัย

1. ประยุกต์ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ในวัสดุผสมแอสฟัลท์ โดยระเบียบวิธีวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งานของวัสดุผลิตภัณฑ์

1.1 วัสดุผลิตภัณฑ์สำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุมวลรวม

- กำหนดแหล่งและที่มาของวัสดุผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาใช้
- ตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาใช้ทดแทนวัสดุมวลรวม เช่น ขนาดคละ (Gradation) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ความคงทน (Soundness) ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent) ดัชนีความแบน (Flakiness Index) คุณสมบัติความปลอดภัยจากการลื่นไถล (Polished Stone Value) ดัชนีความยาว (Elongation Index) และความสึกหรอของวัสดุมวลรวม (Los Angeles Abrasion) หลังจากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมธรรมชาติ เช่น หินปูน หินปะชอลท์ และหินแกรนิต
- เลือกขนาดคละของวัสดุผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด จากนั้นนำมาผสมร้อนกับแอสฟัลท์ซีเมนต์และทำการบดอัดตามวิธีของซูเปอร์เพฟ (Superpave) โดยใช้เครื่อง Superpave Gyratory Compactor
- ทดสอบหาความหนาแน่น (Density) ของวัสดุผสม และทำการวิเคราะห์เชิงปริมาตรแบบซูเปอร์เพฟ เพื่อหาอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมแอสฟัลท์ที่ดีที่สุด
- ทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสม เช่น การทดสอบ Resilient Modulus และยังรวมถึงการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น เช่น การทดสอบด้วยวิธี Modified Lottman Test (AASHTO T283) ซึ่งเป็นการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ของวัสดุผสมแอสฟัลต์ก่อนและหลังการแปรสภาพให้อยู่ภายใต้ความชื้น

- เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุผสมที่ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ และวัสดุผสมที่ใช้วัสดุมวลรวมธรรมชาติ
- ตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมที่ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ทั้งในด้านคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติและพฤติกรรมทางวิศวกรรม และความสามารถของวัสดุผสมในการต้านทานความเสียหายอันเนื่องมาจากความชื้น เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่พอเหมาะของวัสดุผลิตภัณฑ์ที่ถูกนำมาใช้ทดแทนวัสดุมวลรวมจากธรรมชาติ

1.2 วัสดุผลิตภัณฑ์สำหรับใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลท์คอนกรีต

- กำหนดแหล่งและที่มาของวัสดุผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาใช้
- ตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่ม เช่น ขนาดและโครงสร้าง ความถ่วงจำเพาะ และคุณสมบัติทางเคมีต่างๆ
- เลือกอัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมธรรมชาติ เช่น หินปูน หรือ หินแกรนิตเป็นตัวแทนควบคุม
- เติมวัสดุผลิตภัณฑ์ที่จะใช้เป็นสารผสมเพิ่มลงในวัสดุมวลรวมธรรมชาติ โดยใช้ปริมาณของสารผสมเพิ่มในระดับต่างๆ จากนั้นนำมาผสมร่อนกับแอสฟัลท์ซีเมนต์ และทำการบดอัดตามวิธีของซูเปอร์พอ (Superpave)
- ทดสอบหาความหนาแน่น (Density) ของวัสดุผสม และทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสม รวมถึงการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 1.1
- เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุผสมที่ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เป็นสารผสมเพิ่ม และวัสดุผสมที่ไม่ได้ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เป็นสารผสมเพิ่ม
- ตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมที่ใช้อัตราส่วนผสมของวัสดุผลิตภัณฑ์ในปริมาณต่างๆ กัน ทั้งในด้านคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติและพฤติกรรมทางวิศวกรรม และความสามารถของวัสดุผสมในการต้านทานความเสียหายอันเนื่องมาจากความชื้น เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผลิตภัณฑ์ที่ถูกนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่ม

2. ประเมินและเปรียบเทียบทางด้านราคา ระหว่างแอสฟัลท์คอนกรีต ที่ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เป็นวัสดุมวลรวมหรือสารผสมเพิ่ม และแอสฟัลท์คอนกรีตที่ผลิตโดยวัสดุธรรมชาติและไม่ได้ใช้สารผสมเพิ่ม

3. ศึกษาผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม จากการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

4. เสนอแนะแนวทางปฏิบัติในการขยายผลของการเลือกและการนำวัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ไปใช้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และก่อให้เกิดผลดีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการต้านทานการเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความชื้นในชั้นผิวทาง
5. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ทั้งหมด จัดทำรายงาน นำเสนอผลงาน และขอแนะนำในการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมในงานทางแอสฟัลท์คอนกรีต

7. สรุปและขอเสนอแนะ

จากผลการทดลองต่างๆ ซึ่งแสดงปริมาณที่เหมาะสมของส่วนผสมและแสดงถึงการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมเมื่อใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เป็นส่วนประกอบ รวมถึงการประเมินทางด้านราคาและผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเมื่อมีการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เป็นส่วนประกอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แม้ว่าปริมาณวัสดุมวลรวมธรรมชาติ เช่น หินปูน และหินแกรนิต จะมีเพียงพอในอุตสาหกรรมการก่อสร้างถนน แต่งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์มาเป็นสารผสมเพิ่มหรือใช้แทนวัสดุมวลรวมธรรมชาติจะช่วยทำให้เกิดผลดีต่างๆ เช่น สามารถลดการใช้วัสดุธรรมชาติ สามารถลดมลพิษ สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม และช่วยลดงบประมาณในการปรับปรุงและซ่อมแซมถนนจากปัญหาด้านความชื้น ซึ่งวัสดุผลิตภัณฑ์ที่กล่าวนี้ได้แก่ เถ้าลอย (fly ash) ผงซีเมนต์ (cement kiln dust) และตะกรันเหล็ก (steel slag) ส่วนคอนกรีตเก่า (reclaimed concrete material) นั้นไม่ได้มีการปรับปรุงทางด้านคุณสมบัติทางวิศวกรรมเลย แต่ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของตัวคอนกรีตเก่าเองด้วย
2. สัดส่วนของส่วนผสมที่เหมาะสมเมื่อมีการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เป็นวัสดุมวลรวมแสดงให้เห็นว่าทุกประเภทของก้อนตัวอย่างใช้ขนาดละเอียดแบบเหมือนกันหมดยกเว้นแต่ปริมาณของวัสดุเชื่อมผสมที่แตกต่างกัน กล่าวคือปริมาณวัสดุเชื่อมผสมที่เหมาะสมสำหรับการใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมคือ 4.713% ส่วนปริมาณวัสดุเชื่อมผสมที่เหมาะสมสำหรับการใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมคือ 5.455% และ 6.852% สำหรับการใช้อคอนกรีตเก่าเป็นวัสดุมวลรวม
3. สำหรับการทดสอบการต้านทานความชื้น วัสดุผลิตภัณฑ์ทั้ง 4 ประเภทที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในการต้านทานความชื้นได้เมื่อเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างควบคุม

4. การทดสอบค่าโมดูลัส (resilient modulus) จะขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของวัสดุผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นส่วนผสมในก้อนตัวอย่าง
5. ชนิดของมวลรวมจะส่งผลต่อดัชนีพลังงานการบดอัดและดัชนีการต้านทานปริมาณการจราจร ซึ่งถ้าค่าของความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุมวลรวมมากก็จะส่งผลให้ค่าของดัชนีพลังงานการบดอัดและดัชนีการต้านทานปริมาณการจราจรสูงด้วย อย่างไรก็ตามคุณสมบัติอื่น ๆ ก็ควรนำมาพิจารณาประกอบด้วยเช่นกัน
6. เมื่อพิจารณาถึงเรื่องราคาของวัสดุในแต่ละประเภทของก้อนตัวอย่างนั้น ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานจะส่งผลอย่างมาก กล่าวคือถ้าวัสดุมวลรวมยังมีความดูดซึ่มมากก้อนตัวอย่างที่ใช้วัสดุมวลรวมนั้นก็ยิ่งจะมีราคาสูงเช่นกัน
7. การใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ทั้ง 4 ชนิดในงานวิจัยนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเลยเมื่อใช้มาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษในประเทศไทย

8. ประโยชน์ที่ได้รับ

การศึกษาและประยุกต์ใช้วัสดุเหลือใช้หรือวัสดุผลิตภัณฑ์จากงานอุตสาหกรรมในงานผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุมวลรวม หรือเพื่อนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลท์คอนกรีตภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น การวิจัยนี้ได้เป็นการศึกษาที่จะช่วยเสริมองค์ความรู้ และยังเป็นการศึกษาพื้นฐานเพื่อมุ่งเป้าหรือการวิจัยประยุกต์ภายในประเทศ ซึ่งพบว่าได้มีการศึกษาน้อยมาก เมื่อเทียบกับต่างประเทศ ที่จะนำเอาวัสดุเหลือใช้เหล่านี้มาใช้ให้ก่อประโยชน์กับงานทางแอสฟัลท์คอนกรีต

งานวิจัยนี้สามารถนำผลการวิจัยมาตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารนานาชาติที่เป็นที่ยอมรับได้คือ

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

Kanitpong, K. and Pummarin, K., "Investigation of Using Industrial Wastes in Moisture Damage Resistance of Hot Mix Asphalt Pavement," Journal of Solid Waste Technology and Management, 2009. (in press)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG49

ชื่อโครงการ: การศึกษาแนวโน้มการใช้วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมใน งานผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตเพื่อลดปัญหาความเสียหายที่เกิดจากความชื้นในชั้นผิวทางแอสฟัลท์ในประเทศไทย

ชื่อนักวิจัย: ผ.ศ. ดร. กันวีร์ กันิชฐพงศ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

E-mail Address : kanitpon@ait.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: ธันวาคม 2549 ถึง กันยายน 2552

ปัญหาที่เกิดจากความชื้นในชั้นผิวทางแอสฟัลท์นั้น เป็นปัญหาหลักอย่างหนึ่งที่พบมากในประเทศไทย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาหาวิธีการแก้ไขหรือลดความเสียหายของถนนอันเนื่องมาจากความชื้น วิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหาก็คือ การใช้สารผสมเพิ่ม (Additive) เพื่อลดปัญหาการหลุดลอกของแอสฟัลท์จากผิวของวัสดุมวลรวมอันเนื่องมาจากความชื้น จากปัญหาที่ได้กล่าวมา จึงมีความจำเป็นในการศึกษานำวัสดุที่เป็นขยะอุตสาหกรรมที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ในงานก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นการนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมเพื่อทดแทนวัสดุธรรมชาติ อาทิเช่น ตะกรันเหล็ก (Steel Slag) หรือคอนกรีตเก่า (Reclaimed Concrete or Demolition Waste) ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณของประเทศในด้านการก่อสร้างหรือการนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้กับวัสดุผสมแอสฟัลท์คอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น อาทิเช่น เถ้าลอย (Fly Ash) หรือผงซีเมนต์ (Cement Kiln Dust) เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณในด้านการบำรุงรักษาผิวทาง เพราะสามารถนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงทนทาน ลดความเสียหาย และช่วยยืดอายุการใช้งานของผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต จากผลการทดลองคุณสมบัติทางวิศวกรรมซึ่งทดสอบด้านการต้านทานความชื้นและการทดสอบค่าโมดูลัสนั้น จะเห็นว่าการใช้เถ้าลอยและผงซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มนั้นจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในการต้านทานความชื้นได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ตะกรันเหล็กและคอนกรีตเก่าเป็นวัสดุมวลรวม ส่วนในการทดสอบค่าโมดูลัสนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้

คำหลัก : ผิวทางแอสฟัลท์, สารผสมเพิ่ม, วัสดุมวลรวม, ตะกรันเหล็ก, คอนกรีตเก่า, เถ้าลอย, ผงซีเมนต์

Abstract

Project Code: MRG49

Project Title: Potential Use of Industrial By-Products in Moisture Damage Resistance of Hot Mix Asphalt Pavement in Thailand

Investigator: Assistant Professor Kunnawee Kanitpong
School of Engineering and Technology, Asian Institute of Technology

E-mail Address : kanitpon@ait.ac.th

Project Period: December 2006 to September 2009

Moisture damage is one of the main problems in asphalt pavement which is found especially in areas with high a amount of rainfall. One effective solution is to apply anti-stripping additives in asphalt mixtures to reduce the stripping of asphalt binder from the aggregate surface due to moisture. Another solution is to select an aggregate type that provides better affinity with asphalt binder rather than water and hence provides better adhesion. In this study, fly ash and cement kiln dust (CKD) were selected as the anti-stripping additives, while steel slag and reclaimed concrete were selected as the aggregates in asphalt mixtures. The resilient modulus test and the indirect tensile strength test were conducted to evaluate the performance of asphalt mixtures. It was found that the use of CKD as additive increased the stiffness of asphalt mixtures at intermediate and high temperatures, while the application of fly ash and reclaimed concrete reduced the stiffness of the asphalt mix. Results also indicated that asphalt mixtures with fly ash and CKD additives and those with slag and reclaimed concrete aggregates could resist moisture damage.

Key words : Industrial waste, fly ash, cement kiln dust, slag, reclaimed concrete,

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี ด้วยการสนับสนุนทุนในการดำเนินการวิจัยจากสำนักงาน
กองทุนสนับสนุนการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ยอดพล ธนาภิบุรณ์ ผู้ส่งกลับไปแล้ว ซึ่งเป็นนักวิจัยที่
ปรึกษาท่านแรกของโครงการ และรองศาสตราจารย์ ดร. พิชัย นิมิตรยงสกุล ซึ่งเป็นนักวิจัยที่
ปรึกษาท่านปัจจุบัน ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

เจ้าหน้าที่ทุกๆ ท่าน ของสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบและสำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรม
ทางหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และให้คำแนะนำในการใช้งานเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ อธิการบดี ผู้บริหาร คณาจารย์ นักศึกษา และบุคลากรจากสถาบันเทคโนโลยีแห่ง
เอเชีย ซึ่งเป็นผู้บังคับบัญชาและเพื่อนร่วมงานที่ส่งเสริมและสนับสนุนผู้วิจัย จนดำเนินการวิจัย
สำเร็จตามความมุ่งหมายทุกประการ

ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

ผ.ศ. ดร. กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	iv
สารบัญ	xii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	10
3.1 บทนำ	10
3.2 การเตรียมก่อนตัวอย่าง	11
3.3 การทดสอบก่อนตัวอย่าง	15
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	20
4.1 บทนำ	20
4.2 ส่วนผสมออกแบบ	20
4.3 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม	42

บทที่ 5 การประเมินต้นทุนเบื้องต้นและผลกระทบสิ่งแวดล้อม.....	49
5.1 การประเมินต้นทุน.....	49
5.2 การศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม.....	52
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	55
เอกสารอ้างอิง.....	57
ภาคผนวก.....	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันปริมาณที่เพิ่มขึ้นของขยะอุตสาหกรรม (Industrial Waste) ประเภทต่างๆ ได้นำไปสู่กระบวนการคิดและแนวทางที่จะนำเอาขยะอุตสาหกรรมและของเสียเหล่านั้น นำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ให้ได้มากที่สุด โดยขยะอุตสาหกรรมจะถูกเปลี่ยนเป็นวัสดุผลิตภัณฑ์ (Industry By-Products) ที่สามารถนำมาใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติ เพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากรธรรมชาติของประเทศและลดการเกิดมลพิษให้กับประเทศชาติได้ ที่ผ่านมาในอุตสาหกรรมการก่อสร้างต่างๆ โดยเฉพาะงานคอนกรีตได้มีการศึกษานำขยะอุตสาหกรรม และวัสดุธรรมชาติมาใช้อย่างแพร่หลาย อาทิเช่น นำเถ้าลอย (Fly Ash) มาใช้เป็นสารผสมทดแทนซีเมนต์ หรือการนำผงซีเมนต์จากกระบวนการผลิตซีเมนต์ (Cement Kiln Dust) มาใช้เป็นสารแข็งตัวแทนปูนซีเมนต์ในการทำพื้นดินบริเวณที่เป็นโคลนน้ำมันแข็งตัว หรือการใช้ ทรายหยาบที่ได้ออกจากการผลิตเหล็ก หรือถลุงเหล็ก (Steel Slag) เป็นสารผสมซีเมนต์ (Cement Admixture) หรือการนำเอาคอนกรีตเก่าที่ใช้แล้ว (Reclaimed Concrete Material or Demolition Waste) มาใช้เป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีตใหม่หรือนำเอาไปใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางสำหรับการก่อสร้างถนน

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับอุตสาหกรรมการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์ในประเทศไทย กลับปรากฏว่าได้มีความพยายามน้อยมากในการนำขยะอุตสาหกรรมเหล่านี้มาใช้ในงานผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต ทั้งๆที่งานผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตเป็นงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ต้องใช้งบประมาณของประเทศจำนวนมากในแต่ละปีทั้งในด้านการก่อสร้างและการบำรุงรักษา

ในมุมมองทางด้านวิศวกรรมการก่อสร้างผิวทาง วัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมที่นำกลับมาใช้ในการก่อสร้างผิวทาง ควรจะก่อให้เกิดผลดีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของผิวทางด้วย อย่างไรก็ตามขยะอุตสาหกรรมในประเทศไทย มีมากมายหลายประเภท และแต่ละประเภทก็มีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่แตกต่างกันที่จะถูกเลือกนำมาใช้ในการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์ เพื่อที่จะค้นหาขยะอุตสาหกรรมชนิดที่มีแนวโน้มว่าจะนำมาใช้ในผิวทางแอสฟัลท์ วิศวกร นักวิจัย ผู้ผลิต และผู้กำหนดมาตรฐานในการก่อสร้าง จะต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงคุณสมบัติและพฤติกรรมทางวิศวกรรมของวัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมชนิดต่างๆ ว่าจะประยุกต์ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ได้อย่างไร และควรมีข้อกำหนดหรือข้อจำกัดอะไรบ้าง ในการเลือกใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เหล่านี้ในงานผิวทางแอสฟัลท์

จากข้อมูลที่ได้จากกรมทางหลวง ผิวทางในประเทศไทย ถูกสร้างโดยใช้วัสดุแอสฟัลท์คอนกรีต ถึง 80% ของผิวทางทั้งหมด ได้มีการระเบิดหินเพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้างผิวทางเป็นจำนวนมาก หินที่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ วัสดุจำพวกหินปูน (Limestone) และหินแกรนิต (Granite) ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด และมีราคาค่อนข้างสูง ปัญหาที่สำคัญของการใช้วัสดุจำพวกหินปูน คือ หินชนิดนี้มีความแข็งแรงไม่มากนัก และมักจะเกิดการสึกกร่อนได้ง่าย เมื่อได้รับการเสียดสีกับยางรถยนต์ ทำให้ลดความเสียดทานระหว่างยางรถยนต์กับผิวถนน อาจก่อให้เกิดการลื่นไถลและเกิดอุบัติเหตุได้โดยง่าย ส่วนปัญหาหลักของการใช้วัสดุจำพวกหินแกรนิต คือ หินชนิดนี้มีลักษณะของแร่วิทยา (Mineralogy) ที่เป็นแบบ Hydrophilic คือการชอบน้ำเป็นพิเศษ และจะเกิดการจับตัวกับน้ำได้ดีกว่าการจับตัวกับแอสฟัลท์ซีเมนต์ ซึ่งจะทำให้แอสฟัลท์ซีเมนต์หลุดลอก (stripping) ออกจากผิวของวัสดุมวลรวมได้โดยง่าย เป็นผลให้วัสดุผสมแอสฟัลท์คอนกรีต เกิดความเสียหายได้อย่างรวดเร็วเมื่อเจอกับสภาพผิวทางที่เปียกชื้น หรือมีปริมาณน้ำฝนไหลผ่านลงสู่ชั้นผิวทางจำนวนมาก ปัญหานี้เป็นที่รู้จักกันดีและถูกเรียกว่า ปัญหาความเสียหายของผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตอันเนื่องมาจากความชื้น (Moisture Damage Problem)

ปัญหาที่เกิดจากความชื้นในชั้นผิวทางแอสฟัลท์ เป็นปัญหาหลักอย่างหนึ่งที่พบมากในประเทศไทย ซึ่งเป็นบริเวณที่มีฝนตกชุกในทุกปี ความชื้นเหล่านี้สามารถก่อให้เกิดความเสียหายแก่ถนนผิวทางแอสฟัลท์เป็นอย่างมาก ซึ่งอาจเกิดจากการหลุดลอก (Stripping) หรือการอ่อนตัวของแอสฟัลท์ ออกจากผิวของ วัสดุมวลรวม เป็นผลให้เกิดการสูญเสียความคงทนในการรองรับน้ำหนักบรรทุกจากการจราจร ความเสียหายเนื่องมาจากความชื้นนี้ ได้นำไปสู่ความสูญเสียทางด้านงบประมาณในการปรับปรุงซ่อมแซมถนนในแต่ละปีเป็นจำนวนมากมหาศาล ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาหาวิธีการแก้ไขหรือลดความเสียหายของถนนอันเนื่องมาจากความชื้น วิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหาก็คือ การใช้สารผสมเพิ่ม (Additive) ในส่วนผสมของวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตเพื่อลดปัญหาการหลุดลอกของแอสฟัลท์จากผิวของวัสดุมวลรวมอันเนื่องมาจากความชื้น

จากปัญหาทั้งหมดที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้น จึงมีความจำเป็นในการศึกษานำวัสดุที่เป็นขยะอุตสาหกรรมที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ในงานก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นการนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมเพื่อทดแทนวัสดุธรรมชาติ อาทิเช่น ตะกรันเหล็ก (Steel Slag) หรือคอนกรีตเก่า (Reclaimed Concrete or Demolition Waste) ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณของประเทศในด้านการก่อสร้าง หรือการนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่ม (Additive) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ และเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุผสมแอสฟัลท์คอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น อาทิเช่น ถ้ำลอย (Fly Ash) หรือผงซีเมนต์จากกระบวนการผลิตซีเมนต์ (Cement Kiln Dust) เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณในด้านการ

บำรุงรักษาผิวทาง เพราะสามารถนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงทนทาน ลดความเสียหาย และช่วยยืดอายุการใช้งานของผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต

แม้ว่าขยะอุตสาหกรรมที่ถูกกล่าวถึงในเบื้องต้นจะถูกนำมาใช้ได้ดีในงานก่อสร้างอื่นๆ และมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต การศึกษาถึงปริมาณที่พอเหมาะ และวิธีการในการเลือกนำมาใช้ในวัสดุผสมแอสฟัลท์ก็มีความสำคัญอย่างยิ่ง ผลงานจากโครงการวิจัยนี้จึงถูกคาดว่าจะสามารถนำเสนอความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ขยะอุตสาหกรรมที่ไม่เคยถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตมาก่อนในประเทศไทย กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ใน 2 รูปแบบ คือ 1) นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนแทนวัสดุมวลรวม และ 2) นำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุผสมแอสฟัลท์ โดยจะแยกการพิจารณาออกเป็น 2 รูปแบบของการใช้งานและจะนำเสนอแนะแนวทางการใช้ขยะอุตสาหกรรมประเภทที่ถูกคาดว่าจะสามารถนำไปสู่คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมแอสฟัลท์ที่ดีขึ้นได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติของวัสดุผสมแอสฟัลท์ในการต้านทานความเสียหายอันเนื่องมาจากความชื้นในชั้นผิวทางของประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ ในวัสดุผสมแอสฟัลท์ที่ใช้สำหรับการ ก่อสร้างผิวทาง โดยถูกแบ่งแยกออกเป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

1.1 ศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลท์คอนกรีต ที่ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ประเภทที่มีแนวโน้มว่า จะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุมวลรวม อาทิเช่น ตะกรันเหล็ก คอนกรีตเก่า และ cement kiln dust โดยใช้แอสฟัลท์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 เป็นวัสดุเชื่อมประสานในแอสฟัลท์คอนกรีต และศึกษาเปรียบเทียบกับวัสดุผสมแอสฟัลท์ที่ใช้วัสดุธรรมชาติเป็นวัสดุมวลรวม อาทิเช่น หินปูนและหินแกรนิต

1.2 ศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลท์คอนกรีตที่ใช้หินปูนและหินแกรนิตเป็นวัสดุมวลรวมและมีการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ประเภทที่มีแนวโน้มว่า จะสามารถนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่ม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุผสมแอสฟัลท์ภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น อาทิเช่น ถ้ำลอย และ cement kiln dust โดยเปรียบเทียบกับวัสดุผสมแอสฟัลท์ที่ไม่ได้ใช้สารผสมเพิ่ม เพื่อแก้ไขปัญหาความเสียหายอันเนื่องมาจากความชื้น

2. ศึกษาผลการออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลท์คอนกรีต ที่ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ เป็นวัสดุมวลรวมหรือสารผสมเพิ่ม โดยเปรียบเทียบกับแอสฟัลท์คอนกรีตที่ถูกออกแบบและใช้อยู่โดยทั่วไปในประเทศไทย

3. ศึกษาผลการเปรียบเทียบทางราคา ระหว่างแอสฟัลท์คอนกรีต ที่ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ เป็นวัสดุมวลรวมหรือสารผสมเพิ่ม และแอสฟัลท์คอนกรีตที่ผลิตโดยวัสดุธรรมชาติและไม่ได้ใช้สารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โดยปกติทั่วไป การศึกษาจะต้องกระทำทั้งในห้องปฏิบัติการ และในงานสนาม แต่สำหรับการศึกษาวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาวิจัยเฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เนื่องจากการศึกษาและการประเมินคุณสมบัติทางวิศวกรรมของผิวทางแอสฟัลท์หลังจากเปิดการใช้งานแล้วในสนามอาจต้องใช้ระยะเวลาในการศึกษานานกว่า 2 ปี และงบประมาณที่ใช้อาจสูงกว่าทุนวิจัยที่จะได้รับ ขอบเขตของโครงการวิจัยจึงถูกกำหนดดังต่อไปนี้

1. ศึกษาการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมเพื่อเป็นวัสดุทดแทนวัสดุมวลรวม โดยจะมุ่งเน้นไปที่ การใช้ตะกรันเหล็ก (Steel Slag) และคอนกรีตเก่า (Reclaimed Concrete Material) เนื่องจากหลังทำการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วพบว่า มีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุมวลรวมธรรมชาติได้ และอาจมีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุมวลรวมธรรมชาติโดยเฉพาะภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น
2. ศึกษาการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมเพื่อเป็นสารผสมเพิ่ม โดยจะมุ่งเน้นไปที่ การใช้เถ้าลอย (Fly Ash) และผงซีเมนต์ (Cement Kiln Dust) เนื่องจากหลังทำการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วพบว่า มีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลท์คอนกรีตภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น
3. การออกแบบและการเตรียมตัวอย่างวัสดุผสมแอสฟัลท์ จะใช้วิธี ซูเปอร์เพฟ (Superpave) เป็นหลักเนื่องจากเป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อกำหนดคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์และวัสดุมวลรวมที่ใช้ในวัสดุผสม นอกจากนี้วิธีการออกแบบ และการวิเคราะห์เชิงปริมาตรตามข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ ยังสามารถทำนายประสิทธิภาพของผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตและทำให้ได้ผิวทางแอสฟัลท์ที่มีคุณภาพดีขึ้น
4. การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมแอสฟัลท์จะมุ่งเน้นไปทางด้าน การทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Performance Properties) ภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้นของวัสดุผสมแอสฟัลท์เป็นหลัก เนื่องจากที่ผ่านมาการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสมแอสฟัลท์ภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น ไม่ได้ถูกให้ความสำคัญมากนักทั้งๆ ที่ปัญหาความเสียหายของผิวทางแอสฟัลท์อันเนื่องมาจากความชื้น จัดได้ว่าเป็นปัญหาสำคัญและพบเห็นได้บ่อยในผิวทางแอสฟัลท์ของประเทศไทย
5. การประเมินเปรียบเทียบทางด้านราคา และการศึกษาผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม จะครอบคลุมถึงวัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะธรรมชาติที่ถูกทำการศึกษาในโครงการวิจัยนี้

บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้วัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรม (Industry By-Products) มาผสมในแอสฟัลท์คอนกรีตที่ใช้ในงานทางนั้น ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ซึ่งในการศึกษาเกี่ยวกับการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมเหล่านี้ ได้มีผู้ทำการวิจัยไว้แล้วบางส่วน แต่การศึกษานั้นถูกจำกัดอยู่ในเพียงบางวัตถุประสงค์ และเพียงบางชนิดของวัสดุผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้ในผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต การศึกษาถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงถูกแบ่งแยกออกเป็น ผลงานวิจัยที่ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เป็นวัสดุทดแทนวัสดุมวลรวม และผลงานวิจัยที่ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลท์คอนกรีต

การเลือกวัสดุผลิตภัณฑ์สำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุมวลรวมนั้น ควรจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการใช้งาน เพื่อก่อให้เกิดผลดีต่อคุณสมบัติของแอสฟัลท์คอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและทางกล โดยจะต้องทำการศึกษาว่าวัสดุผลิตภัณฑ์สามารถเข้ากับแอสฟัลท์ซีเมนต์ได้มากน้อยเพียงใด และมีความแข็งแรงทนทานเพียงใดในการนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวม ส่วนการเลือกวัสดุผลิตภัณฑ์สำหรับใช้เป็นสารผสมเพิ่ม ควรจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุผลิตภัณฑ์เป็นหลัก ว่ามีส่วนประกอบทางเคมีชนิดใดที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลท์คอนกรีตได้

วัสดุผลิตภัณฑ์ที่มีแนวโน้มว่าจะสามารถถูกนำมาใช้ทดแทนวัสดุมวลรวม ได้แก่ ตะกรันเหล็ก (Slag) และ คอนกรีตเก่า (Reclaimed Concrete Materials) ส่วนวัสดุผลิตภัณฑ์ที่มีแนวโน้มว่าจะสามารถถูกนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลท์คอนกรีต ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) และ Cement Kiln Dust

2.1 ตะกรันเหล็ก (Slag)

Collins และ Ciesielski [6] ได้ศึกษาคุณสมบัติของตะกรันเหล็กที่ใช้ในงานทาง และพบว่าคุณสมบัติด้านกายภาพของตะกรันเหล็กมีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม (high angular shape) และมีผิวหยาบ (rough surface texture) ซึ่งถูกคาดว่าเป็นลักษณะที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมในแอสฟัลท์คอนกรีต เนื่องจากจะเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคมวลรวม (particle interlocking) และการยึดติดกับแอสฟัลท์ซีเมนต์ (bonding) ทำให้วัสดุผสมแอสฟัลท์มีความคงทน (stability) สูงขึ้น

Noureldin และ McDaniel [7] ได้ศึกษาพบว่าคุณสมบัติทางกลของตะกรันเหล็กนั้นสามารถต้านทานการสึกกร่อนได้ดี โดยวัดจากค่า Los Angeles Abrasion มีค่าสูงถึง 20-25%, มีความแข็งแรงทนทานสูง โดยวัดได้จากค่า soundness loss ต่ำกว่า 12%, และมีค่า bearing strength สูง โดยวัดได้จากค่า California Bearing Ratio (CBR) สูงถึง 300%

นอกจากนี้การศึกษาโดยคณะนักวิจัยหลายกลุ่ม [2, 8, 9, 10] ในการเลือกชนิดของแร่วิทยา (Mineralogy) ของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในวัสดุผสมแอสฟัลท์ เพื่อให้เกิดการยึดติดกับแอสฟัลท์ซีเมนต์ได้ดี และแอสฟัลท์ซีเมนต์ไม่หลุดลอกได้ง่ายเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น ควรจะพิจารณาวัสดุมวลรวมชนิดที่มีคุณสมบัติเป็น Hydrophobic ซึ่งจะจับตัวกับแอสฟัลท์ซีเมนต์ได้ดีมากกว่าจับตัวกับความชื้น โดยทั่วไปพบว่าวัสดุมวลรวมชนิดที่มีคุณสมบัติเป็นเบส (basic aggregate) จะมีคุณสมบัติเป็น Hydrophobic

การศึกษาโดย Riedel [11] พบว่า basic aggregate หรือ hydrophobic aggregate จะต้องมีส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุมวลรวมที่มีคุณสมบัติเป็นเบสมากกว่า 50% ส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นเบสเหล่านี้ ได้แก่ CaO , Al_2O_3 , FeO , MgO , Na_2O , และ K_2O และจากการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของตะกรันเหล็กนั้นพบว่า ตะกรันเหล็กมีส่วนประกอบทางเคมีชนิดที่เป็นเบสมากกว่า 50% ($\text{CaO} = 40\text{-}52\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1\text{-}3\%$, $\text{FeO} = 10\text{-}40\%$, $\text{MgO} = 5\text{-}10\%$) [12] ดังนั้นตะกรันเหล็กจึงถูกคาดว่าจะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมที่มีคุณสมบัติจับตัวกับแอสฟัลท์ซีเมนต์ได้ดี แม้แต่ภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น

2.2 คอนกรีตเก่า (Reclaimed Concrete Materials)

คอนกรีตเก่า (Reclaimed Concrete Material) ได้ถูกศึกษาเพื่อนำมาใช้ทดแทนวัสดุมวลรวม ซึ่งคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุมวลรวมชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคอนกรีตเก่าที่ถูกนำมาใช้ อาทิเช่น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและขนาดของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในคอนกรีตเก่า ความแข็งแรงต่อแรงกดอัดของคอนกรีต (compressive strength) ความเหมือนกันของวัสดุ (uniformity) [13] ยกตัวอย่างเช่น วัสดุมวลรวมที่ใช้ในคอนกรีตเก่าสำหรับงานโครงสร้าง (footings or structural members) ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายนอกมากนัก จะมีวัสดุปนเปื้อน (deleterious materials) ผสมอยู่ในวัสดุมวลรวมมากกว่าวัสดุมวลรวมที่ใช้ในคอนกรีตเก่าสำหรับงานผิวทาง (pavement concrete) หรือ Precast concrete จะถูกพบว่าใช้วัสดุมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า แต่มีความแข็งแรงต่อการต้านแรงกดสูงกว่า Cast-in-place concrete

Hanks และ Magni [14] ได้กล่าวว่า คอนกรีตเก่าที่จะนำมาใช้นั้น ได้ผ่านกระบวนการทำให้แตกละเอียด (crushed process) ทำให้มีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม (angular shape) และมีผิวหยาบ (rough texture) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีสำหรับนำมาใช้ทดแทนวัสดุมวลรวม

สำหรับผิวทางแอสฟัลท์ อย่างไรก็ตามวัสดุมวลรวมที่ได้จากคอนกรีตเก่ามีค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ (permeability) สูงกว่าวัสดุมวลรวมตามธรรมชาติ เช่น หินปูน หินกรวด และทรายธรรมชาติ การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของคอนกรีตเก่าที่พบว่ามีปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของคอนกรีตประกอบด้วยส่วนประกอบของ calcium-aluminum-silicate รวมถึง calcium hydroxide ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น alkaline สูง และมีลักษณะเป็นเบส ดังนั้นจึงถูกคาดว่าจะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมที่มีคุณสมบัติจับตัวกับแอสฟัลท์ซีเมนต์ได้ดี โดยเฉพาะภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น ในขณะเดียวกัน คณะนักวิจัยหลายกลุ่ม [14, 15, 16] ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเก่าและพบว่าคอนกรีตเก่าสามารถต้านทานการสึกกร่อนได้ดี (abrasion resistance) มีความแข็งแรงทนทานสูง (soundness) และมีค่า bearing strength ที่สูง

2.3 Cement Kiln Dust (CKD)

Cement Kiln Dust (CKD) สามารถนำมาประยุกต์ให้เป็นก้อนหรือเป็นเม็ดเพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมเทียมได้ ในประเทศญี่ปุ่นนั้นพบว่าการผลิตวัสดุมวลรวมเทียมที่สามารถดูดซึม oil ได้ และวัสดุมวลรวมเทียมชนิดนี้ถูกนำไปใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรที่เกิดจากน้ำหนักกดจราจร (rutting resistance) ในผิวทางแอสฟัลท์ โดยวัสดุมวลรวมเทียมจะดูดซึมส่วนประกอบเบา (lighter fraction) ของแอสฟัลท์ซีเมนต์ส่วนเกินที่ไหลเยิ้มออกมาในขณะที่ผิวทางมีอุณหภูมิสูง

นอกจากนี้มีการพบว่า CKD ยังสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตได้ โดย Kraszewski และ Emery [17] พบว่าการผสม CKD ลงในแอสฟัลท์ซีเมนต์ก่อนที่จะผสมกับวัสดุมวลรวมสามารถช่วยลดปริมาณแอสฟัลท์ซีเมนต์ที่ใช้ในวัสดุผสมแอสฟัลท์ได้ถึง 15%-20% โดยปริมาตรของวัสดุผสมทั้งหมด นอกจากนี้ส่วนประกอบของปูนขาวใน CKD สามารถช่วยต้านทานการหลุดลอกของแอสฟัลท์ซีเมนต์ออกจากผิวของวัสดุมวลรวมภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น ในกรณีนี้ CKD สามารถใช้ทดแทนปูนขาวหรือสารผสมเพิ่มเพื่อต้านทานการหลุดลอกได้

Collins และ Emery [18] ทำการศึกษาคูณสมบัติทางเคมีของ CKD และพบว่า CKD มีส่วนประกอบที่คล้ายกับ Portland Cement ซึ่งมีส่วนประกอบ CaO สูงถึง 40% มีลักษณะเป็นเบส และมีส่วนประกอบ alkali สูง อย่างไรก็ตามมีการพบว่า CKD มีส่วนผสมของโลหะหนัก [19] อาทิเช่น แคดเมียม ตะกั่ว และ เซเรเนียม ปะปนอยู่ด้วย ถึงแม้ว่าจะเป็นปริมาณที่น้อย (0.05% โดยน้ำหนัก) แต่ก็อาจก่อให้เกิดมลพิษได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเป็นพิเศษในการนำ CKD มาใช้ในวัสดุผสมแอสฟัลท์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเคลื่อนย้ายวัสดุ CKD และความเป็นไปได้ในการกรองเอาโลหะหนักเหล่านี้ออก

2.4 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอย (Fly Ash) ถูกนำมาใช้ในงานคอนกรีตมาแล้วเกือบ 60 ปี เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็น pozzolanic ซึ่งเมื่อ siliceous หรือ aluminosiliceous อยู่ในสภาพละเอียดและเมื่อจับกับน้ำ จะรวมตัวเข้าด้วยกันกับ calcium hydroxide ในซีเมนต์ ก่อให้เกิดคุณสมบัติเชื่อมประสาน (cementitious compounds) [20] คุณสมบัติด้านกายภาพของเถ้าลอยนั้นมีลักษณะรูปร่างกลมละเอียด ขนาดเล็กกว่า 0.075 mm หรือสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยมีส่วนประกอบ คือ silica, alumina, iron oxide และ calcium และอาจมีปริมาณ carbon ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับเถ้าลอยแต่ละชนิด [21] เมื่อเถ้าลอยถูกนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในงานคอนกรีต อาจถูกแบ่งแยกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เถ้าลอย Class C และเถ้าลอย Class F ข้อแตกต่างระหว่างเถ้าลอย Class C และ Class F คือปริมาณ calcium, silica, alumina, และ iron ในเถ้าลอย [22] เถ้าลอย Class F มีปริมาณ calcium อยู่ระหว่าง 1-12% ซึ่งอยู่ในรูปของ calcium hydroxide และ calcium sulfate ในทางตรงกันข้าม เถ้าลอย Class C มีปริมาณ calcium oxide สูงถึง 30-40% [23] ข้อแตกต่างอีกอย่างก็คือ เถ้าลอย Class C จะมีปริมาณ alkalis และ sulfates สูงกว่า เถ้าลอย Class F

เป็นที่สังเกตได้ว่าแหล่งผลิตเถ้าลอยแห่งใหญ่ ในประเทศไทย ได้แก่เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาถ่านลิกไนต์ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งได้มีคณะนักวิจัยหลายกลุ่ม [21, 22, 23] ระบุว่า เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาถ่านลิกไนต์มีส่วนประกอบของ calcium oxide สูงถึง 15-40% เนื่องด้วยคุณสมบัติเชื่อมประสานและขนาดอนุภาคที่เล็ก เถ้าลอยจึงถูกคาดว่าจะสามารถนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อเติมช่องว่างในวัสดุผสมแอสฟัลท์ หรือเพิ่มคุณสมบัติเชื่อมประสานในแอสฟัลท์ซีเมนต์ ส่งผลให้สามารถเพิ่มความคงทนให้กับวัสดุผสมแอสฟัลท์ได้ ทั้งนี้ จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลของส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง พบว่ามีปริมาณ calcium oxide อยู่ระหว่าง 10-20% เถ้าลอยจึงถูกคาดว่าจะสามารถนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อป้องกันการหลุดลอกในวัสดุผสมแอสฟัลท์ภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้นได้

โครงการวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการศึกษาวัสดุผลิตภัณฑ์ที่ถูกกล่าวถึงในเบื้องต้นเป็นหลัก เนื่องจากเป็นวัสดุผลิตภัณฑ์จากขยะอุตสาหกรรมที่ยังไม่เคยมีการศึกษาและนำมาขยายผลสำหรับใช้ในวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีตมาก่อนในประเทศไทย โดยจะทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุผสมแอสฟัลท์ที่ใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ กับวัสดุผสมแอสฟัลท์แบบที่ใช้โดยทั่วไปในปัจจุบัน ทั้งนี้จะคำนึงถึงการประเมินทางด้านราคาและผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

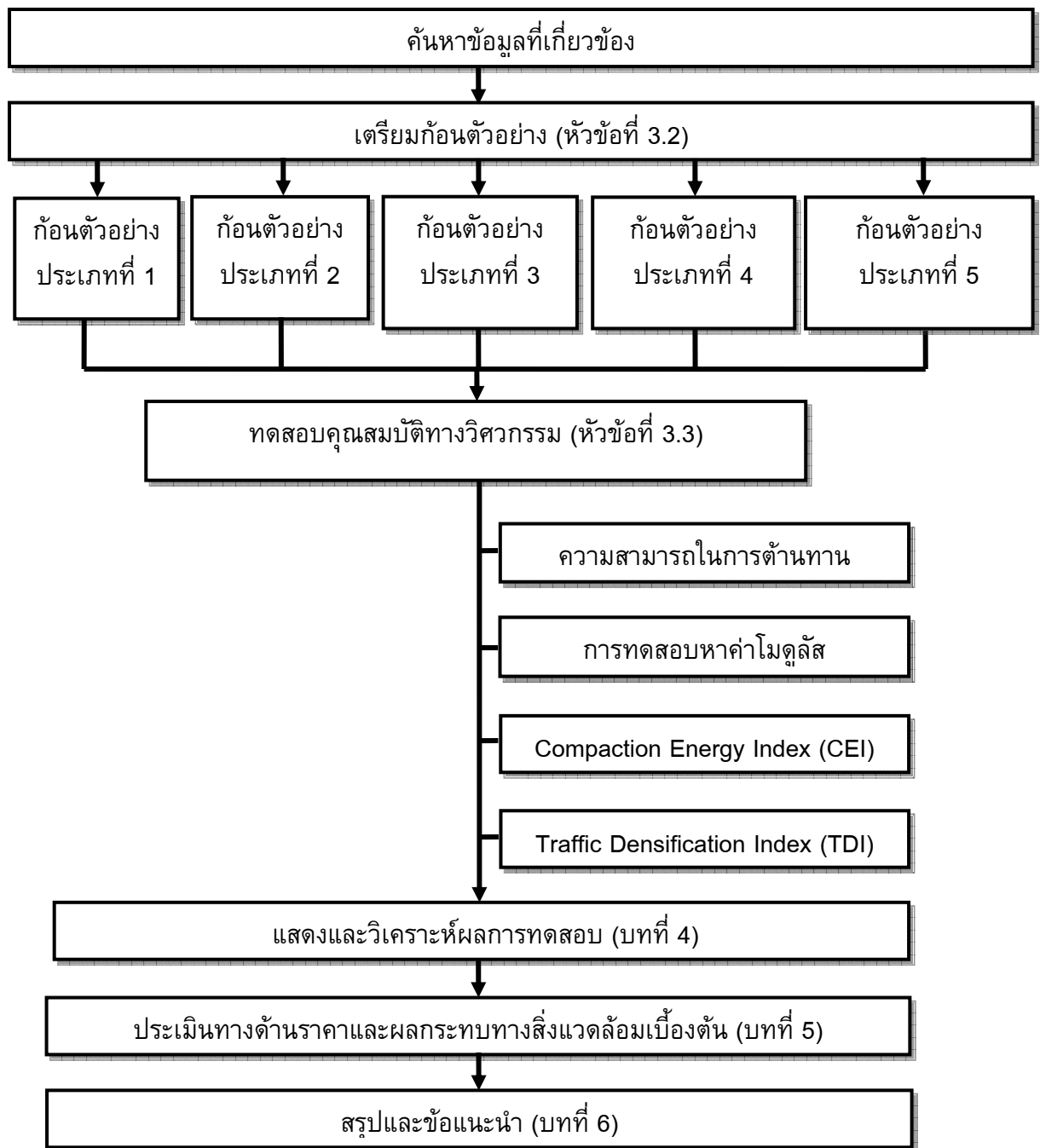
3.1 บทนำ

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงมาตรฐานวิธีการทดสอบซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐานของ ASTM (American Standard for Testing Material) และ AASHTO (American Association of State Highways and Transportation Officials) ซึ่งใช้ทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ ได้ถูกทดสอบตามระบบซูเปอร์เพฟ นอกจากวัสดุมวลรวมแล้ว วัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบไปด้วย วัสดุเชื่อมประสาน (Asphalt Cement) และสารผสมเพิ่ม (Additive)

คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมซึ่งประกอบด้วย ขนาดคละของวัสดุ (Gradation of Aggregate) ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวม (Specific Gravity and Absorption) ดัชนีความแบนยาวของอนุภาค (Flat and Elongated Particle) ความเป็นเหลี่ยมมุม (Aggregate Angularity) เปอร์เซนต์หน้าแตกของมวลรวม (Percent Fractured of Course Aggregate) ความคงทนต่อการสึกกร่อนของวัสดุมวลรวมหยาบ (Los Angeles Abrasion) ความคงทนของวัสดุมวลรวมโดยใช้โซเดียมซัลเฟตหรือแมกนีเซียมซัลเฟต (Soundness) ค่ามวลผสมเทียบเป็นทราย (Sand Equivalent) ส่วนวัสดุเชื่อมผสมนั้นจะใช้ AC60/70 เกรดเดียวตลอดงานวิจัยนี้

การเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบจะออกแบบตามวิธีซูเปอร์เพฟ และก้อนตัวอย่างเหล่านั้นจะถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ซึ่งในการวิจัยนี้ประกอบด้วย การทดสอบการต้านทานความชื้น (Moisture Damage Resistance) และค่าโมดูลัส (Resilient Modulus) นอกจากนี้ความสามารถในการบดอัดและความสามารถในการต้านทานปริมาณการจราจรของก้อนตัวอย่างจะถูกทดสอบด้วย

ก้อนตัวอย่างทดสอบที่ผสมขึ้นมาจะมีหลายชนิดด้วยกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุผลิตภัณฑ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้แบ่งได้เป็น 5 ประเภทดังนี้ 1) ก้อนตัวอย่างควบคุมโดยใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมและไม่มีสารผสมเพิ่ม 2) ก้อนตัวอย่างที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมและใช้เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นสารผสมเพิ่ม 3) ก้อนตัวอย่างที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมและใช้ผงซีเมนต์ (Cement Kiln Dust) เป็นสารผสมเพิ่ม 4) ก้อนตัวอย่างที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบและหินปูนเป็นมวลรวมละเอียดโดยที่ไม่มีสารผสมเพิ่ม 5) ก้อนตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตเก่าเป็นวัสดุมวลรวมหยาบและหินปูนเป็นมวลรวมละเอียดโดยที่ไม่มีสารผสมเพิ่ม ซึ่งแผนงานของโครงการวิจัยนี้ได้แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนงานของโครงการวิจัย

3.2 การเตรียมก่อนตัวอย่าง

ในหัวข้อนี้เป็นการเตรียมก่อนตัวอย่างตามการออกแบบโดยวิธีซูบเปอร์เพฟ และการออกแบบส่วนผสมตามระบบซูบเปอร์เพฟนั้นประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนคือ (1) การเลือกวัสดุ (2) การเลือกโครงสร้างของมวลรวม (แสดงในรูปของขนาดคละ) และ (3) การออกแบบปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน ในทางปฏิบัตินั้นก่อนตัวอย่างแต่ละก้อนจะถูกเตรียมโดยโครงสร้างของมวลรวมและปริมาณวัสดุเชื่อมผสานที่แตกต่างกันโดยเครื่องบดอัดซูบเปอร์เพฟ (Superpave Gyratory

Compactor) เพื่อที่จะประเมินคุณสมบัติเชิงปริมาตรของก้อนตัวอย่างแต่ละก้อนที่ความหนาแน่นต่าง ๆ ตามจำนวนรอบที่ทำการบดอัดตั้งที่แสดงในกราฟแสดงความหนาแน่น (Compaction density curve) จากนั้นผลจากการบดอัดจะได้โครงสร้างมวลรวมและปริมาณวัสดุเชื่อมผสานออกแบบจากก้อนตัวอย่างที่มีคุณสมบัติเชิงปริมาตรที่ดีที่สุด

3.2.1 การเลือกวัสดุ

ในขั้นตอนนี้เป็น การเลือกวัสดุมวลรวม และวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสมกับสภาพสิ่งแวดล้อมและสภาพการจราจร อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุเชื่อมผสานเพียงชนิดเดียวที่เป็นตัวแปรควบคุม นั่นก็คือ แอสฟัลท์ซีเมนต์เกรด 60/70 ส่วนวัสดุมวลรวมนั้นได้ใช้มวลรวมทั้งหมด 3 ชนิด คือ หินปูน (limestone) ตะกรันเหล็ก (steel slag) และคอนกรีตเก่า (reclaimed concrete material)

การที่จะนำวัสดุต่าง ๆ มาผสมกันเป็นก้อนตัวอย่างนั้นระบบซูบเปอร์เพฟมีข้อกำหนดเกี่ยวกับวัสดุมวลรวมซึ่งข้อกำหนดสองอย่างคือ (1) วัสดุมวลรวมจะถูกควบคุมโดย จุดควบคุม (control point) และเขตจำกัด (restrict zone) ซึ่งแสดงดังตาราง A1 ใน Appendix A และ (2) วัสดุมวลรวมจะต้องผ่านข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณสมบัติบางประการคือ ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวม หยาบและมวลรวมละเอียด ความยาวและแบนของอนุภาค และปริมาณดินเหนียว ซึ่งแสดงในตาราง A2 ใน Appendix A ส่วนวิธีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวม

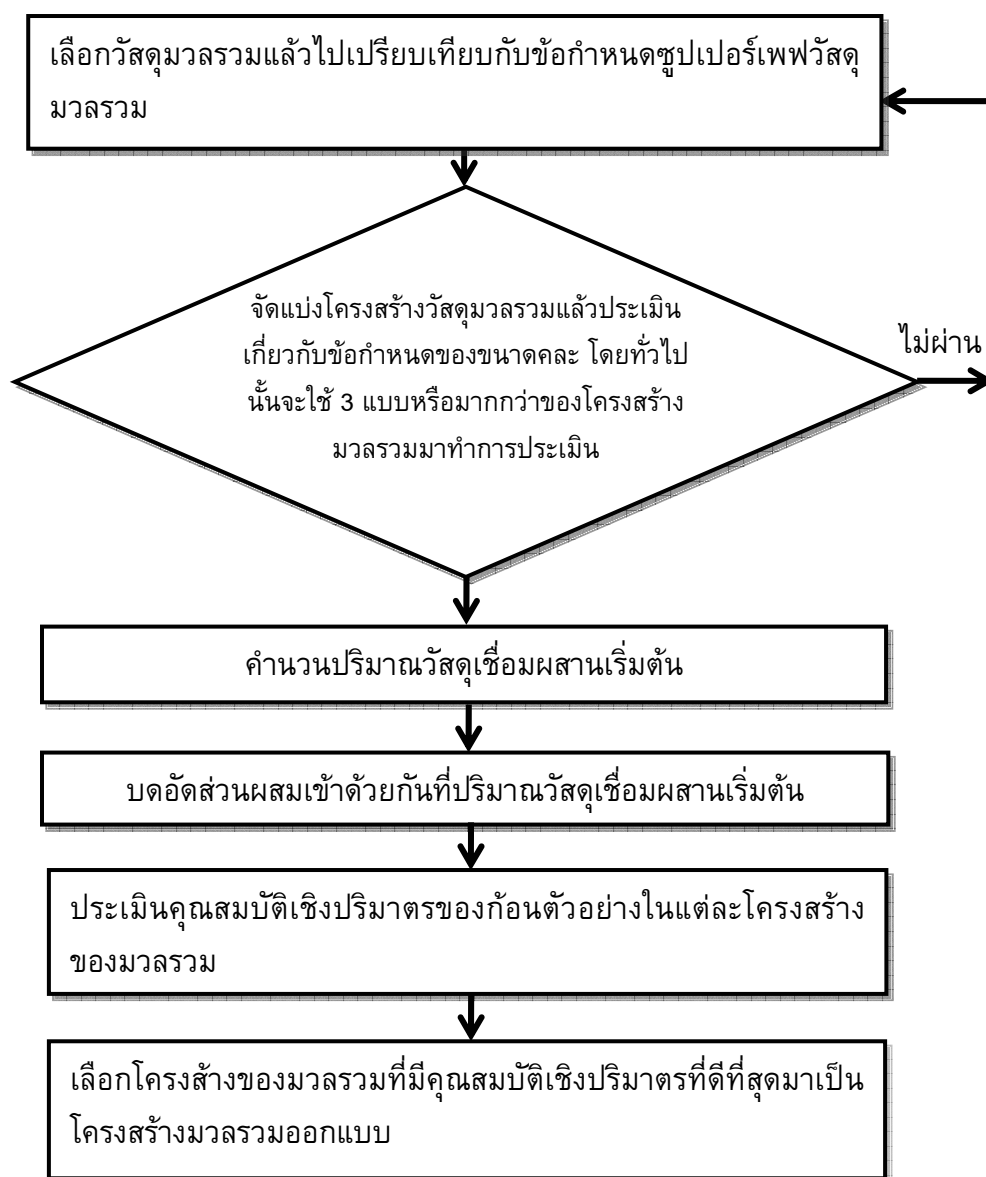
มาตรฐาน	วิธีการทดสอบ
AASHTO T11 & T27	Sieve Analysis for Determining Gradation and Size
AASHTO T84-88	Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate
AASHTO T85-88	Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate
AASHTO TP56-99	Standard Test Method for Uncompacted Void Content of Coarse Aggregate – As Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading
ASTM C1252	Standard Test Method for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate – As Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading
ASTM D5821	Determining Percent of Fractured by Particles in Coarse Aggregate
AASHTO T96	Resistance to Abrasion of Small Size Coarse Aggregate by Use of the Los Angeles Machine
AASHTO T104	Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate
AASHTO T176	Plastic Fines in Graded Aggregate and Soils by Use of the Sand Equivalent Test
ASTM D4791	Flat or Elongated Particles in Coarse Aggregate

