



# ผลกระทบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อสมบัติทางกายภาพ ของเถ้าหนักจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

## Effect of Portland cement on physical properties of bottom ash geopolymer mortar

ชนากกร ภูเงินขำ<sup>1</sup> และ สกนวรรณ ห่านจิตสุวรรณ<sup>2\*</sup>

Tanakorn Phoo-ngernkham<sup>1</sup> and Sakonwan Hanjitsuwan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 744 ถ.สุรนารายณ์ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

<sup>2</sup>สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

119 หมู่ 9 ถ.ลำปาง-แม่ทะ ต.ชมพู อ.เมือง จ.ลำปาง 52100

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Isan, NakhonRatchasima, 3000

Program in Civil Technology, Faculty of Industrial Technology,

LampangRajabhat University, Lampang, 52100

\*yim\_kachan@yahoo.com, hanjitsuwan@gmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าหนักเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยมีการศึกษาปัจจัยของปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าหนัก เท่ากับ 0:100, 10:90, 20:80 และ 30:70 และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นของเหลวในส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าหนัก และอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ระยะเวลาก่อตัวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่เถ้าหนักมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ภายในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าหนัก เท่ากับ 30:70 และใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.9 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 16.67 เมกะปาสกาล สำหรับขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำ พบว่ามีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

### ABSTRACT

This article investigates the utilization of bottom ash (BA) in geopolymer material with various factors of Portland cement (PC) replacement and liquid alkali to binder (L/B) ratio on physical properties of geopolymer mortar. This study is used the PC:BA ratio of 0:100, 10:90, 20:80 and 30:70. The 10 molar of sodium hydroxide and sodium silicate solution are used as the liquid portion in the mixture. The test results indicate that the increase in PC:BA ratio and L/B ratio affect mechanical properties geopolymer mortar. The setting time of geopolymer mortar decreases with increasing of PC

replacement. The use of PC to replace BA is significantly affected to the reaction products of geopolymer matrix. The uses of PC:BA ratio at 30:70 and L/B ratio at 0.9 gives high compressive strength, which is 16.67MPa. For total porosity and water absorption test, they are decreased as PC replacement increases. This resulted is corresponded to compressive strength results of geopolymer mortar.

## 1. บทนำ

การจัดการวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมยังคงเป็นประเด็นที่ควรให้ความสำคัญและได้รับการจัดการอย่างจริงจังเพื่อลดการนำวัสดุพลอยได้มากองทิ้งในที่โล่งและส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม หนึ่งในวัสดุพลอยได้ที่ปัจจุบันสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง โดยการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน คือเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แต่อย่างไรก็ตามเถ้าลอยดังกล่าวยังคงเหลือกองทิ้งอีกจำนวนมาก ในปัจจุบันมีความพยายามในการพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่เพื่อนำมาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยวัสดุดังกล่าวสามารถก่อตัวและรับกำลังได้เหมือนกับระบบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์วัสดุนั้นคือจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์สามารถเตรียมได้จากการนำวัสดุพลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมที่มีองค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นวัสดุตั้งต้นมาทำปฏิกิริยากับ สารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์และ สารละลายอัลคาไล-ซิลิเกตทำให้สามารถก่อตัวและรับกำลังอัดได้ [1] ในประเทศไทยนิยมใช้เถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้น ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินา มีองค์ประกอบทางแร่ที่มีความเป็นอสังฐานที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารละลายต่าง และมีขนาดอนุภาคเล็ก [1] ขณะเดียวกันวัสดุพลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะอีกชนิดหนึ่งคือเถ้าหนัก โดยที่เถ้าหนักมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเช่นเดียวกับเถ้าลอย แต่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า มีความพรุนสูง และมีส่วนอสังฐานน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอย [1] ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้งาน อาภา สชนเสาวภาคย์ [2] รายงานไว้ว่าเมื่อเถ้าหนักมีขนาดอนุภาคเล็กลงช่วยเพิ่ม

ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาให้ดีขึ้น แต่ยังคงมีกำลังรับแรงอัดที่ค่อนข้างต่ำ ขณะที่จากงานวิจัยของ Chindaprasirt et al., [3] รายงานไว้ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยสามารถให้กำลังอัดได้สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนัก เนื่องด้วยลักษณะเฉพาะของวัสดุตั้งต้นอย่างไรก็ตามจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่อุณหภูมิปกติ ยังคงมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ ดังนั้น จึงมีงานวิจัยที่ได้พยายามศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่อุณหภูมิปกติ เช่น Garcia-Lodeiro et al. [4] ศึกษาจีโอโพลิเมอร์ผสมแคลเซียมออกไซด์เป็นสารผสมเพิ่ม จากรายงานดังกล่าวสรุปไว้ว่าเมื่อระบบของจีโอโพลิเมอร์มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้นในระบบมีแนวโน้มส่งผลเชิงทางบวกต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างอัลคาไลเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) คล้ายกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาในระบบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้ระบบมีสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตแทรกอยู่กับผลผลิตของจีโอโพลิเมอร์ส่งผลให้วัสดุแข็งตัวและรับกำลังได้สูงขึ้นที่อุณหภูมิปกติและมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นจากผลงานวิจัยของ Phoo-ngernkham et al. [5] และ ธนากร ภูเงินขำ และคณะ [6] แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยส่งผลเชิงบวกต่อการพัฒนาการก่อตัวและการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาแทนที่ในเถ้าหนักเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าหนักเพื่อปรับปรุงสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนัก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าหนักมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ซึ่งนอกจากจะเป็นการนำวัสดุพลอยได้มาใช้ประโยชน์สูงสุดในงานวัสดุก่อสร้างนอกจากนั้นยังเป็นการจัดการสิ่งแวดล้อมเพื่อลดการกองทิ้งวัสดุพลอยได้ดังกล่าว โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัวกำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนักที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำวัสดุตั้งต้นไปใช้กับงานวัสดุก่อสร้างต่อไป

## 2. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ประกอบด้วย เถ้าหนัก (BA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยการบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 80 เพื่อให้ได้อนุภาคที่มีขนาดปานกลางที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) และทรายละเอียด (RS) องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ BA และ PC

Chemical compositions	BA (%)	PC (%)
SiO <sub>2</sub>	26.17	20.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.79	4.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.21	3.40
CaO	28.51	65.30
MgO	2.98	1.50
Na <sub>2</sub> O	1.05	0.40
K <sub>2</sub> O	1.43	0.10
MnO	0.12	-
LOI + SO <sub>3</sub>	9.17	3.80

สารละลายที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ Na<sub>2</sub>O เท่ากับ 13.45%,

SiO<sub>2</sub> เท่ากับ 32.39% และ H<sub>2</sub>O เท่ากับ 54.16% ตามลำดับ

### 2.2 การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยแปรผันอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าหนัก เท่ากับ 0:100, 10:90, 20:80 และ 30:70 และอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/B) เท่ากับ 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 1.5 ทุกอัตราส่วนผสม

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของเถ้าหนักจีโอโพลิเมอร์

Symbol	BA (g)	PC (g)	RS (g)	NH (g)	NS (g)
0.6BA0PC	100	-	150	20.0	40.0
0.6BA10PC	90	10	150	20.0	40.0
0.6BA20PC	80	20	150	20.0	40.0
0.6FA30PC	70	30	150	20.0	40.0
0.7BA0PC	100	-	150	23.3	46.7
0.7BA10PC	90	10	150	23.3	46.7
0.7BA20PC	80	20	150	23.3	46.7
0.7FA30PC	70	30	150	23.3	46.7
0.8BA0PC	100	-	150	26.7	53.3
0.8BA10PC	90	10	150	26.7	53.3
0.8BA20PC	80	20	150	26.7	53.3
0.8FA30PC	70	30	150	26.7	53.3
0.9BA0PC	100	-	150	30.0	60.0
0.9BA10PC	90	10	150	30.0	60.0
0.9BA20PC	80	20	150	30.0	60.0
0.9FA30PC	70	30	150	30.0	60.0

สำหรับขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เริ่มต้นด้วยผสมเถ้าหนัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และทรายให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมของเหลวที่เตรียมไว้ (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต) ลงไปในส่วนผสมแล้วผสมต่อเป็นเวลาประมาณ 5 นาที จนส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันสำหรับสารละลายต่างคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะผสมให้เข้ากันก่อนนำไปใช้ เป็นของเหลวในส่วนผสม [6]

## 2.3 การทดสอบตัวอย่าง

### 2.3.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้าเนินการทดสอบด้วยเครื่องมือไวกะตามมาตรฐาน ASTM C191 [7] โดยดำเนินการทดสอบในห้องที่มีอุณหภูมิปกติ สำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบหลังจากกระบวนการผสมแล้วเสร็จทำการเทจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้าลงในแบบหล่อทรงกรวยแล้วปาดหน้าให้เรียบซึ่งการวัดระยะเวลาการก่อตัวคือระยะเวลาที่เข็มไวกะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 มิลลิเมตร ปลดปล่อยไปในเนื้อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้า ในระยะเวลา 30 วินาที การหาความสัมพันธ์ของเวลาที่ผ่านไปกับระยะที่เข็มจมเป็นระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่เข็มจมในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้า 25 มิลลิเมตร คือระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และเมื่อเวลาผ่านไปจนเข็มไม่จมในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้า คือระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายโดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 2 ตัวอย่างต่อ 1 ส่วนผสม

### 2.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

หลังจากกระบวนการผสมแล้วเสร็จ ทำการเทจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้าลงในแบบขนาด 50x50x50 มิลลิเมตรตามมาตรฐาน ASTM C109 [8] โดยกระทุ้งเนื้อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้าแต่งกระทุ้ง และใช้เกรียงปาดหน้าตัวอย่างให้เรียบหลังจากนั้นทำการห่อแบบหล่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างและเก็บไว้ที่อุณหภูมิปกติจนครบอายุการทดสอบตัวอย่างที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วันก่อนการทดสอบดำเนินการวัดขนาดตัวอย่างและชั่งน้ำหนัก และนำเข้าเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยให้ตัวอย่างอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่องทดสอบและผิวก่อนตัวอย่างสัมผัสกับแป้นกดโดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง

### 2.3.3 การทดสอบค่าขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำ

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาค่าขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้าเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642 [9] สำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบเริ่มต้นด้วยเทจีโอ

โพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้าลงในแบบหล่อขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับกับการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยทำการทดสอบหาค่าขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้าที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน โดยเมื่อครบอายุที่ต้องการทดสอบ ดำเนินการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักตัวอย่าง และนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลานำออกจากเตาอบและชั่งน้ำหนัก ( $W_{dry}$ ) จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำอีก 48 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลานำตัวอย่างขึ้นจากน้ำและชั่งน้ำหนัก ( $W_{sat}$ ) และสุดท้ายคือชั่งน้ำหนักในน้ำ ( $W_{air}$ ) เพื่อหาค่าการดูดซึมน้ำ ขนาดโพรง และการดูดซึมน้ำโดยสามารถคำนวณหาค่าขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำได้จากสมการที่ (1)-(2)

$$\text{porosity (\%)} = \left( \frac{W_{air} - W_{dry}}{W_{air} - W_{sat}} \right) \times 100 \quad (1)$$

