



ประสิทธิภาพของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารผสมเพิ่ม TAFPACK-SUPER

PERFORMANCE OF POROUS ASPHALT PAVEMENT WITH TAFPACK-SUPER ADDITIVES

วรุฒ รัชมีกอบกุล¹ ทนงศักดิ์ อิ่มใจ² และถาวร ตะไต้แก้ว³

¹นายช่างโยธาชำนาญงาน, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

²อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

³วิศวกรโยธาปฏิบัติการ, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอผลการศึกษาประสิทธิภาพผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารผสมเพิ่ม *Tafpack-super* (TPS) เท่ากับ 12% โดยน้ำหนัก ผสมกับยาง AC 60-70 ที่สัดส่วน 4.5% ผลจากการทดสอบพบว่าสารผสม *Tafpack Super* ในยางแอสฟัลต์ AC 60-70 สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของยางแอสฟัลต์ คือ ค่า *Pen-value* ลดลง ค่า *Softening point-value* เพิ่มขึ้น และเพิ่มค่าความหนืด (*Viscosity*) และจากการทดสอบค่าความต้านทานการเสียดสีแบบบร็องลือ พบว่าผิวทางพอร์สแอสฟัลต์สามารถต้านทานการเสียดสีแบบพลาสติกจากค่า *Dynamic Stability* ซึ่งสูงกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานพอร์ส ประเทศญี่ปุ่น จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์บนแปลงทดสอบพบว่ามีคุณสมบัติช่วยระบายน้ำได้เป็นอย่างดี (*Coefficient of Permeability*) และเพิ่มค่าความต้านทานการลื่นไถล (*Skid resistance*) ให้กับผิวถนนมากขึ้น ผลการศึกษารูปได้ว่าผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารผสมเพิ่มประเภท TPS มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพดีขึ้นตรงกับผลการศึกษาที่ผ่านมาและผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงและมาตรฐานจากประเทศญี่ปุ่น

คำสำคัญ: พอร์สแอสฟัลต์, *Tafpack-super*, ค่าช่องว่างอากาศ, เสถียรภาพเชิงพลศาสตร์, การซึมผ่านของน้ำ, ความต้านทานการลื่นไถล

ABSTRACT

This article presents experimental studies on the performance of porous asphalt concrete mix with *Tafpack-super* (TPS) additives. The percentages of TPS used in this study were 12% of the total weight of bitumen AC 60-70 with the asphalt content of 4.5%. Experimental studies show that the use of *Tafpack-super* modified binders AC grade 60/70 seems to decrease the Penetration value, increase the Softening point and increase the viscosity. The Wheel Tracking test was also performed to determine the dynamic stability which was found to meet the Japanese Standard. Performance studies on the field tests also prove that the use of TPS additive in the porous mix is being effective in enhancing traffic safety in rainy weather, producing

Warut Rassameekobkul¹ Thanongsak Imjai² and Thaworn Takaikeaw³

¹Public Works Technician, Bureau of Materials Analysis and Inspection, Department of Highways, Ministry of Transport

²Lecturer, Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

³Public Works Engineer, Bureau of Materials Analysis and Inspection, Department of Highways, Ministry of Transport

good skid resistance, and excellent permeability. The study concludes that the use of TPS additive in porous asphalt mix could give the better performance of porous mix, in line with previous research and meets the Department of Highway (Thailand) and the Japanese Standard.

KEYWORDS: Porous asphalt, Tackpack-super, Air void, Dynamic stability, Permeability, Skid resistance

1. บทนำ

ในอดีตการก่อสร้างถนนแบบยึดหยุ่นของกรมทางหลวงแผ่นดินในประเทศไทย ใช้ยางแอสฟัลต์ประเภท Hot Mix Asphalt (HMA) ซึ่งทั่วไปมีค่า Penetration Grade (AC 60/70) และในปัจจุบันมีการปรับปรุงคุณภาพวัสดุแอสฟัลต์ (HMA) โดยการผสมวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เรียกว่า Polymer Modified Asphalt (PMA) ทำให้ยางแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณภาพนี้มีคุณสมบัติการรับกำลังและเสถียรภาพเพิ่มขึ้น [1,2] อย่างไรก็ตาม ส่วนผสมแอสฟัลต์ที่ใช้โครงสร้างมวลรวมหินแบบทั่วไป (Dense Grade) มักจะมีคุณสมบัติที่บดน้ำซึ่งเป็นข้อจำกัด เพราะในบางพื้นที่บางครั้งมีความจำเป็นต้องระบายน้ำอย่างเร่งด่วน เช่นผิวทางบนสะพาน พื้นที่จอดรถ การใช้วัสดุผิวทางประเภทพอร์สแอสฟัลต์ (Porous Asphalt) ซึ่งมีคุณสมบัติให้น้ำผ่านได้ จึงเป็นส่วนผสมทางเลือกในงานประเภทดังกล่าว [3-7]

