



## วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

### การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าชานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผา

### Development of geopolymer concrete made from bagasse ash and calcined water supply sludge

อดิศักดิ์ ชนะพันธ์ สหลาภ หอมวุฒินวงศ์\*

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

Adisak Chanapan Sahalaph Homwouttiwong\*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University Kham Rieng Sub-district, Kantarawichai District, Mahasarakham 44150, Thailand

\* Corresponding author.

E-mail: sahalaph.h@msu.ac.th, Telephone Number: 081-661-3955

วันที่รับบทความ 14 กุมภาพันธ์ 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 28 เมษายน 2563 ; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 20 กรกฎาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 24 สิงหาคม 2563

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากจากวัสดุเหลือทิ้ง โดยการนำเถ้าชานอ้อยจากอุตสาหกรรมน้ำตาลมาเป็นวัสดุตั้งต้น เนื่องจากเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบของซิลิกาเป็นหลักแต่มีอลูมินาค่อนข้างน้อย ตะกอนน้ำประปาเผาจึงถูกนำมาเป็นส่วนผสมเพื่อชดเชยปริมาณของอลูมินา เถ้าชานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผาถูกบดจนมีขนาดอนุภาคข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) 0.50-0.70 มวลรวมหยาบขนาด 3/8 นิ้ว 2 ชนิด ได้แก่ หินปูนย่อยและหินบะซอลต์ จากการศึกษาพบว่าผลของการแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 185-317 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) ที่สูงขึ้น เพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต แต่มีแนวโน้มทำให้กำลังรับแรงอัดที่ลดลง และยังพบอีกว่าชนิดของมวลรวมหยาบมีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ

#### คำสำคัญ

เถ้าชานอ้อย ตะกอนน้ำประปาเผา จีโอโพลิเมอร์ ปอชโซลาน กำลังรับแรงอัด มวลรวมหยาบ

#### Abstract

This research aims to develop geopolymer concrete from waste materials. Bagasse ash from the sugar industry was used as source material. Since the bagasse ash (BA) contains a lot of silica but small amount of alumina. The calcined water supply sludge waste (WS) was compiled in the mixture to compensate the alumina. Bagasse ash and calcined water supply sludge were ground until their particle size retained on a standard sieve No. 325 less than 5% by weight. Bagasse ash was replaced by calcined water supply sludge in the rage of 5-7.5% by weight. The alkaline to binder materials ratio (AL/B) were between 0.50 -0.70. Two types of 3/8 inch coarse aggregates were used, crushed limestone and basalt. It was found that the effect of replacing bagasse ash with calcined water supply sludge resulted in a geopolymer concrete with compressive strength higher than 185-317 ksc. The higher AL/B ratio increases the

workability of geopolymers concrete, but tended to affect the decreasing of compressive strength. Moreover, it was found that the coarse aggregate type had a significant effect on the compressive strength of the geopolymer.

## Keywords

bagasse ash; calcined water supply sludge; geopolymer; pozzolan; compressive strength; coarse aggregate

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมการก่อสร้างไม่ว่าจะขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศทั่วโลก ต่างใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุพื้นฐานในงานก่อสร้าง ทั้งงานด้านโครงสร้าง และงานสถาปัตยกรรมต่างๆ นักวิจัยได้พยายามคิดค้นวิธีการพัฒนาปรับปรุงคอนกรีตเพื่อให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตที่ดี ง่ายต่อการใช้งาน ประหยัดคุ้มค่าเหมาะสมกับราคา มีความแข็งแรง ทนทาน ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา อุตสาหกรรมการก่อสร้างได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในการพัฒนาประเทศ ส่งผลให้ประเทศไทยต้องผลิตปูนซีเมนต์มาเพื่อรองรับอุตสาหกรรมการก่อสร้างดังกล่าว ในปี พ.ศ.2560 มีการผลิตปูนซีเมนต์ 62.37 ล้านตัน และเพิ่มขึ้นเป็น 66.27 ล้านตัน ในปี พ.ศ.2561[1] และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นทุกปี ซึ่งการผลิตปูนซีเมนต์นั้นทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จำนวนมากสู่ชั้นบรรยากาศโลก พบว่าการผลิตปูนซีเมนต์ในปริมาณ 1 ตัน จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศจำนวนมากส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน[2] การผลิตปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คิดเป็นร้อยละ 5-8 ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด[3] ที่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน จึงมีความพยายามในการลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์หรือพัฒนาวัสดุใหม่ที่มาทดแทนปูนซีเมนต์

ในปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่นำวัสดุเหลือทิ้งหรือวัสดุผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมมาใช้ โดยการนำเอาคุณสมบัติเด่นๆ ของวัสดุเหลือทิ้งออกมาใช้ แต่วัสดุเหล่านั้นต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) เพื่อง่ายต่อการพัฒนามีการประยุกต์ใช้วัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสมของคอนกรีต เนื่องจากพบว่าวัสดุปอซโซลานสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ และทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติดีขึ้นในหลายด้าน[4,5] วัสดุปอซโซลานได้แก่ เถ้าถ่านหิน (Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ดินขาวเผา (Calcined kaolin)

เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) และเถ้าชีวมวล (Biomass ash) วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานไม่สามารถยึดประสานได้ด้วยตัวเอง แต่ถ้ามีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เหมาะสม จะสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ ทำให้ก่อตัวและแข็งตัวได้

การพัฒนาการใช้วัสดุใหม่โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งใช้วัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสมเรียกว่า วัสดุนี้ว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของธาตุเป็นองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ประกอบด้วยซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อผสมกับเบสอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate solution) และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนสามารถก่อตัวและแข็งตัวทำให้รับแรงได้

เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) เป็นเถ้าชีวมวลชนิดหนึ่งที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งหรือวัสดุผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ใช้ใบอ้อยและชานอ้อย เปรวมกันเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าชานอ้อยที่เหลือมีการนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อย เช่น นำไปเป็นส่วนผสมของปุ๋ยหมักเพื่อใช้ในการเกษตรหรือนำไปปรับสภาพดินที่เป็นกรด ที่เหลือส่วนมากจะนำไปทิ้งทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการขนทิ้ง ค่าใช้จ่ายในการขุดบ่อเพื่อฝังกลบ เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีได้ [6,7] และหาก มีการบดให้มีความละเอียดที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น มีการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยพบว่ามี  $\text{SiO}_2$  เป็นส่วนประกอบค่อนข้างสูง [8] แต่มีปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ค่อนข้างต่ำ ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเพื่อที่จะเพิ่มสัดส่วนของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยเลือกใช้ตะกอนน้ำประปาซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำประปา เนื่องจากพบว่ามีส่วนผสมของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ปนอยู่ [9] และเป็นการนำตะกอนน้ำประปามาใช้ให้เกิดประโยชน์และลดปริมาณที่ต้องกำจัดทิ้ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยนำเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปามาเป็นวัสดุตั้งต้น ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นตลอดเวลา นำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์และลดปริมาณที่ต้องกำจัด ซึ่งความรู้ที่ได้จะมีประโยชน์ในการผลิตและพัฒนาวัสดุใหม่เพื่อทดแทนหรือลดการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งจะ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไปในอนาคต

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุ

เถ้าขานอ้อยจากแหล่งกำจัดของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล จังหวัดกาฬสินธุ์ ที่นำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ถูกนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการเพิ่มความละเอียดด้วยการบดจนกระทั่งอนุภาคของเถ้าค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 เถ้าขานอ้อยบดแสดง ดังรูปที่ 1 (ก) สำหรับตะกอนน้ำประปาจากโรงผลิตน้ำประปา ถูกนำมาตากแห้งแล้วทำการย่อยให้มีขนาดเล็กลง ก่อนถูกนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 8 เพื่อให้ขนาดของตะกอนมีความสม่ำเสมอก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ๆ จากลักษณะทางกายภาพของตะกอนน้ำประปาลายดินเหนียว และมีองค์ประกอบคล้ายกับดินขาว โดยมีงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทดลองปรับปรุงดินขาวด้วยวิธีการเผาเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ และพบว่าดินขาวที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ให้ผลกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ค่อนข้างสูง [10,11] จากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำมาบดให้มีความละเอียดเช่นเดียวกันกับเถ้าขานอ้อย ตะกอนน้ำประปาเผาที่บดแล้วแสดงในรูปที่ 1 (ข) เมื่อถ่ายภาพขยายโดยใช้ เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่าของเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผาพบว่าเถ้าขานอ้อยรูปร่างลักษณะโดยส่วนมากเป็นเหลี่ยมมุม ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) ส่วนตะกอนน้ำประปาเผา มีรูปร่างลักษณะโดยส่วนมากเล็กและละเอียดกว่าเถ้าขานอ้อย ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข)

มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบถูกเตรียมไว้ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ทราบแนะนำให้ป็นมวลรวมละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ประมาณ

2.73 สำหรับมวลรวมหยาบมี 2 ชนิด คือ หินปูนย่อย (Limestone) และหินบะซอลต์ (Basalt) รูปที่ 3 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะของหินทั้งสองชนิด

น้ำกลั่นถูกใช้ในการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ สำหรับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) มีองค์ประกอบทางเคมี  $\text{Na}_2\text{O}$  ร้อยละ 15.32  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 32.87 และ  $\text{H}_2\text{O}$  ร้อยละ 15.81 โดยน้ำหนัก

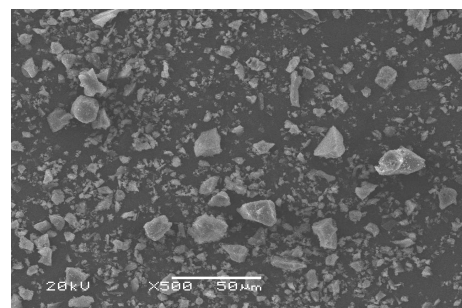


ก) เถ้าขานอ้อย

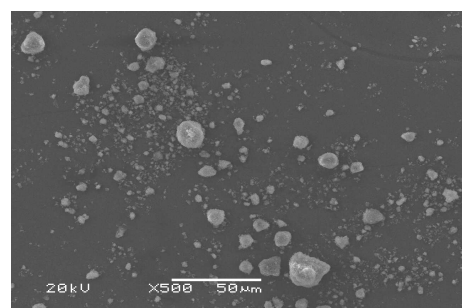


ข) ตะกอนน้ำประปาเผา

รูปที่ 1 ก) เถ้าขานอ้อย และ ข) ตะกอนน้ำประปาเผา



ก) เถ้าขานอ้อย





ข) ตะกอนน้ำประปาเผา

รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุตั้งต้น



ก) หินปูนย่อย



ข) หินบะซอลต์

รูปที่ 3 ก) หินปูนย่อย และ ข) หินบะซอลต์

## 2.2 วิธีการศึกษา

### 2.2.1 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

เถ้าขานอ้อยนำมาเป็นวัสดุหลักในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยมีปริมาณของส่วนผสมชนิดต่างๆ ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในตารางที่ 1 ใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 1.0 ใช้ทรายระหว่าง 570-582 กิโลกรัม น้ำหนักของมวลรวมหยาบหรือหินทั้งสองชนิดอยู่ในช่วง 1,228-1,254 กิโลกรัม และมีการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5.0 และ 7.5 โดยน้ำหนักอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) แปรผันอยู่ในช่วง 0.50-0.70 โดยน้ำหนัก

### 2.2.2 ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

การผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผาเริ่มจากเติมเถ้าขานอ้อยและตะกอน

น้ำประปาเผาพร้อมกันลงในเครื่องผสมคอนกรีตแล้วก็เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทรายสารละลายโซเดียมซิลิเกต และเติมมวลรวมหยาบเป็นส่วนผสมสุดท้ายเมื่อครบเวลาแล้วนำไปหล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและปล่อยให้ตัวอย่างอยู่ในอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปทำการบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบและทำการบ่มในอากาศจนครบอายุการทดสอบที่ 3 7 และ 28 วัน กระบวนการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแสดงดังรูปที่ 4 (ก) (ข) (ค) และ (ง)



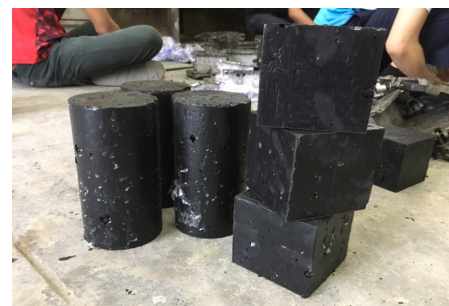
ก) ใส่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลงในแบบหล่อคอนกรีต



