



# การใช้วัสดุเหลือทิ้งจากแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าและยิปซัมสังเคราะห์ เพื่อทดแทนวัสดุงานชั้นทาง

เฉลิมพล ไชยแก้ว<sup>1</sup> พัชรียา ไชยแก้ว<sup>1</sup> และ วรวิญญู ณ สงขลา<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: warun.w@rmutsb.ac.th

วันที่รับบทความ: 21 กันยายน 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 26 พฤศจิกายน 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 9 มกราคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 23 มีนาคม 2565

**บทคัดย่อ:** งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาคุณสมบัติและอัตราส่วนที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าต่อ ยิปซัมสังเคราะห์ที่มีผลต่อค่า California Bearing Ratio (CBR) เพื่อทดแทนวัสดุงานชั้นทางเดิมที่มาจากธรรมชาติ โดยกำหนดสัดส่วนตัวอย่างทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าต่อยิปซัมสังเคราะห์ในสัดส่วนผสมร้อยละ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 โดยใช้ปริมาณน้ำที่ปริมาณความชื้นที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าและยิปซัมสังเคราะห์เพื่อใช้พิจารณาความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุงานชั้นทาง ประกอบด้วย การทดสอบหาค่า CBR และการทดสอบหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด พบว่า เมื่อแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 30 (70:30) ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ซึ่งมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับค่า CBR ของวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุกในงานชั้นทาง ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่า CBR มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และการแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ในปริมาณที่สูง จะส่งผลให้เกิดการพองตัวเพิ่มขึ้น แต่ยังมีค่าอยู่ในเกณฑ์ไม่เกินมาตรฐานของวัสดุถมคั่นทางในงานชั้นทาง

**คำสำคัญ:** แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า; ยิปซัมสังเคราะห์; การทดสอบซีบีอาร์

# The Use of Waste Materials from RAP and FGD Gypsum to Compensatory the Pavement Material

Chalermphol Chaikaew<sup>1</sup>, Patchareeya Chaikaew<sup>1</sup> and Warun Na Songkhla<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

\* Corresponding author, E-mail: warun.w@ramtsb.ac.th

Received: 21 September 2021; Revised: 26 November 2021; Accepted: 9 January 2022

Online Published: 23 March 2022

**Abstract:** This research aims to study the appropriate properties and ratios of reclaimed asphalt pavement (RAP) to synthetic gypsum or flue gas desulfurization (FGD Gypsum) that affects the california bearing ratio (CBR) to replace the natural pavement material. Determining the proportion of test samples RAP per FGD gypsum in mixed proportions 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 and 50:50 using the amount of water at the maximum dry density. The laboratory tests, conducted to determine engineering properties of RPA and FGD Gypsum used as preliminary factors in pavement material selection, california bearing ratio test and dry density test. Based on the test results showed that when replaced with FGD gypsum in the amount of 30 percent (70:30), the maximum california bearing ratio, equivalent to crushed rock soil aggregate type base. Tests showed that the CBR value relates directly to the maximum dry density and swelling increased with increasing of FGD gypsum, but stay in the standard embankment material.

