

แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของหินปูนและตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมหยาบ: คุณสมบัติทางวิศวกรรม  
และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ASPHALT CONCRETES USING MIXTURE OF LIMESTONE AND STEEL SLAG AS  
AGGREGATES: ENGINEERING PROPERTIES AND COST-EFFECTIVENESS

เสาวรส หะลิตะ<sup>1</sup>

สุขสันต์ หอพิบูลสุข<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

*niks\_sut17@hotmail.com*

<sup>2</sup>ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

*suksun@g.sut.ac.th*

**บทคัดย่อ :** วัสดุมวลรวมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตส่วนใหญ่ที่ใช้ในประเทศไทยคือหินปูน แหล่งหินปูนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีน้อยและมีแนวโน้มลดลงและไม่เพียงพอต่อโครงการก่อสร้างถนน การประยุกต์ใช้ตะกรันเหล็กซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เป็นวัสดุแทนที่หินปูนสามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าวอีกทั้งยังช่วยลดปัญหาการกำจัดตะกรันเหล็ก ในสภาวะปัจจุบัน ปริมาณจราจรและน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นอย่างมากทำให้ถนนหลักหลายสายรับน้ำหนักกระทำซ้ำเกินกว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบ ส่งผลให้เกิดปัญหาหว่างล้อและการเสียดรูปอย่างถาวร บทความนี้ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของหินปูนและตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมหยาบ เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนและหินแกรนิตเป็นมวลรวมหยาบ ผลการศึกษาพบว่าการใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมหยาบในแอสฟัลต์คอนกรีตช่วยเพิ่มเสถียรภาพ โดยมีค่าสูงขึ้นตามการแทนที่หินปูนด้วยตะกรันเหล็ก และมีค่าสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตและแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูน สำหรับทั้งแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC60/70 และ PMA แอสฟัลต์คอนกรีตชนิด AC60/70 ที่ใช้หินปูนและตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมหยาบมีค่าเสถียรภาพเทียบเท่าแอสฟัลต์คอนกรีตชนิด PMA ผสมหินธรรมชาติ (หินปูนและแกรนิต) ผลทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่านอกจากการใช้แอสฟัลต์ที่มีคุณภาพสูงในผิวทางที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกสูงแล้ว การใช้ตะกรันเหล็กสามารถเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าการไหลใกล้เคียงกันโดยไม่แปรผันตามชนิดของแอสฟัลต์และมวลรวม ผลการวิเคราะห์ต้นทุนแสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการประยุกต์ใช้ตะกรันเหล็ก ดังนั้น การประยุกต์ใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมหยาบมีประโยชน์อย่างมากในด้านวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม

**ABSTRACT :** Limestone is generally used as aggregates in asphalt concrete in Thailand. Limestone in northeast Thailand is becoming increasingly scarce to source for road infrastructure projects. The reuse and recycling of industry by-products such as steel slag as a replacing material in limestone can reduce this problem and also reduce the disposal

of steel slag. Presently, the increase in traffic volume cause repeated loads exceeding the design capacity and consequently induces rutting and performance deformation. This paper investigates engineering properties and cost effectiveness of asphalt concretes using a mixture of limestone and steel slag as aggregates and compared with those of limestone asphalt concrete and granite asphalt concrete. Test results show that slag replacement improves the stability and the stability of limestone-slag asphalt concretes is higher than that of limestone asphalt concretes and granite asphalt concretes for both AC60/70 and PMA. A cost analysis shows that the replacement of limestone by slag is economical for compression applications such as for wearing/surface course. The limestone replacement in asphalt concrete is useful in term of engineering, economic and environmental perspectives. The limestone-slag asphalt concretes using AC60/70 as a binder has similar stability to the limestone asphalt concretes and granite asphalt concretes using PMA as a binder. This shows that besides high graded asphalt binder, the slag replacement is an alternative for heavy traffic pavement. The flow values of all asphalt concretes test are essentially the same, indicating that they are irrespective of asphalt binder and aggregate types. A cost analysis shows that the slag replacement is economical and hence it is useful in term of engineering, economic and environmental perspectives.