ข) นำพลาสติกใส (Plastic film) พันรอบแบบหล่อ



ค) นำตัวอย่างบ่มในตู้อบเป็นเวลา 48 ชั่วโมง



## คอนกรีต

## 2.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ง) ถอดแบบหล่อคอนกรีตและร่อนคราบอายุการทดสอบ

รูปที่ 4 ขั้นตอนการผสมและการเตรียมก้อนตัวอย่างซีโพลิเมอร์

ทำการทดสอบตัวอย่างทรงกระบอกและลูกบาศก์ตามมาตรฐาน ASTM C39 และ BS EN 12390-2 ด้วยเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)

และสภาพตัวอย่างซีโพลิเมอร์คอนกรีตหลังการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 ทำการกดตัวอย่างด้วยอัตราความเร็วที่ 0.15-0.35 เมกะปาสคาลต่อวินาที



ก) ก้อนตัวอย่างขณะการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ข) ก้อนตัวอย่างหลังจากการทดสอบ

รูปที่ 5 การทดสอบแรงอัดของซีโพลิเมอร์คอนกรีตและสภาพตัวอย่างหลังจากการทดสอบ

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของซีโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขาน้อยและตะกอนน้ำประปาเผา

| No | Mixtures  | Type of Rock | WWS (%) | NS/NH | AL/B | 1 Cube (kg/m <sup>3</sup> ) |           |            |                                        |            |            |
|----|-----------|--------------|---------|-------|------|-----------------------------|-----------|------------|----------------------------------------|------------|------------|
|    |           |              |         |       |      | BA (kg.)                    | WWS (kg.) | NaOH (kg.) | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg.) | Sand (kg.) | Rock (kg.) |
| 1  | L0.60W5.0 | Limestone    | 5       | 1     | 0.60 | 389.50                      | 20.50     | 122.90     | 122.90                                 | 570.40     | 1,228.90   |
| 2  | L0.55W5.0 | Limestone    | 5       | 1     | 0.55 | 389.50                      | 20.50     | 112.95     | 112.95                                 | 576.70     | 1,242.50   |
| 3  | L0.50W5.0 | Limestone    | 5       | 1     | 0.50 | 389.50                      | 20.50     | 104.50     | 104.50                                 | 582.00     | 1,254.00   |
| 4  | L0.60W7.5 | Limestone    | 7.5     | 1     | 0.60 | 379.25                      | 30.75     | 122.90     | 122.90                                 | 570.40     | 1,228.90   |
| 5  | L0.55W7.5 | Limestone    | 7.5     | 1     | 0.55 | 379.25                      | 30.75     | 112.95     | 112.95                                 | 576.70     | 1,242.50   |
| 6  | L0.50W7.5 | Limestone    | 7.5     | 1     | 0.50 | 379.25                      | 30.75     | 104.50     | 104.50                                 | 582.00     | 1,254.00   |
| 7  | B0.70W5.0 | Basalt       | 5       | 1     | 0.70 | 389.50                      | 20.50     | 149.10     | 149.10                                 | 553.70     | 1,193.00   |
| 8  | B0.65W5.0 | Basalt       | 5       | 1     | 0.65 | 389.50                      | 20.50     | 134.70     | 134.70                                 | 562.80     | 1,212.70   |
| 9  | B0.60W5.0 | Basalt       | 5       | 1     | 0.60 | 389.50                      | 20.50     | 122.90     | 122.90                                 | 570.40     | 1,228.90   |
| 10 | B0.70W7.5 | Basalt       | 7.5     | 1     | 0.70 | 379.25                      | 30.75     | 149.10     | 149.10                                 | 553.70     | 1,193.00   |
| 11 | B0.65W7.5 | Basalt       | 7.5     | 1     | 0.65 | 379.25                      | 30.75     | 134.70     | 134.70                                 | 562.80     | 1,212.70   |
| 12 | B0.60W7.5 | Basalt       | 7.5     | 1     | 0.60 | 379.25                      | 30.75     | 122.90     | 122.90                                 | 570.40     | 1,228.90   |
| 13 | L0.60W0.0 | Limestone    | 0       | 1     | 0.60 | 410.00                      | -         | 122.90     | 122.90                                 | 570.40     | 1,228.90   |
| 14 | L0.55W0.0 | Limestone    | 0       | 1     | 0.55 | 410.00                      | -         | 112.95     | 112.95                                 | 576.70     | 1,242.50   |
| 15 | L0.50W0.0 | Limestone    | 0       | 1     | 0.50 | 410.00                      | -         | 104.50     | 104.50                                 | 582.00     | 1,254.00   |
| 16 | B0.70W0.0 | Basalt       | 0       | 1     | 0.70 | 410.00                      | -         | 149.10     | 149.10                                 | 553.70     | 1,193.00   |
| 17 | B0.65W0.0 | Basalt       | 0       | 1     | 0.65 | 410.00                      | -         | 134.70     | 134.70                                 | 562.80     | 1,212.70   |
| 18 | B0.60W0.0 | Basalt       | 0       | 1     | 0.60 | 410.00                      | -         | 122.90     | 122.90                                 | 570.40     | 1,228.90   |

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ส่วนผสม xyWz โดยที่ x = ชนิดของหินที่ใช้ผสม (L=Limestone หรือ B=Basalt)

y = อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B), W = WWS = ตะกอนน้ำประปาเผา (Calcined Waste Water Sludge),

z = ร้อยละของปริมาณตะกอนน้ำประปาที่แทนที่ในเถ้าขาน้อย, NS = สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ),  
NH = สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ), BA = เถ้าขาน้อย (Bagasse Ash)