ส่วนสารผสมเพิ่มในการวิจัยนี้จะใช้ทั้งหมด 2 ชนิดคือ เถ้าลอย (fly ash) และผงซีเมนต์ (cement kiln dust) และส่วนประกอบทางเคมีของสารผสมเพิ่มทั้งสองตัวนี้ซึ่งทำการหาโดยวิธี x-ray fluorescence spectroscopy (XRF) และผลการทดสอบได้แสดงไว้ในบทที่ 4

3.2.2 การเลือกโครงสร้างของมวลรวม

หลังจากวัสดุเชื่อมผสมและวัสดุมวลรวมได้ถูกเลือกและได้ผ่านข้อกำหนดต่างๆแล้ว ก็จะทำให้การเลือกโครงสร้างมวลรวมออกแบบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเลือก 3 แบบหรือมากกว่ามาประเมินว่าโครงสร้างไหนผ่านเกณฑ์ หลังจากนั้นก็จะคำนวณหาปริมาณวัสดุเชื่อมผสมเริ่มต้น จากนั้นก็นำปริมาณวัสดุเชื่อมผสมเริ่มต้นนั้นมาผสมกับวัสดุมวลรวมในแต่ละโครงสร้างของมวลรวม และจากนั้นก็ประเมินคุณสมบัติเชิงปริมาตรโดยเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของระบบซูบเปอร์เฟล (ตาราง A3 ใน Appendix A) เพื่อประเมินว่าโครงสร้างมวลรวมไหนมีคุณสมบัติดีที่สุดจะได้

นำโครงสร้างมวลรวมนั้นมาใช้ในการผสมกันตัวอย่าง รูปที่ 3.2 แสดงแผนโครงสร้างสำหรับการออกแบบโครงสร้างมวลรวม

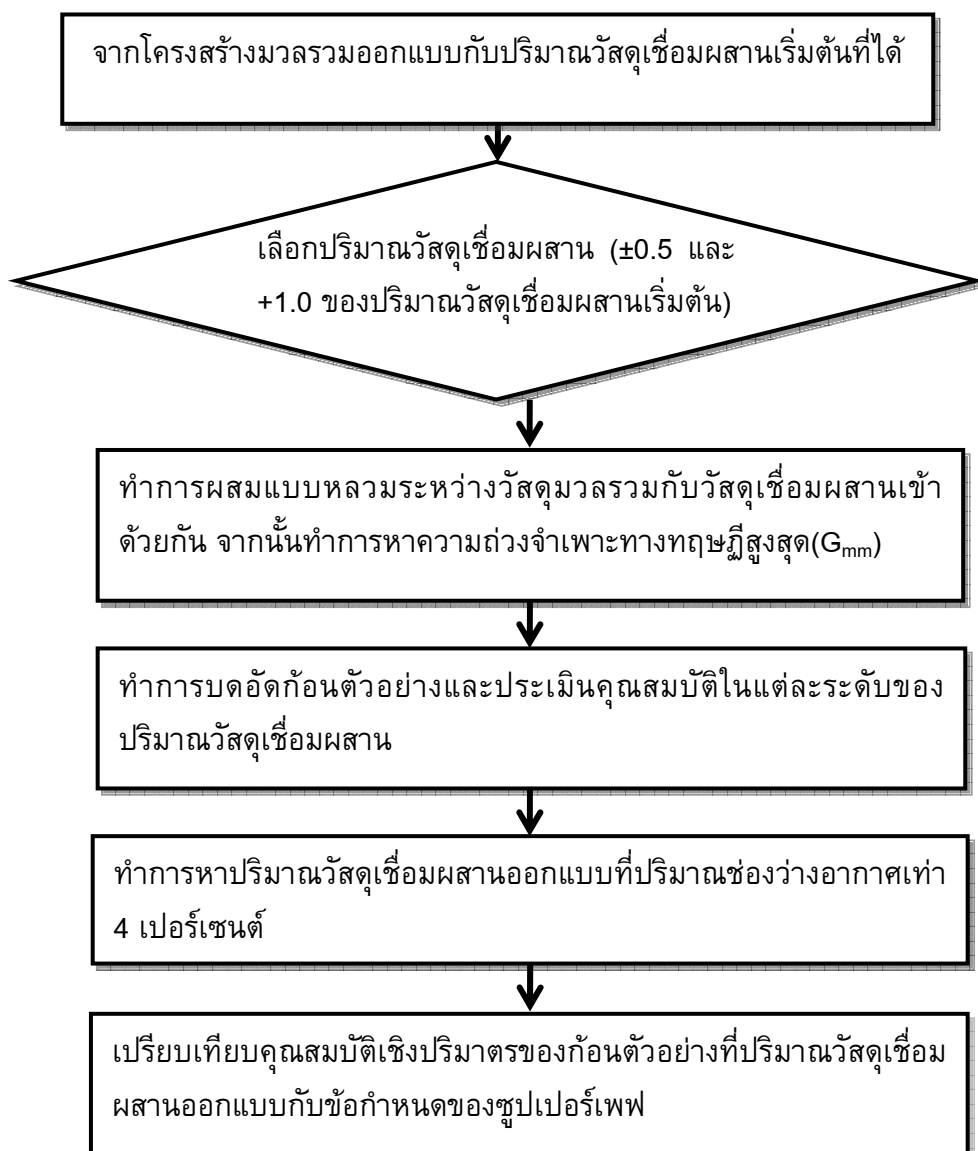


รูปที่ 3.2 แผนโครงสร้างแสดงการออกแบบโครงสร้างมวลรวม

3.2.3 การเลือกปริมาณวัสดุเชื่อมผสมออกแบบ

เมื่อได้โครงสร้างมวลรวมออกแบบแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปคือการหาปริมาณวัสดุเชื่อมผสมออกแบบ ซึ่งหาได้โดยผสมกันตัวอย่างขึ้นโดยเครื่องบดอัดซูเปอร์เพอร์เฟกต์ (Superpave gyratory compactor) โดยใช้ปริมาณวัสดุเชื่อมผสมที่ ± 0.5 และ $+1.0$ ของปริมาณวัสดุเชื่อมผสมเริ่มต้น จากนั้นก็นำก้อนตัวอย่างของแต่ละโครงสร้างมวลรวมไปหาปริมาณช่องว่างอากาศ โดยจะหาปริมาณวัสดุเชื่อมผสมออกแบบได้ที่ปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากับ 4 และนอกจากนั้น

ก่อนตัวอย่างที่ปริมาณวัสดุเชื่อมผสานออกแบบนี้จะต้องผ่านข้อกำหนดต่างๆของระบบซูบเปอร์เฟฟด้วย (ตาราง A3 ใน Appendix A) รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนในการหาปริมาณวัสดุเชื่อมผสานออกแบบ



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนในการหาปริมาณวัสดุเชื่อมผสานออกแบบ

3.3 การทดสอบก้อนตัวอย่าง

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการทดสอบคุณสมบัติของก้อนตัวอย่างซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบการต้านทานความชื้น (Moisture damage resistance) การทดสอบค่าโมดูลัส (resilient

modulus test) และการทดสอบหาค่าดัชนีพลังงานของความหนาแน่น (densification energy indices)

3.3.1 การทดสอบการต้านทานความชื้น

การทดสอบ Indirect Tensile Strength นั้นได้อ้างอิงตามมาตรฐานของ AASHTO (AASHTO T283, "Standard Test Method for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage") เพื่อที่จะใช้ประเมินการต้านทานความชื้นของก้อนตัวอย่างทั้ง 5 ประเภท

การทดสอบนี้จะใช้ 6 ก้อนตัวอย่างของส่วนผสมแต่ละประเภท และใน 6 ก้อนตัวอย่างนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ก้อน โดยกลุ่มแรกจะไม่มีการทำงานอะไรกับก้อนตัวอย่างและเรียกก้อนตัวอย่างกลุ่มนี้ว่าก้อนตัวอย่างแบบไม่มีเงื่อนไข (Unconditioned specimen) ขณะที่ก้อนตัวอย่างกลุ่มที่ 2 จะมีการดูดอากาศออกจากก้อนตัวอย่าง หรือทำให้ก้อนตัวอย่างอิ่มตัวประมาณ 70-80% หลังจากนั้นก็จะนำก้อนตัวอย่างในกลุ่มนี้ไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก้อนตัวอย่างกลุ่มหลังนี้เรียกว่าก้อนตัวอย่างแบบมีเงื่อนไข (Conditioned specimen) รูปที่ 3.4 แสดงการบ่มก้อนตัวอย่างของก้อนตัวอย่างแบบมีเงื่อนไข



รูปที่ 3.4 การเตรียมก้อนตัวอย่างแบบมีเงื่อนไข

ก้อนตัวอย่างทั้งสองกลุ่มนั้นจะถูกนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำก้อนตัวอย่างทั้งหมดไปทดสอบเพื่อปรับสภาพอุณหภูมิของก้อนตัวอย่าง หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างขึ้นจากอ่างควบคุมอุณหภูมิแล้ว ก็จะนำตัวอย่างไปกดเพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมที่อัตรากด 50.8 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัด ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.5 และเครื่องทดสอบจะหยุดทันทีเมื่อตัวอย่างเกิดรอยแตกดังแสดงในรูปที่ 3.6

การทดสอบนี้จะวัดผลกระทบจากความชื้นในรูปของอัตราส่วนกำลังรับแรงดึงโดยอ้อม (Indirect Tensile Strength Ratio, TSR) ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงดึงโดยอ้อมของก้อน

ตัวอย่างแบบมีเงื่อนไขและกำลังรับแรงดึงโดยอ้อมของก้อนตัวอย่างแบบไม่มีเงื่อนไข ถ้าก้อนตัวอย่างมีค่า TSR สูงแสดงว่ามีความสามารถในการต้านทานความชื้นมาก



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบแรงอัด



รูปที่ 3.6 ก้อนตัวอย่างภายหลังการทดสอบ

กำลังรับแรงดึงโดยอ้อมสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{กำลังรับแรง (Pa)} = \frac{2P}{\pi Dt}$$

โดยที่ P = แรงอัดสูงสุด (นิวตัน)

t = ความหนาของตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

ส่วนอัตราส่วนกำลังรับแรงดึงโดยอ้อม (Indirect Tensile Strength Ratio, TSR) สามารถหาได้ดังสมการ

$$\text{อัตราส่วนกำลังรับแรงดึงโดยอ้อม (TSR)} = \frac{TS_C}{TS_U}$$

โดยที่ TS_C = กำลังรับแรงดึงโดยอ้อมของก้อนตัวอย่างแบบมีเงื่อนไข

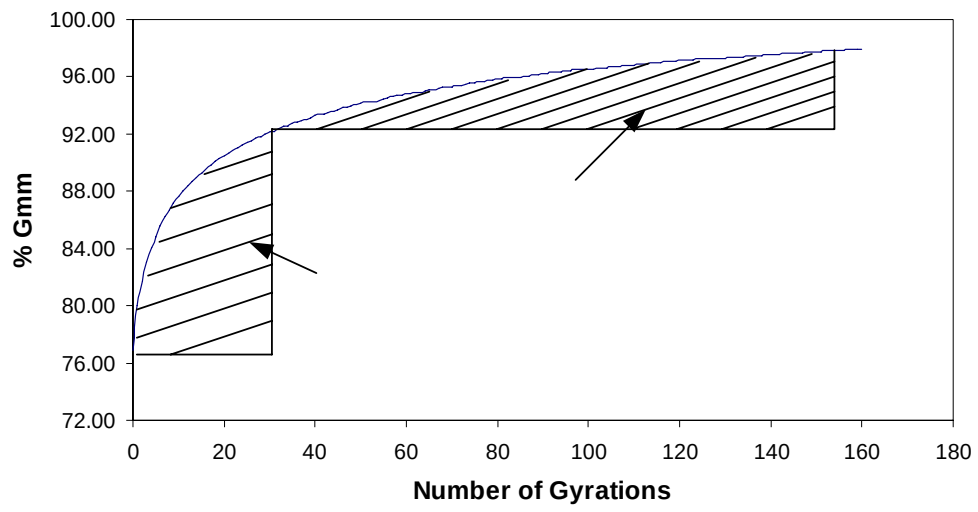
TS_U = กำลังรับแรงดึงโดยอ้อมของก้อนตัวอย่างแบบไม่มีเงื่อนไข

3.3.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัส

การทดสอบหาค่าโมดูลัสนี้เป็นการวัดค่ากำลังรับแรงดึงโดยอ้อม (indirect tensile strength) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกซ้ำ (Repeated loading) ซึ่งการทดสอบนี้ได้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM (ASTM D4123-82, Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures) และการทดลองนี้จะใช้ 100 รอบของน้ำหนักบรรทุกซ้ำ และใน 1 ก้อนตัวอย่างจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 5° , 25° และ 40°C

3.3.3 การทดสอบหาค่าดัชนีพลังงานความหนาแน่น

ดัชนีพลังงาน 2 ค่าคือ Compaction energy index (CEI) และ Traffic Densification index (TDI) จะถูกประเมินในงานวิจัยนี้ซึ่งค่าดัชนีเหล่านี้หาได้จากพื้นที่ใต้ Densification curve ระหว่าง 2 จุดอ้างอิง โดยที่ค่า CEI คือค่าพลังงานที่ต้องการในการบดอัดถนนจนได้ความหนาแน่นที่ต้องการ (ปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากับ 8) ในระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟความหนาแน่นที่วัดออกมาโดยเครื่องบดอัดซูเปอร์เพฟ (Superpave gyratory compactor) ระหว่างจุดที่เป็นจำนวนรอบของการหมุนรอบแรกกับจุดที่มีเปอร์เซ็นต์ของค่า G_{mm} เท่ากับ 92 ซึ่งเป็นจุดที่สมมติได้ว่าเป็นความหนาแน่นที่ต้องการเมื่อเสร็จสิ้นการก่อสร้าง ดังนั้นถ้าค่า CEI ยิ่งต่ำก็จะยิ่งดีเนื่องจากต้องการพลังงานในการบดอัดจนถึงความหนาแน่นที่ต้องการน้อยกว่า ส่วนค่า TDI คือค่าพลังงานที่ต้องการในการบดอัดถนนจนถึงความหนาแน่นที่ 98 เปอร์เซ็นต์ของ G_{mm} หรือก็คือค่าพลังงานที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานปริมาณการจราจร ซึ่งสามารถหาได้โดยการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟความหนาแน่นที่วัดออกมาโดยเครื่องบดอัดซูเปอร์เพฟ (Superpave gyratory compactor) ระหว่างจุดที่มีเปอร์เซ็นต์ของค่า G_{mm} เท่ากับ 92 กับจุดที่มีเปอร์เซ็นต์ของค่า G_{mm} เท่ากับ 98 ดังนั้นถ้าค่า TDI ยิ่งสูงก็จะยิ่งดีเนื่องจากต้องมีปริมาณการจราจรมากกว่าก้อนตัวอย่างที่มีค่า TDI ที่ต่ำกว่า หรือกล่าวอีกนัยก็คือมีความสามารถต้านทานปริมาณการจราจรได้มากกว่านั่นเอง รูปที่ 3.7 แสดงพื้นที่ของค่า CEI และ TDI



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่า CEI และ TDI

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะแสดงและวิเคราะห์ผลการทดสอบของก้อนตัวอย่างทั้ง 5 ประเภทที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 ซึ่งก้อนตัวอย่างทั้งหมดที่นำมาทดสอบจะต้องผ่านเกณฑ์ทางด้านคุณสมบัติเชิงปริมาตรตามระบบซูบเปอร์เพฟก่อน และก้อนตัวอย่างเหล่านี้จะถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมซึ่งประกอบไปด้วยการต้านทานความชื้น (Moisture damage resistance) และการทดสอบหาค่าโมดูลัส (Resilient Modulus) นอกจากนั้นความสามารถในการบดอัด (compactability) และการต้านทานปริมาณการจราจร (traffic densification) จะถูกประเมินด้วย

4.2 ส่วนผสมออกแบบ

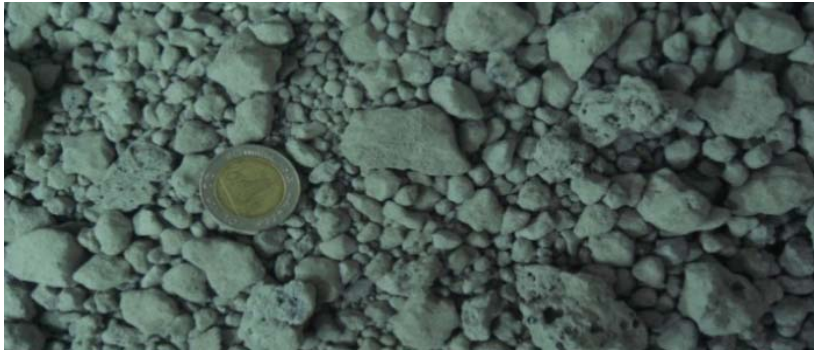
กระบวนการออกแบบส่วนผสมและข้อกำหนดต่าง ๆ จะถูกแสดงในหัวข้อนี้ หลังจากนั้นจะแสดงผลที่ได้จากการออกแบบส่วนผสม ก้อนตัวอย่างทั้ง 5 ประเภทที่ออกแบบแล้วจะต้องผ่านเกณฑ์ของระบบซูบเปอร์เพฟทั้งหมด ก่อนที่จะถูกนำไปทดสอบ

4.2.1 การเลือกวัสดุ

ขั้นตอนสำคัญในการออกแบบตามวิธีซูบเปอร์เพฟนั้นคือการเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับปริมาณการจราจร สภาพภูมิอากาศและส่วนของโครงสร้างถนน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้มวลรวม 3 ชนิด ได้แก่ หินปูน (limestone) ตะกรันเหล็ก (Steel Slag) และคอนกรีตเก่า (Reclaimed concrete material) เพื่อที่จะนำไปเตรียมก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 4.1 หินปูน (limestone)



รูปที่ 4.2 ตะกรันเหล็ก (steel slag)



รูปที่ 4.3 คอนกรีตเก่า (reclaimed concrete material)

โครงสร้างของมวลรวมที่จะนำมาออกแบบนั้นจะต้องผ่านข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟคือ จุดควบคุม (Control point) และเขตจำกัด (Restrict zone) ซึ่งจะแสดงในหัวข้อ 4.2.2 ส่วนคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมจะทดสอบตามมาตรฐานของ AASHTO และ ASTM ซึ่งแสดงดังตาราง 3.1 และผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมแต่ละชนิดเหล่านั้นได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของมวลรวมแต่ละชนิด

คุณสมบัติ	มวลรวม							
	หินปูน				ตะกรันเหล็ก		คอนกรีตเก่า	
	มวลรวมหยาบ			มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด
	HB2	HB3	HB4	HB1				
Bulk Specific Gravity	2.677	2.685	2.692	2.660	3.035	-	2.320	-
Percent Absorption	0.500	0.420	0.320	0.890	4.343	-	5.302	-
Uncompacted Void Content of Fine Aggregate	-	-	-	49.1	-	-	-	-
Uncompacted Void Content of Course Aggregate	47.6	46.7	46.1	-	52.1	-	48.9	-
Fractured Particles in Coarse Aggregate	100/10 0	100/10 0	100/10 0	-	16/2	-	100/10 0	-
Los Angeles Abrasion	25.5	25.2	24.6	29.4	28.8	-	29.7	-
Soundness	3.802	0.970	2.180	4.559	1.34		2.44	
Sand Equivalent	-	-	-	79	-	-	-	-
Flat and Elongated	0.13	0.16	0.22	-	0.1	-	0.51	-

ส่วนคุณสมบัติทางเคมีของ Fly ash, CKD และ ตะกรันเหล็ก จะถูกทดสอบส่วนประกอบด้วยวิธี x-ray fluorescence spectroscopy (XRF) และผลการทดสอบได้แสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 4.4 เถ้าลอย (fly ash)



รูปที่ 4.5 ผงซีเมนต์ (cement kiln dust)

ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ผงซีเมนต์และตะกรันเหล็ก

สารประกอบ	เปอร์เซ็นต์		
	เถ้าลอย	ผงซีเมนต์	ตะกรันเหล็ก
Calcium oxide (CaO)	15.14	72.88	33.11
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	14.22	3.38	23.17
Silicon oxide (SiO ₂)	39.85	14.6	20.86
Magnesium oxide (MgO)	2.74	1.16	10.20
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃)	20.61	6.13	6.15
Manganese oxide (MnO)	0.09	-	3.36
Sulfur oxide (SO ₃)	3.68	0.39	0.93
Chromium oxide (Cr ₂ O ₃)	-	-	0.88
Titanium oxide (TiO ₂)	0.36	0.25	0.61
Phosphorus oxide (P ₂ O ₅)	0.13	0.10	0.25
Zinc oxide (ZnO)	-	-	0.16

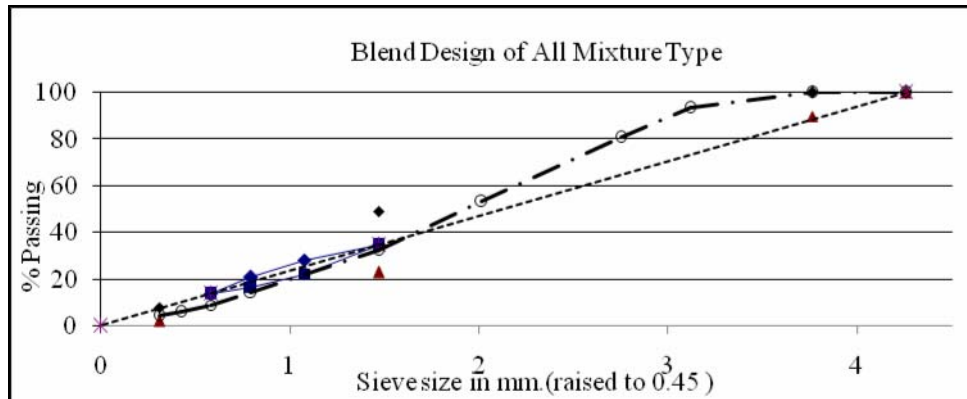
Potassium oxide (K ₂ O)	2.21	0.77	0.07
Sodium oxide (Na ₂ O)	1.00	0.15	-
Bromine (Br)	-	0.10	-
Chlorine (Cl)	-	0.08	-

4.2.2 ขนาดคละของมวลรวม

การออกแบบตามวิธีซูบเปอร์เพพนี้ขนาดคละของมวลรวมจะต้องผ่านเกณฑ์ ซึ่งถูกควบคุมโดยจุดควบคุม (Control point) และเขตจำกัด (Restrict zone) ซึ่งเกณฑ์ทั้งสองอย่างนั้น คือจุดที่พล็อตบนแผนภูมิของ Federal Highway Administration (FHWA) ซึ่งพล็อตระหว่างเปอร์เซ็นต์การผ่านตะแกรงของมวลรวม กับขนาดของตะแกรงยกกำลัง 0.45 นอกจากนี้ทั้งจุดควบคุมและเขตจำกัด จะขึ้นอยู่กับขนาดระบุของมวลรวม (nominal maximum size) ซึ่งในงานวิจัยนี้มวลรวมทั้ง 3 ชนิดจะใช้ขนาดระบุที่ 19 มิลลิเมตร ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดคละของมวลรวมทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ออกแบบในงานวิจัยนี้ และรูปที่ 4.6 แสดงกราฟของขนาดคละของมวลรวมทั้ง 3 ชนิดซึ่งผ่านเกณฑ์ทั้ง จุดควบคุม และเขตจำกัด

ตารางที่ 4.3 ขนาดคละของมวลรวม

ขนาดตะแกรง (มม)	เปอร์เซ็นต์ผ่าน
19	100
12.5	93.38
9.5	80.83
4.75	53.32
2.36	32.31
1.18	21.95
0.6	14.59
0.3	9.08
0.15	5.88
0.075	4.32
Pan	0



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงขนาดคละของมวลรวม

เมื่อได้ขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ออกแบบแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการแบ่งสัดส่วนของปริมาณของมวลรวมและสารผสมเพิ่มในแต่ละประเภทของก้อนตัวอย่าง ตารางที่ 4.4 ถึง 4.12 แสดงการแบ่งปริมาณของมวลรวมและสารผสมเพิ่มในแต่ละประเภท ซึ่งก้อนตัวอย่างทุกประเภทนั้นมีน้ำหนัก 1,200 กรัม/ก้อน

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนปริมาณมวลรวมของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1

ขนาด (มม)	ชื่อตะแกรง	น้ำหนัก (กรัม)
12.5 (limestone)	1/2"	79.44
9.5 (limestone)	3/8"	150.60
4.75 (limestone)	#4	330.12
2.36 (limestone)	#8	252.12
1.18 (limestone)	#16	124.32
0.6 (limestone)	#30	88.38
0.3 (limestone)	#50	66.06
0.15 (limestone)	#100	38.40
0.075 (limestone)	#200	18.72
0-0.075 (limestone)	Pan	51.84
Sample size		1200.00

ตารางที่ 4.5 สัดส่วนปริมาณมวลรวมของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 2 (ใช้ถั่วลย 3%)

ขนาด (มม)	ชื่อตะแกรง	น้ำหนัก (กรัม)
12.5 (limestone)	1/2"	79.44
9.5 (limestone)	3/8"	150.60
4.75 (limestone)	#4	330.12
2.36 (limestone)	#8	252.12
1.18 (limestone)	#16	124.32
0.6 (limestone)	#30	88.38
0.3 (limestone)	#50	66.06
0.15 (limestone)	#100	38.40
0.075 (limestone)	#200	18.72
0-0.075 (limestone)	Pan	15.84
0-0.075 (fly ash)	Pan	36.00
Sample size		1200.00

ตารางที่ 4.6 สัดส่วนปริมาณมวลรวมของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 2 (ใช้ถั่วลย 5%)