ในปี ค.ศ. 1990 ทวีปยุโรปได้มีการศึกษาวิจัยนำวัสดุผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ (Porous Asphalt, PA) หรือ Open Graded Friction Course (OGFC) มาใช้กันอย่างแพร่หลาย [4,8,9] โดยจากการศึกษาวิจัยพบว่าถนนที่ก่อสร้างแบบพอร์สแอสฟัลต์นั้นสามารถระบายน้ำได้ดี เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง มีปริมาณช่องว่างอากาศในส่วนผสมที่มาก จึงทำให้การระบายน้ำเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว และลดปัญหาน้ำท่วมขังบริเวณผิวทาง เนื่องจากมวลน้ำสามารถซึมแทรกผ่านวัสดุผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ช่วยเพิ่มสมรรถนะในการขับขี่รถยนต์ รถไม่ลื่นไถลขณะวิ่งด้วยความเร็วหรือเบรกกะทันหัน [6,7,10,11] ในปัจจุบันที่กรมทางหลวงแผ่นดินและกระทรวงคมนาคมมีนโยบาย ลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุและอำนวยความสะดวกในการเดินทางกับผู้ใช้ทาง การออกแบบถนนแบบยึดหยุ่นโดยใช้วัสดุผิวทางพอร์สแอสฟัลต์สำหรับบริเวณที่ต้องการระบายน้ำอย่างรวดเร็ว เช่น สะพาน หรือพื้นที่จอดรถ จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในงานก่อสร้างถนนแบบยึดหยุ่นในประเทศไทย ซึ่งวัสดุมวลรวมที่ใช้อยู่ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้วัสดุมวลรวมหินปูน (Limestone) และหินแกรนิต (Granite) ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด Polymer modified asphalt (PMA) [1,2,7]

จากการศึกษาคุณสมบัติของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ผสมยาง PMA ออกแบบตามมาตรฐานพอร์สแอสฟัลต์กรมทางหลวงแผ่นดินยังมีค่า Penetration Grade อยู่ในช่วง AC 60-70 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบก่อสร้างถนนโดยทั่วไป [10] แต่ในการก่อสร้างผิวทางสำหรับถนนในเมืองหรือทางหลวงพิเศษ ควรต้องพิจารณาเพิ่มเสถียรภาพการใช้งานให้มีประสิทธิภาพที่ดีตลอดอายุ เช่น ความต้านทานการเกิดร่องล้อ (Rutting resistance) ความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance) นอกเหนือจากคุณสมบัติด้านการระบายน้ำ ดังนั้นการวิจัยนี้จึงได้พัฒนาออกแบบส่วนผสมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ด้วยสารผสมเพิ่ม Tackpack-Super (TPS) ซึ่งเป็นวัสดุประเภทโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลที่สูง จัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomers, TPEs) และเมื่อนำมาผสมกับยางแอสฟัลต์แล้วจะช่วยเพิ่มกำลังการยึดเกาะที่อุณหภูมิสูงและเพิ่มความยึดหยุ่นที่

อุณหภูมิต่ำ ทั้งยังเพิ่มความแข็งแรงให้กับยางแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิปกติ [12,13] สอดคล้องกับผลการวิจัยโดย Liu et al. [14] ที่พบว่าเมื่อนำวัสดุ TPS มาผสมกับยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 จะเพิ่มคุณสมบัติความหนืด (Viscosity) มีค่าความแข็งแรงของยางแอสฟัลต์มากขึ้น และยังเพิ่มคุณสมบัติต้านทานการเกิดร่องล้อ ซึ่งปริมาณของวัสดุ TPS ที่นำมาผสมกับยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 จะอยู่ระหว่างที่ 8-16% โดยคณะวิจัยได้ทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด (Optimum TPS content) และพบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมของ TPS เท่ากับ 12% มีค่าความแข็งแรงของยางเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการออกแบบส่วนผสมมากที่สุด [16]

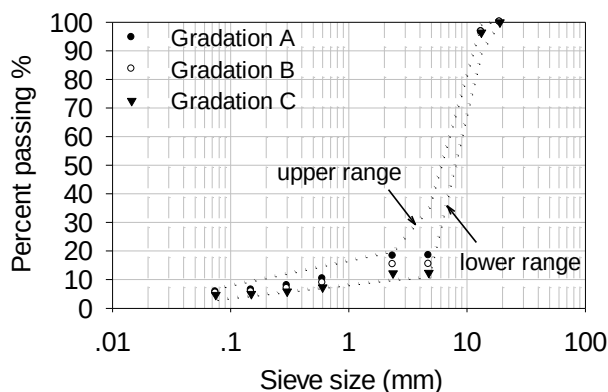
เนื่องจากมาตรฐานพอร์สแอสฟัลต์และมาตรฐานวิธีการทดลองกรมทางหลวงแผ่นดิน [6,10] ยังไม่ครอบคลุมรายละเอียดการออกแบบที่มากเพียงพอ ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้นำมาตรฐานพอร์สแอสฟัลต์ประเทศไทย [15] มาประกอบการศึกษาด้วย เหตุผลเพราะประเทศไทยได้ศึกษาเรื่องพอร์สแอสฟัลต์มาเป็นเวลานานจนเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง โดยงานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย TPS พร้อมทั้งก่อสร้างผิวทางพอร์สแอสฟัลต์บนแปลงทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของผิวทางตลอดอายุการใช้งาน

2. ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

2.1 การออกแบบส่วนผสมผิวทางพอร์สแอสฟัลต์และทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการ

การออกแบบส่วนผสมผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ผสม TPS เป็นโครงการวิจัยของกรมทางหลวงแผ่นดินร่วมกับผู้เชี่ยวชาญจากประเทศไทย [16] มีแนวทางการออกแบบตามมาตรฐานพอร์สแอสฟัลต์ของกรมทางหลวงแผ่นดิน [10] และข้อแนะนำทางเทคนิคซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐานพอร์สแอสฟัลต์ประเทศไทย [15] ดำเนินการแบ่งโครงสร้างสัดส่วนขนาดกะของมวลรวมหินออกเป็น 3 ส่วนผสมดังแสดงในรูปที่ (1-ก) และ (รูปที่ 1-ข) นำมาผสมกับยางแอสฟัลต์ (AC 60/70 ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วย TPS) โดย Trail ยางแอสฟัลต์ที่ปริมาณต่างๆ ในที่นี้ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดใส่ปริมาณยางแอสฟัลต์เท่ากับ 4.5% โดยน้ำหนัก และสัดส่วน TPS ที่ใช้ผสมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติยางแอสฟัลต์ (รูปที่ 1-ค) ใช้ที่ปริมาณ 12.0% อ้างอิงจากผลการศึกษาของผู้วิจัย [16] ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Liu et al. [14] ซึ่งสัดส่วน TPS ในยางแอสฟัลต์ที่ได้จากการทดสอบจะนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Subagio et al. [13] ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน TPS และค่า Pen-value, Softening point-value และ Viscosity value ของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์

ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการ จะแบ่งตัวอย่างเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม 1: เตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบ จำนวน 5 ตัวอย่าง สำหรับทดสอบ Density, Air void, Connected Air void, Stability, Flow และ Cantabro Loss test ที่ห้องปฏิบัติการของกรมทางหลวง และกลุ่ม 2: แผ่นตัวอย่างทดสอบขนาด 305x400x50 มม. จำนวน 2 ตัวอย่าง (รูปที่ 1-ง) ทดสอบ Wheel Tracking test เพื่อดูค่าเสถียรภาพเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Stability) ที่ห้องปฏิบัติการ Engineering Research Laboratory, Nagoya-city, japan ประเทศไทย



(ก) ขนาดกะของมวลรวมหินทั้ง 3 ส่วนผสม



(ข) การเตรียมตัวอย่างส่วนผสมทั้ง 3 ส่วนผสม

(ค)



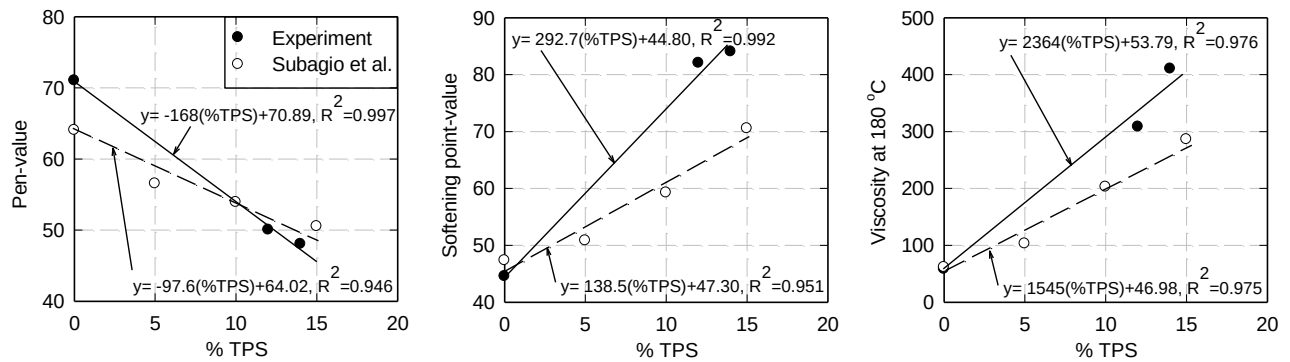
(ง) สารผสมเพิ่ม Tapack-Super (TPS)



(จ) แผ่นตัวอย่างทดสอบ 305x400 มม.

รูปที่ 1 ขนาดกะของมวลรวมหินและสารผสมเพิ่ม TPS ในตัวอย่างพอร์สแอสฟัลต์สำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 2 แสดงอิทธิพลของสัดส่วนของ TPS ในยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีผลต่อค่า Pen-value, Softening point-value และ Viscosity value โดยการศึกษาวิจัยได้ทดสอบยางแอสฟัลต์ AC 60/70 ที่ใส่สารผสมเพิ่ม TPS ที่อัตราส่วน 0, 12 และ 14% ตามลำดับ และเปรียบเทียบจากผลจากงานวิจัยของ Subagio et al. [13] ที่สัดส่วน TPS = 0, 5, 10 และ 15% ผลจากการศึกษาเปรียบเทียบผลการทดสอบ มีความสอดคล้องกันคือเมื่อผสม TPS ในยางแอสฟัลต์ AC 60/70 สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของยางแอสฟัลต์ให้ดีขึ้น คือทำให้ค่า Pen-value ลดลง, ค่า Softening point-value เพิ่มขึ้น และเพิ่มค่าความหนืด ส่งผลให้ส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้ยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติโดย TPS มีเสถียรภาพการรับกำลัง (i.e. Marshall stability) และมีความคงทน (Durable) เพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ของตัวแปรแบบเชิงเส้น ดังสมการแสดงในรูปที่ 2