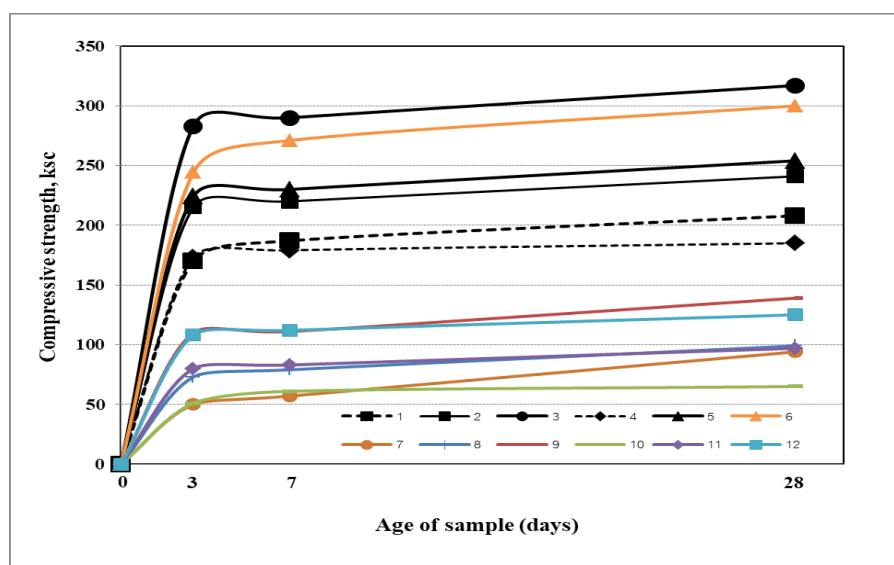
### 3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขาน้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผาโดยการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา พบว่าผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพิ่มขึ้นตามอายุของตัวอย่าง ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกันกับการพัฒนาำลังอัดของคอนกรีตปกติที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสารเชื่อมประสาน โดยรูปที่ 6 แสดงการพัฒนากำลังอัดที่อายุ

3 7 และ 28 วัน ของส่วนผสมที่ 1-12 และพบว่าการรับแรงอัดสูงสุดคือส่วนผสมที่ 3 เท่ากับ 317 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อตัวอย่างอายุ 28 วัน โดยใช้ส่วนผสมที่มีการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยตะกอนน้ำประปาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 0.50 และหินปูนย่อยเป็นมวลรวมหยาบ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา

| No. | Mixtures  | WWS<br>(%) | AL/B | Compressive Strength (ksc) |       |        |
|-----|-----------|------------|------|----------------------------|-------|--------|
|     |           |            |      | 3 day                      | 7 day | 28 day |
| 15  | L0.50W0.0 | 0          |      | 199                        | 244   | 248    |
| 3   | L0.50W5.0 | 5          | 0.50 | 283                        | 290   | 317    |
| 6   | L0.50W7.5 | 7.5        |      | 244                        | 271   | 300    |
| 14  | L0.55W0.0 | 0          |      | 182                        | 183   | 210    |
| 2   | L0.55W5.0 | 5          | 0.55 | 215                        | 220   | 241    |
| 5   | L0.55W7.5 | 7.5        |      | 224                        | 230   | 254    |
| 13  | L0.60W0.0 | 0          |      | 117                        | 148   | 169    |
| 1   | L0.60W5.0 | 5          | 0.60 | 170                        | 187   | 208    |
| 4   | L0.60W7.5 | 7.5        |      | 173                        | 179   | 185    |



รูปที่ 6 แสดงการพัฒนาของกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขาน้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผา

### 3.1 ผลของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

จากองค์ประกอบเคมีของเถ้าขาน้อยและตะกอนน้ำประปาเผาในตารางที่ 3 สามารถนำมาคำนวณหาอัตราส่วนโมลระหว่าง  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ได้ตามตารางที่ 4 พบว่าส่วนผสมที่ไม่เติมตะกอนน้ำประปาเผา จะมีอัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 31.70 ส่วนผสมที่เติมตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5 มีอัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 24.22 และส่วนผสมที่เติมตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 7.5 มีอัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 21.64 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าแนะนำในตารางที่ 5 ซึ่งมีค่าอัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เพียง 3.30 – 4.50 เท่านั้น สันนิษฐานว่าถ้าจะควบคุมอัตราส่วนโมลให้อยู่ในช่วงแนะนำก็จะสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของซีโพลิเมอร์ได้ ซึ่งในการลดอัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  สามารถทำได้โดยการลด  $\text{SiO}_2$  และเพิ่ม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  นั้นเอง (อริกา, 2553) จากการคำนวณค่าอัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ให้อยู่ในช่วง 3.30 – 4.50 นั้นจะต้องเติมตะกอนน้ำประปาเผาสูงถึงร้อยละ 70 เลยทีเดียว

วรยศ วิชูธีรศานต์ (2556) ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อกำลังอัดซีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากเถ้าขาน้อยผสมตะกอนน้ำประปาเผา โดยทดลองแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 0-40 พบว่าการแทนที่ตะกอนน้ำประปาไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้กำลังรับแรงอัดของซีโพลิเมอร์มอร์ตาร์สูงกว่าการแทนที่ร้อยละอื่นๆ

ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้การแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 0-7.5 พบว่าการแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักจะให้กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน สูงที่สุดเท่ากับ 317 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร รองลงมาคือการแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 7.5 ให้กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน สูงที่สุดเท่ากับ 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยน้ำหนักและต่ำสุดคือการแทนที่ตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก ให้กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน สูงที่สุดเท่ากับ 248 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามตารางที่ 6 โดยพบว่าอัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ของวัสดุตั้งต้นจะแปรผกผันกับกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 3 องค์ประกอบเคมีของเถ้าขาน้อยและตะกอนน้ำประปาเผา

| องค์ประกอบทางเคมี (%)   | เถ้าขาน้อย | ตะกอนน้ำประปาเผา |
|-------------------------|------------|------------------|
| $\text{SiO}_2$          | 77.57      | 45.50            |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 4.15       | 27.37            |
| CaO                     | 3.72       | 1.81             |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 3.00       | 11.85            |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 3.08       | 3.56             |
| $\text{SO}_3$           | 0.80       | 0.71             |
| LOI                     | 11.94      | -                |

ตารางที่ 4 อัตราส่วนโมล  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่เกิดจากการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา

| Case | BA (%) | WWS (%) | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ |
|------|--------|---------|----------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 1    | 100.0  | 0.0     | 318.04         | 17.02                   | 31.70                                |
| 2    | 95.0   | 5.0     | 311.46         | 21.78                   | 24.22                                |
| 3    | 92.5   | 7.5     | 308.18         | 24.16                   | 21.64                                |