ขนาด (มม)	ชื่อตะแกรง	น้ำหนัก (กรัม)
12.5 (limestone)	1/2"	79.44
9.5 (limestone)	3/8"	150.60
4.75 (limestone)	#4	330.12
2.36 (limestone)	#8	252.12
1.18 (limestone)	#16	124.32
0.6 (limestone)	#30	88.38
0.3 (limestone)	#50	66.06
0.15 (limestone)	#100	38.40
0.075 (limestone)	#200	10.56
0.075 (fly ash)	#200	8.16

0-0.075 (fly ash)	Pan	51.84
Sample size		1200.00

ตารางที่ 4.7 สัดส่วนปริมาณมวลรวมของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 2 (ใช้เถ้าลอย 9%)

ขนาด (มม)	ชื่อตะแกรง	น้ำหนัก (กรัม)
12.5 (limestone)	1/2"	79.44
9.5 (limestone)	3/8"	150.60
4.75 (limestone)	#4	330.12
2.36 (limestone)	#8	252.12
1.18 (limestone)	#16	124.32
0.6 (limestone)	#30	88.38
0.3 (limestone)	#50	66.06
0.15 (limestone)	#100	0.96
0.15 (fly ash)	#100	37.44
0.075 (fly ash)	#200	18.72
0-0.075 (fly ash)	Pan	51.84
Sample size		1200.00

ตารางที่ 4.8 สัดส่วนปริมาณมวลรวมของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 3 (ใช้ผงซีเมนต์ 3%)

ขนาด (มม)	ชื่อตะแกรง	น้ำหนัก (กรัม)
12.5 (limestone)	1/2"	79.44
9.5 (limestone)	3/8"	150.60
4.75 (limestone)	#4	330.12
2.36 (limestone)	#8	252.12
1.18 (limestone)	#16	124.32
0.6 (limestone)	#30	88.38
0.3 (limestone)	#50	66.06
0.15 (limestone)	#100	38.40
0.075 (limestone)	#200	18.72

0-0.075 (limestone)	Pan	15.84
0-0.075 (CKD)	Pan	36.00
Sample size		1200.00

ตารางที่ 4.9 สัดส่วนปริมาณมวลรวมของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 3 (ใช้ผงซีเมนต์ 5%)

ขนาด (มม)	ชื่อตะแกรง	น้ำหนัก (กรัม)
12.5 (limestone)	1/2"	79.44
9.5 (limestone)	3/8"	150.60
4.75 (limestone)	#4	330.12
2.36 (limestone)	#8	252.12
1.18 (limestone)	#16	124.32
0.6 (limestone)	#30	88.38
0.3 (limestone)	#50	66.06
0.15 (limestone)	#100	38.40
0.075 (limestone)	#200	10.56
0.075 (CKD)	#200	8.16
0-0.075 (CKD)	Pan	51.84
Sample size		1200.00

ตารางที่ 4.10 สัดส่วนปริมาณมวลรวมของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 3 (ใช้ผงซีเมนต์ 9%)

ขนาด (มม)	ชื่อตะแกรง	น้ำหนัก (กรัม)
12.5 (limestone)	1/2"	79.44
9.5 (limestone)	3/8"	150.60
4.75 (limestone)	#4	330.12
2.36 (limestone)	#8	252.12
1.18 (limestone)	#16	124.32
0.6 (limestone)	#30	88.38
0.3 (limestone)	#50	66.06
0.15 (limestone)	#100	0.96

0.15 (CKD)	#100	37.44
0.075 (CKD)	#200	18.72
0-0.075 (CKD)	Pan	51.84
Sample size		1200.00

ตารางที่ 4.11 สัดส่วนปริมาณมวลรวมของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 4

ขนาด (มม)	ชื่อตะแกรง	น้ำหนัก (กรัม)
12.5 (steel slag)	1/2"	79.44
9.5 (steel slag)	3/8"	150.60
4.75 (steel slag)	#4	330.12
2.36 (limestone)	#8	252.12
1.18 (limestone)	#16	124.32
0.6 (limestone)	#30	88.38
0.3 (limestone)	#50	66.06
0.15 (limestone)	#100	38.40
0.075 (limestone)	#200	18.72
0-0.075 (limestone)	Pan	51.84
Sample size		1200.00

ตารางที่ 4.12 สัดส่วนปริมาณมวลรวมของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 5

ขนาด (มม)	ชื่อตะแกรง	น้ำหนัก (กรัม)
12.5 (RCM)	1/2"	79.44
9.5 (RCM)	3/8"	150.60
4.75 (RCM)	#4	330.12
2.36 (limestone)	#8	252.12
1.18 (limestone)	#16	124.32
0.6 (limestone)	#30	88.38
0.3 (limestone)	#50	66.06
0.15 (limestone)	#100	38.40

0.075 (limestone)	#200	18.72
0-0.075 (limestone)	Pan	51.84
Sample size		1200.00

4.2.3 คุณสมบัติเชิงปริมาตร

มวลรวมออกแบบ (หัวข้อ 4.2.2) จะถูกนำมาผสมกับวัสดุเชื่อมผสาน (AC60/70) และสารผสมเพิ่ม (ชนิดของสารผสมเพิ่มขึ้นอยู่กับประเภทของก้อนตัวอย่าง) ที่ปริมาณวัสดุเชื่อมผสานเริ่มต้น (trial asphalt content) ที่จำนวนรอบหมุนมากที่สุด (ขึ้นอยู่กับปริมาณการจราจรและสภาพภูมิอากาศ) โดยเครื่องบดอัดซูเปอร์เพฟ (Superpave gyratory compactor) หลังจากนั้นจะวัดความถ่วงจำเพาะ (bulk specific gravity) ของแต่ละก้อนเพื่อนำไปหาปริมาณของวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสม (optimum asphalt content) และคุณสมบัติเชิงปริมาตรที่แต่ละระดับของปริมาณวัสดุเชื่อมผสานเริ่มต้น (trial asphalt content) ซึ่งปริมาณวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสม (optimum asphalt content) ในแต่ละประเภทของก้อนตัวอย่างนั้น หาได้โดยใช้มาตรฐานและข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟคือต้องมีช่องว่างอากาศประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ และคุณสมบัติอื่นๆต้องเป็นไปตามข้อกำหนด ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบปริมาณการจราจรที่ 1 ล้าน ESALs ดังนั้นจำนวนรอบหมุนที่จะบดอัดก้อนตัวอย่างโดยเครื่องบดอัดซูเปอร์เพฟ (Superpave gyratory compactor) เป็นดังนี้ จำนวนรอบหมุนเริ่มต้นเท่ากับ 8 จำนวนรอบหมุนออกแบบเท่ากับ 100 และจำนวนรอบหมุนสูงสุดเท่ากับ 158

4.2.3.1 ปริมาณวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสมสำหรับก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1, 2 และ 3

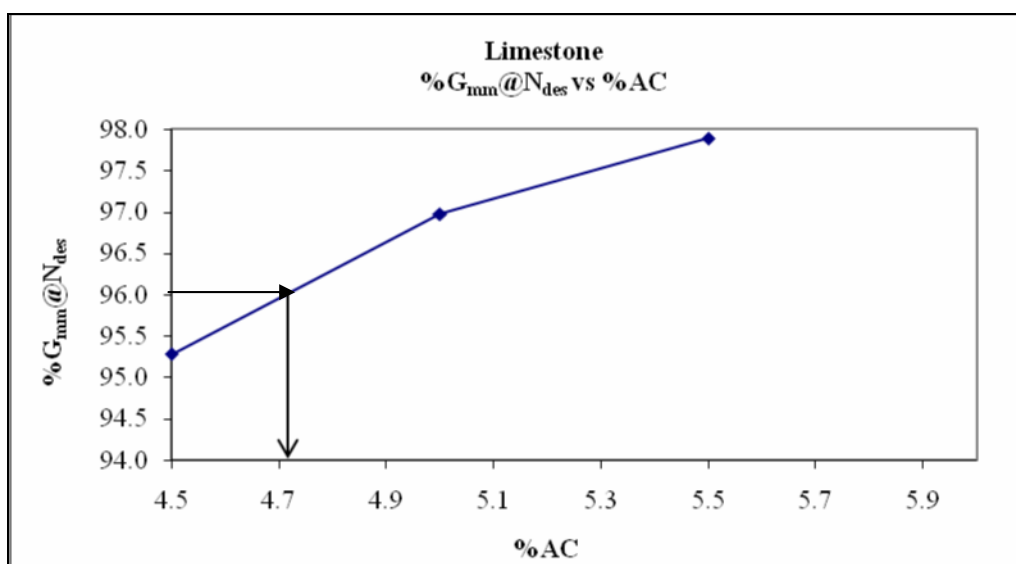
ก้อนตัวอย่างทั้ง 3 ประเภทจะใช้ขนาดคละของมวลรวมตามที่ออกแบบตามตารางที่ 4.3 จากนั้นก้อนตัวอย่างแต่ละประเภทจะถูกแบ่งสัดส่วนของปริมาณตามตารางที่ 4.4 สำหรับก้อนตัวอย่างประเภทที่หนึ่ง ตามตารางที่ 4.5 ถึง 4.7 สำหรับก้อนตัวอย่างประเภทที่สอง และตามตารางที่ 4.8 ถึง 4.10 สำหรับก้อนตัวอย่างประเภทที่สาม

ในก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1, 2 และ 3 นั้นก้อนตัวอย่างจะถูกผสมขึ้นในแต่ละระดับของปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน (trial asphalt content) จากนั้นก็จะสามารถหาปริมาณวัสดุเชื่อมที่เหมาะสม

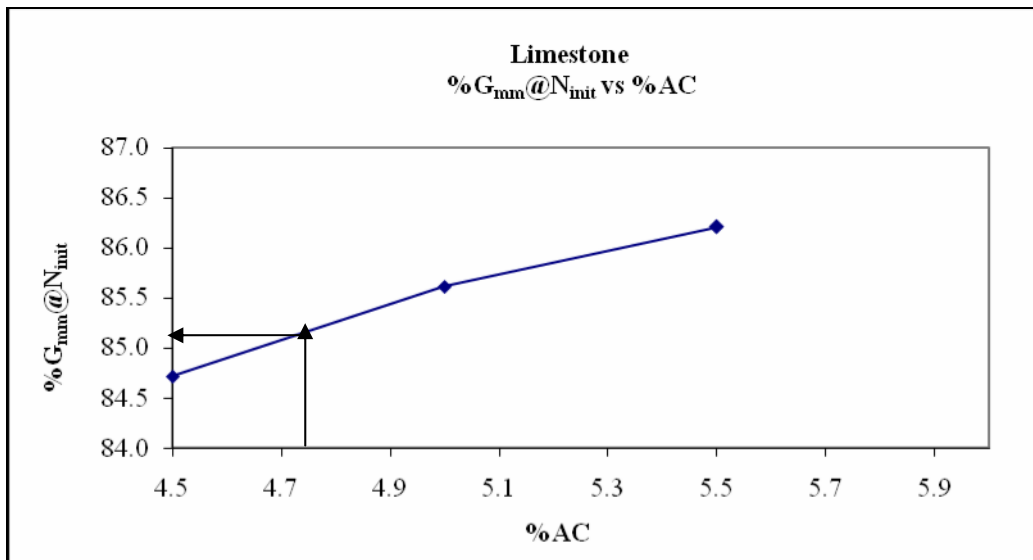
(optimum asphalt content) ได้ และคุณสมบัติต่างๆที่จุดปริมาณวัสดุเชื่อมผสมที่เหมาะสมนี้ จะต้องผ่านเกณฑ์และข้อกำหนดของระบบซูเปอร์เพฟด้วย ตารางที่ 4.13 แสดงคุณสมบัติเชิงปริมาตรของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1, 2 และ 3 ในแต่ละปริมาณของวัสดุเชื่อมผสม รูปที่ 4.7 ถึง 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างอากาศ, เปอร์เซนต์ VMA, เปอร์เซนต์ VFA, เปอร์เซนต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนเริ่มต้น, เปอร์เซนต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนออกแบบ, เปอร์เซนต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนสูงสุด กับระดับของปริมาณวัสดุเชื่อมผสม

ตารางที่ 4.13 คุณสมบัติเชิงปริมาตรในแต่ละระดับของวัสดุเชื่อมผสม

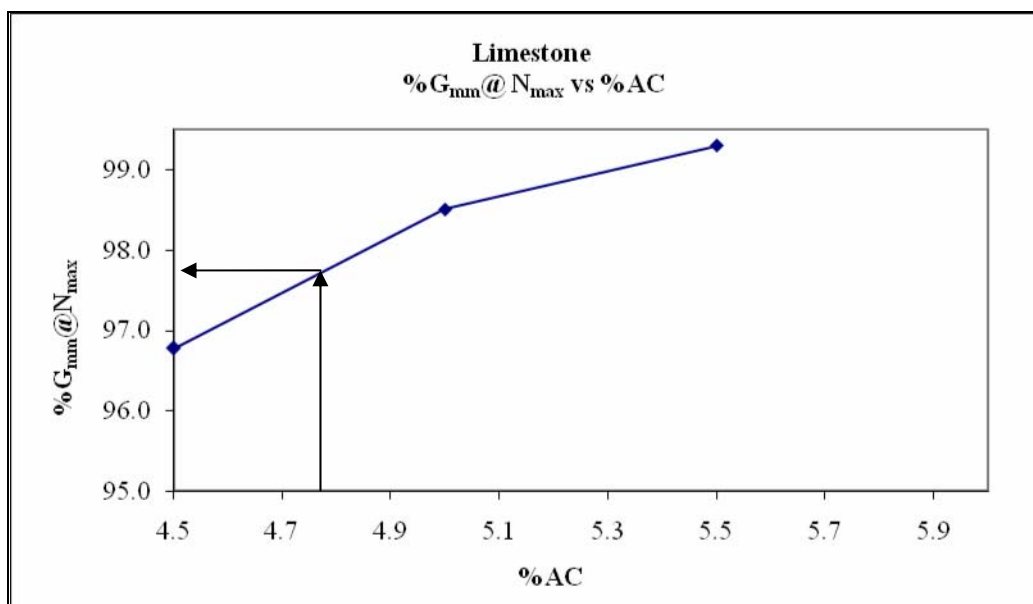
AC Content (%)	G_{mm}	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	% G_{mm}		
					N_{int}	N_{des}	N_{max}
4.5	2.532	4.72	13.81	65.82	84.72	95.28	96.78
5.0	2.510	3.03	13.49	77.57	85.61	96.97	98.51
5.5	2.501	2.11	13.45	84.30	86.21	97.89	99.30



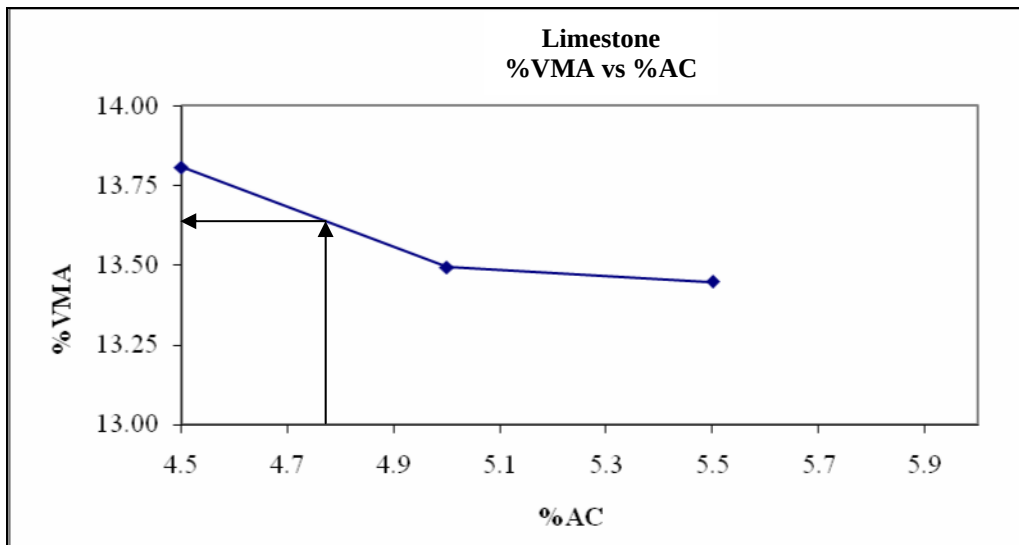
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % $G_{mm}@N_{des}$ กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสม



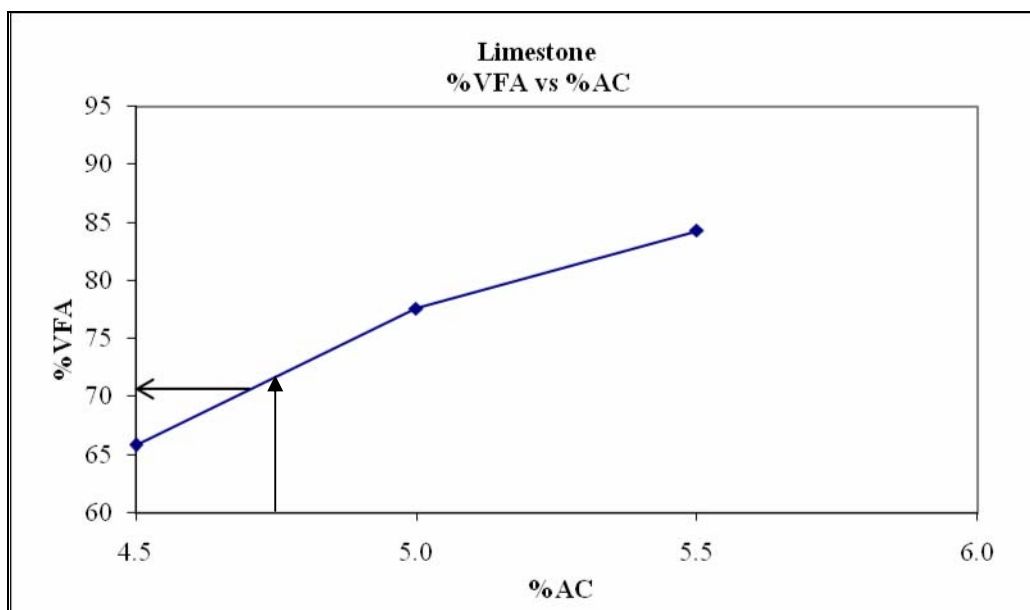
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %G_{mm}@N_{init} กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %G_{mm}@N_{max} กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %VMA กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %VFA กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน

จากรูปที่ 4.7 สามารถหาปริมาณวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสมได้เมื่อปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ หรือเปอร์เซ็นต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนออกแบบเท่ากับ 96 ส่วนรูปที่ 4.7 ถึง 4.11 ใช้ประเมินคุณสมบัติเชิงปริมาตร อาทิเช่น เปอร์เซ็นต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนเริ่มต้น, เปอร์เซ็นต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนสูงสุด, VFA และ VMA ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ก็ต้องผ่านข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ ตารางที่ 4.14 สรุปค่าคุณสมบัติเชิงปริมาตรที่จุดปริมาณวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสม (optimum asphalt content) สำหรับก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1, 2 และ 3 ซึ่ง

พบว่าปริมาณวัสดุเชื่อมผสมที่เหมาะสมสำหรับก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งเป็นประเภทที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม คือ 4.713%

ตารางที่ 4.14 คุณสมบัติเชิงปริมาตรในระดับของวัสดุเชื่อมผสมที่เหมาะสม

AC Content (%)	G _{mm}	Air Voids (%)		VMA (%)		VFA (%)		%G _{mm}					
								N _{int}		N _{des}		N _{max}	
		Result	Req.	Result	Req.	Result	Req.	Result	Req.	Result	Req.	Result	Req.
4.713	2.511	4.0	4.0	13.63	13 Min.	70.83	65-78	85.10	≤89	96.00	96.00	97.52	≤98

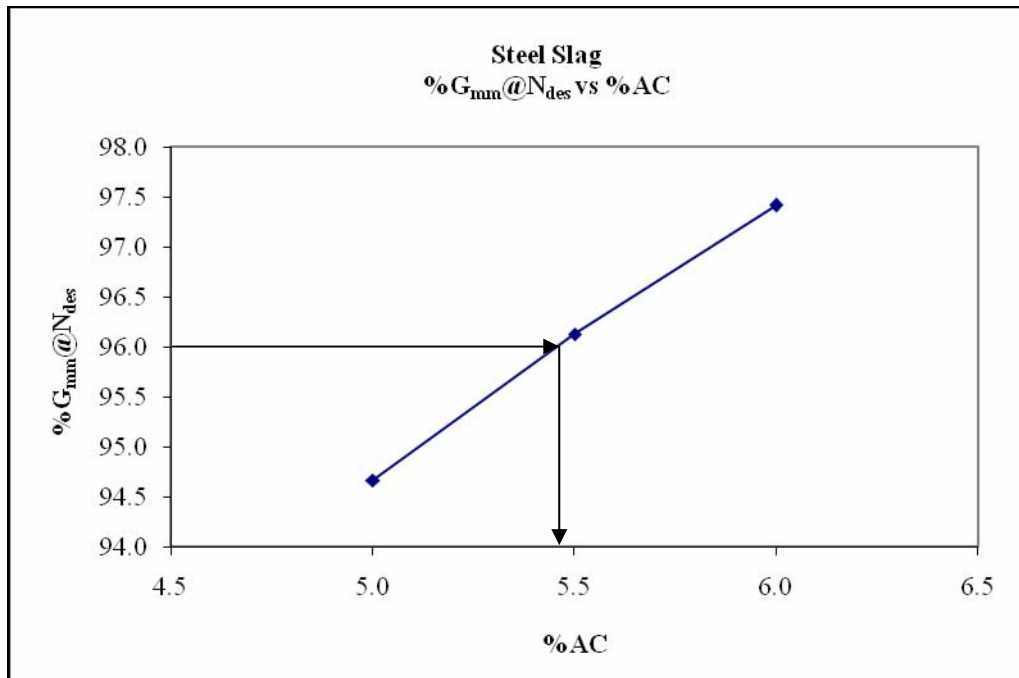
4.2.3.2 ปริมาณวัสดุเชื่อมผสมที่เหมาะสมสำหรับก้อนตัวอย่างประเภทที่ 4

ก้อนตัวอย่างประเภทนี้จะใช้ขนาดคละของมวลรวมตามทีออกแบบตามตารางที่ 4.3 จากนั้นก้อนตัวอย่างแต่ละประเภทจะถูกแบ่งสัดส่วนปริมาณตามตารางที่ 4.11

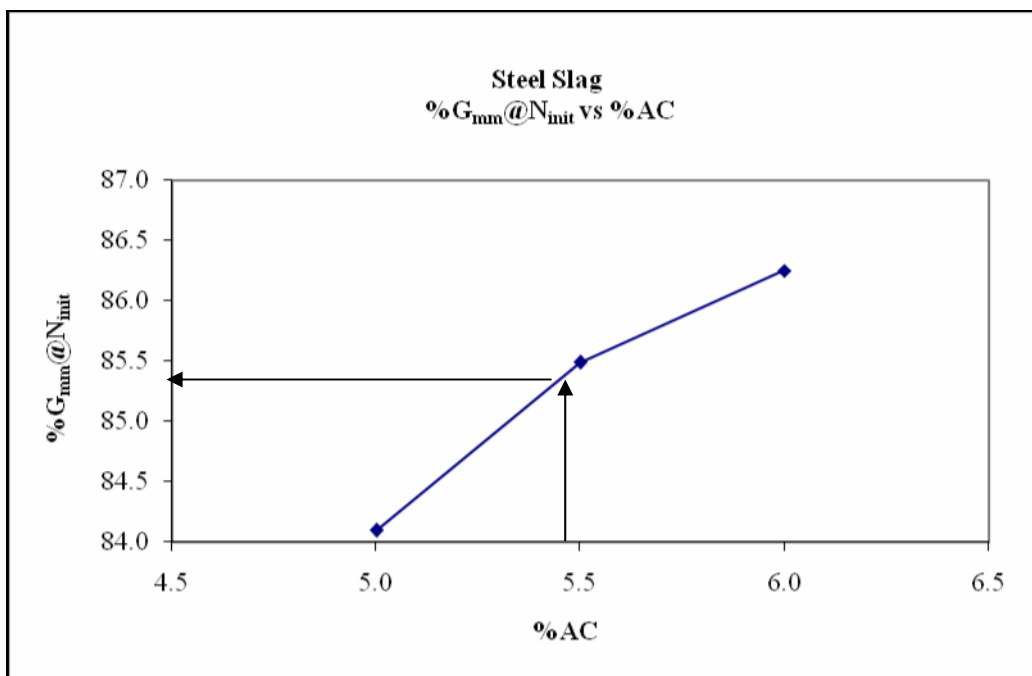
ในก้อนตัวอย่างประเภทที่ 4 นั้นก้อนตัวอย่างจะถูกผสมขึ้นในแต่ละระดับของปริมาณวัสดุเชื่อมผสม (trial asphalt content) จากนั้นก็จะสามารถหาปริมาณวัสดุเชื่อมทีเหมาะสม (optimum asphalt content) ได้ และคุณสมบัติต่างๆทีจุดปริมาณวัสดุเชื่อมผสมทีเหมาะสมนี้จะต้องข้อกำหนดของระบบซูบเปอร์เพฟด้วย ตารางที่ 4.15 แสดงคุณสมบัติเชิงปริมาตรของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 4 ในแต่ละปริมาณของวัสดุเชื่อมผสม รูปที่ 4.12 ถึง 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างอากาศ, เปอร์เซนต์ VMA, เปอร์เซนต์ VFA, เปอร์เซนต์ G_{mm} ทีจำนวนรอบหมุนเริ่มต้น, เปอร์เซนต์ G_{mm} ทีจำนวนรอบหมุนออกแบบ, เปอร์เซนต์ G_{mm} ทีจำนวนรอบหมุนสูงสุด กับระดับของปริมาณวัสดุเชื่อมผสม

ตารางที่ 4.15 คุณสมบัติเชิงปริมาตรในแต่ละระดับของวัสดุเชื่อมผสม

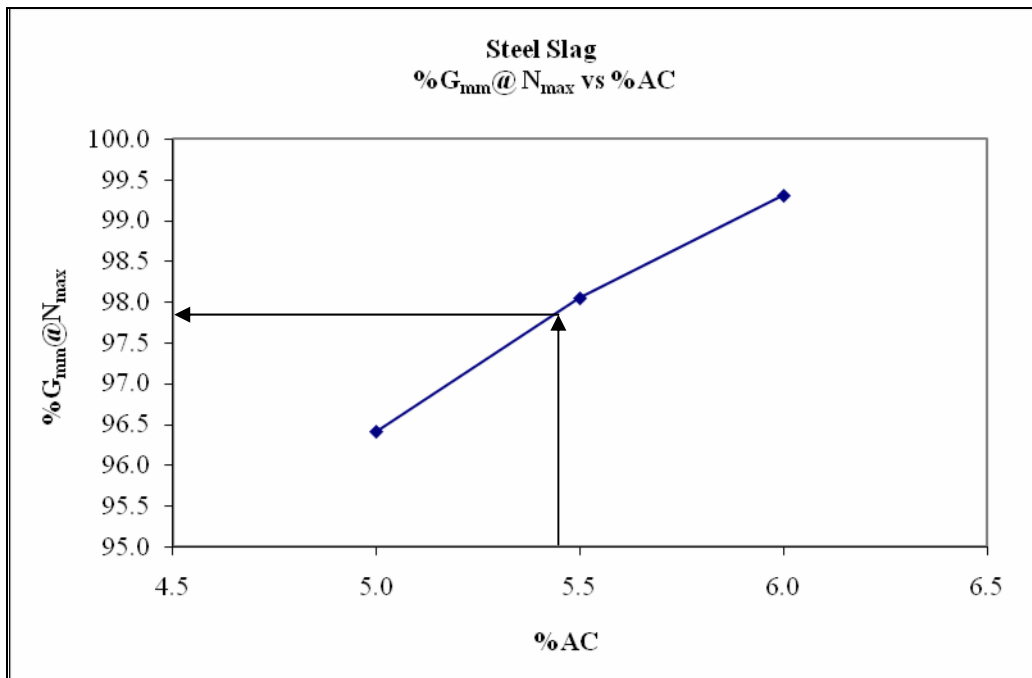
AC Content (%)	G _{mm}	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	%G _{mm}		
					N _{int}	N _{des}	N _{max}
5.0	2.731	5.33	13.00	72.39	84.10	94.67	96.41
5.5	2.692	3.87	13.37	85.42	85.49	96.13	98.05
6.0	2.682	2.58	13.00	94.69	86.25	97.42	99.31