**Keywords:** Reclaimed asphalt pavement (RAP); Flue gas desulfurization (FGD Gypsum); CBR Testing



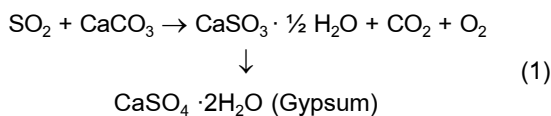
## 1. บทนำ

ถนนเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจและการพัฒนาของประเทศชาติ เป็นสิ่งก่อสร้างที่สามารถช่วยอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ทั้งในการคมนาคมขนส่งของคนและสินค้า จากสถิติของกรมทางหลวงปี พ.ศ.2556 ถนนประเภทลาดยางมีความยาว 61,134.351 กิโลเมตร และกรมทางหลวงชนบท 42,736 กิโลเมตร [1] เมื่อมีการซ่อมแซมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) ด้วยวิธีชูดไส (Milling) ซึ่งจะได้แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ซึ่งปัจจุบันส่วนใหญ่หน่วยงานที่รับผิดชอบมีการชูดไสหรือผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีนี้ และพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาณมาก วัสดุที่ทำการชูดไสส่วนใหญ่ มักจะถูกนำไปถมที่หรือทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ซึ่งมีส่วนผสมหลักเป็นหินที่มาจากธรรมชาติ จากการศึกษางานวิจัยพบว่า มีการใช้วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) หรือ แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า เพื่อลดต้นทุนการก่อสร้างในภาพรวมทดแทนวัสดุตามธรรมชาติที่มีจำนวนลดน้อยลง นำมาซึ่งการลดการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ถูกใช้ในการทำผิวทาง ชั้นรองพื้นทาง ซึ่งมีประเด็นที่คล้ายคลึงกันคือ การนำแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าซึ่งเป็นวัสดุเก่ามาเป็นส่วนผสมนั้น คุณสมบัติทางวิศวกรรมทั้งทางกลและทางกายภาพย่อมไม่สูงกว่าการใช้วัสดุใหม่ แต่ยังสามารถใช้งานได้เนื่องจากผ่านค่ามาตรฐานตามที่หน่วยงานกำหนด อาทิเช่น การศึกษาการพัฒนากำลังอัดของผิวทางที่ผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า และปรับปรุงด้วย

ปูนซีเมนต์เปรียบเทียบกับการพัฒนากำลังอัดของหินคลุกโดยเปรียบเทียบทั้งในด้านต้นทุนและด้านวิศวกรรมและการสร้างมูลค่าเพิ่มของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ผลการวิจัยพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า มีขนาดคละสอดคล้องตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามีค่าต่ำกว่าหินคลุกเพียง 0.95 เท่า สำหรับพลังงานการบดอัดแบบมาตรฐานและสูงกว่ามาตรฐาน [2] และการนำแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามาใช้ทดแทนแอสฟัลต์คอนกรีตใหม่ ซึ่งผลที่ได้ก็สามารถทดแทนได้เป็นอย่างดี โดยศึกษาวิธีการนำแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมกับน้ำมันดีเซลและยาง AC 60/70 โดยทำการทดสอบค่าเสถียรภาพค่าการไหล และค่าความหนาแน่นที่เหมาะสมในแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากับน้ำมันดีเซลตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง [3] หรืองานวิจัยด้านคอนกรีต มีการใช้แอสฟัลต์คอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมหยาบผสมคอนกรีต โดยที่เปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ซึ่งผลกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปแต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และจากผลการทดสอบพฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าจะมีลักษณะการวิบัติที่เหนียวกว่าคอนกรีตทั่วไป [4] และการนำแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ชูดไสซึ่งมีหินเก่าเป็นมวลรวมหยาบจำนวนมาก และมีขนาดที่เป็นมวลรวมละเอียดค่อนข้างน้อยนำกลับมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุด้านวิศวกรรมงานทางอีกครึ่งนั้น ต้องมีการใช้วัสดุแทรกผสมทดแทนมวลรวมละเอียดในปริมาณที่เหมาะสมด้วย



จากข้อมูลดังกล่าวจึงสังเกตเห็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียด จากวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้พลังงานถ่านหิน จากโรงไฟฟ้าในประเทศไทย นั่นก็คือ ยิปซัมสังเคราะห์หรือเอพจีดี ยิปซัม (Flue Gas Desulfurization ; FGD Gypsum) ซึ่งยิปซัมสังเคราะห์ที่ได้ นั้น เกิดจากกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ จะใช้วิธีผ่านก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลงไปในน้ำปูนขาว โดยที่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นซัลเฟต (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) จากนั้นจะทำปฏิกิริยากับ CaCO<sub>3</sub> กลายเป็นยิปซัม ดังสมการที่ 1