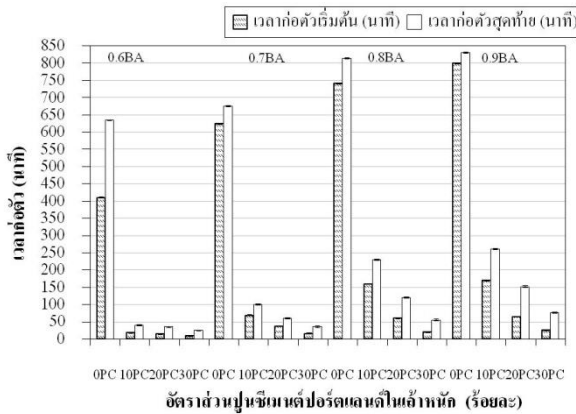
$$\text{absorption (\%)} = \left( \frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{sat}} \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ porosity หมายถึง ขนาดโพรง (เปอร์เซ็นต์), Absorption หมายถึง การดูดซึมน้ำ (เปอร์เซ็นต์),  $W_{sat}$  หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างหลังแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (กรัม),  $W_{dry}$  หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างหลังอบที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (กรัม) และ  $W_{air}$  หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างในขณะที่ชั่งในน้ำ (กรัม)

## 3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

### 3.1 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้า

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้าเมื่อแปรผันอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าหนัก เท่ากับ 0:100, 10:90, 20:80 และ 30:70 และอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 ดังแสดงในรูปที่ 1



**รูปที่ 1** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉาบหุ้มและอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานกับระยะเวลาก่อตัว

จากรูปที่ 1 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉาบหุ้มเพิ่มขึ้น เช่น ระยะเวลาการก่อตัวของ 0.6BA0PC, 0.6BA10PC, 0.6BA20PC และ 0.6BA30PC มีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 410, 18, 14 และ 7 นาที ตามลำดับ และระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 635, 40, 35 และ 25 นาที ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉาบหุ้มเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง เนื่องจากปริมาณของแคลเซียมออกไซด์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้จีโอโพลิเมอร์เจลสามารถจับตัวกันและแข็งตัวได้รวดเร็วขึ้น จากผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากฉาบหุ้มเมื่อไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะใช้เวลาในการก่อตัวก่อนข้างมาก เนื่องจากฉาบหุ้มมีอนุภาคขนาดใหญ่และเกี่ยวข้องการเกิดปฏิกิริยาจึงส่งผลต่อระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปัจจัยของอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น เช่น ระยะเวลาการก่อตัวของ 0.6BA0PC, 0.7BA0PC, 0.8BA0PC และ 0.9BA0PC มีระยะเวลา

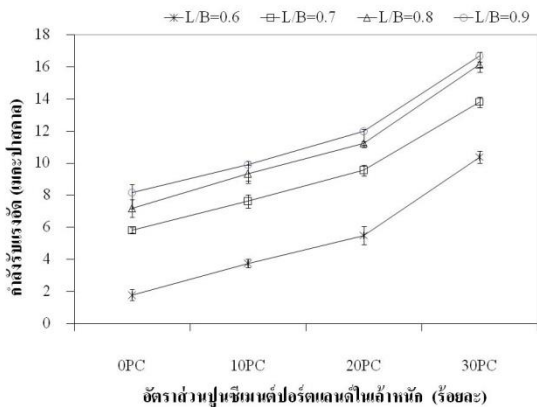
ก่อตัวเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 410, 625, 742 และ 800 นาที ตามลำดับและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 635, 675, 815 และ 830 นาที ตามลำดับ การเพิ่มอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการทำงานเพิ่มขึ้น กล่าวคือการเพิ่มขึ้นของสารละลายต่างที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ทำให้เพิ่มความสามารถในการชะละลายซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมออกไซด์จากวัสดุตั้งต้นมากขึ้น ซึ่งการที่เพิ่มความสามารถชะละลายดังกล่าวหมายถึงจำเป็นต้องใช้เวลามากขึ้น ดังรายงานวิจัยของอาภา สชนเสาวภาคย์ [2] จากผลทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉาบหุ้มและอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ การใช้งานจีโอโพลิเมอร์ควรพิจารณาถึงส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการใช้งานนั้นๆ

