

# กำลังอัดแกนเดียวของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก Unconfined compressive strength of recycled asphalt pavement improved by hydraulic cement

กรองกาญจน์ เทือกทอง<sup>1\*</sup> เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์<sup>2</sup> วีระวัฒน์ วรรณกุล<sup>3</sup> วรวิทย์ โพธิ์จันทร์<sup>4</sup> คักดิ์ชัย ศรีจันทร์คำ<sup>5</sup>  
และ ชินะวัฒน์ มุกตพันธ์<sup>6</sup>

<sup>1,3,4,6</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จ.ขอนแก่น

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา

<sup>5</sup> สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.ขอนแก่น

\*Corresponding author; E-mail address: Krongkan.tk@gmail.com

## บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสำหรับวัสดุพื้นทาง ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled asphalt pavement, RAP) ได้จากโครงการก่อสร้างถนนของแขวงทางหลวงชนบทกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ ตัวแปรต้นของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยชนิดของปูนซีเมนต์ (ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1), ปริมาณปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 1, 3 และ 5) และเงื่อนไขการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน (แช่น้ำและไม่แช่น้ำ) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength, UCS) ของ RAP ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นสำหรับทุกชนิดของปูนซีเมนต์ เนื่องจาก Calcium silicates hydrates (CSH) ในตัวอย่างเพิ่มขึ้น UCS ของ RAP ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าใกล้เคียงกับ UCS ของ RAP ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในขณะที่ UCS แบบแช่น้ำของ RAP ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์มีค่าน้อยกว่า UCS แบบไม่แช่น้ำของ RAP ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ สำหรับทุกชนิดของปูนซีเมนต์และปริมาณปูนซีเมนต์

คำสำคัญ: ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, กำลังอัดแกนเดียว

## Abstract

This article studied the possibility of the use of recycle asphalt pavement improved by hydraulic cement for pavement base material. Recycle asphalt pavement (RAP) was obtained from a road construction project of Kalasin Rural Roads Office, Kalasin Province. The Independent variable of this research consisted of cement types (Hydraulic cement and ordinary Portland cement type 1), cement contents (1%, 3% and 5%) and condition of the 7-day unconfined compressive strength (UCS) test (soaked and unsoaked). The results showed that the 7-day UCS of RAP improved by cement increased as cement content increased due to the increase of calcium silicates hydrates (CSH) in the samples. The 7-day UCS of RAP improved by hydraulic cement was similar to that of RAP improved by Portland cement type 1. Whereas the 7-day soaked UCS of RAP

improved by cement was lower than the 7-day unsoaked UCS for all cement types and cement contents.

Keywords: Recycle asphalt pavement, Hydraulic cement, Ordinary Portland cement type 1, Unconfined compressive strength

## 1. คำนำ

ในปัจจุบันระบบการคมนาคมถือเป็นโครงสร้างพื้นฐานของประเทศที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะการคมนาคมทางถนนถือเป็นสิ่งก่อสร้างที่สามารถช่วยอำนวยความสะดวกทั้งในด้านการคมนาคมของผู้คน การขนส่งสินค้าหรือบริการต่าง ๆ เพื่อให้ประชาชนได้รับความสะดวก รวดเร็ว และปลอดภัยในการเดินทาง จากข้อมูลกรมทางหลวงชนบทในเดือนกันยายน พ.ศ.2564 โครงข่ายสายทางในความรับผิดชอบมีความยาวถนนมากกว่า 49,000 กิโลเมตร ซึ่งได้กระจายอยู่ทั่วภูมิภาคของประเทศไทย [1] ถนนสายหลักจะนิยมก่อสร้างเป็นผิวทางแอสฟัลต์ (Asphalt Pavement) เมื่อมีการซ่อมแซมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีขุดไส (Milling) ซึ่งจะได้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ในปัจจุบันหน่วยงานที่รับผิดชอบด้านงานทางมีการขุดหรือผิวจราจรด้วยวิธีดังกล่าวและพบว่าผิวทางเก่าที่ขุดหรือมาส่วนใหญ่มักจะถูกนำไปกองเก็บหรือทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ ส่งผลให้เกิดเป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ใช้งาน ซึ่งในแต่ละปีมีการซ่อมแซมผิวทางด้วยวิธีขุดไส (Milling) มากขึ้น จึงทำให้เกิดผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ขุดหรือมามีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