ยิปซัมคงเหลือประมาณกว่า 2 ล้านตันต่อปี ยังไม่เป็นที่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย [5] เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณในการจัดหาวัสดุใหม่ การใช้ประโยชน์จากแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าและยิปซัมสังเคราะห์ จะช่วยลดการทำลายทรัพยากรธรรมชาติ ช่วยแก้ปัญหาด้านมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้โดยการนำกลับมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุงานชั้นทาง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า และยิปซัมสังเคราะห์เพื่อทดแทนวัสดุงานชั้นทางเดิมที่มาจากธรรมชาติ โดยทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าและยิปซัมสังเคราะห์ที่มีผลต่อค่า California Bearing Ratio (CBR) และการพองตัวของวัสดุ เพื่อจัดจำแนกกับวัสดุงานชั้นทางตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและ

ผังเมือง (มยผ.2101-57 ถึง มยผ.2109-57) เนื่องจากเพื่อรองรับให้หน่วยงานราชการส่วนท้องถิ่นนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทางด้านวิศวกรรมจึงจำเป็นที่จะต้องใช้มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง

## 2. วัสดุ การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

### 2.1 วัสดุ

วัสดุผิวทางที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) หรือ แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ได้มาจากสำนักงานทางหลวงที่ 15 (ประจวบคีรีขันธ์) กรมทางหลวง ได้ทำการบูรณะบำรุงรักษาทางหลวงให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และทำการบูรณะทางโดยวิธีการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) ซึ่งในการออกแบบต้องขูดไส (Milling) ผิวแอสฟัลต์คอนกรีตบน (Wearing) หนา 5 ซม. ออกก่อนที่จะดำเนินการในชั้นตอนต่อไป ทำให้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าที่ขูดไสออกมา มีปริมาณเกือบกองไว้จำนวนมาก โดยยังไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์เท่าที่ควร ดังรูปที่ 1 และในส่วนยิปซัมสังเคราะห์ ได้เกิดจากการสังเคราะห์ของก๊าซไอเสียจากกระบวนการดักจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้น้ำหินปูนเป็นวัตถุดิบตั้งต้นทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปาง ดังรูปที่ 2 และองค์ประกอบทางเคมีของยิปซัมสังเคราะห์ที่ใช้ดังตารางที่ 1 พบว่ามีปริมาณสารประกอบกำมะถัน (ร้อยละ 47.15) และแคลเซียม (ร้อยละ 28.49) น้ำหนักสูญหายหลังการเผา (ร้อยละ 21.28) และไม่จัดเป็นวัสดุประสานปอซโซลาน [6] แต่สามารถประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมวัสดุงานชั้นพื้นทางได้ [7]



รูปที่ 1 แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า



รูปที่ 2 ยิปซัมสังเคราะห์

## 2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การวิจัยครั้งนี้ มีรายละเอียดขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง โดยการนำแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าไปร่อนเพื่อคัดแยกขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐานเพื่อเป็นวัสดุผสมรวม โดยคัดเลือกใช้มวลรวมที่ผ่านตะแกรง 3/4" ในอัตราส่วนที่ตามออกแบบ นำมาผสมกันโดยใช้ปริมาณยิปซัมสังเคราะห์ผสมร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมวัสดุและการผสมตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยสัญลักษณ์แสดง ชื่อเรียกตัวอย่างดังนี้ RAP หมายถึง แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า และ FGD หมายถึง ยิปซัมสังเคราะห์ โดยการทดสอบจะประกอบไปด้วยการหาขนาดผลของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Grain Size-Determination of Sieve Analysis) ตามมาตรฐาน มยผ. 2208-57 การทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test) ตามมาตรฐาน มยผ. 2202-57 และการทดสอบ California Bearing Ratio: CBR แบบแช่น้ำ (Soaked) โดยมาตรฐาน มยผ. 2203-57 ตามลำดับ

### ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของยิปซัมสังเคราะห์

Chemical Composition	Amount (%)
Magnesium Oxide (MgO)	0.69
Aluminium Oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.63
Silicon Dioxide (SiO <sub>2</sub> )	1.46
Sulfur Trioxide (SO <sub>3</sub> )	47.15
Potassium Oxide (K <sub>2</sub> O)	0.08
Calcium Oxide (CaO)	28.49
Iron (III) Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.29
Loss on Ignition (LOI)	21.28