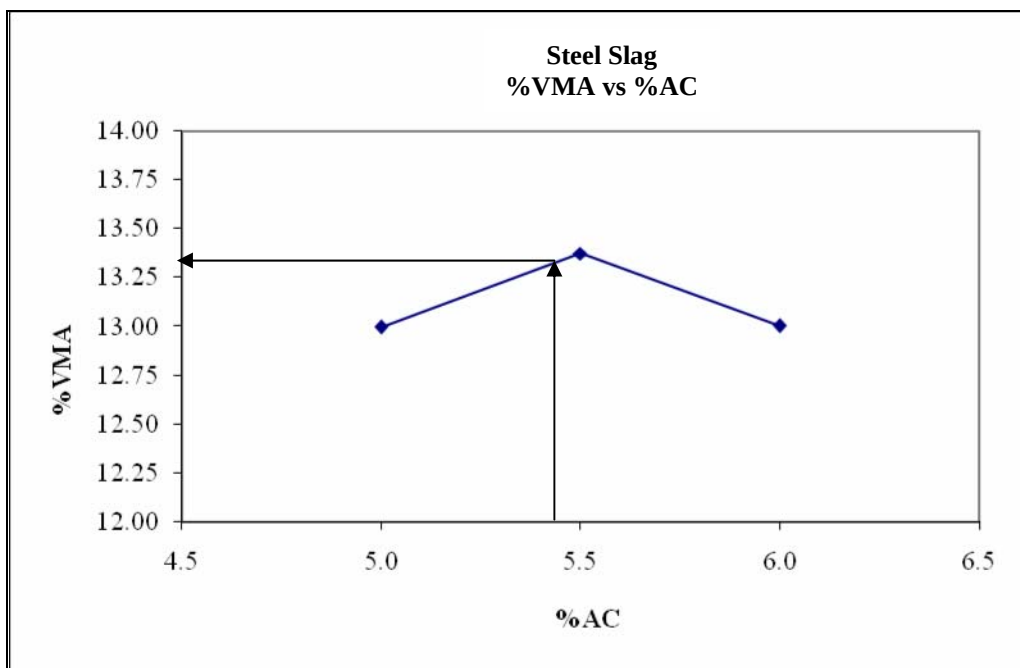
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %G_{mm}@N_{des} กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน



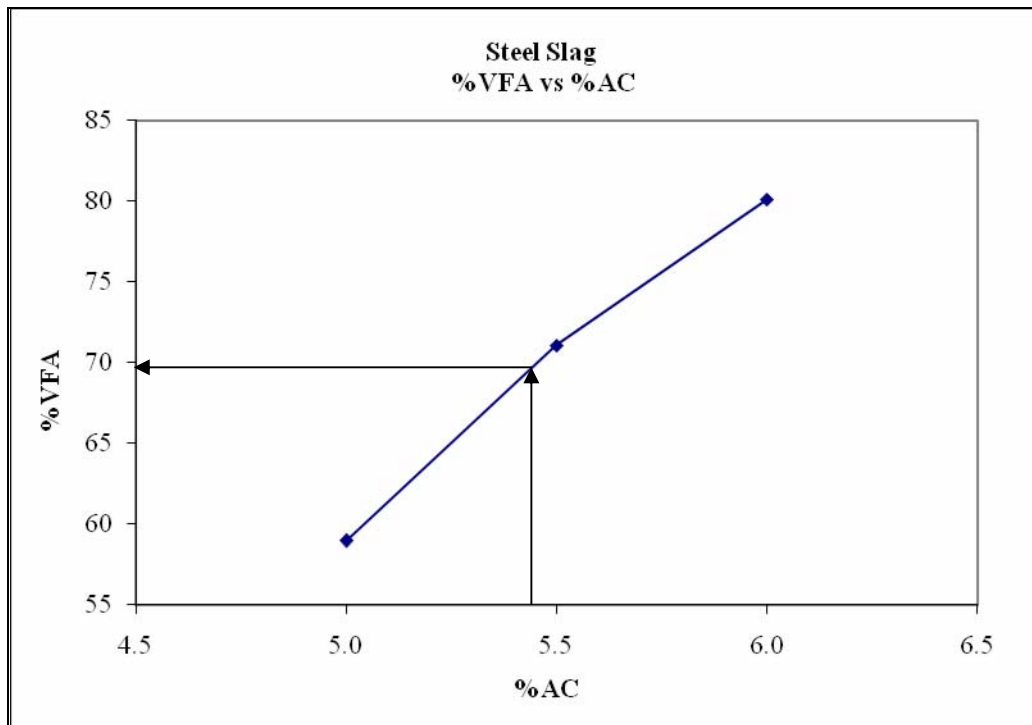
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %G_{mm}@N_{init} กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % $G_{mm}@N_{max}$ กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %VMA กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %VFA กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน

จากรูปที่ 4.12 สามารถหาปริมาณวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสม (optimum asphalt content) ได้เมื่อปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ หรือเปอร์เซ็นต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนออกแบบเท่ากับ 96 ส่วนรูปที่ 4.12 ถึง 4.16 ใช้ประเมินคุณสมบัติเชิงปริมาตร อาทิเช่น เปอร์เซ็นต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนเริ่มต้น, เปอร์เซ็นต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนสูงสุด, VFA และ VMA ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ก็ต้องผ่านข้อกำหนดของระบบซูบเปอร์เพฟ ตารางที่ 4.16 สรุปค่าคุณสมบัติเชิงปริมาตรที่จุดปริมาณวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสมสำหรับก้อนตัวอย่างประเภทที่ 4 ซึ่งพบว่าปริมาณวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสมสำหรับก้อนตัวอย่างประเภทที่ 4 ซึ่งเป็นประเภทที่ใช้ตะกรันหลักเป็นมวลรวม คือ 5.455% ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่าก้อนตัวอย่างที่ใช้มวลรวมเป็นหินปูน (ก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1, 2 และ 3) อาจเป็นเพราะว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมของตะกรันหลักมากกว่าหินปูนดังแสดงในตารางที่ 4.1 ก้อนตัวอย่างที่ผสมขึ้นโดยใช้มวลรวมที่มีความดูดซึ่มสูง แสดงว่าต้องการปริมาณวัสดุเชื่อมผสานสำหรับเคลือบผิวของมวลรวมสูงด้วย

ตารางที่ 4.16 คุณสมบัติเชิงปริมาณในระดับของวัสดุเชื่อมผสมที่เหมาะสม

AC Content (%)	G _{mm}	Air Voids (%)		VMA (%)		VFA (%)		%G _{mm}					
		Result	Req.	Result	Req.	Result	Req.	N _{int}		N _{des}		N _{max}	
								Result	Req.	Result	Req.	Result	Req.
5.455	2.707	4.0	4.0	13.34	13 Min.	69.97	65-78	85.37	≤89	96.00	96.00	97.9	≤98

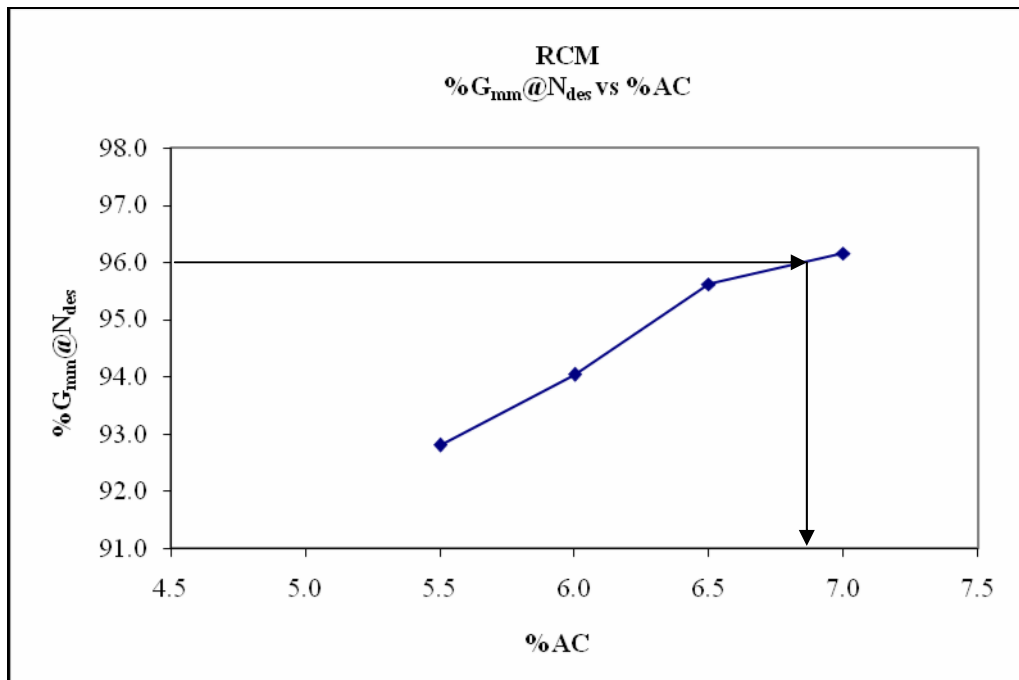
4.2.3.3 ปริมาณวัสดุเชื่อมผสมที่เหมาะสมสำหรับก้อนตัวอย่างประเภทที่ 5

ก้อนตัวอย่างประเภทนี้จะใช้ขนาดผลของมวลรวมตามที่ออกแบบตามตารางที่ 4.3 จากนั้นก้อนตัวอย่างแต่ละประเภทจะถูกแบ่งสัดส่วนปริมาณตามตารางที่ 4.12

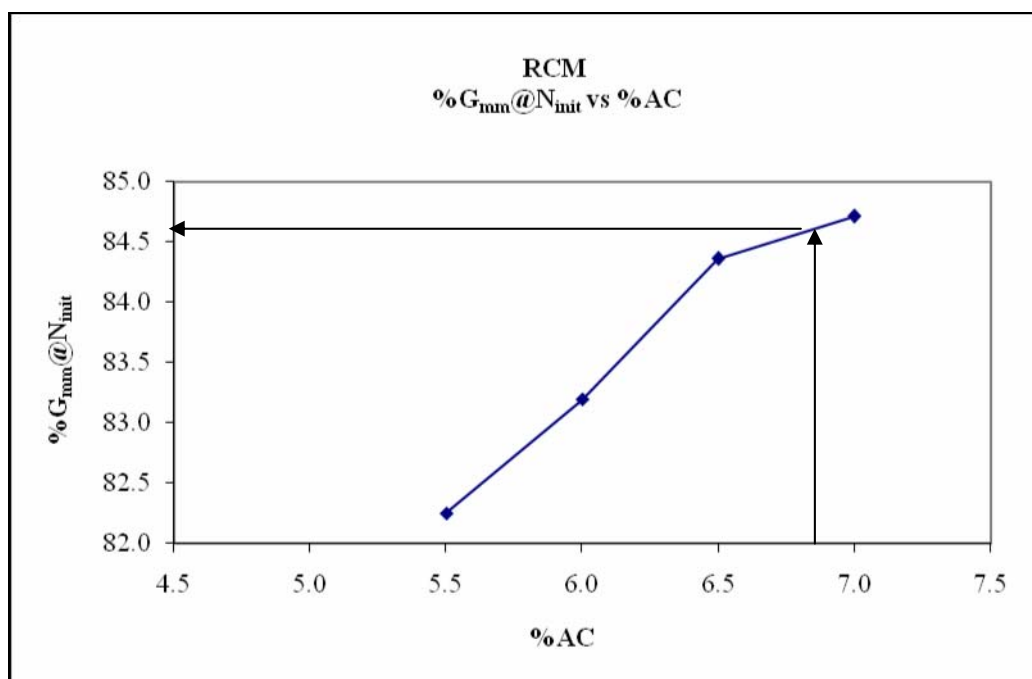
ในก้อนตัวอย่างประเภทที่ 5 นั้นก้อนตัวอย่างจะถูกผสมขึ้นในแต่ละระดับของปริมาณวัสดุเชื่อมผสม (trial asphalt content) จากนั้นก็จะสามารถหาปริมาณวัสดุเชื่อมที่เหมาะสม (optimum asphalt content) ได้ และคุณสมบัติต่างๆที่จุดปริมาณวัสดุเชื่อมผสมที่เหมาะสมนี้จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบซูบเปอร์เพฟ ด้วย ตารางที่ 4.17 แสดงคุณสมบัติเชิงปริมาณของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 5 ในแต่ละปริมาณของวัสดุเชื่อมผสม รูปที่ 4.17 ถึง 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างอากาศ, เปอร์เซนต์ VMA, เปอร์เซนต์ VFA, เปอร์เซนต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนเริ่มต้น, เปอร์เซนต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนออกแบบ, เปอร์เซนต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนสูงสุด กับระดับของปริมาณวัสดุเชื่อมผสม

ตารางที่ 4.17 คุณสมบัติเชิงปริมาณในแต่ละระดับของวัสดุเชื่อมผสม

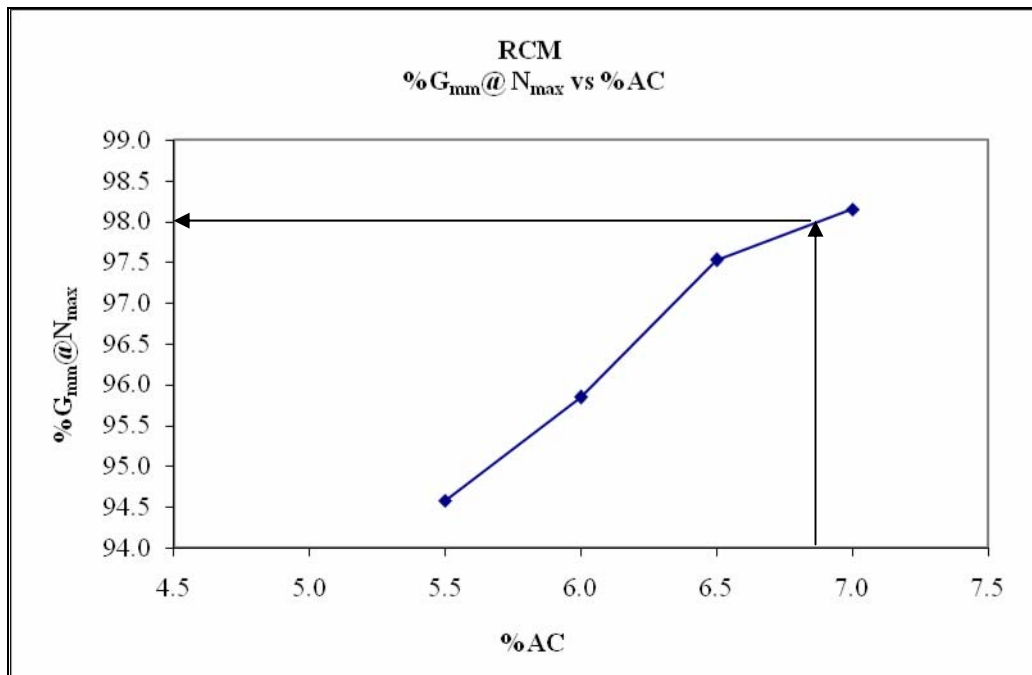
AC Content (%)	G _{mm}	Air Voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	%G _{mm}		
					N _{int}	N _{des}	N _{max}
5.5	2.400	7.20	15.47	53.47	82.25	92.80	94.58
6.0	2.380	5.96	15.51	61.57	83.19	94.04	95.84
6.5	2.350	4.38	15.62	71.97	84.36	95.62	97.53
7.0	2.350	3.84	15.60	75.38	84.71	96.16	98.15



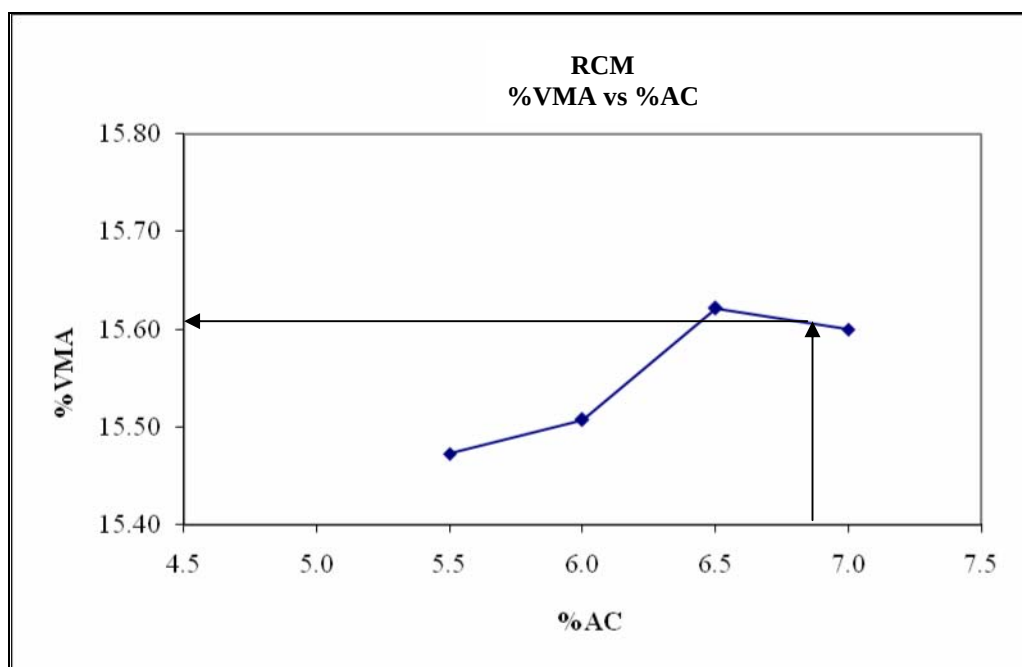
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %G_{mm}@N_{des} กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน



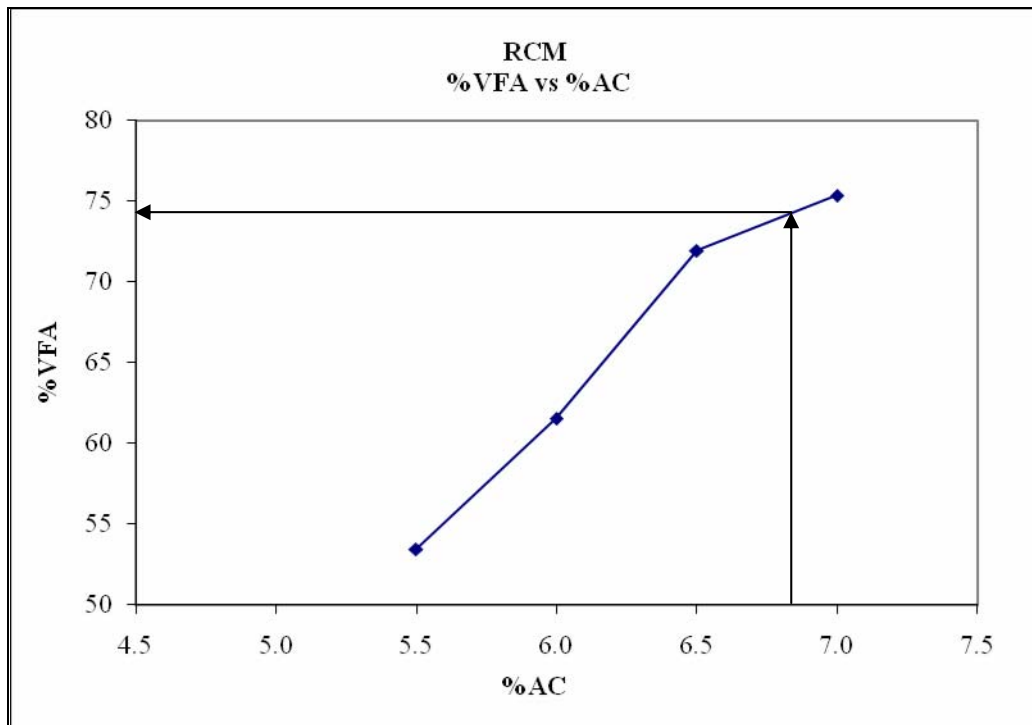
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %G_{mm}@N_{init} กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %G_{mm}@N_{max} กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %VMA กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %VFA กับปริมาณวัสดุเชื่อมผสาน

จากรูปที่ 4.17 สามารถหาปริมาณวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสมได้เมื่อปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ หรือเปอร์เซ็นต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนออกแบบเท่ากับ 96 ส่วนรูปที่ 4.17 ถึง 4.21 ใช้ประเมินคุณสมบัติเชิงปริมาตร อาทิเช่น เปอร์เซ็นต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนเริ่มต้น, เปอร์เซ็นต์ G_{mm} ที่จำนวนรอบหมุนสูงสุด, VFA และ VMA ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ก็ต้องผ่านข้อกำหนดของซูบเปอร์เพฟ ตารางที่ 4.18 สรุปค่าคุณสมบัติเชิงปริมาตรที่จุดปริมาณวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสมสำหรับก้อนตัวอย่างประเภทที่ 5 ซึ่งพบว่าปริมาณวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสมสำหรับก้อนตัวอย่างประเภทที่ 5 ซึ่งเป็นประเภทที่ใช้คอนกรีตเก่าเป็นมวลรวม คือ 6.852% จะเห็นได้ว่าปริมาณวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสมของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 5 สูงกว่าก้อนตัวอย่างประเภทที่ 4 แสดงว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมของคอนกรีตเก่าสูงกว่าตะกรันเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.18 คุณสมบัติเชิงปริมาตรในระดับของวัสดุเชื่อมผสานที่เหมาะสม

AC Content (%)	G_{mm}	Air Voids (%)		VMA (%)		VFA (%)		%G _{mm}					
								N _{int}		N _{des}		N _{max}	
		Result	Req.	Result	Req.	Result	Req.	Result	Req.	Result	Req.	Result	Req.
6.852	2.350	4.0	4.0	15.59	13 Min.	74.37	65-78	84.61	≤89	96.00	96.00	97.97	≤98

4.3 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

4.3.1 การทดสอบการต้านทานความชื้น

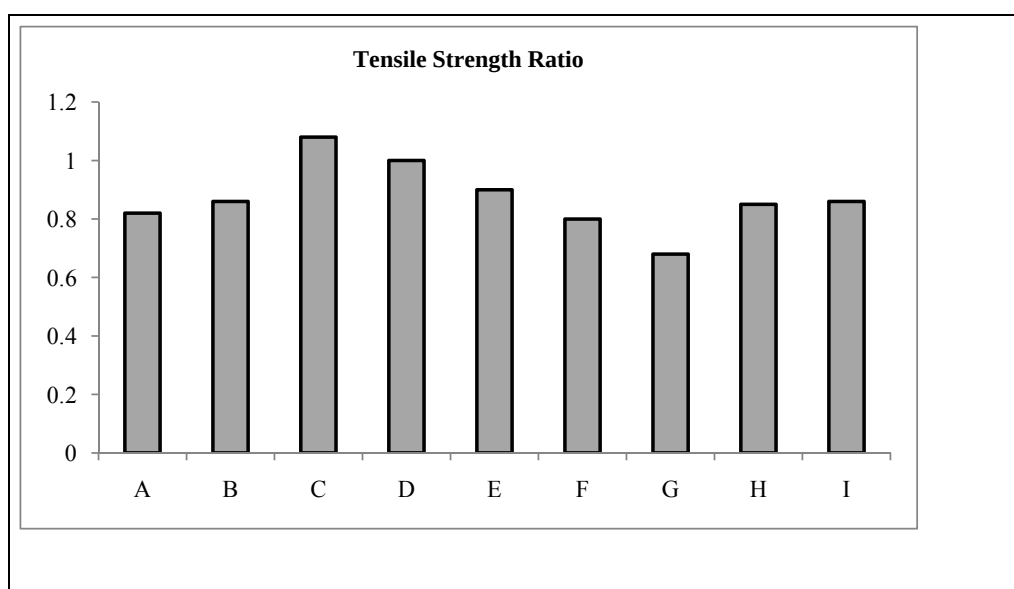
การทดสอบ Indirect Tensile Strength นั้นจะอ้างอิงตามมาตรฐานของ AASHTO (AASHTO T283, "Standard Test Method for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage") เพื่อที่จะใช้ประเมินการต้านทานความชื้นของก้อนตัวอย่างทั้ง 5 ประเภท

การทดสอบนี้จะใช้ 6 ก้อนตัวอย่างของแต่ละประเภท และ 6 ก้อนนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ก้อน โดยกลุ่มแรกจะไม่มีการทำอะไรกับก้อนตัวอย่างและเรียกก้อนตัวอย่างกลุ่มนี้ว่า ก้อนตัวอย่างแบบไม่มีเงื่อนไข (Unconditioned specimen) ขณะที่ก้อนตัวอย่างกลุ่มที่ 2 จะมีการดูดอากาศออกจากก้อนตัวอย่าง หรือทำให้ก้อนตัวอย่างอิ่มตัวประมาณ 70-80% หลังจากนั้นก็จะนำก้อนตัวอย่างในกลุ่มนี้ไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก้อนตัวอย่างกลุ่มนี้เรียกว่าก้อนตัวอย่างแบบมีเงื่อนไข (Conditioned specimen)

ก้อนตัวอย่างทั้งสองกลุ่มนั้นจะนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบเพื่อปรับสภาพอุณหภูมิของก้อนตัวอย่าง หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างขึ้นจากอ่างควบคุมอุณหภูมิแล้ว ก็จะนำตัวอย่างไปกดเพื่อหาค่ารับแรงดึงโดยอ้อมโดยใช้อัตราการกดที่ 50.8 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งการทดสอบนี้จะวัดผลกระทบจากความชื้นในรูปของอัตราส่วนกำลังรับแรงดึงโดยอ้อม (Indirect Tensile Strength Ratio, TSR) ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงดึงโดยอ้อมของก้อนตัวอย่างแบบมีเงื่อนไขและกำลังรับแรงดึงโดยอ้อมของก้อนตัวอย่างแบบไม่มีเงื่อนไข ถ้าก้อนตัวอย่างมีค่า TSR สูงแสดงว่ามีความสามารถในการต้านทานความชื้นมาก ตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.22 แสดงค่า TSR ของก้อนตัวอย่างแต่ละประเภท