กรมทางหลวงชนบทจึงได้มีมาตรฐานในการนำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ใช้งานกลับมาใช้ใหม่ โดยการใช้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไม่ได้ใช้งานที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุผสมเพิ่มมาแทนมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ [2] อีกทั้งยังเป็นการช่วยสนับสนุนการใช้วัสดุผิวทางเก่ามาใช้ในกระบวนการก่อสร้างทางและลดความต้องการใช้มวลรวมใหม่จากธรรมชาติลง

ปัจจุบันได้มีการรณรงค์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 โดยสมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทยระบุว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีกำลังอัดสูงสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้หลายประเภท ทั้งงานโครงสร้างทั่วไป งานโครงสร้างขนาดใหญ่ งานพื้นทาง และงานปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทาง รวมถึงถึงผลิตภัณฑ์คอนกรีตหล่อสำเร็จ ด้วยคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มอก.2594 การใช้วัสดุทดแทนเข้ามาเป็นส่วนประกอบจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการทำงานของปูนซีเมนต์และคอนกรีตให้ดีขึ้นในด้านการ

รับแรง ความสั่นไหว ความเรียบเนียน และความคงทน เป็นต้น ซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการที่หลากหลายในแต่ละชนิดการใช้งานและแต่ละประเภทของงานก่อสร้างโครงสร้างได้มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 สำหรับสิ่งควมและสิ่งแวดล้อม ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะมีการปล่อย CO<sub>2</sub> จากการสลายตัวของวัตถุดิบและการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในขั้นตอนการเผาเม็ดปูน (Clinker) ซึ่ง CO<sub>2</sub> นี้เป็นหนึ่งในสาเหตุของการเกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ที่ขึ้นบรรยากาศของโลก ดังนั้น การใช้ปูนเม็ดในสัดส่วนที่น้อยลงจะส่งผลให้เกิดการปล่อย CO<sub>2</sub> ออกสู่ชั้นบรรยากาศลดลงไปด้วย จึงนับได้ว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นการพัฒนาด้านวัสดุศาสตร์ที่สามารถช่วยลดการเกิดภาวะเรือนกระจกได้อย่างมีนัยสำคัญ และก่อให้เกิดการพัฒนาที่ยั่งยืนในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และอุตสาหกรรมก่อสร้าง [3]

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังอัดแกนเดียวของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก เพื่อใช้เป็นวัสดุงานพื้นทางและเปรียบเทียบผลการศึกษากับมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการสนับสนุนให้มีการนำผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลมาใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ อีกทั้งยังสามารถใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

## 2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

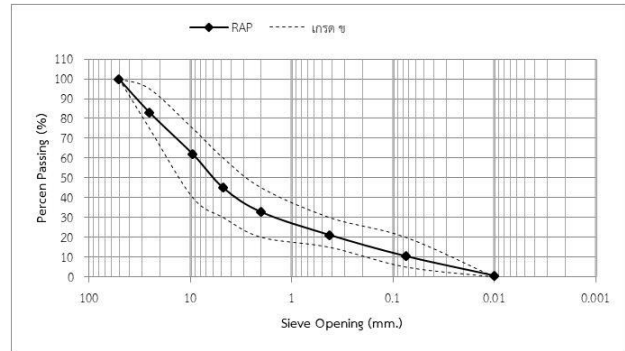
### 2.1 ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement, RAP)

งานวิจัยนี้ได้ใช้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่นำมาจากโครงการก่อสร้างถนนของแขวงทางหลวงชนบทกาฬสินธุ์ โดยมีคุณสมบัติพื้นฐานเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท มทข.244-2556 งานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) [4] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล

วิธีการทดสอบ	มาตรฐาน	ผลการทดสอบ	เกณฑ์มาตรฐาน
Liquid Limit (LL)	มทข.(ท) 501.5-(2545)	NA	< 35 %
Plasticity Index (PI)	มทข.(ท) 501.6-(2545)	NP	< 11 %
Los Angeles Abrasion	มทข.(ท) 501.9-(2545)	32 %	< 60 %
Dry Density	มทข.(ท) 501.2-(2545)	2.03 gm./cc.	-
Optimum Moisture Content	มทข.(ท) 501.2-(2545)	10 %	-

ขนาดผลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล ทดสอบตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.8-(2545) วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve Analysis) ซึ่งตามมาตรฐานที่กำหนดให้ต้องมีขนาดเม็ดโตสุดไม่เกิน 50.00 มิลลิเมตร มีส่วนผ่านตะแกรงขนาด 2.00 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ไม่เกินร้อยละ 70 และส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 25 [5] ซึ่งขนาดผลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่นำมาใช้ในในงานวิจัยนี้เป็นไปตามมาตรฐานจัดอยู่ในเกรด ข. ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยลักษณะของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2