### ตารางที่ 2 ชื่อเรียกและสัดส่วนผสมตัวอย่าง

ชื่อส่วนผสม	สัดส่วนผสมตัวอย่าง	
	RAP (%)	FGD (%)
RAP100	100	0
RAP90 : FGD10	90	10
RAP80 : FGD20	80	20
RAP70 : FGD30	70	30
RAP60 : FGD40	60	40
RAP50 : FGD50	50	50



### 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

#### 3.1 ผลการทดสอบทางกายภาพและขนาดคละ

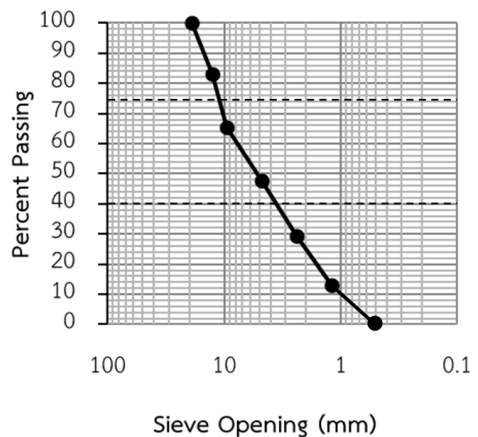
ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ ขนาดคละ ของ แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า และยิปซัมสังเคราะห์ พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตเก่า มีค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมอิมั้วแห้งเท่ากับ 2.42 และค่าร้อยละของการดูดซึ่มเท่ากับ 0.39 โดยความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าหินใหม่จากโรงโม่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 และค่าร้อยละของการดูดซึ่มเท่ากับ 0.74 ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus; F.M.) เท่ากับ 3.61 และร้อยละที่ผ่านขนาดตะแกรง 10 มิลลิเมตร หรือ 3/8" อยู่ในช่วงน้ำหนักร้อยละ 40-75 พบว่า ขนาดของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ามีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคมวลรวมค่อนข้างหยาบจัดอยู่ในมาตรฐานวัสดุพื้นทางหินคลุก ชนิด ข. ดังแสดงในรูปที่ 3 ในส่วนค่าความถ่วงจำเพาะของยิปซัมสังเคราะห์ เท่ากับ 2.58 และเมื่อนำข้อมูลขนาดอนุภาคของยิปซัมสังเคราะห์ที่มาจาก W. H. Zimmer Station of Duke Energy (Ohio) กับยิปซัมธรรมชาติจาก The Kwest Group (Ohio) ในแหล่งพื้นที่เดียวกันมาลองเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของขนาดอนุภาค พบว่า ยิปซัมสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก และเสถียรกว่ายิปซัมจากธรรมชาติ โดยมากกว่าร้อยละ 95 ของขนาดอนุภาคในยิปซัมสังเคราะห์มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 3 [8]

#### 3.2 ความสัมพันธ์ของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าและ

#### ยิปซัมสังเคราะห์ต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสม

เมื่อแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ที่เป็นมวลรวมละเอียด (ฝุ่น) บางส่วนในแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ที่ปริมาณร้อยละ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ

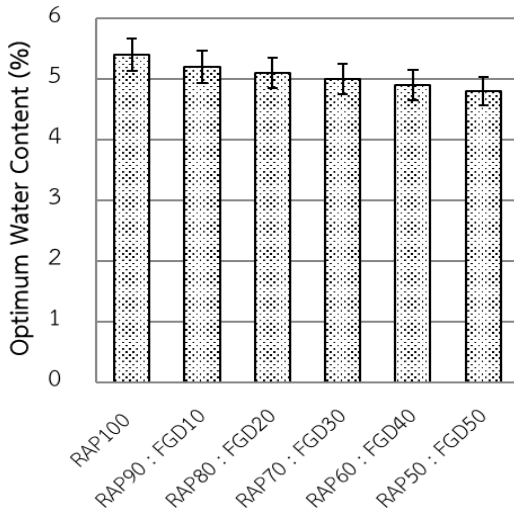
50:50 จากนั้นนำมาทดสอบหาค่าความแน่นแห้ง แบบสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งจะได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมเท่ากับ ร้อยละ 5.4, 5.2, 5.1, 5.0, 4.9 และ 4.8 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4 และพบว่า ปริมาณความต้องการน้ำที่เหมาะสมจะลดลง เมื่อมีการแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากยิปซัมสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก จึงเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมหยาบในแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมหยาบลดลงเป็นผลให้ความต้องการปริมาณน้ำเหมาะสมลดลงตามไปด้วย