ตารางที่ 4.19 ค่ากำลังรับแรงดึงโดยอ้อมของก้อนตัวอย่างแต่ละประเภท

สัญลักษณ์	ประเภท	ลักษณะ	Unconditioned Strength (kPa)	Conditioned Strength (kPa)	TSR
A	1	ก้อนตัวอย่างควบคุม	373.52	308.05	0.82
B	2	ใช้เถ้าลอย 3% เป็นสารผสมเพิ่ม	427.80	368.47	0.86
C	2	ใช้เถ้าลอย 5% เป็นสารผสมเพิ่ม	372.70	404.08	1.08
D	2	ใช้เถ้าลอย 9% เป็นสารผสมเพิ่ม	487.82	488.50	1.00
E	3	ใช้ผงซีเมนต์ 3% เป็นสารผสมเพิ่ม	490.56	441.52	0.90
F	3	ใช้ผงซีเมนต์ 5% เป็นสารผสมเพิ่ม	508.72	406.08	0.80
G	3	ใช้ผงซีเมนต์ 9% เป็นสารผสมเพิ่ม	604.52	412.87	0.68
H	4	ใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวม	432.90	366.29	0.85
I	5	ใช้คอนกรีตเก่าเป็นมวลรวม	341.42	292.75	0.86



รูปที่ 4.22 อัตราส่วนกำลังรับแรงดึงโดยอ้อมในแต่ละประเภทของก้อนตัวอย่าง

จากผลการทดลองจะเห็นว่าก้อนตัวอย่างควบคุม (ก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1) จะมีค่า TSR ต่ำที่สุดคือ 0.82 ส่วนก้อนตัวอย่างที่ใช้ fly ash 5% เป็นสารผสมเพิ่ม จะมีค่า TSR มากสุดในก้อนตัวอย่างประเภทที่ 2 ส่วนการใช้ CKD 3% เป็นสารผสมเพิ่มจะต้านทานความชื้นดีที่สุดในกลุ่มตัวอย่างประเภทที่ 3 ส่วนก้อนตัวอย่างที่ใช้ตะกรันเหล็กและคอนกรีตเก่าเป็นมวลรวมนั้นจะมีค่า TSR ใกล้เคียงกันคือ 0.85 และ 0.86 ตามลำดับ

4.3.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัส (Resilient Modulus Test)

การทดสอบหาค่าโมดูลัสนี้เป็นการวัดค่ากำลังรับแรงดึงโดยอ้อม (indirect tensile strength) ภายใต้หน้าหนักบรรทุกซ้ำ (Repeated loading) ซึ่งการทดสอบนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM (ASTM D4123-82, Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures) และการทดลองนี้จะใช้ 100 load repetitions และใน 1 ก้อนตัวอย่าง จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 5 °, 25 ° และ 40 ° C

ตารางที่ 4.20 ค่าของโมดูลัสในแต่ละประเภทของก้อนตัวอย่าง

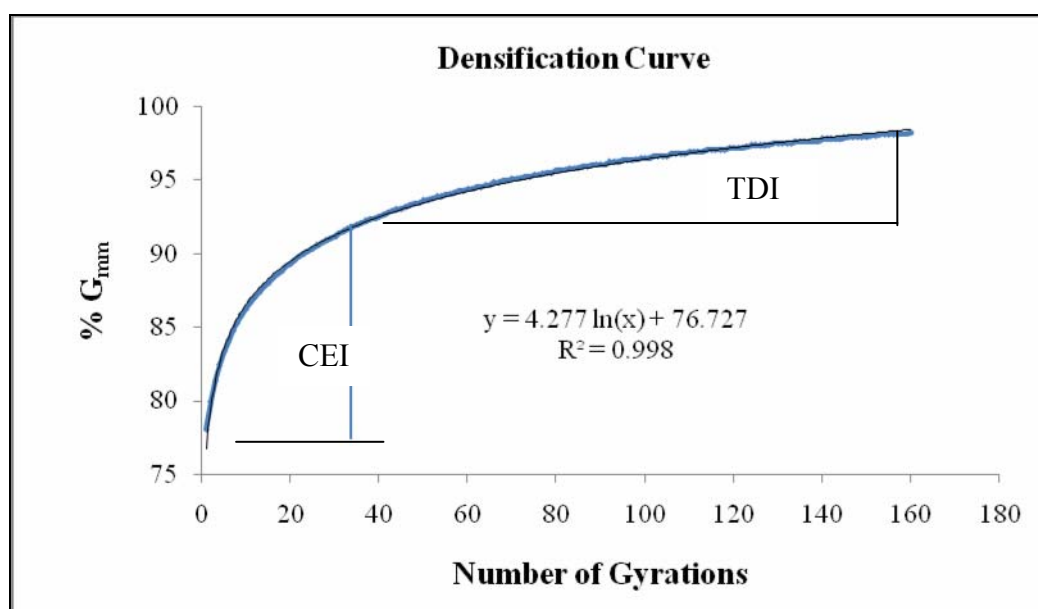
สัญลักษณ์	ประเภท	ลักษณะ	ค่าโมดูลัส (MPa)		
			5 °C	25 °C	40 °C
A	1	ก้อนตัวอย่างควบคุม	8968	1919	380.5
B	2	ใช้เถ้าลอย 5% เป็นสารผสมเพิ่ม	8618	1515	349
C	3	ใช้ผงซีเมนต์ 5% เป็นสารผสมเพิ่ม	7458.5	2801.5	692
D	4	ใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวม	9141.5	2114	390
E	5	ใช้คอนกรีตเก่าเป็นมวลรวม	7612.5	1236.5	331.5

ตารางที่ 4.20 แสดงผลของการทดสอบหาค่าโมดูลัส จากผลการทดสอบจะเห็นว่าก้อนตัวอย่างประเภทที่ 3 (ใช้ผงซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม) จะมีค่าโมดูลัสสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 25 ° และ 40 ° C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าก้อนตัวอย่างที่ใช้ผงซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มจะมีคุณสมบัติในการต้านทานการเกิดร่องรอยล้อ (Rutting) ได้ดีที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสสูงๆที่อุณหภูมิต่ำจนถึงปานกลางจะสามารถทำให้เกิดการแตก (Fatigue cracking) ได้ง่าย ส่วนก้อนตัวอย่างที่ใช้

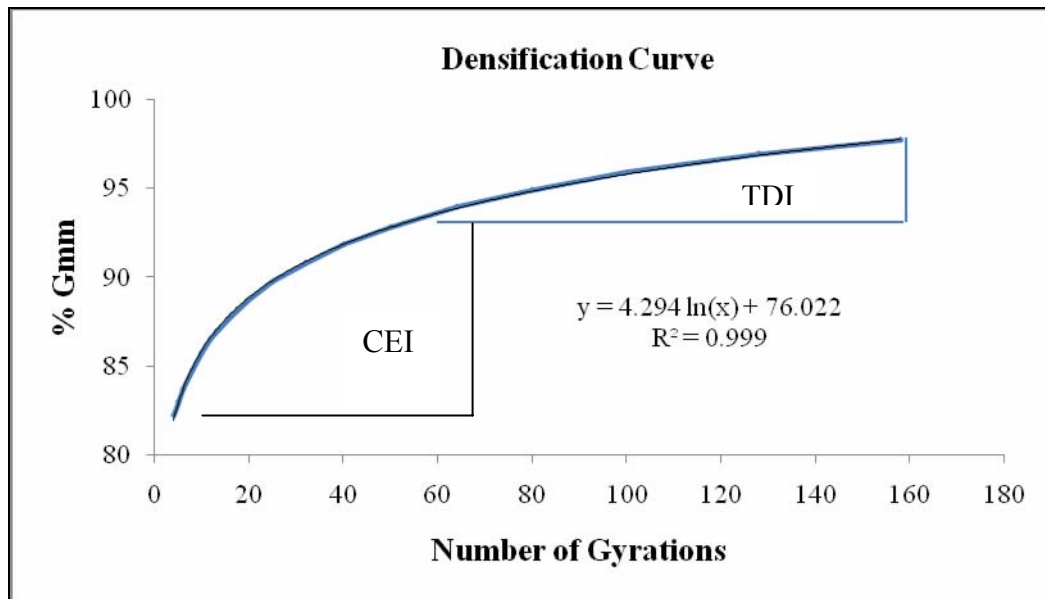
ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวม (ก้อนตัวอย่างประเภทที่ 4) จะมีค่าโมดูลัสสูงทุกอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างควบคุม (ก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่าความเป็นเหลี่ยมมุม (Angularity) ของตะกรันเหล็กจะทำให้มีการเกี่ยวกันระหว่างอนุภาค (interlocking) ซึ่งส่งผลให้เพิ่มเสถียรภาพของส่วนผสม ส่วนก้อนตัวอย่างที่ใช้ถั่วลอยเป็นสารผสมเพิ่ม (ก้อนตัวอย่างประเภทที่ 2) จะมีค่าโมดูลัสใกล้เคียงกับก้อนตัวอย่างควบคุม (ก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1) ซึ่งดูได้จากตารางที่ 4.20 อย่างไรก็ตาม ก้อนตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตเก่าเป็นมวลรวมจะมีค่าโมดูลัสที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างควบคุมเนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่มีคุณภาพของตัวคอนกรีตเก่าที่นำมาใช้เป็นมวลรวม ซึ่งตารางที่ 4.1 แสดงถึงคุณสมบัติที่ไม่พึงปรารถนาของคอนกรีตเก่า อาทิเช่น เปอร์เซนต์ของอนุภาคที่แบนและยาวค่อนข้างสูง (Flat and elongated particle)

4.3.3 ดัชนีพลังงานความหนาแน่น (Densification Energy Indices)

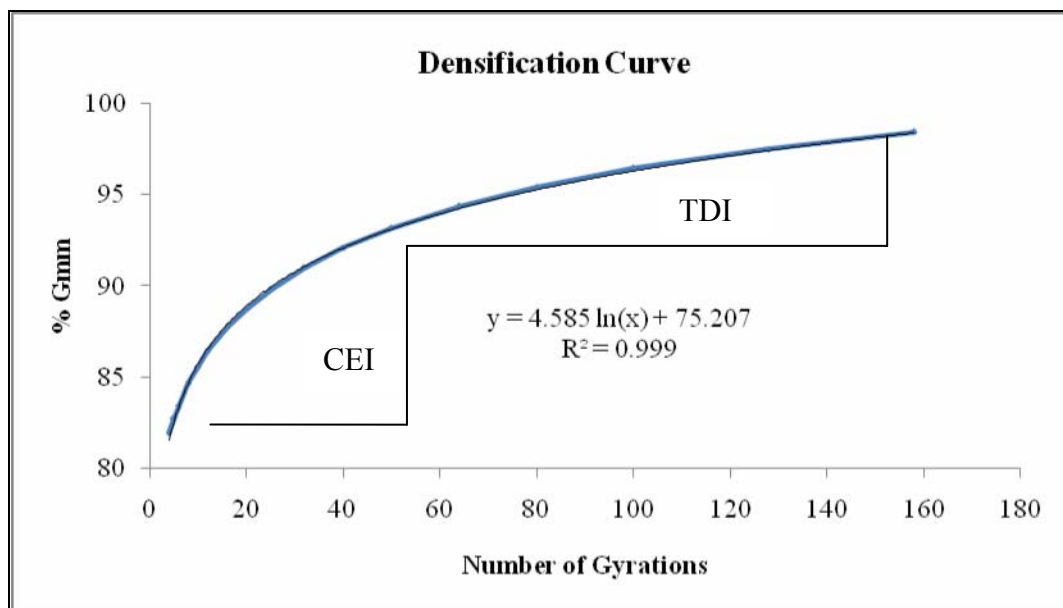
ดัชนีพลังงาน 2 ค่าคือ Compaction energy index (CEI) และ Traffic Densification index (TDI) จะถูกประเมินในงานวิจัยนี้ซึ่งค่าดัชนีเหล่านี้หาได้จากพื้นที่ใต้ Densification curve ระหว่าง 2 จุดอ้างอิงที่ได้อธิบายไปในบทที่ 3 รูปที่ 4.23 ถึง 4.25 แสดง densification curve ของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1-5



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1, 2 และ 3



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 4



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างประเภทที่ 5

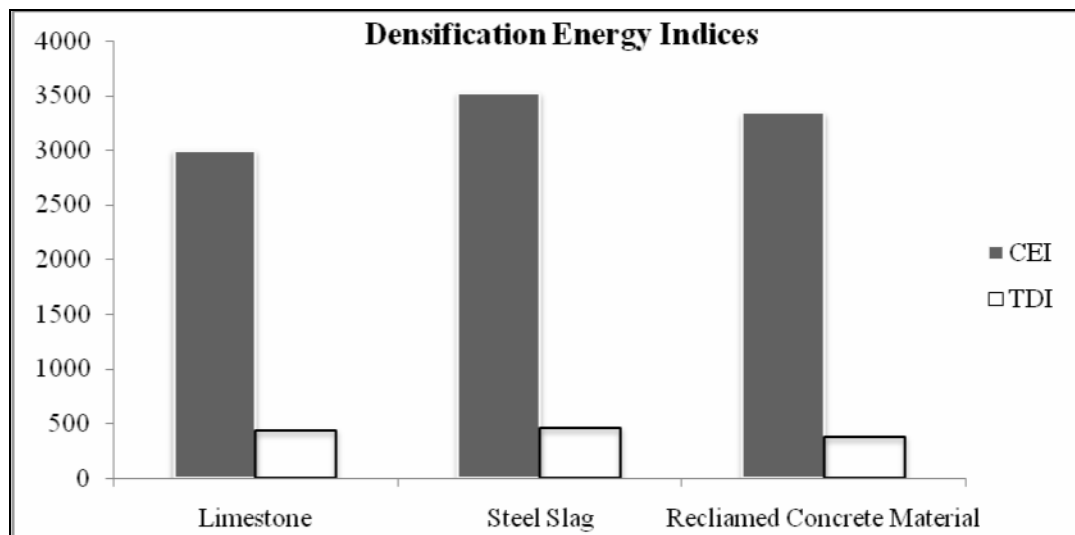
จากผลการทดลองจะเห็นว่าก้อนตัวอย่างที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวม (ก้อนตัวอย่างประเภทที่ 1, 2 และ 3) นั้นจะมีค่า CEI ต่ำสุดที่ 2995.48 ส่วนก้อนตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตเก่าเป็นมวลรวม และก้อนตัวอย่างที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมจะมีค่า CEI ที่ 3338.69 และ 3522.87 ตามลำดับ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.26 ดังนั้นก้อนตัวอย่างที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมจะเป็นที่ปรารถนามากที่สุดเนื่องจากต้องการพลังงานในการบดอัดจนถึงความหนาแน่นที่ต้องการ

(92%G_{mm} หรือ ช่องว่างอากาศเท่ากับ 8) น้อยที่สุด ตามที่กล่าวถึงคุณสมบัติของมวลรวมแต่ละชนิดในตอนต้นนั้นตะกรันเหล็กจะมีค่าความเป็นเหลี่ยมมุม (Course aggregate angularity) มากที่สุด ตามมาด้วยคอนกรีตเก่าและหินปูนตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามวลรวมที่มีค่าความเป็นเหลี่ยมมุมสูง จะต้องการพลังงานในการบดอัดจนถึงความหนาแน่นที่ต้องการสูงเช่นกัน ดังนั้นก้อนตัวอย่างที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมจะเป็นที่พอใจมากที่สุด ค่าของ CEI ตามด้วยก้อนตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตเก่าและตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมตามลำดับ

ส่วนก้อนตัวอย่างที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมจะมีค่า TDI สูงสุดคือ 461.87 ส่วนก้อนตัวอย่างที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมและก้อนตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตเก่าเป็นมวลรวมจะมีค่า TDI ที่ 440.05 และ 381.31 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.26 ดังนั้นก้อนตัวอย่างที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมจะเป็นที่พึงปรารถนามากที่สุดเพราะสามารถต้านทานปริมาณการจราจรได้มากที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ามวลรวมที่มีค่าความเป็นเหลี่ยมมุม (Angularity) สูงจะมีการยึดเกาะ (Interlocking) ระหว่างอนุภาคสูงเช่นกัน และยังสามารถช่วยต้านทานปริมาณการจราจรได้ดีอีกด้วย แต่เนื่องจากว่าคอนกรีตเก่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าความสึกกร่อน (Los Angeles Abrasion) ที่สูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตเก่ามีความแข็งแรงน้อยกว่าหินปูน ดังนั้นก้อนตัวอย่างที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมจะเป็นที่พึงปรารถนามากที่สุดในค่าของ TDI ตามด้วยก้อนตัวอย่างที่ใช้หินปูนและคอนกรีตเก่าเป็นมวลรวมตามลำดับ

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าของ Compaction Energy Index (CEI) และ Traffic Densification Index (TDI)

ประเภท	ลักษณะ	จำนวนรอบ ที่ 92% G _{mm}	จำนวนรอบ ที่ 98% G _{mm}	CEI	TDI
1,2,3	Limestone Aggregate	35	151	2995.48	440.05
4	Steel Slag Aggregate	41	167	3522.87	461.87
5	Reclaimed Concrete Material	39	144	3338.69	381.31



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าของ Compaction Energy Index (CEI) และ Traffic Densification Index (TDI)

บทที่ 5

การประเมินต้นทุนเบื้องต้นและผลกระทบสิ่งแวดล้อม

5.1 การประเมินต้นทุน

ในหัวข้อนี้จะทำการประเมินราคาของถนนยางมะตอยทั้ง 5 ประเภท โดยที่ไม่คำนึงถึงราคาค่าก่อสร้าง ค่าบำรุงรักษา ค่าซ่อมแซมต่างๆ มาคิดคำนวณในหัวข้อนี้ด้วย ดังนั้นจะคิดแต่เฉพาะราคาของวัสดุเพียงอย่างเดียวและจะคิดออกมาในหน่วยบาทต่อกิโลเมตร โดยที่กำหนดให้ขนาดของถนนที่ใช้คือเป็นถนนสองเลน กว้าง 18 เมตร หนา 15 เซนติเมตร ดังนั้นปริมาณทั้งหมดต่อหนึ่งกิโลเมตรคือ 2,700 ลูกบาศก์เมตร ตารางที่ 5.1 แสดงราคาวัสดุในแต่ละประเภทของถนนยางมะตอย และตารางที่ 5.2 แสดงการสรุปราคาในแต่ละประเภทของถนนยางมะตอย

ตารางที่ 5.1 ราคาวัสดุในแต่ละประเภทของถนนยางมะตอย

ประเภท	วัสดุ	สัดส่วน (%)	น้ำหนัก (ตัน/กม.)	หน่วยราคา (บาท/ตัน)	ราคา (บาท/กม.)
ตัวอย่างควบคุม	AC60/70	4.713	313.674	13,000	4,077,762
	หินปูน				
	- HB1	38.115	2536.744	60	152,205
	- HB2	33.351	2219.676	60	133,181
	- HB3	19.057	1268.339	130	164,884
	- HB4	4.764	317.068	130	41,219
ใช้ถั่วลอย 3% เป็นสารผสมเพิ่ม	AC60/70	4.713	313.674	13,000	4,077,762
	หินปูน				
	- HB1	35.256	2346.463	60	140,788
	- HB2	33.351	2219.676	60	133,181
	- HB3	19.057	1268.339	130	164,884
	- HB4	4.764	317.068	130	41,219
	ถั่วลอย (3%)	2.859	190.28	1,000	190,280

ตารางที่ 5.1 ราคาวัสดุในแต่ละประเภทของถนนยางมะตอย (ต่อ)

ประเภท	วัสดุ	สัดส่วน (%)	น้ำหนัก (ตัน/กม.)	หน่วยราคา (บาท/ตัน)	ราคา (บาท/กม.)
ใช้เถ้าลอย 5% เป็น สารผสมเพิ่ม	AC60/70	4.713	313.674	13,000	4,077,762
	หินปูน				
	- HB1	33.351	2219.676	60	133,181
	- HB2	33.351	2219.676	60	133,181
	- HB3	19.057	1268.339	130	164,884
	- HB4	4.764	317.068	130	41,219
	เถ้าลอย (5%)	4.764	317.068	1,000	317,068
ใช้เถ้าลอย 9% เป็น สารผสมเพิ่ม	AC60/70	4.713	313.674	13,000	4,077,762
	หินปูน				
	- HB1	29.539	1965.968	60	117,958
	- HB2	33.351	2219.676	60	133,181
	- HB3	19.057	1268.339	130	164,884
	- HB4	4.764	317.068	130	41,219
	เถ้าลอย (9%)	8.576	570.776	1,000	570,776
ใช้ผงซีเมนต์ 3% เป็น สารผสมเพิ่ม	AC60/70	4.713	313.674	13,000	4,077,762
	หินปูน				
	- HB1	35.256	2346.463	60	140,788
	- HB2	33.351	2219.676	60	133,181
	- HB3	19.057	1268.339	130	164,884
	- HB4	4.764	317.068	130	41,219
	ผงซีเมนต์ (3%)	2.859	190.28	-	0
ใช้ผงซีเมนต์ 5% เป็น สารผสมเพิ่ม	AC60/70	4.713	313.674	13,000	4,077,762
	หินปูน				
	- HB1	33.351	2219.676	60	133,181

	- HB2	33.351	2219.676	60	133,181
	- HB3	19.057	1268.339	130	164,884
	- HB4	4.764	317.068	130	41,219
	ผงซีเมนต์ (5%)	4.764	317.068	-	0

ตารางที่ 5.1 ราคาวัสดุในแต่ละประเภทของถนนยางมะตอย (ต่อ)

ประเภท	วัสดุ	สัดส่วน (%)	น้ำหนัก (ตัน/กม.)	หน่วยราคา (บาท/ตัน)	ราคา (บาท/กม.)
ใช้ผงซีเมนต์ 9% เป็น สารผสมเพิ่ม	AC60/70	4.713	313.674	13,000	4,077,762
	หินปูน				
	- HB1	29.539	1965.968	60	117,958
	- HB2	33.351	2219.676	60	133,181
	- HB3	19.057	1268.339	130	164,884
	- HB4	4.764	317.068	130	41,219
	ผงซีเมนต์ (9%)	8.576	570.776	-	0
ใช้ตะกรันเหล็กเป็น วัสดุมวลรวม	AC60/70	5.455	389.569	13,000	5,064,397
	ตะกรันเหล็ก	44.134	3151.830	80	252,147
	หินปูน (HB1)	50.411	3600.101	60	216,006
ใช้คอนกรีตเก่าเป็น วัสดุมวลรวม	AC60/70	6.852	427.914	13,000	5,562,882
	คอนกรีตเก่า	43.481	2715.432	-	0
	หินปูน (HB1)	49.667	3101.754	60	186,105

ตารางที่ 5.2 สรุปราคาในแต่ละประเภทของถนนยางมะตอย

ประเภท	ราคา (บาท/ กิโลเมตร)
ตัวอย่างควบคุม	4,569,251
ใช้ถั่วลอย 3% เป็นสารผสมเพิ่ม	4,748,114
ใช้ถั่วลอย 5% เป็นสารผสมเพิ่ม	4,867,295
ใช้ถั่วลอย 9% เป็นสารผสมเพิ่ม	5,105,780
ใช้ผงซีเมนต์ 3% เป็นสารผสมเพิ่ม	4,557,834
ใช้ผงซีเมนต์ 5% เป็นสารผสมเพิ่ม	4,550,227
ใช้ผงซีเมนต์ 9% เป็นสารผสมเพิ่ม	4,535,004
ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวม	5,532,550
ใช้คอนกรีตเก่าเป็นวัสดุมวลรวม	5,748,987

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าตัวอย่างที่ใช้คอนกรีตเก่าเป็นวัสดุมวลรวมนั้นจะมีราคาสูงที่สุดตามมาด้วยการใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวม การใช้ถั่วลอยเป็นสารผสมเพิ่ม ตัวอย่างควบคุม การใช้ผงซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มตามลำดับ แม้ว่าการใช้ถั่วลอยเป็นสารผสมเพิ่ม และการใช้ตะกรันเหล็กและคอนกรีตเก่าเป็นวัสดุมวลรวมจะมีราคาค่าวัสดุมากกว่าตัวอย่างควบคุม แต่ตัวอย่างเหล่านี้จะคุณสมบัติการต้านทานความชื้นและคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีกว่าตัวอย่างควบคุม ในทางตรงกันข้ามการใช้ผงซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่มจะมีราคาวัสดุใกล้เคียงกันกับตัวอย่างควบคุมและก็ยังมีความสมบัติใกล้เคียงกันอีกด้วย

5.2 การศึกษาถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

5.2.1 จุดประสงค์และขอบเขตของการศึกษา

ในหัวข้อนี้จะได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเมื่อมีการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เป็นส่วนประกอบในส่วนผสม และนอกจากนั้นก็ยังได้แนะนำวิธีการหลีกเลี่ยงและข้อแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับการกำจัดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย อย่างไรก็ตามในหัวข้อนี้จะไม่ได้ทำการอธิบายอย่างละเอียดนัก เป็นเพียงแต่การแนะนำเบื้องต้นที่สามารถจะนำไปเป็นแนวทางปฏิบัติเท่านั้น

5.2.2 การประเมินทั่วไป

แม้ว่าข้อกำหนดเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์จะมีน้อย แต่โดยทั่วไปนั้นสามารถประเมินสิ่งแวดล้อมได้จากผลกระทบพื้นฐาน ซึ่งได้แก่:

วัสดุผลิตภัณฑ์

วัสดุผลิตภัณฑ์บางชนิดอาจจะมีพิษปนเปื้อนอยู่ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งสารพิษที่นี้อาจเป็น วัสดุผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยสารที่มีความเป็นด่างสูงหรือมีสารที่ประกอบด้วยเกลือที่สามารถละลายได้ในความเข้มข้นที่สูงและมีอนุภาคขนาดเล็ก

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ในการก่อสร้างถนนสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานได้หลายขั้นตอนคือ ช่วงการก่อสร้างถนน ช่วงการเปิดให้บริการ และช่วงหลังการให้บริการ และนอกจากนั้นในแต่ละขั้นตอนเหล่านี้ยังประกอบด้วยหลายกระบวนการ อาทิเช่น การกองเก็บวัสดุ การผลิต การบดทำลาย การขุด และการนำกลับมาใช้ใหม่เป็นต้น ดังนั้นฝุ่นละอองหรือของเหลวจากกระบวนการเหล่านี้อาจจะส่งผลกระทบต่อมลภาวะทางอากาศ ทางน้ำผิวดิน ทางน้ำใต้ดิน หรืออาจเกิดผลกระทบต่อคนงานได้อีกด้วย

5.2.3 สาเหตุและผลของปัญหาทางสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากการขาดมาตรฐานหรือข้อกำหนดต่างๆที่เกี่ยวกับการนำวัสดุผลิตภัณฑ์มาใช้งาน ถนน และเป็นการยากที่จะประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการสำรวจถึงตัววัสดุผลิตภัณฑ์เองและช่วงการดำเนินการของถนนก็สามารถที่จะทำการประเมินทางด้านสิ่งแวดล้อมได้

คุณสมบัติของวัสดุ

ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุผลิตภัณฑ์เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุผลิตภัณฑ์ได้แสดงไปแล้วในบทที่ 4 ซึ่งวัสดุผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีส่วนประกอบทางเคมีที่จะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมเลย เนื่องจากปริมาณสารโลหะหนัก สารที่สามารถระเหยได้ สารที่มีความเป็นด่างสูง สารที่มีเกลือที่ละลายได้ และสารอื่นที่มีพิษ มีค่าไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งมาตรฐานที่ใช้นี้ได้ใช้มาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษสังกัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามวัสดุผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีค่าความเป็นกรดต่างที่สูงซึ่งสามารถกัดกร่อนท่อเหล็กหรืออลูมิเนียมที่วางตัวอยู่ใกล้กับวัสดุผลิตภัณฑ์และอยู่ในสภาพที่มีความชื้นอยู่ด้วยได้

ช่วงการปฏิบัติการถนน

วัสดุผลิตภัณฑ์ที่ถูกเลือกนำมาใช้ในงานถนนนั้นส่วนมากจะนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มหรือใหม่ก็นำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการนำวัสดุผลิตภัณฑ์มาเป็นสารผสมเพิ่มนั้นส่วนมากจะใช้ในปริมาณที่ค่อนข้างน้อย (น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมน้อยเช่นกัน ในช่วงการปฏิบัติการถนนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ช่วงด้วยกันคือ (1) การคัดสรรและกองเก็บวัสดุ (2) การผลิตวัสดุ (แอสฟัลท์คอนกรีต) (3) ช่วงการก่อสร้าง (4) ช่วงการเปิดให้ใช้บริการ และ (5) ช่วงหลังการใช้บริการซึ่งขั้นตอนทั้ง 5 ขั้นตอนเหล่านี้เป็นขั้นตอนพื้นฐานในงานถนน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีทั้งขนส่ง การเท การกองเก็บ และการคัดแยก ซึ่งกระบวนการเหล่านี้อาจจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้เนื่องจากกระบวนการเหล่านี้สามารถทำให้เกิดฝุ่นละอองได้ อย่างไรก็ตามฝุ่นละอองจะถูกจำกัดได้โดยวิธีการต่างๆ เช่น การควบคุมโดยความชื้น และการปฏิบัติการในระบบปิด นอกจากการเกิดฝุ่นละอองแล้วในขั้นตอนนี้อาจจะเกิดการชะล้างจากกองวัสดุได้ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านน้ำผิวดินได้ แต่ก็สามารถขจัดได้โดยการเก็บวัสดุให้มิดชิดอาจจะหาผ้าใบมาคลุมหรือการปฏิบัติการต่างๆในระบบปิด

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเชิงบวก

การใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ในงานถนนไม่ใช่ว่าจะมีแต่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงลบเท่านั้น แต่จะมีการส่งผลกระทบในทางบวกเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น การใช้ตะกรันเหล็กหรือการใช้คอนกรีตเก่าเป็นวัสดุมวลรวมจะส่งผลให้เกิดการลดลงของการทำลายภูเขาหินปูนและมลภาวะ และนอกจากนี้ยังช่วยให้มีทัศนียภาพที่สวยงามอีกด้วย

5.2.4 การติดตามและตรวจสอบทางด้านสิ่งแวดล้อม

การใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ในงานถนนนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมได้ไม่ว่าจะในด้านมลภาวะทางอากาศหรือทางน้ำ ดังนั้นการตรวจสอบปัญหาเหล่านี้สามารถทำได้โดยการตรวจสอบคุณภาพของอากาศและน้ำซึ่งจะต้องไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ซึ่งในประเทศไทยนั้นจะใช้มาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษเป็นตัวควบคุม

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการทดลองต่างๆดังกล่าวไปแล้วในบทที่ 4 และ 5 ซึ่งแสดงปริมาณที่เหมาะสมของส่วนผสมและแสดงถึงการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมเมื่อใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เป็นส่วนประกอบ นอกจากนั้นยังแสดงถึงทางด้านราคาและผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเมื่อมีการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. แม้ว่าปริมาณวัสดุมวลรวมธรรมชาติ เช่น หินปูน และหินแกรนิต จะมีเพียงพอในอุตสาหกรรมการก่อสร้างถนน แต่งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์มาเป็นส่วนผสมเพิ่มหรือใช้แทนวัสดุมวลรวมธรรมชาติจะช่วยทำให้เกิดผลดีต่างๆ เช่น สามารถลดการใช้วัสดุธรรมชาติ สามารถลดมลพิษ สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม และช่วยลดงบประมาณในการปรับปรุงและซ่อมแซมถนนจากปัญหาด้านความชื้น ซึ่งวัสดุผลิตภัณฑ์ที่กล่าวนี้ได้แก่ เถ้าลอย (fly ash) ผงซีเมนต์ (cement kiln dust) และตะกรันเหล็ก (steel slag) ส่วนคอนกรีตเก่า (reclaimed concrete material) นั้นไม่ได้มีการปรับปรุงทางด้านคุณสมบัติทางวิศวกรรมเลย แต่ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของตัวคอนกรีตเก่าเองด้วย
2. สัดส่วนของส่วนผสมที่เหมาะสมเมื่อมีการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์เป็นวัสดุมวลรวมแสดงให้เห็นว่าทุกประเภทของก้อนตัวอย่างใช้ขนาดละเอียดแบบเหมือนกันหมดยกเว้นแต่ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน กล่าวคือปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมสำหรับการใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมคือ 4.713% ส่วนปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมสำหรับการใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมคือ 5.455% และ 6.852% สำหรับการใช้คอนกรีตเก่าเป็นวัสดุมวลรวม
3. สำหรับการทดสอบการต้านทานความชื้น วัสดุผลิตภัณฑ์ทั้ง 4 ประเภทที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในการต้านทานความชื้นได้เมื่อเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างควบคุม
4. การทดสอบค่าโมดูลัส (resilient modulus) จะขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของวัสดุผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นส่วนผสมในก้อนตัวอย่าง
5. ชนิดของมวลรวมจะส่งผลต่อดัชนีพลังงานการบดอัดและดัชนีการต้านทานปริมาณการจราจร ซึ่งถ้าค่าของความเป็นเหลี่ยมมุมของวัสดุมวลรวมมากก็จะส่งผลให้ค่าของ

ดัชนีพลังงานการบดอัดและดัชนีการต้านทานปริมาณการจราจรสูงด้วย อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติอื่นๆก็ควรนำมาพิจารณาประกอบด้วยเช่นกัน

6. เมื่อพิจารณาถึงเรื่องราคาของวัสดุในแต่ละประเภทของก้อนตัวอย่างนั้น ปริมาณของวัสดุเชื่อมผสานจะส่งผลอย่างมาก กล่าวคือถ้าวัสดุมวลรวมยังมีความดุดซึ่มมากก้อนตัวอย่างที่ใช้วัสดุมวลรวมนั้นก็ยิ่งจะมีราคาสูงเช่นกัน
7. การใช้วัสดุผลิตภัณฑ์ทั้ง 4 ชนิดในงานวิจัยนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเลยเมื่อใช้มาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษในประเทศไทย

ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยในครั้งนี้น่าจะมีสิ่งที่พัฒนาดังต่อไปนี้

1. ในการศึกษาวิจัยในอนาคตน่าจะมีในส่วนของทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมในสนาม ไม่ใช่มีเฉพาะแต่การทดลองในห้องปฏิบัติการเท่านั้น
2. ในการศึกษาวิจัยในอนาคตควรที่จะนำวัสดุผลิตภัณฑ์อื่นนอกเหนือจากวัสดุผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้วย
3. ในการศึกษาวิจัยในอนาคตควรจะมีการตรวจสอบและประเมินทางด้านสิ่งแวดล้อมในสนามด้วยโดยเฉพาะอย่างยิ่งมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการนำวัสดุผลิตภัณฑ์มาใช้ในการก่อสร้างถนน
4. ในการศึกษาวิจัยในอนาคตควรจะมีการประเมินคุณสมบัติอื่นๆนอกเหนือจากในงานวิจัยนี้ เช่น การทดสอบความล้า (fatigue test) และการทดสอบร่องรอยล้อ (rutting test) เป็นต้น
5. ในการศึกษาวิจัยในอนาคตควรที่จะมีการติดตามและตรวจสอบผลกระทบความเสียหายของถนนเมื่อมีการใช้วัสดุผลิตภัณฑ์มาใช้เป็นส่วนประกอบ เช่น การแตกร้าวของถนน การเกิดร่องรอยล้อรถยนต์ และการเกิดหลุมบ่อ ซึ่งจะทำให้สามารถเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนนได้ง่าย

เอกสารอ้างอิง

AASHTO T283, "Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage", American Association of State Highway and Transportation Official

ACPA. *Concrete Paving Technology: Recycling Concrete Pavement*, American Concrete Pavement Association, Skokie, Illinois, 1993.

Ali, N., Chan, J.S., Simms, S., Bushman R., and Bergan, A.T., "*Mechanistic Evaluation of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures*", Journal of Materials in Civil Engineering, 8 (1), 19-25, 1996.

ASTM C204, "Test Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus", American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02, West Conshohocken, Pennsylvania, 1994.

ASTM C618 – 08, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", ASTM International.

ASTM D 4123, "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures", ASTM International.

Bahia, H.U., Friemel, T.P., Peterson, P.A., Russell, J.S., and Poehnel, B., "*Optimization of Constructibility and Resistance to Traffic: A New Design Approach for HMA Using the Superpave Compactor*", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 67, pp. 189-232, 1998.

Collins, R. J. and Ciesielski, S.K., *Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction*, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199, Transportation Research Board, Washington, DC, 1994.

Collins, R. J. and Emery, J.J., "*Kiln Dust-Fly Ash Systems for Highway Bases and Subbases*", Federal Highway Administration, Report No. FHWA/RD-82/167, Washington, DC, September, 1983.

DiGioia, A.M., Jr. and William, L.N., *"Fly Ash as Structural Fill"*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, *Journal of the Power Division*, 1972

Emery, J.J., *"Slag Utilization in Pavement Construction"*, Extending aggregate resources. Washington DC, 1982

Hanks, A. J. and Magni, E.R., *The Use of Recovered Bituminous and Concrete Materials in Granular Base and Earth*, Report MI-137, Ontario Ministry of Transportation, Downsview, Ontario, 1989.

Kraszewski, L. and Emery, J., *"Use of Cement Kiln Dust as a Filler in Asphalt Mixes"*, Proceedings, ORF/CANMET Symposium on Mineral Fillers, Ontario Research Foundation and Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Toronto, Canada, 1981.

McKerall, W.C., Ledbetter, W.B., and Teague, D.J., *"Analysis of Fly Ashes Produced in Texas"*, Texas Transportation Institute, Research Report No. 240-1, Texas A&M University, College Station, Texas, 1982.

Meyers, J.F., Pichumani, R., and Kapples, B.S., *"Fly Ash. A Highway Construction Material"*, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-IP-76-16, Washington, DC, 1976.

Petrarca, R.W. and Galdiero, V.A., *"Summary of Testing of Recycled Crushed Concrete"*, Transportation Research Record No. 989, pp. 19-26, Washington, DC, 1984.

Taha, R., Al-Rawas, A., Al-Harthy, A., and Qatan, A., *"Use of Cement Bypass Dust as Filler in Asphalt Concrete Mixtures"*, Journal of Material in Civil Engineering, Vol.14, No.4, pp. 338-343, 2002.

Tam, V. and Tam, C.M., *Economic Comparison of Recycling Over-ordered Fresh Concrete: A Case Study Approach*, Resources, Conservation and Recycling, 52, 208-218, 2007.

U.S. Federal Highway Administration. "Fly Ash Facts for Highway Engineers".

Zimmer, F. V., "*Fly Ash as a Bituminous Filler*", Proceedings of the Second Ash Utilization Symposium, 1970.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

Kanitpong, K. and Pummarin, K., "Investigation of Using Industrial Wastes in Moisture Damage Resistance of Hot Mix Asphalt Pavement," Journal of Solid Waste Technology and Management, 2009. (in press)

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

การศึกษาและประยุกต์ใช้วัสดุเหลือใช้หรือวัสดุผลิตภัณฑ์จากงานอุตสาหกรรมในงานผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุมวลรวม หรือนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลท์คอนกรีตภายใต้สภาวะที่ได้รับความชื้น การวิจัยนี้เป็นการศึกษาที่ช่วยเสริมองค์ความรู้ และเป็น การวิจัยพื้นฐานเพื่อมุ่งเป้าหรือการวิจัยประยุกต์ภายในประเทศ ซึ่งพบว่าได้มีการศึกษาอย่างมาก เมื่อเทียบกับต่างประเทศ ที่จะนำเอาวัสดุเหลือใช้เหล่านี้มาใช้ให้ก่อประโยชน์กับงานทางแอสฟัลท์คอนกรีต นอกจากนี้การวิจัยนี้สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเชิงนโยบาย ที่จะคัดค้านำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ในงานทาง ให้เป็นประโยชน์ต่อไป

ภาคผนวก

ตารางที่ **A1** Control Points and a Restricted Zone

Superpave 37.5 mm nominal size gradation requirements				
Sieve, mm	Control Points		Restricted Zone Boundary	
			Minimum	Maximum
50	-	100	-	-
37.5	90	100	-	-
25	-	-	-	-
19	-	-	-	-
12.5	-	-	-	-
9.5	-	-	-	-
4.75	-	-	34.7	34.7
2.36	15	41	23.3	27.3
1.18	-	-	15.5	21.5
0.6	-	-	11.7	15.7
0.3	-	-	10	10
0.15	-	-	-	-
0.075	0	6	-	-

Superpave 25 mm nominal size gradation requirements				
Sieve, mm	Control Points		Restricted Zone Boundary	
			Minimum	Maximum
37.5	-	100	-	-
25	90	100	-	-
19	-	-	-	-
12.5	-	-	-	-
9.5	-	-	-	-

4.75	-	-	39.5	39.5
2.36	19	45	26.8	30.8
1.18	-	-	18.1	24.1
0.6	-	-	13.6	17.6
0.3	-	-	11.4	11.4
0.15	-	-	-	-
0.075	1	7	-	-

ตารางที่ A1 Control Points and a Restricted Zone (continued)

Superpave 19 mm nominal size gradation requirements				
Sieve, mm	Control Points		Restricted Zone Boundary	
			Minimum	Maximum
25	-	100	-	-
19	90	100	-	-
12.5	-	-	-	-
9.5	-	-	-	-
4.75	-	-	-	-
2.36	23	49	34.6	34.6
1.18	-	-	22.3	28.3
0.6	-	-	16.7	20.7
0.3	-	-	13.7	13.7
0.15	-	-	-	-
0.075	2	8	-	-

Superpave 12.5 mm nominal size gradation requirements			
Sieve, mm	Control Points		Restricted Zone Boundary
			Minimum Maximum

19	-	100	-	-
12.5	90	100	-	-
9.5	-	-	-	-
4.75	-	-	-	-
2.36	28	58	39.1	39.1
1.18	-	-	25.6	31.6
0.6	-	-	19.1	23.1
0.3	-	-	15.5	15.5
0.15	-	-	-	-
0.075	2	10	-	-

ตารางที่ A1 Control Points and a Restricted Zone (continued)

Superpave 9.5 mm nominal size gradation requirements				
Sieve, mm	Control Points		Restricted Zone Boundary	
			Minimum	Maximum
12.5	-	100	-	-
9.5	90	100	-	-
4.75	-	-	-	-
2.36	32	67	47.2	47.2
1.18	-	-	31.6	37.6
0.6	-	-	23.5	27.5
0.3	-	-	18.7	18.7
0.15	-	-	-	-
0.075	2	10	-	-

ตารางที่ A2 Consensus Requirements

Superpave Coarse Aggregate Angularity Consensus Requirements		
Traffic, million ESALs	Depth from Surface	
	<100 mm	> 100 mm
< 0.3	55/-	-/-
< 1	65/-	-/-
< 3	75/-	50/-
< 10	85/80	60/-
< 30	95/90	80/75
< 100	100/100	95/90
> 100	100/100	100/100
Note: "85/80" denotes that 85 % of the coarse aggregate has one fractured face and 80 % has two fractured faces.		

Superpave Fine Aggregate Angularity Consensus Requirements		
Traffic, million ESALs	Depth from Surface	
	<100 mm	> 100 mm
< 0.3	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
> 100	45	45

Note: Criteria are presented as percent air voids in loosely compacted fine aggregate.

ตารางที่ A2 Consensus Requirements (continued)

Superpave Flat and Elongated Particles Consensus Requirements	
Traffic, million ESALs	Percent
< 0.3	-
< 1	-
< 3	10
< 10	10
< 30	10
< 100	10
> 100	10
Note: Criteria are presented as maximum percent by weight of flat and elongated particles.	

Superpave Clay Content Consensus Requirements	
Traffic, million ESALs	Sand Equivalent, minimum
< 0.3	40
< 1	40
< 3	40
< 10	45

< 30	45
< 100	50
> 100	50

ตารางที่ A3 Superpave Mix Design Criteria

Superpave Air Void Design Criteria
Range of Design Air Voids: 3 to 5 percent
Optimum Air Void Content: 4 percent

Superpave Voids in Mineral Criteria	Minimum VMA, %
Nominal Maximum Aggregate Size	
9.5 mm	15
12.5 mm	14
19 mm	13
25 mm	12
37.5 mm	11

Superpave Voids Filled With Asphalt Criteria	Design VFA, %
Traffic, ESALs	
$< 3 \times 10^5$	70 - 80
$< 1 \times 10^6$	65 - 78
$< 3 \times 10^6$	65 - 78
$< 1 \times 10^7$	65 - 75
$< 3 \times 10^7$	65 - 75
$< 1 \times 10^8$	65 - 75
$> 3 \times 10^8$	65 - 75

ตารางที่ A3 Superpave Mix Design Criteria (continued)

Compaction Level	Required Density (% of Theoretical Maximum Specific Gravity)
N_{int}	$C_{int} < 89$
N_{des}	$C_{des} = 96$
N_{max}	$C_{max} < 98$

Volumetric Properties	Superpave Limit
V_a at N_{des}	4%
VMA at N_{des}	Set by nominal maximum size of aggregate
C_{des}	$< 89.0\%$ of G_{mm}
C_{max}	$< 98.0\%$ of G_{mm}

INVESTIGATION OF INDUSTRIAL WASTES IN HOT MIX ASPHALT FOR MOISTURE DAMAGE RESISTANCE

Kunnawee Kanitpong and Kitsumate Pummarin

kanitpon@ait.ac.th and kitsumate.pummarin@ait.ac.th

Transportation Engineering Program

School of Engineering and Technology, Asian Institute of Technology

P.O. Box 4, Klong Luang, Pathumthani, Thailand, 12120

(Received 28 October 2008; Revised 10 July 2009; Accepted 14 September 2009)

Abstract

Moisture damage is one of the main problems in asphalt pavement which is found especially in areas with high a amount of rainfall. One effective solution is to apply anti-stripping additives in asphalt mixtures to reduce the stripping of asphalt binder from the aggregate surface due to moisture. Another solution is to select an aggregate type that provides better affinity with asphalt binder rather than water and hence provides better adhesion. In this study, fly ash and cement kiln dust (CKD) were selected as the anti-stripping additives, while steel slag and reclaimed concrete were selected as the aggregates in asphalt mixtures. The resilient modulus test and the indirect tensile strength test were conducted to evaluate the performance of asphalt mixtures. It was found that the use of CKD as additive increased the stiffness of asphalt mixtures at intermediate and high temperatures, while the application of fly ash and reclaimed concrete reduced the stiffness of the asphalt mix. Results also indicated that asphalt mixtures with fly ash and CKD additives and those with slag and reclaimed concrete aggregates could resist moisture damage.

Keywords: Industrial waste, fly ash, cement kiln dust, slag, reclaimed concrete, Superpave

INTRODUCTION

Moisture damage is one of the main problems in asphalt pavement, typically found in a tropical area where high amounts of rainfall are expected. Moisture leads to several types of asphalt pavement distresses because it causes stripping of asphalt binder from aggregates, and hence results in loss of load support and long-term durability. It is very important to investigate an appropriate method to reduce pavement distresses caused by moisture damage. One effective method is to apply the anti-stripping additives in asphalt mixture to reduce the stripping of asphalt binder from aggregates. However, the anti-stripping additive is expensive. Another solution is to select an appropriate aggregate type that has better affinity with the asphalt binder than water.

In the pavement engineering view point, materials which are considered as industrial wastes could have the potential to improve engineering properties of the asphalt mixtures. However, many types of industrial wastes are different in physical, chemical and engineering properties which can affect the performance-related properties of the asphalt mixtures.

Currently, large amounts of fly ash, cement kiln dust, steel slag, and reclaimed concrete are the industrial by-products produced in Thailand. According to the Mae-Moh Electricity Generating Authority of Thailand (Mae-Moh EGAT), approximately three million tons of coal fly ash have been generated. Even though the fly ash has been applied to the production of concrete, the amount of fly ash produced annually still remains approximately two to three million tons. In the Portland cement industry, it is reported that 800,000 tons of cement kiln dust (CKD) is generated each year from the Portland cement production. Some portions of the CKD are fed back to the production process; however, some are considered as production waste. One million ton of steel slag is generated each year and most of them are generally used for pavement construction. The reclaimed concrete used in this study is the over-ordered concrete. A report by Tam and Tam (2007) shows that the quantity of over-ordered concrete is about 1.5% of the total quantity of concrete produced in Thailand, or 144,000 tons of over-ordered concrete is disposed each year which is a considerably large amount of concrete waste.

As discussed previously, it is therefore necessary to conduct the study to find out different applications to reuse industrial wastes to improve the engineering properties of asphalt mixture, particularly for the resistance of asphalt mixtures to moisture damage. The first application is to reuse fly ash and cement kiln dust as anti-stripping additives in order to improve the resistance of asphalt mixtures to moisture damage. The second application is to reuse slag and reclaimed concrete materials to replace natural aggregate in order to reduce the budget in the production and construction of asphalt mixtures, and also to prevent moisture damage of asphalt mixtures. The application of these material types not only can minimize the amount of industrial wastes, but also can bring both technological and economical benefits to the asphalt pavement industry.

The objectives of this study are therefore to investigate the properties of asphalt mixtures when using industrial wastes as anti-stripping additives and replacement of natural

aggregate. The property of asphalt mixture to resist moisture damage is focused on in this study.

PREVIOUS RESEARCH

Slag is generated from the steel manufacturing process during the separation of the molten steel from impurities in steel-making furnace. A study conducted by Collins and Ciesielski (1994) indicated that the slag had an angular shape and a rough surface texture which were desirable for asphalt mixtures. Use of slag in asphalt mixtures increases the stability due to particle interlocking and bonding between asphalt and aggregate surface.

Reclaimed concrete materials (RCM) can be used as coarse aggregates of which the properties depend on the properties of the virgin materials used to produce concrete. Hanks and Magni (1989) stated that the processed RCM or the crushed RCM material were highly angular in shape and had a rough texture which was believed to be beneficial to the properties of asphalt mixtures. The RCM has the basic component of calcium-aluminum-silicate which includes calcium hydroxide with high alkaline. RCM is therefore expected to provide good bonding with asphalt binder, especially under moisture susceptibility. Additionally, many researchers (Hanks and Magni 1989, ACPA 1993, and Petrarca and Galdiero 1984) found that the RCM exhibited good resistance to weathering and erosion.

Fly ash is the residuals generated in the combustion of coal, which is generally captured from the chimneys of coal-fired power plants. Fly ash is a fine-grained, powdery particulate material which contains substantial amounts of silicon dioxide (SiO_2) and calcium oxide (CaO). Two classes of fly ash are defined by ASTM C618 as Class F fly ash and Class C fly ash. The major difference between these two classes is the amount of calcium, silica, alumina, and iron content in the ash. The chemical properties of the fly ash are significantly influenced by the chemical content of the coal burned (ASTM C618). Class F fly ash contains calcium oxide of 1-12%, while Class C fly ash contains 20% or more of calcium oxide (McKerall et al., 1982).

Many researchers observed that fly ash released from the lignite-fired power plant contained a high amount of calcium oxide up to 15-40% (Meyers et al. 1976, McKerall et al. 1982, ASTM C204). With the pozzolanic properties, fly ash can be used as an additive or mineral filler to fill the voids and attribute larger contact between aggregates in asphalt concrete mixes. The hydrophobic nature of fly ash provides stripping resistance (Ali et al. 1996). Use of fly ash can also increase the stiffness and durability of the asphalt mixture, as well as rutting resistance. (US FHWA, Zimmer 1970)

Cement kiln dust (CKD) is a fine by-products collected from a filter during the cement production process. The maximum particle size of cement kiln dust is 0.30 mm (No. 50 sieve), and generally 75% of the material passes through a 0.03 mm No. 450 sieve. CKD has a similar chemical composition to the conventional portland cement. The principal components are lime, iron, alumina, and silica. The CKD contains a high amount of CaO up to 40% with high alkaline (Collins and Emery 1983). Kraszewski and Emery (1981)

indicated that when CKD is used as mineral filler in asphalt pavements, CKD can reduce the amount of asphalt cement by 15-20%. Another study conducted by Taha et al. (2002) showed that the use of 5% CKD as additive in the asphalt mixture did not affect the optimum asphalt binder content. In addition, the lime content in CKD can provide stripping resistance in asphalt mixture under water-exposed conditions.

MATERIAL SELECTION

Asphalt and Aggregate

The original asphalt binder AC 60/70 and limestone aggregate were selected to prepare the controlled mix in this study. The 19-mm nominal maximum limestone aggregate was used to produce the asphalt mixture specimens according to the Superpave mix design method. The slag and reclaimed concrete with the same nominal maximum aggregate size were used as two materials replacing limestone coarse aggregate. Figure 1 shows the pictures of limestone, slag, and reclaimed concrete used in this study. The aggregate blend selected for this study included coarse and fine aggregate, and was controlled according to the gradation chart illustrated in Figure 2. The basic properties of each aggregate type were summarized in Table 1. It should be noted that the slag and reclaimed concrete replaced the coarse aggregate portion in the aggregate blend. Fine limestone aggregate was still used in all mix types.