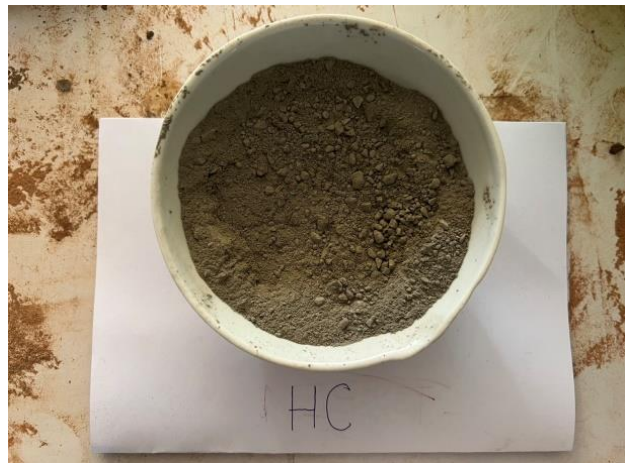
รูปที่ 1 ขนาดผลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิล



รูปที่ 2 ขนาดผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรีไซเคิลที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ ๓๔ นิ้ว

### 2.2 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement)

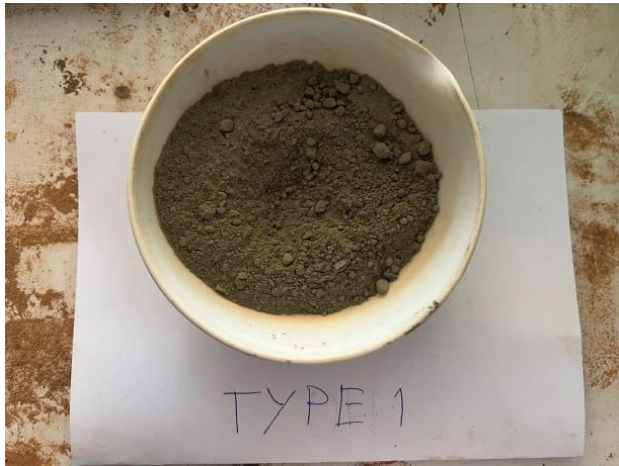
ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป งานโครงสร้างทั่วไป ตาม มอก.2594-2556



รูปที่ 3 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement)

### 2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Ordinary Portland Cement Type 1)

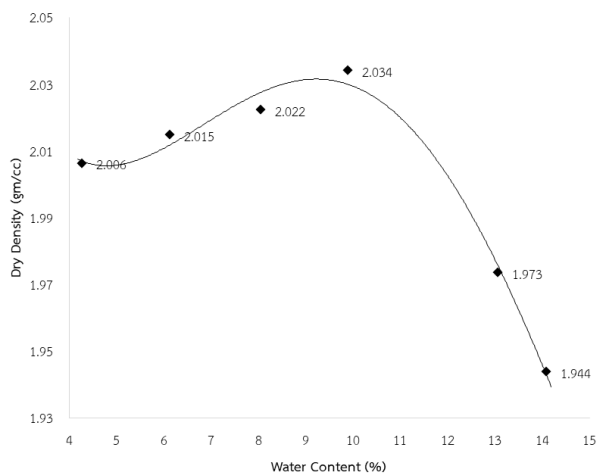
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป งานโครงสร้างทั่วไป ตาม มอก.15 เล่ม 1-2555



รูปที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Ordinary Portland Cement Type 1)

### 2.4 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตซีเมนต์ปรับปรุด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เริ่มจากการเตรียมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตซีเมนต์ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมร้อยละ 10 (Optimum Moisture Content, OMC) ซึ่งได้จากวิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและความหนาแน่นแห้งสูงสุด

และวัสดุเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1) ในอัตราส่วนร้อยละ 1, 3 และ 5 ของน้ำหนักผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตซีเมนต์ โดยใช้อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2 จากนั้นทำการผสมให้เข้ากัน แล้วเทลงในแบบหล่อตัวอย่าง โดยใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่าน

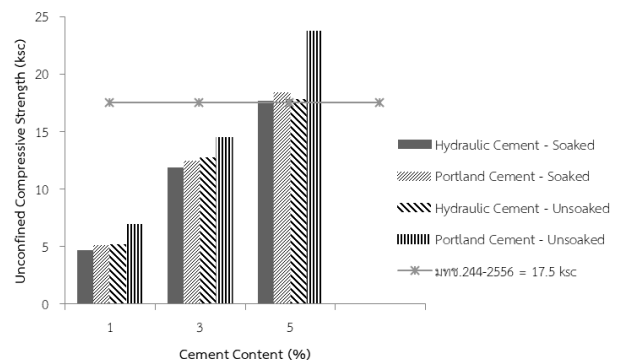
ศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.2-(2545) วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน [6] เมื่ออัดตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว ทิ้งตัวอย่างไว้ในแบบหล่อที่อุณหภูมิห้องประมาณ 3-4 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างเซ็ตตัว จากนั้นใช้เครื่องดันตัวอย่างดันตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แล้วนำตัวอย่างไปบ่มด้วยการห่อด้วยถุงพลาสติก เพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นระเหยออกจากก้อนตัวอย่าง แล้วทำการบ่มก้อนตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุ 7 วัน เมื่อครบอายุบ่มแล้วให้นำก้อนตัวอย่างไปทำการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, USC) ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท มทข.(ท) 303-(2545) วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าแรงอัดแกนเดียว [7] โดยจะทำการทดสอบทั้งสถานะแช่น้ำ (Soaked) ซึ่งจะต้องนำก้อนตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ และสถานะไม่แช่น้ำ (Unsoaked) เมื่อทำการทดสอบแล้วเสร็จค่าที่ได้จะต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท ที่กำหนดค่ากำลังอัดแกนเดียวไว้ไม่น้อยกว่า 17.50 ksc [4]

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมระหว่าง RAP : ปูนซีเมนต์ : น้ำ

ปริมาณ RAP (g)	ปริมาณปูนซีเมนต์ (g)		ปริมาณน้ำ (ml)
	Hydraulic Cement	Portland Cement	
3,000	30 (1%)	30 (1%)	303 (10%)
3,000	90 (3%)	90 (3%)	309 (10%)
3,000	150 (5%)	150 (5%)	315 (10%)

### 3. ผลการทดสอบ

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, USC) ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท มทข.(ท) 303-2545 ที่อายุบ่ม 7 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดแกนเดียวแบบแช่น้ำและแบบไม่แช่น้ำของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตซีเมนต์ปรับปรุด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น กำลังอัดแกนเดียวแบบแช่น้ำของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตซีเมนต์ปรับปรุด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ 4.71, 11.84 และ 17.66 ksc สำหรับปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ กำลังอัดแกนเดียวที่เพิ่มขึ้นนี้เนื่องจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicates Hydrates, CSH) ในตัวอย่างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดแกนเดียวแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตซีเมนต์ปรับปรุด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 1, 3 และ 5

กำลังอัดแกนเดียวแบบแช่น้ำ (Soaked) ของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีค่าน้อยกว่ากำลังอัดแกนเดียวแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) ที่อายุบ่ม 7 วัน ยกตัวอย่างเช่น กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ร้อยละ 5 มีค่าเท่ากับ 18.40 และ 23.78 ksc สำหรับตัวอย่างแบบแช่น้ำและไม่แช่น้ำ ตามลำดับ

อิทธิพลของชนิดปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดแกนเดียวแบบแช่น้ำของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบด้วยปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกให้กำลังอัดแกนเดียวต่ำกว่าตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 สำหรับทุกปริมาณปูนซีเมนต์ และเงื่อนไขการแช่น้ำ เนื่องจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีส่วนผสมของวัสดุทดแทนซึ่งนำมาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก จึงทำให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าที่ต่ำกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ในช่วงแรก [13-14] ที่อายุบ่ม 7 วัน ยกตัวอย่างเช่น กำลังอัดแกนเดียวแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) ของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ร้อยละ 5 มีค่าเท่ากับ 17.81 ksc ในขณะที่กำลังอัดแกนเดียวแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) ของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ร้อยละ 5 มีค่าเท่ากับ 23.78 ksc และจากมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท ที่กำหนดค่ากำลังอัดแกนเดียวแบบแช่น้ำ (Soaked) ไว้ไม่น้อยกว่า 17.50 ksc พบว่าตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่ร้อยละ 5 ให้ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.66 และ 18.40 ksc ตามลำดับ

#### 4. บทสรุป

จากการศึกษากำลังอัดแกนเดียวของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบที่ได้รับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบมีลักษณะเป็น Non-Plastic, ค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 2.03 gm./cc., ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) มีค่าเท่ากับร้อยละ 10 และสามารถจำแนกผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบได้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางเกรด ข. ตามการทดสอบ Sieve Analysis

2. กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ที่อายุบ่ม 7 วัน ตามปริมาณปูนร้อยละ 1, 3 และ 5 แบบแช่น้ำ มีค่าเท่ากับ 4.71, 11.84 และ 17.66 ksc ตามลำดับ แบบไม่แช่น้ำ มีค่าเท่ากับ 5.20, 12.74 และ 17.81 ksc ตามลำดับ และกำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ที่อายุบ่มและปริมาณปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนเดียวกัน แบบแช่น้ำ มีค่าเท่ากับ 5.11, 12.49 และ 18.40 ksc แบบไม่แช่น้ำ มีค่าเท่ากับ 6.95, 14.51 และ 23.78 ksc ตามลำดับ

3. เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท พบว่าปริมาณของวัสดุเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1) ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 5 ซึ่งให้ค่ากำลังอัด

แกนเดียวผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท ที่กำหนดให้ค่ากำลังอัดแกนเดียวไม่น้อยกว่า 17.50 ksc

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ แขวงทางหลวงชนบทกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ ที่เอื้อเฟื้อวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ซีลเคลือบที่ใช้ในการทำวิจัย, ส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 16 (กาฬสินธุ์) ที่สนับสนุนและเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้ และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและใช้สถานที่ในการทำวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักบำรุงทาง, กรมทางหลวงชนบท. (2564). บัญชีโครงข่ายทางหลวงชนบท ประจำปีงบประมาณ 2565.
- [2] กรมทางหลวงชนบท. (2555). มทข.242-2555 งานหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (pavement in-place recycling).
- [3] สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย. (2565). ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก. ฉบับปรับปรุง, หน้า 7-9.
- [4] กรมทางหลวงชนบท. (2556). มทข.244-2556 งานพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base).
- [5] กรมทางหลวงชนบท. (2545). มทข.(ท) 501.8-(2545) วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve Analysis).
- [6] กรมทางหลวงชนบท. (2545). มทข.(ท) 501.2-(2545) วิธีการทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน.
- [7] กรมทางหลวงชนบท. (2545). มทข.(ท) 303-(2545) วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าแรงอัดแกนเดียว.
- [8] กรมทางหลวงชนบท. (2545). มทข.(ท) 501.5-(2545) วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว
- [9] กรมทางหลวงชนบท. (2545). มทข.(ท) 501.6-(2545) วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก
- [10] กรมทางหลวงชนบท. (2545). มทข.(ท) 501.9-(2545) วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบโดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ (Los Angeles Abrasion).
- [11] กลมวรรณ วงษ์จันทร์, กฤษณา บุญรัตน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โชคชัย ไตรยสุทธิ (2565). การปรับปรุงคุณภาพเศษคอนกรีตด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสำหรับวัสดุงานทาง. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565.
- [12] ทวีศักดิ์ ศรีจันทร์อินทร์ (2558). *การปรับปรุงคุณภาพของหินปลายตะแกรงสำหรับงานก่อสร้างถนน*. รายงานวิจัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.
- [13] ปัญญา สุวรรณกลาง, สุภณภัส ขาชำนาญ และ เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ (2565). กำลังอัดแกนเดียวและกำลังแรงดึงทางอ้อมของขยะหินคลุกผสมซีเมนต์ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565.
- [14] สุชาติ เจนจิระปัญญา และ ปิติศานต์ กร้ามาตร (2559). การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้วัสดุจากอุตสาหกรรม. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 2, หน้า 77-86.

- [15] อธิคมাত্র์ แสงแก้ว (2561). อิทธิพลของการกระจายตัวของขนาด  
คละที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียวของผิวทางของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า  
ที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. โครงการมหาบัณฑิต,  
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค, มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีสุรนารี.
- [16] อิทธิพล มีผล, ฆนากานต์ มาศโอสถ และ ปฐม คงจะดี (2563). กำลัง  
รับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดินเหนียวอ่อนปรับปรุงคุณภาพด้วย  
ซีเมนต์ไฮดรอลิก. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม  
มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 48-55.
- [17] อาทิตย์ อินทรา (2556). อิทธิพลของปริมาณผิวทางแอสฟัลต์ติก  
คอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ต่อกำลังอัดของวัสดุชั้นพื้นทางที่ปรับปรุง  
ด้วยปูนซีเมนต์. โครงการมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา,  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.