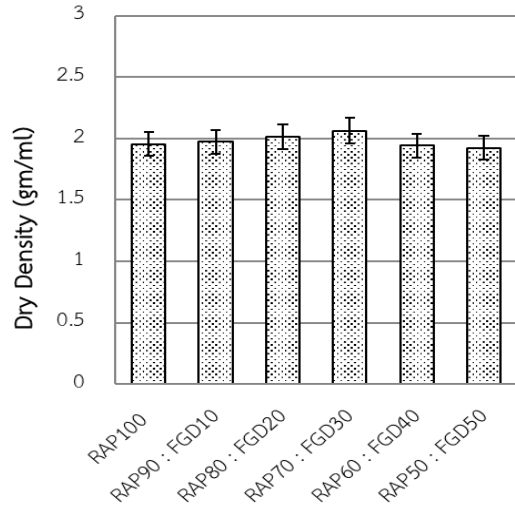
รูปที่ 3 ขนาดคละของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า

ตารางที่ 3 ขนาดอนุภาคของยิปซัมสังเคราะห์และยิปซัมธรรมชาติ [9]

Particle Size (%)	FGD Gypsum	Natural Gypsum
> 250 Microns	0.14	100
150 - 250 Microns	3.2	0
105 - 150 Microns	33	0
74 - 105 Microns	33	0
< 74 Microns	31	0



รูปที่ 4 ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม



รูปที่ 5 ค่าความหนาแน่นแห้ง

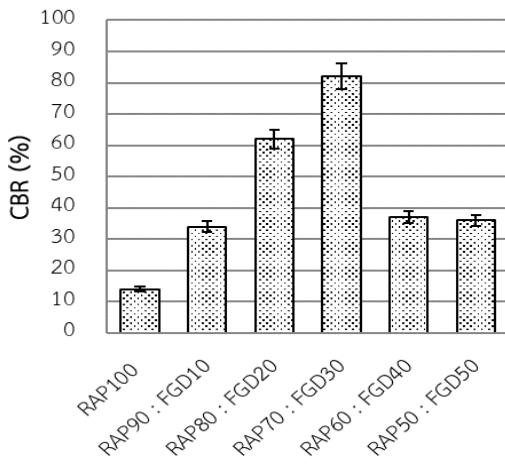
### 3.3 ผลการทดสอบการบดอัด

จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าและยิปซัมสังเคราะห์ในสัดส่วนผสมต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า เมื่อทำการแทนที่ยิปซัมสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 30 จะได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด หรือหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่จุด Optimum Water Content ในรูปที่ 4 ที่ร้อยละ 5 แต่เมื่อแทนที่ยิปซัมสังเคราะห์มากกว่าร้อยละ 30 (70:30) จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งลดลง เนื่องจากการแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ในปริมาณที่สูง ทำให้เนื้อของวัสดุผสมถูกแทนที่ด้วยวัสดุที่มีความละเอียดสูงมากเป็นผลให้ความต้องการปริมาณน้ำน้อยลง สัดส่วนผสมจะมีความแห้งมาก มีแรงเสียดทานของมวลรวมที่สูง เนื่องจากแรงดึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารีเป็นผลให้การบดอัดทำได้ยาก แต่เมื่อมีปริมาณน้ำที่เหมาะสมน้ำจะปลดแรงคาพิลลารี และเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วย