ตารางที่ 5 อัตราส่วนโมลซีโพลิเมอร์เพสต์แนะนำ

| อัตราส่วน                                   | สัดส่วนที่แนะนำ (โดยโมล) |
|---------------------------------------------|--------------------------|
| $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$          | 0.20 – 0.48              |
| $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$        | 3.30 – 4.50              |
| $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$    | 10 – 25                  |
| $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ | 0.80 – 1.20              |
| W / B                                       | 0.30 – 0.40              |

ที่มา : ปริญญา, (2553)

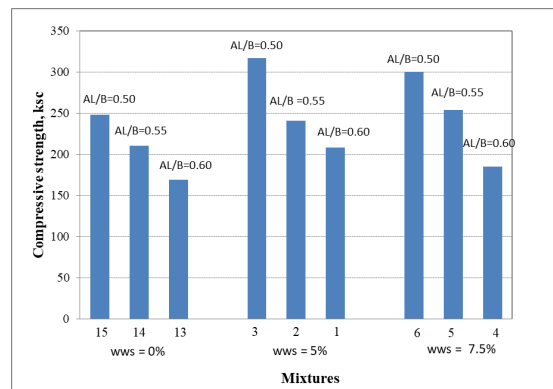
ตารางที่ 6 อัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของซีโพลิเมอร์คอนกรีต

| Mixtures  | WWS (%) | $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ | Compressive Strength (ksc) |      |       |
|-----------|---------|--------------------------------------|----------------------------|------|-------|
|           |         |                                      | 3day                       | 7day | 28day |
| L0.50W0.0 | 0.0     | 31.70                                | 199                        | 244  | 248   |
| L0.55W0.0 |         |                                      | 182                        | 183  | 210   |
| L0.60W0.0 |         |                                      | 117                        | 148  | 169   |
| L0.50W5.0 | 5.0     | 24.22                                | 283                        | 290  | 317   |
| L0.55W5.0 |         |                                      | 215                        | 220  | 241   |
| L0.60W5.0 |         |                                      | 170                        | 187  | 208   |
| L0.50W7.5 |         | 21.64                                | 244                        | 271  | 300   |

|           |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| L0.55W7.5 | 7.5 | 224 | 230 | 254 |
| L0.60W7.5 |     | 173 | 179 | 185 |

### 3.2 ผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา

การพิจารณาผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในอัตราส่วนร้อยละ 5.0-7.5 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปของกำลังรับแรงอัดในตารางที่ 2 พบว่าตะกอนน้ำประปาเผามีส่วนช่วยให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 และการแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5 ให้กำลังสูงสุดในกลุ่มเดียวกัน แต่ส่วนอัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.55 นั้น การแทนที่ร้อยละ 7.5 นั้นให้ผลดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 7 การแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผาทำให้ส่วนผสมมีความเหนียวข้นมากขึ้น เนื่องจากตะกอนน้ำประปามีการดูดซึมน้ำที่ค่อนข้างสูง ซึ่งในกลุ่มอัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 พบว่าการแทนที่ร้อยละ 5 ให้กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 317 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสูงที่สุดในการศึกษาในครั้งนี้ และเมื่อเพิ่มปริมาณของเหลวในส่วนผสมหรือเพิ่ม AL/B เป็น 0.55 พบว่าการแทนที่ด้วยตะกอนน้ำประปาร้อยละ 7.5 ให้กำลังอัดสูงสุด ซึ่งอาจเนื่องมาจากการสมดุลระหว่างของเหลวที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณตะกอนน้ำประปาที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ดี เมื่อเพิ่มปริมาณ AL/B เป็น 0.60 กลับพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 5 ด้วยตะกอนน้ำประปาให้กำลังสูงสุดในกลุ่มนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [12,13] ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะการเพิ่มปริมาณตะกอนน้ำประปาเผานั้น จะมีส่วนของวัสดุเฉื่อยหรืออนุภาคของดินเหนียว [14] ที่ไม่ทำปฏิกิริยาเป็นส่วนที่ไม่แข็งแรงภายในของเพสต์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไฮเดรชันที่ไม่สมบูรณ์ [15] ประกอบกับปริมาณของเถ้าขานอ้อยที่ลดลง จึงอาจจะส่งผลให้การชะล้าง  $\text{SiO}_2$  ได้ปริมาณน้อยลงและมีอัตราส่วนโมลที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลดลง



รูปที่ 7 กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เมื่อมีการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยตะกอนน้ำประปาเผา (หินปูนย่อย)

### 3.3 ผลของอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B)

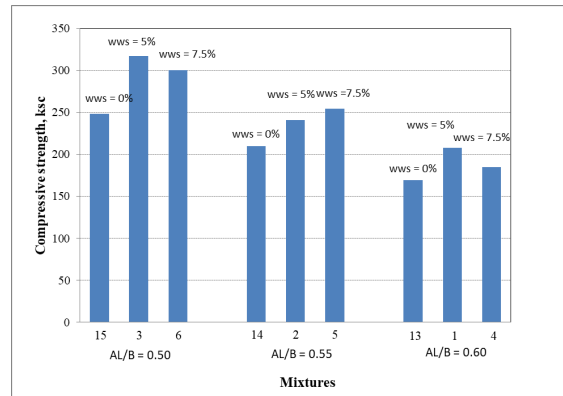
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งมีอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 0.50 0.55 และ 0.60 ตามลำดับ รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) พบว่าส่วนผสมที่มีค่า AL/B เท่ากับ 0.50 นั้น การยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าที่ค่อนข้างต่ำมากเพียง 5-15 มม. ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการทำงานไม่ตึง และเมื่อเพิ่มค่า AL/B = 0.60 ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 38-68 มม. ดังแสดงตามตารางที่ 7 ถ้าเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปก็ยังถือว่าอยู่ในช่วงต่ำ แต่ก็สามารถทำงานได้ สำหรับค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้น มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เพิ่มขึ้น [16] และมีการรายงานว่าอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) ที่ต่ำจะทำให้การเร่งการชะละลายออกไซด์ออกมาจากวัสดุตั้งต้นอีกด้วย [17] ตามลำดับ พฤติกรรมนี้คล้ายกับกฎของ Abrams [18] ที่ว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่ามากขึ้นเมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลง โดยกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 และค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างสม่ำเสมอเมื่อ AL/B เพิ่มขึ้นเป็น 0.55 และ 0.60