Figure 1 Limestone (Left), Slag (Center), and Reclaimed Concrete (Right)

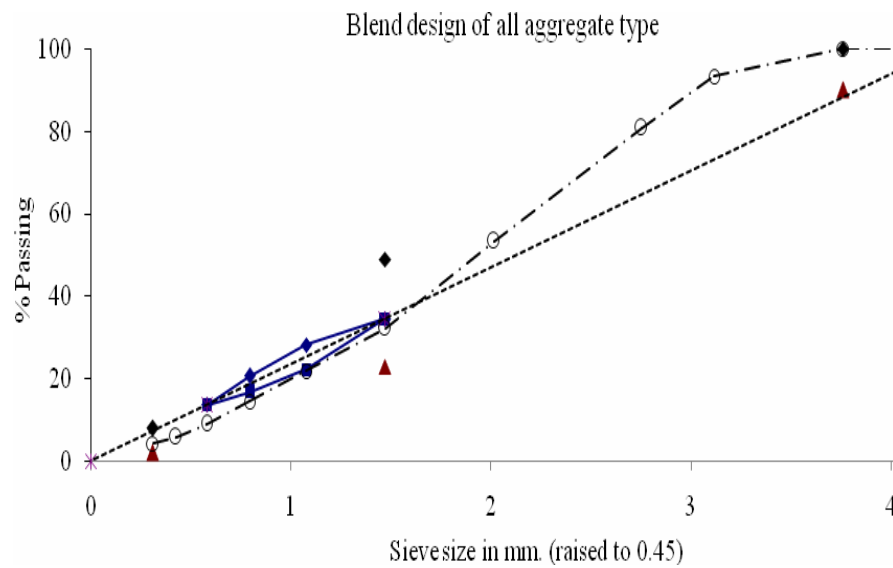


Figure 2 Gradation Chart of Aggregate Used in this Study

Table 1 Basic Properties of Each Aggregate Type

Property	Aggregate					
	Limestone				Steel Slag	RCM
	Coarse Agg.			Fine Agg.	Coarse Agg.	Coarse Agg.
	Bin1	Bin2	Bin3	Bin1		
Bulk Specific Gravity	2.677	2.685	2.692	2.660	3.035	2.320
Percent Absorption	0.500	0.420	0.320	0.890	4.343	5.302
Uncompacted Void Content of Fine Aggregate	-	-	-	49.1	-	-
Uncompacted Void Content of Course Aggregate	47.6	46.7	46.1	-	52.1	48.9
Fractured Particles in Coarse Aggregate Soundness	100/100 3.802	100/100 0.970	100/100 2.180	- 4.56	16/2 1.34	100/100 2.44
Los Angeles Abrasion Sand Equivalent	25.5 79	25.2 79	24.6 79	29.4 79	28.8 79	29.7 79

Flat and Elongated	0.13	0.16	0.22	-	0.1	0.51
--------------------	------	------	------	---	-----	------

Fly Ash and CKD as Anti-Stripping Additives

Fly ash and CKD generated in Thailand were used as two types of anti-stripping additive in this study (Figure 3). The chemical compositions of fly ash and CKD were measured by using the X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), and the results were summarized in Table 2.

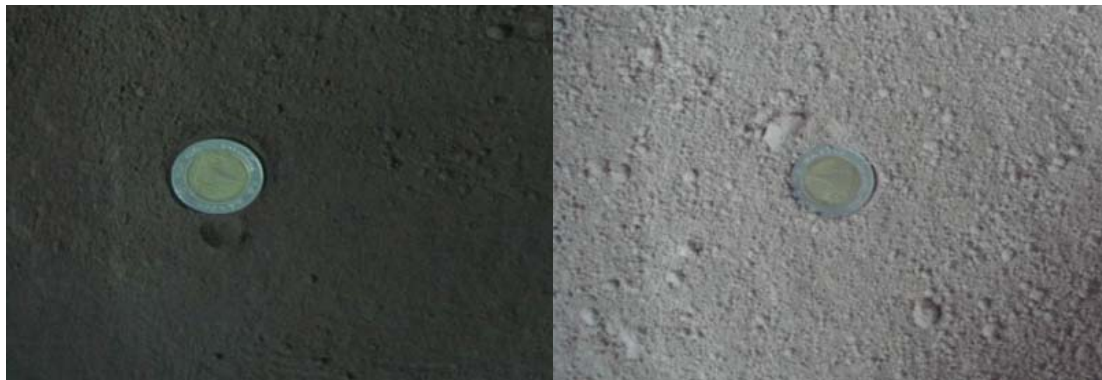


Figure 3 Fly Ash (Left) and Cement Kiln Dust (Right)

Table 2 Chemical composition of fly ash, cement kiln dust, and steel slag

Item	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	SO ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	ZnO	K ₂ O	Na ₂ O
Fly ash	15.14	14.22	39.85	2.74	20.16	0.09	3.68	-	0.36	0.13	-	2.21	1.00
CKD	72.88	3.38	14.6	1.16	6.13	-	0.39	-	0.25	0.10	-	0.77	0.15
Steel slag	33.11	23.17	20.86	10.20	6.15	3.36	0.93	0.88	0.61	0.25	0.16	0.07	-

SPECIMEN PREPARATION

The Superpave Gyratory Compactor was used to produce all mixture specimens which were designed according to the Superpave volumetric mix design method. The mix design selected follows a fine gradation with 19-mm nominal maximum aggregate size. The mix type selected is E-3 mix, which represents the designated mixtures for traffic volume on Thailand's highways. The 102-mm diameter and 64-mm height specimens were prepared for the resilient modulus test and the indirect tensile strength test. The compaction was performed using the number of gyrations to achieve 7% air voids. At least two specimens were produced for different combinations among binder, aggregate, and content of anti-stripping additives selected.

The fly ash and CKD were primarily added to the dry aggregate prior to mixing with the original asphalt binder. The fly ash and CKD used in the mixing process was 3%, 5%, and 9% by weight of dry aggregate. Besides the addition of fly ash and CKD as the anti-stripping additive, the controlled mixtures were produced without adding any additive. Table 3 shows a total combination of specimens produced and tested in this study.

Table 3 A Total Combination of Specimens Produced

Mix Type	Description
Control	Controlled Mixture (limestone aggregate)
S	Use slag to replace coarse limestone aggregate
R	Use reclaimed concrete to replace coarse limestone aggregate
F3	Use 3% fly ash as anti-stripping additive
F5	Use 5% fly ash as anti-stripping additive
F9	Use 9% fly ash as anti-stripping additive
CKD3	Use 3% CKD as anti-stripping additive
CKD5	Use 5% CKD as anti-stripping additive
CKD9	Use 9% CKD as anti-stripping additive

EXPERIMENTAL TESTING PROGRAM

Resilient Modulus Test (M_r)

The resilient modulus (M_r) test (ASTM D 4123) was conducted to measure the cyclic response of asphalt mixtures under the specified temperature. The asphalt mixture specimens were subjected to a repetitive indirect tensile load for 1,000 cycles under a 25°C testing temperature and 100 cycles under a 40°C testing temperature. The resilient modulus was calculated based on the Poisson's ratio of 0.35 for 25°C and 0.40 for 40°C. Two replicated tests were performed for each testing temperature. The amplitude of applied load was 20% of the indirect tensile strength for M_r tested at 25°C and 10% for M_r tested at 40°C. Loading frequency was 5 Hz (0.1 sec pulse and pulse period of 1 sec).

Indirect Tensile Strength Test (IDT)

The IDT test was conducted in accordance with AASHTO T283, a standard test method to measure the resistance of compacted bituminous mixtures to moisture induced damage. Six specimens (102-mm diameter and 64-mm high) were compacted at the optimum binder content and to attain 7% air voids.

Six compacted specimens were divided into two groups. The first three specimens were not subjected to any conditioning. The other three specimens were saturated to 55-80% degree of saturation. Afterwards, these specimens were conditioned in a water bath at 60°C for 24 hrs following the AASHTO T283. Both unconditioned and conditioned specimens were stored in a water bath at 25°C for 1 hr to allow thermal equilibration prior to testing.

During the test, all specimens were subjected to a loading rate of 51 mm/min until failure. The compressive load was applied through two loading strips. The maximum indirect tensile force was recorded and the corresponding IDT strength of the asphalt mixture was determined. The tensile strength ratio (TSR), a ratio of the IDT strength of conditioned specimens to the IDT strength of unconditioned specimens, was calculated and used as a moisture susceptibility index of asphalt mixtures.

Compactability and Traffic Densification Measurement

The compactability of mixtures was measured by using the gyratory compactor as indicated in Bahia et al. (1998). An approach of utilizing the gyratory compactor to determine the mixture resistance to densification was developed using the densification height data as described in Bahia et al. The concept of using the gyratory compactor to calculate the energy required to change the volume of the asphalt mixture was introduced by calculating the area under the densification curve between selected reference points to relate to the actual field construction and in-service conditions. The energy calculated can be used as indicators of mixture suitability for construction and performance under traffic.

Two energy indices were developed by Bahia et al. (1998), which are the Compaction Energy Index (CEI) and the Traffic Densification Index (TDI) as shown in Figure 4. The CEI is the energy needed to compact the mixture to the required density during construction. The CEI can be calculated by integrating the area under the densification curve measured by the gyratory compactor between the first gyration and the 92% Gmm, which is assumed as the required density at the end of the construction. Therefore, lower CEI is more desirable because less energy is needed to achieve the required density. The TDI is the energy needed to compact mixture specimen to final density of 98% Gmm. This energy can be considered as an indicator for the mixture resistance to traffic. The TDI can be calculated by integrating the area under the densification curve between 92% Gmm and 98% Gmm. Higher TDI is more desirable because more traffic is required to densify the mix to the final density.

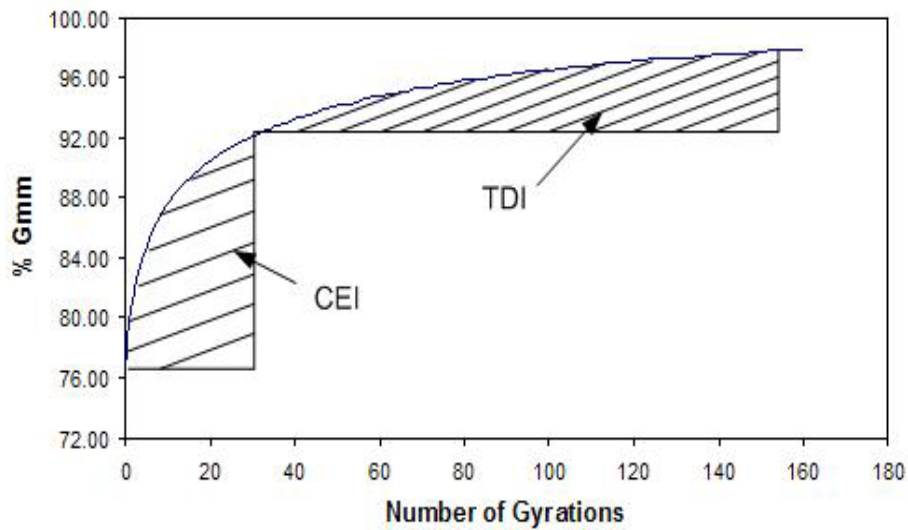


Figure 4 Densification energy indices

RESULTS AND ANALYSIS

Volumetric Properties Analysis

It was found that the optimum asphalt contents for limestone aggregate mixes (control, F, and CKD) are 4.713%; while the optimum asphalt content for S and R mixes are 5.46% and 6.85%, respectively, which are higher than those for the limestone aggregate mix. As shown in Table 4, the percentage of absorption of slag and reclaimed concrete are 4.34% and 5.30% which are much higher than limestone. Aggregate with a higher percentage of absorption needs more asphalt to coat around aggregate particles, and therefore resulting in the requirement of higher optimum asphalt content in the mixes. Results also indicated that R mix requires very high amounts of asphalt content (up to 6.85%) which could be explained by the high percentage of voids in mineral aggregate (VMA) (15.59%) in the mixes. To achieve the required density at 4% air voids, the mix with high VMA needs more asphalt to fill up voids.

Table 4 Volumetric properties at optimum binder content for all mix types

Mix Type	AC (%)	G_{mm}	Air Voids (%)		VMA (%)		VFA (%)	
			Result	Req.	Result	Req.	Result	Req.
Limestone (Control, F and CKD)	4.71	2.511	4.0	4.0	13.6	13 Min.	70.8	65-78

Slag (S)	5.46	2.707	4.0	4.0	13.3	13 Min.	69.9	65-78
Reclaimed Concrete (R)	6.85	2.350	4.0	4.0	15.6	13 Min.	74.4	65-78

Mixture Compactability and Resistance to Traffic

The energy indicators were used as the parameters to estimate the effort required for the compaction and densification of asphalt mixtures at different compaction temperatures. In Figure 5, the control, F, and CKD mixes which are limestone mixes show similar CEI values which are lower than the CEI measured for S and R mixes. The measurement of CEI indicated that more energy was needed to compact S and R mixes from the first gyration to the required density of 92% Gmm when comparing to the energy used to compact limestone mixes. As a result, limestone aggregate which is used to produce control, F, and CKD mixes are easier to be compacted as shown by the fact that less energy is required to compact the mixes from their initial density to 92% Gmm. This finding could be explained by the uncompacted void content of coarse aggregate or coarse aggregate angularity as shown in Table 1. Due to the high angularity of slag and reclaimed concrete aggregate (52.1% and 48.9%), S and R mixes could not reach the required density easily. It can be implied that the aggregate with higher coarse aggregate angularity needs more energy to be compacted in order to achieve the required density. Use of slag and reclaimed concrete as aggregates was therefore found to adversely affect the compactability of asphalt mixtures.

The traffic densification index (TDI), shown in Figure 6, indicates that S mixes require more energy to densify under traffic loads to the design density of 98% Gmm as shown in higher TDI values when comparing to limestone mixes (control, F and CKD). However, the TDI exhibited lower values for R mixes. The results indicated that the slag aggregate provided greater resistance to densification under traffic as well as a potential of greater resistance to permanent deformation under the traffic loads. On the other hand, using reclaimed concrete as aggregate could result in less resistance to permanent deformation. The results could be explained by the high coarse aggregate angularity of slag which can provide aggregate interlocking, and thus can resist rutting due to traffic load. Although the reclaimed concrete also has high coarse aggregate angularity, it was found that the abrasion value is considerably high, and this could be the reason for the poor performance of the mix to resist rutting.

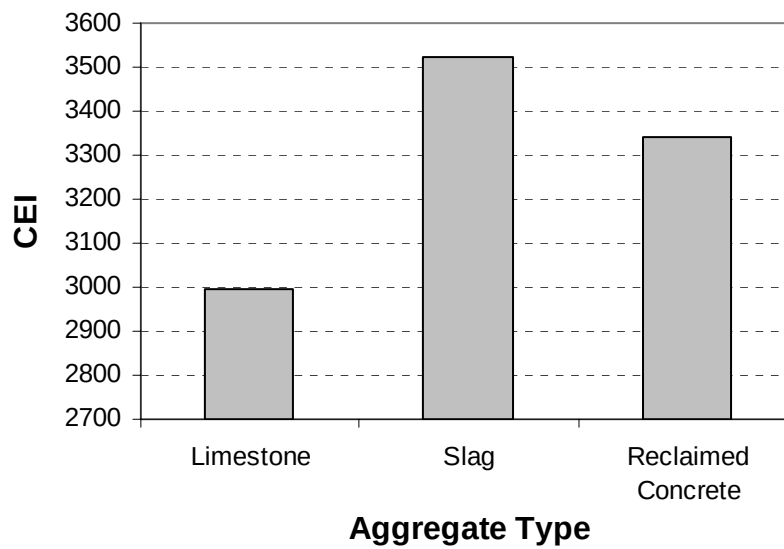


Figure 5 Compaction Energy Index (CEI) Measurement

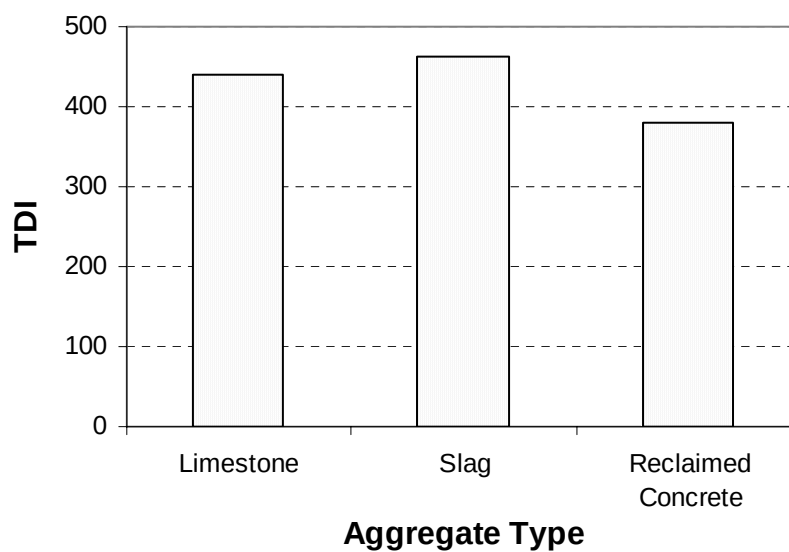


Figure 6 Traffic Densification Index (TDI) Measurement

Moisture Damage Resistance Test

The indirect tensile strength test was conducted to measure the sensitivity of all mix types to moisture damage. The Tensile Strength Ratio (TSR) which is a ratio of the indirect tensile strength of wet specimens to the indirect tensile strength of dry specimens was calculated to compare the moisture susceptibility of all mix types. Figure 7 shows a comparison for all mixtures and depicts the effect of aggregate types and the addition of anti-stripping additives. It can be seen in Figure 7 that controlled mix shows the lowest TSR

value when comparing to S and R mixes. Due to the fact that slag and reclaimed concrete aggregate contains a high amount of calcium composition (CaO) this can result in basic component of aggregate. The basic component could be used as a measure of the hydrophobic nature or “water-hating” surfaces, which have a greater attraction for asphalt binder than for water. Therefore, using slag and reclaimed concrete aggregate can improve the resistance of asphalt mixtures to moisture damage.

For the mixes adding fly ash as anti-stripping additive, the TSR values are higher when the fly ash content is increased in the mixes. For the mixes adding CKD as anti-stripping additive, the TSR value is higher when the 3% CKD is added. As the amount of CKD is increased, the TSR is gradually decreased, and shows very low TSR value when 9% of CKD is applied to the mixes. Higher value of TSR in F and CKD mixes when comparing to controlled mix could be explained by the chemical composition of fly ash and CKD. According to Table 2, fly ash used in this study contains 15.14% calcium oxide (CaO) which is considerably high as indicated in the range for high calcium fly ash (15%-40%). Applying additive with high calcium into the aggregate can increase the ratio of the basic component of aggregate. The basic component can be used to represent the hydrophobic surface (water-hating), which generally gives better adhesion to the asphalt under water-exposed conditions, and thus results in higher TSR values. The chemical composition of CKD used in this study also contains a high amount of CaO (72.88%) which can explain the higher TSR values. However, it appeared that when using too much CKD in the mixes, it could adversely affect the moisture damage resistance of the mixes, which is not what had been expected.

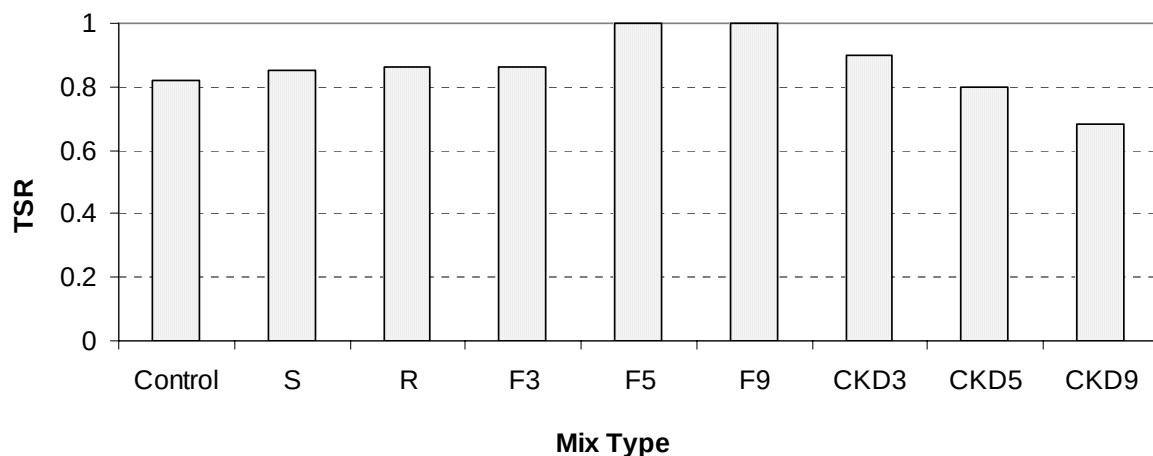


Figure 7 Tensile Strength Ratio (TSR) of all Mix Types

Resilient Modulus Test (M_r)

Figure 8 shows the comparison of M_r for all asphalt mixtures tested at 5°C, 25°C and 40°C. At 5°C, the M_r values of all mix types are not significantly different. At 25°C and 40°C, the M_r of S mix is slightly higher than the controlled mix, but the difference is not so significant. The M_r of CKD5 is higher than the controlled mix at 25°C and 40°C which can imply that CKD increases the stiffness of the asphalt mixture at intermediate and high

temperatures. On the other hand, the Mr of R and F5 mixes are significantly lower than the controlled mix which indicates a lower stiffness of the mix adding fly ash and using reclaimed concrete as aggregate. This result conveys the same trend as previously shown in lower TDI value or less resistance of reclaimed concrete mix to permanent deformation.

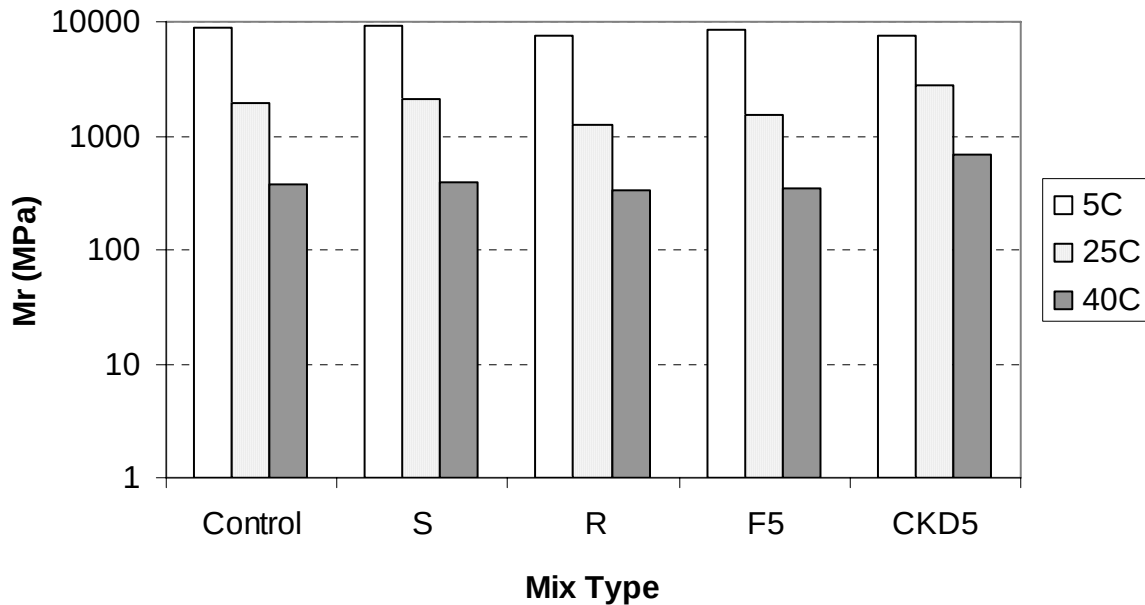


Figure 8 Resilient Modulus of all Mix Types

SUMMARY OF FINDINGS

The main findings from the study are summarized as follows:

- Aggregates with a higher percentage of absorption (Slag and Reclaimed Concrete) needs more asphalt for coating, and result in the requirement of higher optimum asphalt content.
- Use of slag and reclaimed concrete as aggregate was found to adversely affect the compactability of asphalt mixtures due to particle angularity.
- Slag can provide greater resistance to densification under traffic or greater resistance to permanent deformation under traffic load, while reclaimed concrete could result in less resistance to permanent deformation.
- Use of fly ash and CKD as additives or slag and reclaimed concrete as aggregates can improve the properties of asphalt mixture to resist moisture damage.

- CKD increases the stiffness of the asphalt mixture at intermediate and high temperatures, while fly ash and reclaimed concrete reduce the stiffness of the mix. There is no difference in resilient modulus between slag and controlled mixes.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was part of the research project, which is sponsored by the Thailand Research Fund (TRF). The authors gratefully acknowledge the support of Prof.Yordphol Tanaboriboon and Dr.Pichai Nimityongsakul for their valuable suggestions, technician staffs from AIT and Thailand Department of Highways for their support in the laboratory testing of this project.

REFERENCES

AASHTO T283, "Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage", American Association of State Highway and Transportation Official

ACPA. *Concrete Paving Technology: Recycling Concrete Pavement*, American Concrete Pavement Association, Skokie, Illinois, 1993.

Ali, N., Chan, J.S., Simms, S., Bushman R., and Bergan, A.T., "*Mechanistic Evaluation of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures*", Journal of Materials in Civil Engineering, 8 (1), 19-25, 1996.

ASTM C204, "Test Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus", American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02, West Conshohocken, Pennsylvania, 1994.

ASTM C618 – 08, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", ASTM International.

ASTM D 4123, "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures", ASTM International.

Bahia, H.U., Friemel, T.P., Peterson, P.A., Russell, J.S., and Poehnel, B., "*Optimization of Constructibility and Resistance to Traffic: A New Design Approach for HMA Using the Superpave Compactor*", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 67, pp. 189-232, 1998.

Collins, R. J. and Ciesielski, S.K., *Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction*, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199, Transportation Research Board, Washington, DC, 1994.

Collins, R. J. and Emery, J.J., "*Kiln Dust-Fly Ash Systems for Highway Bases and Subbases*", Federal Highway Administration, Report No. FHWA/RD-82/167, Washington, DC, September, 1983.

Hanks, A. J. and Magni, E.R., *The Use of Recovered Bituminous and Concrete Materials in Granular Base and Earth*, Report MI-137, Ontario Ministry of Transportation, Downsview, Ontario, 1989.

Kraszewski, L. and Emery, J., "*Use of Cement Kiln Dust as a Filler in Asphalt Mixes*", Proceedings, ORF/CANMET Symposium on Mineral Fillers, Ontario Research Foundation and Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Toronto, Canada, 1981.

McKerall, W.C., Ledbetter, W.B., and Teague, D.J., "*Analysis of Fly Ashes Produced in Texas*", Texas Transportation Institute, Research Report No. 240-1, Texas A&M University, College Station, Texas, 1982.

Meyers, J.F., Pichumani, R., and Kapples, B.S., "*Fly Ash. A Highway Construction Material*", Federal Highway Administration, Report No. FHWA-IP-76-16, Washington, DC, 1976.

Petrarca, R.W. and Galdiero, V.A., "*Summary of Testing of Recycled Crushed Concrete*", Transportation Research Record No. 989, pp. 19-26, Washington, DC, 1984.

Taha, R., Al-Rawas, A., Al-Harthy, A., and Qatan, A., "*Use of Cement Bypass Dust as Filler in Asphalt Concrete Mixtures*", Journal of Material in Civil Engineering, Vol.14, No.4, pp. 338-343, 2002.

Tam, V. and Tam, C.M., *Economic Comparison of Recycling Over-ordered Fresh Concrete: A Case Study Approach*, Resources, Conservation and Recycling, 52, 208-218, 2007.

U.S. Federal Highway Administration. "Fly Ash Facts for Highway Engineers".

Zimmer, F. V., "*Fly Ash as a Bituminous Filler*", Proceedings of the Second Ash Utilization Symposium, 1970.