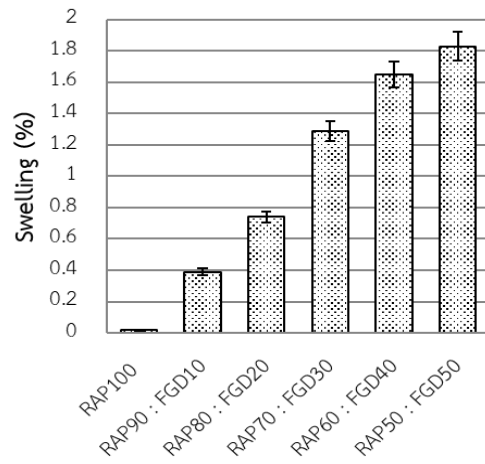
อนุภาคของมวลรวมวัสดุจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ ทำให้ได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด และในทางกลับกันเมื่อแทนที่ปริมาณยิปซัมสังเคราะห์น้อยกว่าร้อยละ 30 ความต้องการปริมาณน้ำจะมีค่าสูงกว่าจุด Optimum Water Content จะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง [10]

### 3.4 ผลการทดสอบ CBR และการพองตัว

ผลการทดสอบหาค่า CBR แบบแช่น้ำ ของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมยิปซัมสังเคราะห์ในสัดส่วนผสมร้อยละ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 ดังแสดงในรูปที่ 6 มีค่าเท่ากับร้อยละ 14, 34, 62, 82, 37 และ 36 ตามลำดับ โดยพบว่า การแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 30 (70:30) ให้ค่า CBR สูงที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากตัวอย่างมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนหน่วยแรงกดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยน้ำหนักแห้ง [10] และหากวิเคราะห์ในส่วนความเป็นวัสดุประสานของยิปซัมสังเคราะห์ ซึ่งจะมี



รูปที่ 6 ผลการทดสอบค่า CBR



รูปที่ 7 ค่าการพองตัว

ค่า  $SO_3$  และ LOI ที่สูงจึงขาดคุณสมบัติทางวัสดุยึดประสานในกลุ่มวัสดุประสานปอซโซลาน แต่ขณะเดียวกันมีองค์ประกอบของแคลเซียม (CaO) ที่สูงเช่นกัน จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นได้ การใช้ยิปซัมสังเคราะห์ที่มีแคลเซียมที่เป็นองค์ประกอบหลักเมื่อแคลเซียมละลายน้ำจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นแคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) อันมีบทบาทช่วยให้อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนที่เสถียรขึ้นโดยเฉพาะเนื่องจากยิปซัมสังเคราะห์มีประจุไฟฟ้าที่ช่วยป้องกันการกระจายตัวของอนุภาคได้ดี [11] จึงส่งผลดีต่อค่าความหนาแน่นแห้ง และค่า CBR อีกด้วย แต่หากการแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ในปริมาณที่สูง จะส่งผลให้เกิดการพองตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ที่มากขึ้น เนื่องจากยิปซัมสังเคราะห์มีขนาดของอนุภาคมวลรวมที่มีความละเอียดมาก จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดการพองตัว และขยายตัวที่สูง [12] ดังแสดงในรูปที่ 7 และจากผลการทดสอบค่าการพองตัวมีค่ามากที่สุดไม่เกินร้อยละ 2

ทั้งนี้ตาม มยผ. 2101-67 วัสดุถมคันทางแสดงเกณฑ์ค่าการพองตัวของวัสดุถมคันทางไม่เกินร้อยละ 3 แนวโน้มของการพองตัวที่สูงขึ้น จากการแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์กำหนดของวัสดุถมคันทางในงานชั้นพื้นทาง

### 3.5 การเปรียบเทียบค่า CBR กับวัสดุงานชั้นทางตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง

จากการทดสอบหาค่า CBR แบบแช่น้ำ เพื่อหาค่าความสามารถในการรับน้ำและการพองตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมยิปซัมสังเคราะห์ในสัดส่วนผสมร้อยละ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 สามารถนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุงานชั้นทางตามมาตรฐาน มยผ. ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยที่การแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 30 (70:30) มีค่าเทียบเท่าค่า CBR ของวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก ซึ่งเป็นวัสดุงานชั้นทางที่มีคุณภาพที่สุด และสัดส่วนอื่นๆ จะอยู่ในกลุ่มวัสดุรองพื้นทางเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งก็สามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ





**ตารางที่ 4** การเปรียบเทียบวัสดุงานชั้นทางตาม  
มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. [13]

ชื่อส่วนผสม	CBR(%)	มาตรฐาน มยผ. วัสดุงานชั้นทาง
RAP100	14 > 8 Swelling 0.08 < 3	วัสดุถมคันทาง (มยผ. 2101 – 57) วัสดุคัดเลือก (มยผ. 2104 – 57)
RA 90 : FGD10	34 > 25 Swelling -	วัสดุรองพื้นทาง (มยผ. 2102 – 57)
RAP80 : FGD20	62 > 30 Swelling -	วัสดุไหล่ทาง (มยผ. 2105 – 57)
RAP70 : FGD30	82 > 80 Swelling -	วัสดุพื้นทางชนิดหินคลุก (มยผ. 2103 – 57)
RAP60 : FGD40	37 > 25 Swelling -	วัสดุรองพื้นทาง (มยผ. 2102 – 57)
RAP50 : FGD50	36 > 25 Swelling -	วัสดุรองพื้นทาง (มยผ. 2102 – 57)

#### 4. สรุปผลการวิจัย

ปริมาณความต้องการน้ำที่เหมาะสมจะลดลง เมื่อมีการแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ในปริมาณที่มากขึ้น และการแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 30 (70:30) มีค่าความหนาแน่นแห้งและค่า CBR สูงที่สุด มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับค่า CBR ของวัสดุพื้นทางชนิดหินคลุกในงานชั้นทาง ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่า CBR มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นแห้ง และการแทนที่ด้วยยิปซัมสังเคราะห์ในปริมาณที่สูง จะส่งผลให้เกิดการพองตัวเพิ่มขึ้น แต่ยังมีค่าไม่เกินร้อยละ 3 ของวัสดุถมคันทางในงานชั้นทาง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่เงินทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Jirapat, Highway engineering, 5<sup>th</sup> Ed., Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 2014. (In Thai)
- [2] S. Lertcuntapak, Compressive strength of reclaimed asphalt pavement stabilized with cement, Thesis, Suranaree University of Technology, Nakorn Ratchasima, Thailand. 2013. (In Thai)
- [3] T. Kasemsee, Properties study of reclaimed asphalt pavement and diesel tak: Office of Highways 4, Thailand, 2016. (In Thai)
- [4] V. Antunes, A.C. Freire and J. Neves, A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of rulti-recycling, Construction and Building Materials, 2019, 211, 453-469.
- [5] [http://www.clcprolicon.com/th/article07\\_1.php](http://www.clcprolicon.com/th/article07_1.php) (Accessed on 11 August 2021)
- [6] ASTM C618-15, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, 2015.



- [7] ASTM D5370-14, Standard Specification for Pozzolanic Blended Materials in Construction Applications, 2014.
- [8] <http://ohioline.osu.edu/factsheet/anr-20> (Accessed on 6 March 2021)
- [9] <https://fabe.osu.edu/sites/fabe/files/imce/files/Soybean/Gypsum%20Bulletin> (Accessed on 8 March 2021)
- [10] L.S. Muthu, S. Geetha and M. Selvakumar, Predicting soaked CBR of SC subgrade from dry density for light and heavy compaction, *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45(2), 1664-1670.
- [11] D. Marchis, C. Badulescu and M.C. Nistor, Benefit of using tgd gypsum from S.E. turceni in agriculture, *Research Journal of Agricultural Science*, 2016, 48(4), 247-253.
- [12] M. Hua, B. Wang, L. Chen, Y. Wang, V.M. Quynh, B. He and X. Li, Verification of lime and water glass stabilized FGD gypsum as road sub-base, *Fuel*, 2010, 89(8), 1812-1817.
- [13] [http://subsites.dpt.go.th/edocument/images/pdf/sd\\_work/std2100.pdf](http://subsites.dpt.go.th/edocument/images/pdf/sd_work/std2100.pdf) (Accessed on 1 September 2021)