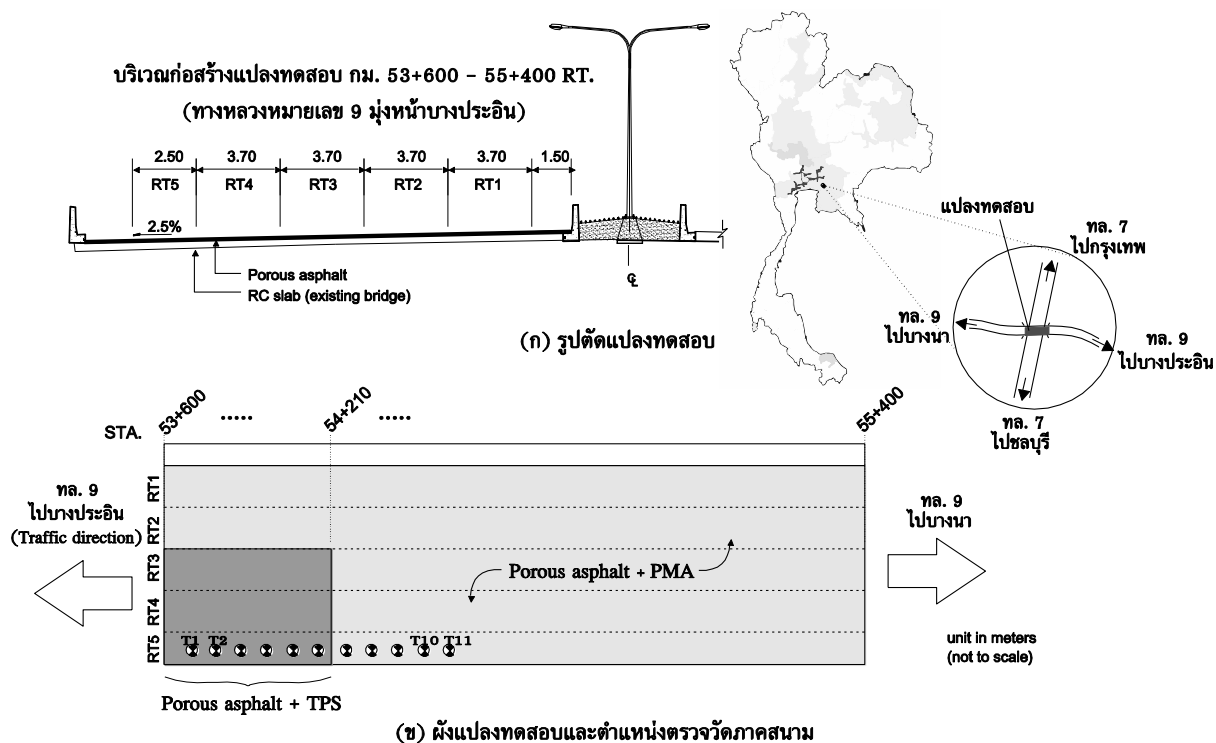


รูปที่ 2 อิทธิพลของส่วนผสม TPS และค่า Pen-value, Softening point-value และ Viscosity value เปรียบเทียบจากการทดสอบ และผลจากงานวิจัยของ Subagio et al. [13]

2.2 การทดสอบประสิทธิภาพในภาคสนาม

ในระยะที่ 2 การก่อสร้างและทดสอบประสิทธิภาพของפורสแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงโดยการผสมวัสดุ TPS ร่วมกับกรมทางหลวง เริ่มก่อสร้างและทดสอบระหว่างวันที่ 29 กันยายน ถึง 27 ธันวาคม 2558 บนทางหลวงพิเศษ หมายเลข 9 ตอน คลองพระยาสุเรนทร์ – พระประแดง ระหว่าง กม.53+600-กม.55+400 Left Traffic (LT), Right Traffic (RT) (รูปที่ 3) มีปริมาณการจราจรเฉลี่ย (Daily Traffic Volume, DTV) เท่ากับ 154,076 คัน/วัน [17] โดยทำการก่อสร้างผิวทางפורสแอสฟัลต์หนา 50 มม. ประกอบด้วยผิวทางפורสแอสฟัลต์ด้วยกัน 2 ชนิด คือผิวทางפורสแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารผสมเพิ่ม Taftack-Super (Porous + TPS) และפורสแอสฟัลต์ตามมาตรฐานกรมทางหลวง (Porous + PMA) บนพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 250 มม. วางอยู่บนคานคอนกรีตอัดแรง (I-girder) มีรายละเอียดส่วนผสมที่ออกแบบโดยผู้วิจัย [16] ภาพตัดแปลงทดสอบแสดงในรูปที่ (3-ข) ซึ่งส่วนผสมפורสแอสฟัลต์เมื่อนำไปก่อสร้างยังภาคสนามจะใช้ก่อสร้างเป็นชั้นผิวทางอย่างเดียวหรือทั้งชั้นผิวทางและชั้น Binder Course โดยต้องมีชั้นงานที่มีคุณสมบัติกั้นน้ำ (Impervious Layer) รองอยู่ใต้ชั้นפורสแอสฟัลต์นี้อีกหนึ่งชั้นเพื่อทำหน้าที่ป้องกันน้ำลงสู่ชั้น Base Course กำหนดโดยมาตรฐานประเทศญี่ปุ่น [15]

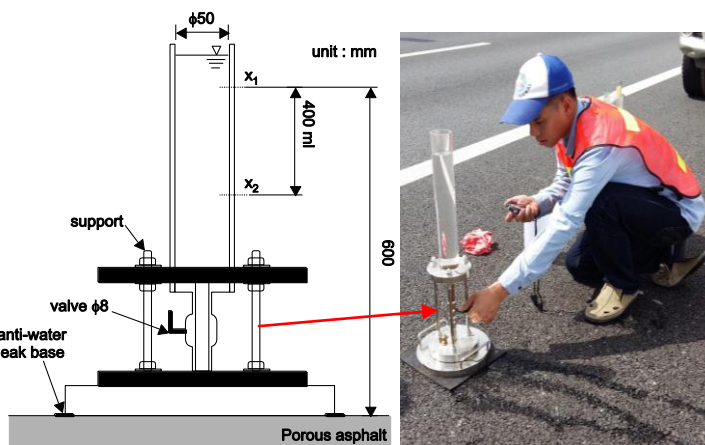
การทดสอบประสิทธิภาพภาคสนามจะทำการตรวจสอบและประเมินคุณสมบัติส่วนผสมפורสแอสฟัลต์ที่ได้นำไปก่อสร้างจริงหลังจากออกแบบส่วนผสม โดยในระยะที่ 1 ออกแบบในห้องปฏิบัติการ และในระยะที่ 2 ประกอบไปด้วยการทดสอบคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของน้ำ (Permeability Test) ดังแสดงในรูปที่ 4 ตามการศึกษาของ Aman et al. [18] และการทดสอบความต้านทานการลื่นไถลของผิวถนน ตามมาตรฐาน ASTM E 2340-11 [19]



รูปที่ 3 แปลงทดสอบในโครงการ (ก) รูปตัดขวางแปลงทดสอบ และ (ข) ผังก่อสร้างแปลงทดสอบและตำแหน่งตรวจวัด



(ก) การก่อสร้างผิวทางพอร์สแอสฟัลต์



(ข) การทดสอบ Permeability test ภายหลังการก่อสร้าง

รูปที่ 4 การก่อสร้างผิวทางพอร์สแอสฟัลต์และการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ (Permeability test)

การทดสอบคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของน้ำ คือการตรวจสอบอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านอนุภาคของช่องว่างในส่วนผสมแอสฟัลต์ ใช้หลักของแรงโน้มถ่วงตามสมการของ Darcy's Law ทดสอบตามการศึกษาของ Aman et al. [18] โดยผลการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ จะนำมาใช้ศึกษาประสิทธิภาพของผิวทางและใช้เป็นข้อมูลการบำรุงรักษาผิวทางให้มีความปลอดภัย

ตลอดอายุการใช้งาน ในการทดสอบนี้ใช้เครื่องมือทดสอบตามมาตรฐานพอร์สแอสฟัลต์ประเทศญี่ปุ่นกำหนด [15] ดังแสดงในรูปที่ (4-ข)

การทดสอบความต้านทานการลื่นไถลหรือค่าความเสียดทานของผิวทาง เป็นการทดสอบเพื่อตรวจวัดค่าความฝืดของผิวถนนจากลักษณะพื้นผิวหน้าซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะถนนที่ก่อสร้างแล้วเสร็จเมื่ออยู่ในสภาวะที่เปียกน้ำ จำเป็นต้องมีค่าความเสียดทานที่มากเพียงพอเพื่อความปลอดภัยของประชาชนผู้ใช้รถสัญจรไปมา การศึกษานี้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 2340-11 [19] โดยใช้รถยนต์พ่วงล้อลากที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเสียดทาน ในขณะที่ทำการทดสอบจะปล่อยให้รถวิ่งจนถึงความเร็วที่ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยกำหนดแรงที่กระทำลงบนล้อทดสอบในแนวตั้งและปล่อยน้ำที่เก็บไว้ในรถลงสู่ผิวถนนเพื่อให้ล้อสัมผัสกับพื้นผิวในสภาวะที่เปียก และทำการเบรกล้อพ่วงพร้อมทั้งแปลงค่าแรงดึงและโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นประมวลผลออกมาเป็นค่าความเสียดทาน ทำการประมวลผลค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์แสดงผลออกมาในรูปค่า Friction Coefficient (μ) ในการทดสอบนี้ใช้เครื่องมือทดสอบความเสียดทานผิวทางจราจรของกรมทางหลวงแบบต่อเนื่องชนิด Fix-Slip Friction Tester รุ่น ASET T-10 [11]

3. ผลการศึกษา

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพอร์สแอสฟัลต์ในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบในห้องปฏิบัติการได้เตรียมตัวอย่างเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 คือ ก้อนตัวอย่างที่เตรียมโดยวิธีมาร์แชล (Marshall Method) จำนวน 5 ตัวอย่าง และกลุ่ม 2 คือแผ่นตัวอย่างทดสอบ จำนวน 2 ตัวอย่าง ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1

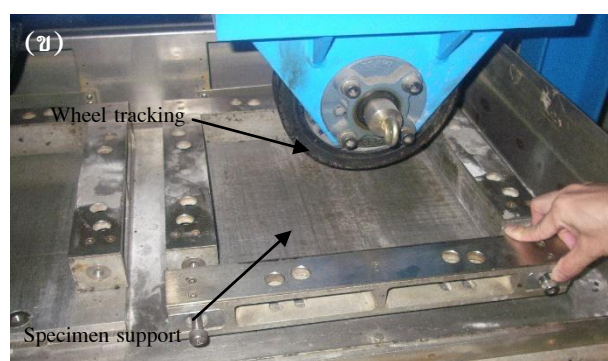
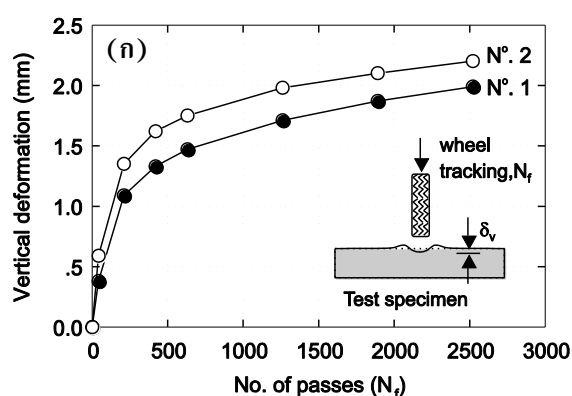
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบตัวอย่างพอร์สแอสฟัลต์ในห้องปฏิบัติการ

Physical properties	Test values	Test method/Reference
^a Asphalt Content (%)	4.5	JPS Guideline [15]
^a Maximum density (g/cm ³)	2.541	ASTM D-2041 [20]
^a Density (g/cm ³)	2.049	ASTM D-1559 [10]
^a Air Void (%)	20.1 (>20)	ASTM D-1559 [10]
^a Connected Air Void (%)	15.9 (>13.0)	JPS Guideline [15]
^a Marshall Stability(kN)	4.28 (>3.43)	ASTM D-1559 [10]
^a Flow Value (1/100 cm)	21 (>20)	ASTM D-1559 [10]
^a Cantabro Loss At 20 °C (%)	6.5 (<20)	JPS Guideline [15]
^b Dynamic Stability (pass/mm)	5775 (>3000)	JPS Guideline [15]

หมายเหตุ ^aได้จากการทดสอบตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. สูง 65 มม. ^bได้จากการทดสอบแผ่นตัวอย่างขนาด 305x400 มม.หนา 50 มม. และค่าแสดงในวงเล็บ Test values คือค่าที่กำหนดใน JPS standard [15]

3.2 ผลการทดสอบการเสียรูปแบบร่องล้อในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 5 แสดงการทดสอบ Wheel Tracking Test ในห้องปฏิบัติการเพื่อดูค่าเสถียรภาพเชิงพลศาสตร์ที่แสดงให้เห็นค่าการเกิดร่องล้อบนแผ่นตัวอย่างทดสอบ โดยนำจำนวนรอบ (N_f) ที่กระทำบนแผ่นตัวอย่าง และค่าการเสียรูป (Vertical deformation) ที่บันทึกจากคอมพิวเตอร์นำมาคำนวณค่าเสถียรภาพเชิงพลศาสตร์ จากผลทดสอบค่าการเสียรูปมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.05 มม. ที่จำนวนรอบ $N_f = 2500$ รอบ และพบว่าค่าเสถียรภาพเชิงพลศาสตร์มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5775 ซึ่งมากกว่า 3000 ตามที่กำหนดในมาตรฐานפורัสแอสฟัลต์ประเทศญี่ปุ่น จึงสรุปได้ว่าผิวทางפורัสแอสฟัลต์ปรับปรุงส่วนผสมด้วย TPS โดยมีสัดส่วน 12% สามารถต้านทานการเสียรูปแบบร่องล้อได้



รูปที่ 5 ผลการทดสอบการเสียรูปแบบร่องล้อ (ก) และชุดเครื่องทดสอบ Wheel tracking test (ข)

3.3 ผลการประสิทธิภาพทดสอบภาคสนาม

3.3.1 การทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Permeability Test)

ในการศึกษานี้กำหนดจุดทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ที่ กม. 53+700 – 54+700 ที่ช่องจราจร RT5 ทำการทดสอบทุกระยะ 100 ม. โดยดำเนินการทดสอบห่างจากขอบทาง 1.50 ม. เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of Permeability) โดยการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ช่วงด้วยกัน ช่วงแรก คือ แปลงทดสอบ Porous asphalt + TPS (T1-T6) และ ช่วงที่สอง คือ แปลงทดสอบ Porous asphalt + PMA (T7-T11) จับเวลาช่วงที่ระดับน้ำลดลง ตั้งแต่ระดับ x_1 ถึงระดับ x_2 (t_w) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Permeability test result)

Test results	Test section (Porous asphalt + TPS)						Test section (Porous asphalt + PMA)				
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
t_w (sec)	2.60	2.57	2.56	2.58	2.60	2.61	2.56	2.48	2.52	2.42	2.40
K ($\times 10^{-5}$)	11900	12100	12100	12000	11900	11900	12100	12500	12300	12800	12900

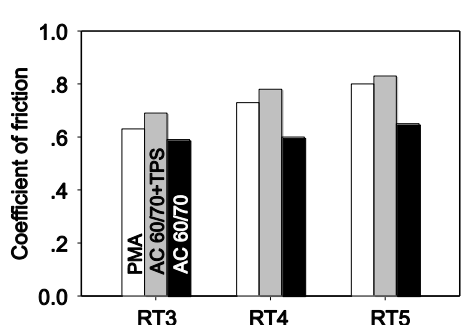
หมายเหตุ t_w คือ เวลาในช่วงที่ระดับน้ำลดลง ตั้งแต่ระดับ x_1 ถึงระดับ x_2 (รูปที่ 3-ข) และ K คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of Permeability) มีหน่วยเป็น ซม./วินาที ของแต่ละจุดทดสอบ T1,...,T11 (รูปที่ 3-ข)

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ แปลงทดสอบ Porous asphalt + TPS มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ (11983×10^{-5}) ซม./วินาที และแปลงทดสอบ Porous asphalt + PMA มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ (12520×10^{-5}) ซม./วินาที จากการเปรียบเทียบพบว่าแปลงทดสอบ Porous asphalt + PMA มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเฉลี่ยมากกว่าแปลงทดสอบ Porous asphalt + TPS ประมาณ 4.5% อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของผิวทางประเภท Porous asphalt + TPS และ Porous asphalt + PMA ทั้ง 2 แปลง ผ่านตามที่ Aman et al. [18] ได้ศึกษาและกำหนดไว้ (11600×10^{-5}) ซม./วินาที แสดงให้เห็นว่าผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงส่วนผสมด้วย TPS มีคุณสมบัติการระบายน้ำที่ดี $(>11600 \times 10^{-5})$ ซม./วินาที และจากการสังเกตสภาพพื้นผิวที่ภาคสนามทั้งสองประเภท พบว่าสภาพผิวทางยังมีความสะอาดไม่มีฝุ่นละอองวัสดุไม่พึงประสงค์มาอุดตัน เมื่อเปรียบเทียบการศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ผสม TPS (55 USD/ตัน) สามารถนำมาใช้เป็นทางเลือกในการก่อสร้างผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ โดยมีราคาลดต่ำกว่าผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ผสม PMA (60 USD/ตัน) [16]

3.3.2 การทดสอบความต้านทานการลื่นไถล

ในการศึกษานี้กำหนดจุดตรวจวัดที่ กม. 53+200 – 55+400 โดยทดสอบทั้งหมด 3 ช่องจราจร (RT3, RT4, RT5) ความยาวช่วงละ 2.2 กม. ซึ่งผลการทดสอบมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเฉลี่ย (μ_{avg}) อยู่ที่ 0.61, 0.77 และ 0.72 สำหรับ AC 60/70, AC 60/70+TPS และ PMA โดยผลการทดสอบในแต่ละช่องจราจรแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบค่าความเสียดทานผิวทางพอร์สแอสฟัลต์

ช่องจราจร ทดสอบ	ช่วงระยะทดสอบ Station No.	μ	Type of Pavement	ผลการทดสอบความฝืดโดยเครื่องมือ Fix-slip friction test
RT3 (L=2.2 km)	54+210 - 55+400	0.63	PMA	
	54+600 - 54+210	0.69	AC 60/70+TPS	
	53+200 - 53+600	0.59	AC 60/70	
RT4 (L=2.2 km)	54+210 - 55+400	0.73	PMA	
	54+600 - 54+210	0.78	AC 60/70+TPS	
	53+200 - 53+600	0.60	AC 60/70	
RT5 (L=2.2 km)	54+210 - 55+400	0.80	PMA	
	54+600 - 54+210	0.83	AC 60/70+TPS	
	53+200 - 53+600	0.65	AC 60/70	

จากข้อมูลการสำรวจผิวทางประเภท AC เกรด 60/70 ซึ่งมีโครงสร้างมวลรวมหินแบบทั่วไป (Dense Grade ทั้งหมดจำนวน 15 สายทาง ในประเทศไทยโดยกรมทางหลวงแผ่นดิน [11] พบว่าปัจจุบันค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเท่ากับ 0.30

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์แปลงทดสอบ AC 60/70+ TPS (ที่ห้องจราจร RT5) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.83 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ผสม TPS สามารถเพิ่มค่าความต้านทานการลื่นไถลได้ถึงประมาณ 176.7% แสดงให้เห็นว่าผิวทางพอร์สแอสฟัลต์มีประสิทธิภาพในการเพิ่มค่าความต้านทานการลื่นไถลตามทฤษฎีที่ได้ศึกษามา

4. สรุปผลการศึกษา

การออกแบบส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์ในกรมทางหลวงแผ่นดินและในห้องปฏิบัติการประเทศญี่ปุ่นรวมถึงการทดสอบประสิทธิภาพผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ที่ภาคสนาม สรุปผลการทดสอบได้ ดังนี้

1. การใช้วัสดุโพลิเมอร์ประเภท Taftack Super ในยางแอสฟัลต์ AC 60/70 สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของยางแอสฟัลต์ คือ ค่า Pen-value ลดลง, ค่า Softening point-value เพิ่มขึ้น และเพิ่มค่าความหนืด ซึ่งผลดังกล่าวทำให้ส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์มีเสถียรภาพการรับกำลัง (i.e. Marshall stability) และคงทนเพิ่มขึ้น
2. แอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติโดยใช้วัสดุโพลิเมอร์ประเภท Taftack Super มีค่าความต้านทานการขัดสี (Cantabro loss value) เป็นไปตามที่มาตรฐานพอร์สแอสฟัลต์ประเทศญี่ปุ่นกำหนด
3. ผลจากการทดสอบหาปริมาณช่องว่างอากาศ (Air Void) ในส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์ มีค่าเฉลี่ย 20% ซึ่งผ่านตามมาตรฐานพอร์สแอสฟัลต์ประเทศญี่ปุ่น
4. จากการทดสอบค่าเสถียรภาพเชิงพลศาสตร์มีค่าเท่ากับ 5775 ซึ่งมากกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานพอร์สแอสฟัลต์ประเทศญี่ปุ่น จึงแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์ในการศึกษานี้สามารถต้านทานการเสียรูปแบบร่องล้อได้
5. จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของผิวทางจากส่วนผสมทั้งสองประเภท พอร์สแอสฟัลต์ผสมกับ TPS และ PMA บนแปลงทดสอบ พบว่าพอร์สแอสฟัลต์ทั้งสองประเภทมีคุณสมบัติช่วยระบายน้ำได้เป็นอย่างดี (High Permeability) และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Skid resistance) สูงกว่าค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผิวทางประเภท AC เกรด 60/70 จากการสำรวจของกรมทางหลวงแผ่นดิน ในประเทศไทย
6. เปรียบเทียบผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ที่ผสมกับ TPS และ PMA บนแปลงทดสอบ พบว่าผิวทางประเภทพอร์สแอสฟัลต์ผสม TPS มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับผิวทางประเภทพอร์สแอสฟัลต์ผสม PMA ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผิวทางประเภทพอร์สแอสฟัลต์ผสม TPS สามารถพิจารณาเป็นทางเลือกในการนำมาใช้สำหรับถนนในประเทศไทยได้

5. การศึกษาตรวจวัดต่อเนื่องในอนาคต

แผนการศึกษาวิจัยในโครงการประกอบไปด้วย 2 ระยะ คือทดสอบประสิทธิภาพของผิวทางในช่วง 1 ปีแรกหลังจากก่อสร้างแล้วเสร็จโดยจะเห็นได้ว่าในช่วง 1 ปีแรกหลังการก่อสร้างผิวทางพอร์สแอสฟัลต์บนแปลงทดสอบ พบว่าคุณสมบัติการซึมผ่านของน้ำเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ศึกษามาและค่าความต้านทานการลื่นไถลมีค่าผ่านมาตรฐานกรมทางหลวงแผ่นดิน ในการศึกษาต่อเนื่องผู้วิจัยจะดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพภาคสนามระยะยาวในช่วง 5-10 ปี เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบส่วนผสมผิวทางพอร์สแอสฟัลต์ที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ในงานของกรมทางหลวงแผ่นดินต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากกรมทางหลวงในด้านเครื่องมือและสถานที่ก่อสร้างแปลงทดสอบ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.มนตรี เดชาสกุลสม (ผู้อำนวยการสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ) นายพรหมมา เทพศรีหา (ผู้อำนวยการส่วนวิเคราะห์และตรวจสอบผิวทางแอสฟัลต์) นายกิตติชัย ศรีโยธา (วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ) และ ดร.ไชยวัฒน์ ณ เชียงใหม่ (วิศวกรโยธาปฏิบัติการ) กรมทางหลวง สำหรับข้อมูลผลการทดสอบในงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Anantachaipong, N. *et al.* A Comparison of Resilient Modulus of Asphalt Mixtures Using Polymer Modified Asphalt Binder with Conventional Asphalt Cement Binder Grad Ac 60/70 and Ac 40/50 using the Superpave Testing Method. *Kasetsart engineering journal*, 2010, 22 (70), pp. 110-121.
- [2] Jantarachot, K. The Comparative Study of Asphalt Concrete Engineering Properties between Top limit and Low limit Criteria of Aggregate Mixed with Asphalt Cement AC 60-70 and PMA. *Kasetsart engineering journal*, 2010, 29 (95), pp. 11-22.
- [3] William, D. M. *et al.* Influence of aggregate gradation on clogging characteristics of porous asphalt mixtures. *Journal of Material in Civil Engineering*, 2014, 26 (7), pp. 1-7.
- [4] Frigio F. *et al.* Improve durability of recycled of porous asphalt. *Construction and Building of Materials*, 2013, 48, pp. 755-763.
- [5] Sombutsakulkit, P. *Porous Asphalt Pavement: A Case Study of North Eastern Part of Thailand*. MSC Thesis, Khon kaen University, 2009.
- [6] Department of Rural Roads. MTHCH 237: 2002. *Porous Asphalt Concrete*. Bangkok: Department of Rural Roads, 2005.
- [7] Bureau of testing Research and Development. *Porous Asphalt Concrete*, 1st ed. Bangkok: Department of Rural Roads, 2009.
- [8] Zhang, Y. *et al.* Assessment of effectiveness of rejuvenator on artificially aged porous asphalt concrete. *Construction and Building of Materials*, 2016, 110, pp. 286-289.
- [9] Al-Rubaei, A. *et al.* Long-term hydraulic performance of porous asphalt pavements in Northern Sweden. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013, 139 (6), pp. 499-505.
- [10] Department of Highways. DH-S 414: 1999. *Porous Asphalt Concrete*. Bangkok: Department of Highways, 1978.
- [11] Bureau of Materials Analysis and Inspection. *Study on the skid resistance of asphalt pavement*, 1st ed. Bangkok: Department of Highways, 2016.
- [12] Tenrilangi, D. *Influence of the use of TAFPACK Super on resilient modulus and tensile strength of porous asphalt mix*. MSC Thesis, Institut Teknologi Bandung, 2004.
- [13] Subagio, B.S., Kosashi, D., Busnial and Tenrilangi, D. Development of stiffness modulus and plastic deformation characteristics of porous asphalt mixture using Tackpack Super. *Proceeding of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Indonesia, 2005, pp. 803-812.
- [14] Liu, Q.T. *et al.* Investigation of rheological properties of TPS modified bitumen. *Journal of Central South of University of Technology*, 2008, 15 (s1), pp. 118-121.
- [15] Taiyu Kensetsu Co. Ltd. *Technical Guideline for Porous Asphalt Pavement*, 1st ed. Japan: Taiyu Kensetsu Co. Ltd, 2014.
- [16] Rassameekobkul W. *et al.* Porous asphalt pavement design used material available in Thailand. *Rajamangala University of Technology Tawan-ok Research Journal*, 2014, 9 (2), pp. 1-10.
- [17] Bureau of Highway Safety, Department of Highways. Average Daily Traffic in Bangkok, 2014. Available from: <http://bhs.doh.go.th/home> [Accessed 26 May 2016].
- [18] Aman, M.Y. *et al.* A Comparative Study on Properties of Malaysian Porous Asphalt Mixes with Different Bitumen Contents. *Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2015, 9 (10), pp. 797-806.

- [19] American Society for Testing and Material. ASTM E 2340-11: 2015. *Standard Test Method for Measuring the Skid Resistance of Pavements and Other Trafficked Surface Using a Continous Reading, Fixed-Slip Technigue*, USA: ASTM, 2015.
- [20] American Society for Testing and Materials. ASTM D 2041-95: 1999. *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*, USA: ASTM, 1999.
- .