ซึ่งในปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์อาจจะมีส่วนเกิน (Excess water) ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกันกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ แล้วทำให้เกิดโพรงภายในเนื้อของคอนกรีตและส่งผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีต แต่เมื่อพิจารณาในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแล้วพบว่าอัตราส่วน AL/B ที่สูงขึ้นนั้นจะทำให้ความชื้นเหนียวลดลงและค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้น [19]

อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) มีผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหรือค่าการยุบตัวเป็นอย่างมาก ดังแสดงตามตารางที่ 8 และรูปที่ 9 ส่วนผสมที่ผสมด้วยหินปูนย่อย อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นที่มีค่า AL/B เท่ากับ 0.50 นั้น การยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าที่ค่อนข้างต่ำมากเพียง 5-15 มม. ซึ่งส่งผลให้

ความสามารถในการทำงานได้ไม่ดีนัก และเมื่อเพิ่มค่า AL/B = 0.55 ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 15-33 มม.



รูปที่ 8 ผลของอัตราส่วนอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นที่มีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 28 วัน (หินปูนย่อย)

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B)

| No. | Mixtures  | AL/B | WWS<br>(%) | Slump<br>(mm.) | Compressive Strength (ksc) |       |        |
|-----|-----------|------|------------|----------------|----------------------------|-------|--------|
|     |           |      |            |                | 3 day                      | 7 day | 28 day |
| 15  | L0.50W0.0 | 0.50 |            | 15             | 199                        | 244   | 248    |
| 14  | L0.55W0.0 | 0.55 | 0.0        | 26             | 182                        | 183   | 210    |
| 13  | L0.60W0.0 | 0.60 |            | 38             | 117                        | 148   | 169    |
| 3   | L0.50W5.0 | 0.50 |            | 5              | 283                        | 290   | 317    |
| 2   | L0.55W5.0 | 0.55 | 5.0        | 15             | 215                        | 220   | 241    |
| 1   | L0.60W5.0 | 0.60 |            | 55             | 170                        | 187   | 208    |
| 6   | L0.50W7.5 | 0.50 |            | 10             | 244                        | 271   | 300    |
| 5   | L0.55W7.5 | 0.55 | 7.5        | 33             | 224                        | 230   | 254    |
| 4   | L0.60W7.5 | 0.60 |            | 68             | 173                        | 179   | 185    |

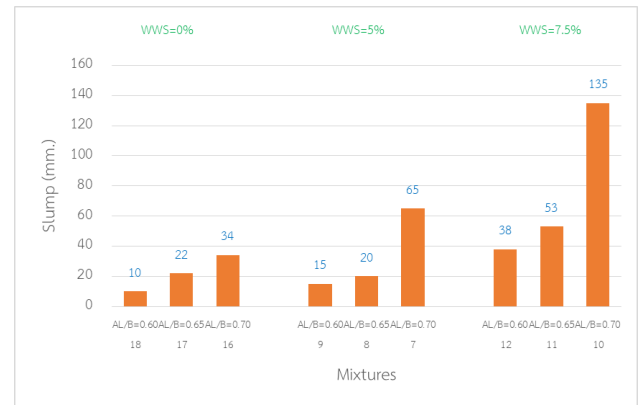
เมื่อเพิ่มค่า AL/B = 0.60 ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 38-68 มม. รูปที่ 10 ส่วนผสมที่ผสมด้วยหินบะซอลต์ อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นที่มีค่า AL/B เท่ากับ 0.60 นั้น การยุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าที่ค่อนข้างต่ำมากเพียง 10-38 มม. และเมื่อเพิ่มค่า AL/B = 0.65 ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 20-53 มม. และเมื่อเพิ่มค่า AL/B = 0.70 ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 34-135 มม.

### 3.4 ผลกระทบจากมวลรวมหยาบที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

จากผลของการทดสอบพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากหินปูนย่อยมีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากหินบะซอลต์ค่อนข้างมากทั้งนี้อาจเนื่องจากความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพของหินทั้ง 2 ชนิด ซึ่งมีหลายงานวิจัยได้กล่าวถึงค่าการดูดซึมน้ำของหินบะซอลต์ที่มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าหินปูนย่อย เพราะหินบะซอลต์มีโพรง



รูปที่ 9 การทดสอบหาค่ายุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (ผสมหินปูนย่อย)



รูปที่ 10 การทดสอบหาค่ายุบตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (ผสมหินบะซอลต์)

ตารางที่ 8 การทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (ค่าการยุบตัว)

| No. | Mixtures  | Type of Rock | WWS (%) | AL/B | Slump (mm.) |
|-----|-----------|--------------|---------|------|-------------|
| 1   | L0.60W5.0 | limestone    | 5.0     | 0.60 | 55          |
| 2   | L0.55W5.0 | limestone    | 5.0     | 0.55 | 15          |
| 3   | L0.50W5.0 | limestone    | 5.0     | 0.50 | 5           |
| 4   | L0.60W7.5 | limestone    | 7.5     | 0.60 | 68          |
| 5   | L0.55W7.5 | limestone    | 7.5     | 0.55 | 33          |
| 6   | L0.50W7.5 | limestone    | 7.5     | 0.50 | 10          |
| 7   | B0.70W5.0 | Basalt       | 5.0     | 0.70 | 65          |
| 8   | B0.65W5.0 | Basalt       | 5.0     | 0.65 | 20          |
| 9   | B0.60W5.0 | Basalt       | 5.0     | 0.60 | 15          |
| 10  | B0.70W7.5 | Basalt       | 7.5     | 0.70 | 135         |
| 11  | B0.65W7.5 | Basalt       | 7.5     | 0.65 | 53          |
| 12  | B0.60W7.5 | Basalt       | 7.5     | 0.60 | 38          |
| 13  | L0.60W0.0 | limestone    | 0.0     | 0.60 | 38          |
| 14  | L0.55W0.0 | limestone    | 0.0     | 0.55 | 26          |
| 15  | L0.50W0.0 | limestone    | 0.0     | 0.50 | 15          |
| 16  | B0.70W0.0 | Basalt       | 0.0     | 0.70 | 34          |
| 17  | B0.65W0.0 | Basalt       | 0.0     | 0.65 | 22          |
| 18  | B0.60W0.0 | Basalt       | 0.0     | 0.60 | 10          |