**KEYWORDS :** Rutting, Asphalt concrete, Limestone, Granite, Steel slag

## 1. บทนำ

การเกิดร่องล้อและการเสีรูปร่างถนนเป็นปัญหาหลักของถนนในประเทศไทย ปัจจุบันได้มีการแก้ไขปัญหาการเกิดร่องล้อของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหลายวิธี เช่น การเติมวัสดุผสมแทรก การเปลี่ยนขนาดคละที่ใหญ่ขึ้น รวมทั้งการเปลี่ยนชนิดของยางแอสฟัลต์คอนกรีต ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีความแข็งแรงของอนุภาคสูง และสามารถใช้เป็นมวลรวมหยาบในการปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตได้

อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมขั้นพื้นฐานที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศชาติ แต่ในขณะเดียวกัน อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กก็เป็นต้นเหตุของการเกิดขยะอุตสาหกรรม ซึ่งจะต้องมีการดำเนินการจัดการอย่างเหมาะสม เพื่อนำขยะอุตสาหกรรมหรือสิ่งเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ให้มากที่สุด เพื่อเป็นการลดต้นทุนอุตสาหกรรม ลดปริมาณการ

ก่อให้เกิดมลพิษแก่สังคม รวมทั้งเป็นการประหยัดทรัพยากรธรรมชาติของประเทศ หลายหน่วยงานจึงมีการนำตะกรันเหล็กมาประยุกต์ใช้ ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ การใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างชั้นพื้นทาง เป็นต้น

ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางเคมีที่สม่ำเสมอ และมีส่วนผสมทางเคมี คือ  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุที่มีความแกร่ง และมีรูปทรงที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้เป็นวัสดุผิวทาง

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมระหว่างหินปูนและตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมหยาบ อันได้แก่ เสถียรภาพ และการไหล และศึกษาอัตราส่วนต้นทุนการผลิตต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนและตะกรันเหล็กเป็นมวลรวม ผลการศึกษาทั้งด้านกำลังและต้นทุนของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนและตะกรันเป็นส่วนผสมจะนำมา

เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เฉพาะหินแกรนิต เป็นมวลรวม และแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เฉพาะหินปูน เป็นมวลรวม

## 2. ตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของหินปูนที่ได้จากโรงโม่หินพิศนา ชลบุรี อ.เมือง จ.ชลบุรี คุณสมบัติของหินแกรนิตที่ได้จากโรงโม่หินเทพศิลาแอกกรีเกต อ.เมือง จ.ชลบุรี และคุณสมบัติของตะกรันเหล็ก ที่ได้จากโรงโม่หินสยามสตีลมิลล์เซอร์วิส อ.บ้านหมอ จ.สระบุรี

**ตารางที่ 1** คุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย

การทดสอบ	ชนิดหิน		
	หินปูน	หินแกรนิต	ตะกรันเหล็ก
Los Angeles abrasion value, LAA (%)	22.90	19.70	17.10
Soundness (%)	1.60	1.70	0.60
Aggregate impact value, AIV (%)	13.60	18.20	13.90
Aggregate crushing value, ACV (%)	18.90	18.30	18.40
Polished stone value, PSV	45.80	50.50	50.60

วัสดุมวลรวมที่จะนำมาเป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตจะต้องเป็นวัสดุที่มีความคงทนต่อแรงกระแทกแรงบดอัด ต่อการแตกหักเป็นก้อนเล็ก มีคุณสมบัติในการต้านทานต่อการขัดสี และมีรูปร่างที่เป็นเหลี่ยมมุมจะขัดประสานกัน เพราะเมื่อบดอัดแล้วจะสามารถรับน้ำหนักได้ดี

จากการทดสอบ Soundness, Los Angeles abrasion, Aggregate impact, Aggregate crushing และ Polished stone ของวัสดุมวลรวมทั้งสามชนิด พบว่าตะกรันเหล็กเป็นวัสดุที่ทนทานต่อการสึกหรอมากที่สุด และสามารถรับน้ำหนักแบบกระแทกและบดอัดได้ดี และมีค่าความต้านทานการลื่นไถลที่สูง ซึ่งจัดเป็นวัสดุมวลรวมทางเลือกที่ดี เพราะตะกรันเหล็กเป็นกากขยะอุตสาหกรรม นอกจากประโยชน์ที่เกิดจากการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ และยังช่วยในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในส่วนของการทำลายตะกรัน