### 3.2 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน เมื่อแปรผันอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉาบหุ้มและอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน ดังแสดงในรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉาบหุ้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเช่น ค่ากำลังรับแรงอัดของ 0.6BA0PC, 0.6BA10PC, 0.6BA20PC และ 0.6BA30PC มีค่าเท่ากับ 1.78, 3.76, 5.50 และ 10.37 เมกะปาสกาล ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉาบหุ้มเนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำหน้าที่เป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์ให้กับระบบฉาบหุ้มจีโอโพลิเมอร์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับซิลิกาและอะลูมินาจากฉาบหุ้มเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตมากขึ้นภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ทำให้ช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ซึ่ง

ผลผลิตดังกล่าวทำหน้าที่เหมือนมวลรวมเล็กๆ ส่งผลให้เพิ่มความแข็งแรงและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ นอกจากนี้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาส่งผลให้มีการปรับแต่งขนาดโพรงในทำนองเดียวกันกับปฏิกิริยาปอซโซลานของระบบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [5-6]



**รูปที่ 2** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉ่าหนักกับค่ากำลังรับแรงอัด

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปัจจัยของอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น เช่น กำลังรับแรงอัดของ 0.6BA0PC, 0.7BA0PC, 0.8BA0PC และ 0.9BA0PC มีค่าเท่ากับ 1.7, 5.82, 7.18 และ 8.16 เมกะปาสกาลตามลำดับจากผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าต่ำกว่าเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7, 0.8 และ 0.9 ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากที่อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 ปริมาณของเหลวไม่เพียงพอต่อระบบของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เพราะฉ่าหนักเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงทำให้มีการดูดน้ำค่อนข้างสูงในขณะที่อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7, 0.8

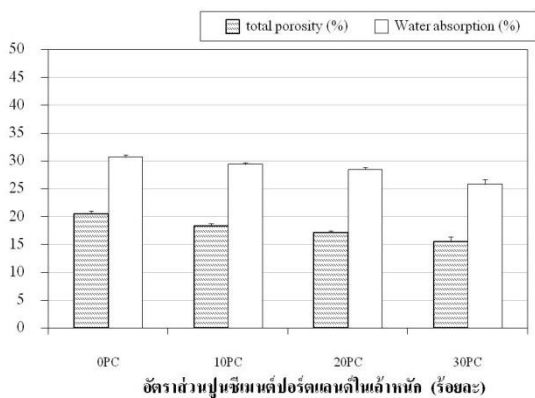
และ 0.9 ของเหลวในส่วนผสมมีความเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาและส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีทำให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงกว่าซึ่งจากผลทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมที่มีความเหมาะสมคือ L/B=0.8 และการใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉ่าหนัก เท่ากับ 30:70 ถึงแม้ว่าที่ L/B=0.9 และการใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉ่าหนัก เท่ากับ 30:70 จะมีค่ามากกว่าเล็กน้อย แต่หากพิจารณาถึงราคาที่ใช้ในการผลิตผู้วิจัยจึงขอแนะนำส่วนผสมที่มีความเหมาะสมคือ L/B=0.8 และการใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉ่าหนัก เท่ากับ 30:70

เมื่อพิจารณาผลกำลังรับแรงอัดของส่วนผสมที่อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉ่าหนักเท่ากับ 20:80 มีค่ากำลังรับแรงอัดประมาณ 9.56 เมกะปาสกาล ซึ่งน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบฉ่าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่มีการแทนที่เท่ากัน 48.58 เมกะปาสกาล [6] ที่อายุตัวอย่าง 28 วัน อาจเนื่องจากลักษณะเฉพาะของวัสดุตั้งต้นระหว่างฉ่าลอยกับฉ่าหนักที่มีผลต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉ่าหนักเท่ากับ 20:80 และอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.56 เมกะปาสกาล มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตบดสีกรับน้ำหนักสำหรับกำแพงภายนอก และกำแพงภายในตามมาตรฐาน มอก. 57-2533 [10] ที่กำหนดให้ชั้นคุณภาพ ก ที่ 28 วัน กำลังต้านแรงอัดต่ำสุดของอิฐแต่ละก้อนเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 5.5 เมกะปาสกาลและชั้นคุณภาพ ค ที่ 28 วัน กำลังต้านแรงอัดต่ำสุดของอิฐแต่ละก้อนเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 4.0 เมกะปาสกาลแต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยเรื่องต้นทุนในการผลิตการใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.7 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในฉ่าหนักเท่ากับ 20:80 และ เท่ากับ 30:70 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 9.56 และ 13.81 เมกะปาสกาล ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัด

ใกล้เคียงกับข้อกำหนดของคอนกรีตบล็อกน้ำหนัก สำหรับกำแพงภายนอก และกำแพงภายในตามมาตรฐาน มอก.57-2533 [10]

### 3.3 ขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อแปรผันอัตราส่วนปูนซีเมนต์-ปอร์ตแลนด์ในเกณฑ์เท่ากับ 0:100, 10:90, 20:80 และ 30:70 โดยใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.7จากรูปที่ 3 พบว่า ขนาดโพรงและร้อยละการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์-ปอร์ตแลนด์ในเกณฑ์เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบขนาดโพรง และการดูดซึมน้ำมีผลไปในทางเดียวกันกับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงและขนาดของโพรงลดลง แสดงถึงโครงสร้างทางจุลภาคมีความหนาแน่นมากขึ้นและมีการปรับแต่งขนาดโพรงของจีโอโพลิเมอร์ให้ลดลงเมื่อปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ หมายถึงการเพิ่มปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกต-ไฮดรอกไซด์มากขึ้น



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเกณฑ์กับขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

### 4. สรุปผลการทดลอง

1) การใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเกณฑ์ที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มลดระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ให้สั้นลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมในระบบจีโอโพลิเมอร์ ขณะที่การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานมีแนวโน้มเพิ่มระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

2) กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเกณฑ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรอกไซด์ภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ขณะที่อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นช่วยให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากด้วยส่วนผสมของเหลวเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาและส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

3) ขนาดโพรงและการดูดซึมน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเกณฑ์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างทางจุลภาคมีความหนาแน่นมากขึ้นและมีการปรับแต่งขนาดโพรงของจีโอโพลิเมอร์ให้ลดลงเมื่อปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์

### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง งบประมาณปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ตามสัญญาเลขที่ 006/2559 และผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางและสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] ปริญญา จินดาประเสริฐ. เถ้าลอยในงานคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2555.
- [2] อภา สชนเสาวภาคย์. การศึกษาเปรียบเทียบการกักตัวของซัลเฟตและกรดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานปริมาณมากและมอร์ตาร์จีโอโพลิเมอร์เถ้าหนัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุชฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2553.
- [3] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., Rattanasak, U. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Mangement*, 2009; 29(2): 539-543.
- [4] Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A. and Macphee, D.E. Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ . *Cement and Concrete Research*, 2011; 41: 923-931.
- [5] Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., Pangdaeng, S., and Sinsiri, T. Properteis of high calcium fly ash geopolymer pastes containing Portland cement as additive. *International Journal of Minerals, metallurgy and Materials*, 2013; 20(2): 214-220.
- [6] ชนากร ภูเงินฆ่า และ สกสรรธรรม ห่านจิตสุวรรณ. ปัจจัยของสารละลายต่างต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 2557; 10(3): 61-72.
- [7] The American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM C191 Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat Needle. Annual Book of ASTM Standard 2005, Vol. 04.01, USA: ASTM International.
- [8] The American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM C109 Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube). Annual Book of ASTM Standard 2005, Vol. 04.01, USA: ASTM International.
- [9] The American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM C642 Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. Annual Book of ASTM Standard 2005, Vol. 04.02, USA: ASTM International.
- [10] 57-2530: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกผสมรับน้ำหนัก. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนอก, 2530; 1-11.