ขนาดเล็กอยู่ภายในเนื้อหินเป็นจำนวนมาก[20]-[23] หินบะซอลต์ เป็นหินภูเขาไฟหรือหินอัคนีพชนิดหนึ่งเกิดจากการที่ลาวาหรือหินหนืดขึ้นมابนผิวโลกและมีการแข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส และมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้ผลึกแร่ขนาดละเอียดหรือมีเนื้อดอก (Porphyritic texture) (รายงานวิชาการ ฉบับที่ สทร 4/2561 , สำนักทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี) หินบะซอลต์ในประเทศไทยพบมากในจังหวัดจันทบุรี ตราด กาญจนบุรี แพร่ บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ เชียงราย และลำปาง มีลักษณะเนื้อละเอียด

มีสีเข้ม เช่น เทาเข้มถึงดำ น้ำตาลเข้ม ส่วนมากมีรูพรุนหรือฟองอากาศในเนื้อหิน คุณสมบัติมีความถ่วงจำเพาะ 2.5-2.8 ความพรุน 7-25 % กำลังวัสดุอัด 90-200 MPa กำลังวัสดุดึง 7-25 MPa กำลังวัสดุเฉือน 12-40 MPa ประโยชน์ใช้เป็นหินก่อสร้าง ทำถนน และหินโรยทางรถไฟ (การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณี จังหวัดบุรีรัมย์:กรมทรัพยากรธรณี)

จากผลการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของมวลรวมหยาบพบว่า หินปูนย่อยมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.68 และมีการดูดซึมน้ำน้อย

ละ 0.51 ส่วนหินบะซอลต์มีความถ่วงจำเพาะ 2.76 ส่วนค่าการดูดซึมน้ำสูงถึงร้อยละ 2.51 ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำของหินบะซอลต์สูงกว่าหินหินปูนย่อยถึง 4-5 เท่า ในส่วนของการสึกหรอพบว่า หินปูนย่อยมีค่าการสึกหรอร้อยละ 26.50 มากกว่าการสึกหรอของหินบะซอลต์ที่มีการสึกหรอร้อยละ 19.70 ดังแสดงในตารางที่ 9 สอดคล้องกับการทดสอบคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินในประเทศไทย (สุรพล สงวนแก้ว และคณะ, 2547) ด้วยลักษณะเช่นนี้อาจเป็นเหตุที่ทำให้หน้าหรือส่วนของสารละลายจะถูกดูดซึมเข้าไปจำนวนหนึ่ง ทำให้ปริมาณสารละลายที่จะทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นที่เป็นเถ้าขานอ้อยและตะกอนน้ำประปาเผามีน้อยกว่าส่วนผสมที่ใช้หินปูนย่อย ความสามารถในการชะออกไซด์ออกมากี่ลดต่ำลง และผลกระทบจากการที่มีสารละลายในส่วนผสมเหลือน้อยกว่าอีกอย่างที่สำคัญคือส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ได้จะมีความชื้นเหนียวที่ค่อนข้างสูง เป็นการยากในการทำให้เนื้อแน่น และอาจเกิดโพรง

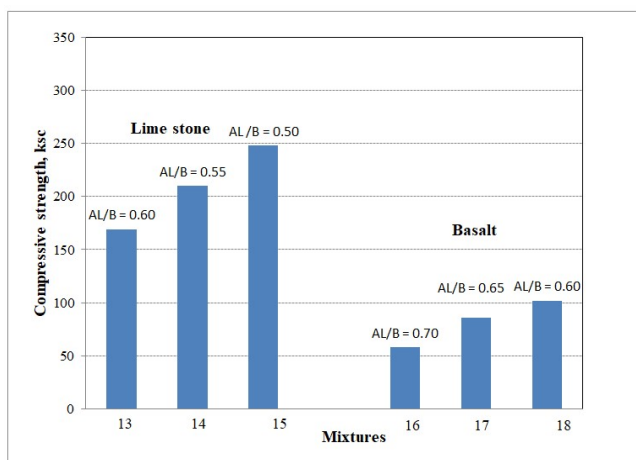
ภายในเนื้อวัสดุ และกระทบต่อการรับกำลังในที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีส่วนผสมเดียวกันสำหรับส่วนผสมที่ 13 และ 18 มีอัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.60 ใช้หินปูนย่อยและหินบะซอลต์ตามลำดับได้กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 169 และ 102 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรซึ่งแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์จากหินปูนย่อยมีกำลังอัดที่ดีกว่า แสดงตามตารางที่ 10 และรูปที่ 11

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานมวลรวมหยาบ

| วัสดุ     | ความถ่วงจำเพาะ | การสึกหรอ (LAA) | การดูดซึมน้ำ |
|-----------|----------------|-----------------|--------------|
| Limestone | 2.68           | 26.50           | 0.50         |
| Basalt    | 2.75           | 19.70           | 2.15         |

ตารางที่ 10 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากมวลรวมหยาบ 2 ชนิด

| No. | Mixtures  | Type of Rock | AL/B | Compressive Strength (ksc) |       |        |
|-----|-----------|--------------|------|----------------------------|-------|--------|
|     |           |              |      | 3 day                      | 7 day | 28 day |
| 13  | L0.60W0.0 | limestone    | 0.6  | 117                        | 148   | 169    |
| 14  | L0.55W0.0 | limestone    | 0.55 | 182                        | 183   | 210    |
| 15  | L0.50W0.0 | limestone    | 0.5  | 199                        | 244   | 248    |
| 16  | B0.70W0.0 | Basalt       | 0.7  | 42                         | 52    | 58     |
| 17  | B0.65W0.0 | Basalt       | 0.65 | 68                         | 70    | 86     |
| 18  | B0.60W0.0 | Basalt       | 0.6  | 76                         | 88    | 102    |



รูปที่ 11 ผลกระทบจากมวลรวมหยาบที่มีต่อกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

#### 4. สรุปผลและอภิปรายผล

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยที่ใช้ตะกอนน้ำประปาเผาแทนที่ และใช้มวลรวมหยาบที่มีลักษณะแตกต่างกัน 2 ชนิด คือ หินปูนย่อยและหินบะซอลต์ สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 อัตราส่วน  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  ของวัสดุตั้งต้นมีผลต่อกำลังรับแรงอัด โดยพบว่าอัตราส่วน  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  ของวัสดุตั้งต้นจะแปรผกผันกับกำลังรับแรงอัด