เหล็ก แล้วยังส่งผลให้ได้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความคงทน แข็งแรง และมีอายุใช้งานที่ยาวนานมากขึ้นอีกด้วย

การออกแบบก้อนตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะใช้วิธีการออกแบบโดยวิธี Marshall ซึ่งจะออกแบบการกระจายขนาดผลของมวลรวมเปรียบเทียบกับเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมทางหลวง ลักษณะการจัดเรียงตัวของขนาดผลมวลรวมในแต่ละ Mix Proportion มีลักษณะที่คล้ายกัน คือ มวลรวมที่มีขนาดผลที่ดี (Well Graded) ซึ่งเป็นหลักการของการผสมแบบ Marshall เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และเพิ่มความต้านทานต่อแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อมวลรวมแน่น (Dense Graded) อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะสัมผัสซึ่งกันและกัน และยึดเกาะกันแน่นประสานขัดเหลี่ยมมุมกัน กับอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อได้รับการบดอัดแล้วจะทำให้สามารถรับน้ำหนักได้ดีมากขึ้น ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนผสมของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้

**ตารางที่ 2** ตารางชนิดวัสดุมวลรวมชนิดแอสฟัลต์

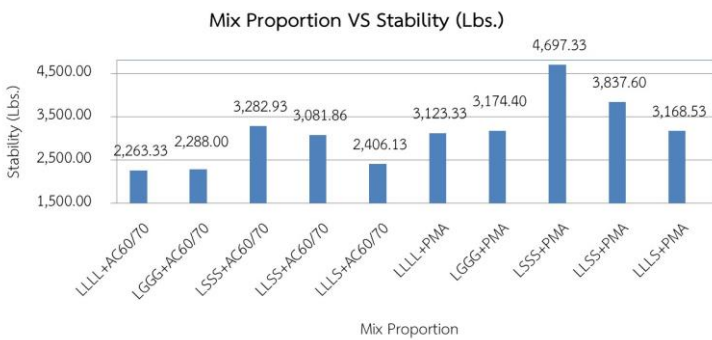
Mix Proportion	Filter	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4	Binder	Mix Proportion (by weight)
1	L	L	L	L	L	AC 60/70	5:37:20:25:13
2	L	L	G	G	G	AC 60/70	5:35:17:25:18
3	L	L	S	S	S	AC 60/70	5:35:22:16:22
4	L	L	L	S	S	AC 60/70	5:37:16:21:21
5	L	L	L	L	S	AC 60/70	5:37:17:23:18
6	L	L	L	L	L	PMA	5:37:20:25:13
7	L	L	G	G	G	PMA	5:35:17:25:18
8	L	L	S	S	S	PMA	5:35:22:16:22
9	L	L	L	S	S	PMA	5:37:16:21:21
10	L	L	L	L	S	PMA	5:37:17:23:18

หมายเหตุ: L คือหินปูน  
G คือหินแกรนิต  
S คือตะกรันเหล็ก

## 3. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

ผลการทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow) เป็นค่าที่บอกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตจะ

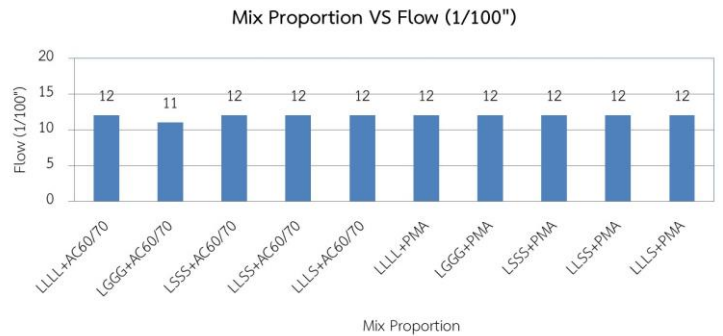
คงทนต่อการพังทลาย การเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีน้ำหนักมากระทำกับตัวอย่าง รวมถึงการขีดเกาะระหว่างวัสดุมวลรวม รูปที่ 1 และ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพ และการไหลกับสัดส่วนผสม ที่แอสฟัลต์ประเภท 60/70 และ PMA



**รูปที่ 1** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพ (Stability) กับสัดส่วนผสม

จากผลการทดสอบเสถียรภาพ จะเห็นได้ว่าแอสฟัลต์คอนกรีตทุกสัดส่วนผสมมีค่าเสถียรภาพผ่านมาตรฐานของกรมทางหลวง คือค่า Stability มากกว่า 1,800 ปอนด์ และแอสฟัลต์คอนกรีตชนิด PMA มีค่าเสถียรภาพที่สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตชนิด AC60/70 ทุกสัดส่วนผสมของมวลรวมหยาบ สัดส่วนที่ให้ค่าเสถียรภาพสูงสุดคือสัดส่วนที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมหยาบ (Bin 2 ถึง 4) และใช้หินปูนเป็น Filter (LSSS) สำหรับแอสฟัลต์ทั้งสองชนิด (AC60/60 และ PMA) โดยมีค่าเท่ากับ 3,282.93 ปอนด์ และ 4,697.33 ปอนด์ สำหรับแอสฟัลต์ชนิด AC60/70 และ PMA ตามลำดับ การใช้ตะกรันเหล็กในแอสฟัลต์ชนิด AC60/70 ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับแอสฟัลต์คอนกรีตได้อย่างชัดเจน ดังจะเห็นได้ว่าแอสฟัลต์คอนกรีต LSSS ชนิด AC60/70 มีค่าเสถียรภาพเทียบเท่าแอสฟัลต์คอนกรีตชนิด PMA ที่ใช้หินธรรมชาติ (หินปูนและแกรนิต) (ตัวอย่าง LLLL และ LGGG) ผลทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตแปรผันตามมวลรวมหยาบและชนิด

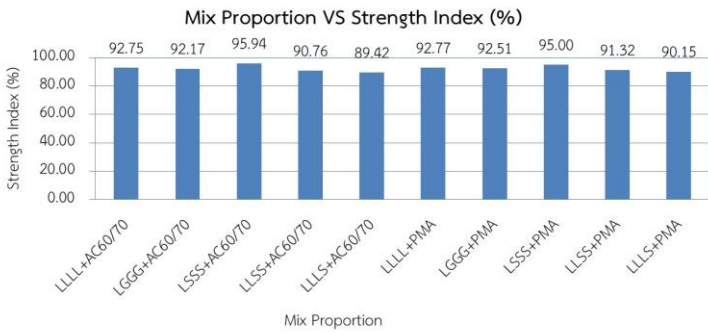
ของแอสฟัลต์ การใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมหยาบช่วยเพิ่มเสถียรภาพและลดต้นทุนจากการใช้แอสฟัลต์ที่มีคุณภาพสูง



**รูปที่ 2** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหล (Flow) กับสัดส่วนผสม

ผลการทดสอบการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าแอสฟัลต์คอนกรีตทุกสัดส่วนผสมมีค่าการไหลผ่านมาตรฐาน ซึ่งกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 8-16 แอสฟัลต์คอนกรีตทุกสัดส่วนมีค่าการไหลใกล้เคียงกันเท่ากับ 12 ยกเว้นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตชนิด AC60/70 ที่ใช้หินแกรนิตเป็นมวลรวมหยาบ (LGGG) ที่มีค่าการไหลเท่ากับ 11 ทั้งนี้เนื่องจากการไหลขึ้นอยู่กับ การออกแบบขนาดคละและการจัดเรียงตัวของมวลรวม (Gradation) และการบดทับก้อนตัวอย่าง

ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อน หลุดล่อน ของส่วนผสมเมื่อนำไปใช้ทำผิวทางอันมีสาเหตุมาจากสภาวะแวดล้อมที่วิกฤต และอุณหภูมิของผิวทางที่สูง ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีดัชนีความแข็งแรงสูง จะสามารถต้านทานการหลุดร่อนได้สูงกว่าส่วนผสมที่มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่ำ ผลการทดสอบดัชนีความแข็งแรงของวัสดุเชื่อมประสานชนิด AC60/70 และ PMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมที่แต่งต่างกัน ซึ่งมีผลการทดสอบดังรูปที่ 3



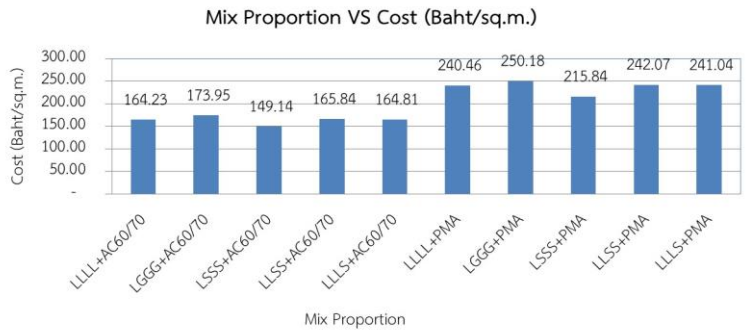
**รูปที่ 3** ดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) ของแอสฟัลต์คอนกรีต

รูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตทุกสัดส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยไม่แปรผันตามชนิดของมวลรวมหยาบและชนิดของแอสฟัลต์ และมีค่าเกินกว่าร้อยละ 90 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ระบุให้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 75 จะเห็นได้ว่าดัชนีกำลังมีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่าเสถียรภาพจะมีค่าต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากดัชนีกำลังเป็นค่าเสถียรภาพที่คำนวณเทียบกับค่าเสถียรภาพเริ่มต้น (ค่าเสถียรภาพของก้อนตัวอย่างที่แช่น้ำเกลือเทียบกับค่าเสถียรภาพของก้อนตัวอย่างที่ไม่แช่น้ำเกลือ)

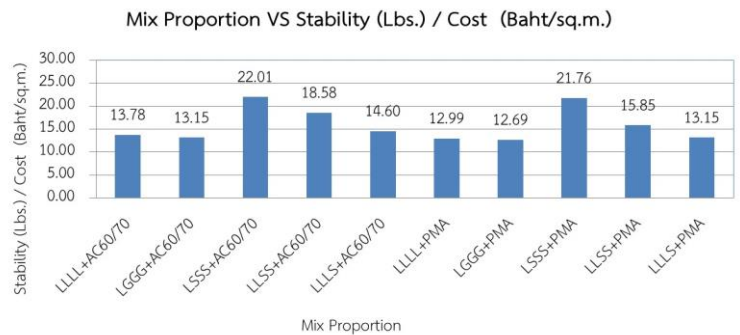
**4. ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์**

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนของแอสฟัลต์คอนกรีตและสัดส่วนผสม ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัดส่วนผสมที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA มีราคาที่สูงกว่าสัดส่วนผสมที่ใช้ AC60/70 และสัดส่วนผสมที่แทนที่ด้วยตะกรันเหล็กมีราคาต้นทุนที่ถูกลง คือเท่ากับ 149.14 ถึง 164.81 บาทต่อตารางเมตร สำหรับแอสฟัลต์ชนิด AC60/70 และเท่ากับ 215.84 ถึง 241.04 บาทต่อตารางเมตร สำหรับแอสฟัลต์ชนิด PMA สัดส่วนผสมที่ใช้หินแกรนิตมีราคาแพงที่สุด เท่ากับ 173.95 บาทต่อตารางเมตร สำหรับแอสฟัลต์ AC60/70 และเท่ากับ 250.18 บาทต่อตารางเมตร สำหรับแอสฟัลต์ชนิด PMA เพราะราคาต่อหน่วยของหินแกรนิต เท่ากับ 280 บาทต่อตัน แต่ราคาของหินปูน เท่ากับ 60-204 บาทต่อตัน และ

ตะกรันเหล็ก เท่ากับ 160-220 บาทต่อตัน ทั้งนี้ราคาค่าหินขึ้นอยู่กับขนาดของหินแต่ละชนิดด้วย



**รูปที่ 4** ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนของแอสฟัลต์คอนกรีตและสัดส่วนผสม



**รูปที่ 5** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเสถียรภาพต่อต้นทุนและสัดส่วนผสม

รูปที่ 5 แสดงอัตราส่วนเสถียรภาพต่อราคาสำหรับทุกสัดส่วนผสม จะพบว่าสัดส่วนผสมที่ใช้แอสฟัลต์ชนิด AC60/70 และแทนที่ด้วยตะกรันเหล็กใน Bin 2, 3, 4 มีค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อราคาที่สูงที่สุด คือ 22.01 ปอนด์ต่อบาทต่อตารางเมตร และสัดส่วนผสมที่ใช้แอสฟัลต์ชนิด PMA และแทนที่ด้วยตะกรันเหล็กใน Bin 2, 3, 4 มีค่า 21.76 ปอนด์ต่อบาทต่อตารางเมตร รูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าในการแทนที่หินปูนด้วยตะกรันเหล็กในแง่ของเสถียรภาพ

## 5. บทสรุป

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ของแอสฟัลต์คอนกรีตในงานวิจัยนี้ใช้มวลรวม 3 ชนิด คือ หินปูน หินแกรนิต และส่วนผสมของหินปูนและตะกรันเหล็ก ผลการศึกษาพบว่าค่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนมีค่าเสถียรภาพที่ต่ำสุด ซึ่งมีค่าเสถียรภาพไม่แตกต่างจากแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตมากนัก แต่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมของหินปูนและตะกรันเหล็กมีค่าเสถียรภาพที่สูงที่สุด สำหรับทั้งแอสฟัลต์ชนิด AC60/70 และ PMA ค่าการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกัน โดยไม่แปรผันตามชนิดมวลรวมหยาบและชนิดของแอสฟัลต์ ผลการวิเคราะห์ต้นทุนพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ชนิด PMA มีราคาที่สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ชนิด AC60/70 การแทนที่หินปูนด้วยตะกรันเหล็กมีผลให้ราคาต้นทุนถูกลงโดยค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อราคาแอสฟัลต์คอนกรีตที่แทนที่ด้วยตะกรันเหล็กมีค่าสูงสุด คือ 22.01 และ 21.76 ปอนด์ต่อบาทต่อตารางเมตร สำหรับ AC60/70 และ PMA ตามลำดับ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นมวลรวมหยาบมีค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อราคา คือ 13.78 และ 12.99 ปอนด์ต่อบาทต่อตารางเมตร สำหรับ AC60/70 และ PMA ตามลำดับ แต่สัดส่วนผสมที่ใช้หินแกรนิตมีราคาแพงที่สุด มีค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อราคาต่ำที่สุด คือ 13.15 และ 12.69 ปอนด์ต่อบาทต่อตารางเมตร สำหรับ AC60/70 และ PMA ตามลำดับ

ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุแทนที่ที่เหมาะสมเป็นวัสดุชั้นพื้นทาง เพราะมีราคาไม่สูงมาก และมีอัตราส่วนค่าเสถียรภาพต่อราคาที่สูง เมื่อเทียบกับหินแกรนิต และหินปูน การนำตะกรันเหล็กมาประยุกต์ใช้จะทำให้ได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความคงทน แข็งแรง รวมทั้งช่วยลดต้นทุนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งมีประโยชน์

อย่างมากในด้านวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักวิเคราะห์ และตรวจสอบกรมทางหลวง ที่ให้ความช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือ และขอขอบคุณบุคลากรสำนักวิเคราะห์ และตรวจสอบ กรมทางหลวง ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชยธันว์ พรหมสร, 2546. คุณสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม(Indirect Tensile Strength) และค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศ. รายงานฉบับที่ วพ. 204. สำนักวิจัยและพัฒนา งานทาง กรมทางหลวง
- [2] สิทธิโชค ลีมีงส์สวัสดิ์, 2543. การศึกษาความเหมาะสมในการใช้กรวดจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นวัสดุมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีต. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] Hass, et al., 1983. The Role of Additive in Asphalt Paving Technology, Proc. Association of Asphalt Paving Technologists.
- [4] Walker D. and Buncher M, 1999. Intersection Strategy. Asphalt Institute Lexington Kentucky.
- [5] White T.D., et al., 2002. Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements. Transportation Research Board. National Research Council. National Cooperative Highway Research Program. NCHRP Report 468. Washington. D.C.