4.2 การใช้ตะกอนน้ำประปาเผาร้อยละ 5-7.5 มีแนวโน้มช่วยให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสูงขึ้น โดยให้กำลังรับแรงอัด 185-317 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่อายุ 28 วันเมื่อใช้หินปูนย่อยเป็นมวลรวมหยาบ (ที่ AL/B เท่ากับ 0.50)

4.3 อัตราส่วน AL/B เท่ากับ 0.50 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด การเพิ่มอัตราส่วน AL/B ช่วยให้ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตดีขึ้น แต่ทำให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง

4.4 จีโอโพลิเมอร์ที่ใช้มวลรวมหยาบที่เป็นหินปูนย่อยมีกำลังอัดที่ดีกว่าหินบะซอลต์ กล่าวคือมวลรวมหยาบที่มีความพรุนและอัตราดูดซึมน้ำต่ำ มีแนวโน้มทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแข็งแรงกว่ามวลรวมที่มีความพรุนและอัตราดูดซึมน้ำสูง

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณหน่วยวิจัยวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณนายทรงฤทธิ์ พุทธลา นายพาโชค ฉันทพิชชาและนายณัฐดนัย แนวพรม และบุคลากรในห้องวิจัย บุคลากรของคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และได้ร่วมสำเร็จลุล่วงด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (สศอ.) เข้าถึงได้จาก: <http://www.oie.go.th>
- [2] สำเริง รักซ้อน และนิโรจน์ เงินพรม การพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบ และเถ้าขาน อ้อย กรุงเทพมหานคร : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
- [3] Cevika A, Alzebareea R, Humura G, Niş A, Gülşan ME, Effect of nano-silica on the chemical durability and mechanical performance of fly ash based geopolymer concrete, *Ceramics International*. 44 (2018) 12253-12264.
- [4] สำเริง รักซ้อน. วัสดุซีเมนต์ชนิดใหม่ มีเถ้าถ่านหินผสมรวมกับเถ้าแกลบ- เปลือกไม้ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2548; 32 (3):423-440
- [5] Sata V. The Use of local pozzolan in fiber Reinforced Concrete. *Khon Kaen University Engineering Journal*. 2010; 38 (1):29-37
- [6] Cordeiro GC, Andreao PV, Tavares LM. Pozzolan properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning. *Heliyon*. 2019; 1: e02566.
- [7] Rajasekara A, Arunachalama K, Kottaisamyb M, Saraswathy V. Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*. 2018; 171: 350-356
- [8] Duangchan A. *Development of bagasse ash concrete block for construction [Thesis]*. Thailand: Kasetsart University; 2006
- [9] เกียรติสุตา สมณา. การใช้ตะกอนประปาเป็นวัสดุประสาน วารสารคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
- [10] อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์. การศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและดินขาวเผา [วิทยานิพนธ์]. จังหวัดขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2549.
- [11] เจริญชัย ฤทธิธร. การศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากดินขาวระนองเผา [วิทยานิพนธ์]. จังหวัดขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2550.
- [12] อธิกา วงศ์วานกลม, สหลาก หอมวุฒิมวงศ์. การศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าขานอ้อยผสมตะกอนน้ำประปา การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15 วิศวกรรมโยธากับการพัฒนาท้องถิ่น. วันที่ 12-14 พฤษภาคม 2553; ศูนย์ แกรนคอนเวนชั่นเซ็นเตอร์, อุบลราชธานี; หน้า 201.
- [13] วรยศ วิฑูริศานต์, สหลาก หอมวุฒิมวงศ์, จักรพันธ์ วงษ์พา. การปรับปรุงตะกอนน้ำประปาด้วยวิธีการเผาผสมเถ้าขานอ้อยเพื่อผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18. 8-10 พฤษภาคม 2556; เชียงใหม่ หน้า MAT 274-277
- [14] ฤชดา นุ่มนวล. การใช้ตะกอนจากระบบประปาทดแทนดินเหนียวในการผลิตอิฐมอญ [วิทยานิพนธ์]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร; 2540.
- [15] ปริญา จินดาประเสริฐ, ถนัดกิจ ชาริรัตน์ โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ. ขอนแก่น;



ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน,  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2548

- [16] เจริญศักดิ์ กลัปปะสิทธิ์, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปริญา  
จินดาประเสริฐ, สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ. จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่  
ทำจากเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล ตอนที่ 1: ของสัดส่วน  
ผสมต่อกำลังอัด. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*.  
2551; 19(2): 9-16
- [17] Konga DLY, Sanjayana JG, Sagoe-Crentsil K.  
Comparative performance of geopolymers  
made with metakaolin and fly ash after  
exposure to elevated temperatures. *Cement  
and Concrete Research*. 2007; 37(12): 1583–  
1589.
- [18] Abrams DA. *Design of Concrete Mixtures:  
Bulletin 1*. Chicago: Structural Materials  
Research Laboratory, Lewis Institute; 1918.
- [19] Zuhua Z, Xiao Y, Huajun Z, Yue C. Role of water  
in the synthesis of calcined kaolin-based  
geopolymer. *Applied Clay Science*. 2009; 43(2):  
218–223
- [20] El-Alfi, EA, Radwan AM, Ali MH. 2004.  
Physicomechanical properties of basalt bricks.  
*International Ceramic Review*. 2004; 53(3): 178–  
181.
- [21] ดนุพล ตันนโยภาส. แร่และหิน. สงขลา:  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2553.
- [22] สมพิศ ตันตวรนาท, ประชุม คำพุฒ, กิตติพงษ์ สุวิโร.  
การเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นฉนวนความร้อนและการ  
รับกำลังของคอนกรีตบล็อกผสมน้ำยางธรรมชาติ: กรณี  
ผสมมวลรวมขนาดต่างกัน. *เอกสารประกอบการประชุม  
วิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 17*. โรงแรม เซ็น  
ทาราไฮเทลแอนด์คอนเวนชันเซ็นเตอร์, อุตรธานี; 2555.
- [23] พุทธิพงษ์ หะสิทธิ์ตันวัฒนา. *คุณสมบัติทางกายภาพและ  
เชิงกลของมวลรวมหยาบที่มีขนาดต่างกัน*. ภาควิชา  
วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย