

## ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำและการสึกกร่อนของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์พูนมวลเบาด้วยเม็ดดินเหนียวเฝามวลเบา เพื่อประยุกต์ใช้งานวัสดุก่อสร้าง

### Permeability and Abrasion Resistance of Pervious Fly Ash Lightweight Geopolymer with Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA) for Construction Materials

สำเนียง อองสุพันธ์กุล<sup>1\*</sup> และ วราธร แก้วแสง<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

\*E-mail: sumnieng@mutr.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยเป็นการศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของน้ำและการสึกกร่อนของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์พูนมวลเบาด้วยเม็ดดินเหนียวเฝามวลเบา เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่จะส่งผลต่อความสามารถในการซึมผ่านและการสึกกร่อน โดยการศึกษา นำดินเหนียวอ่อนที่ได้จากการก่อสร้างทำเสาเข็มเจาะโดยเก็บตัวอย่างดินเหนียวที่ระดับตั้งแต่ 2-8 เมตร ทำการขึ้นรูปเป็นแบบทรงกลมที่มีขนาดรูปร่างขนาด 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเม็ดดินเหนียวเฝามวลเบาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10, 15 และ 20 โมลาร์ ผสมสารละลายระหว่างสารโซเดียมซิลิเกตต่อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 และอัตราส่วนเถ้าลอยเท่ากับ 0.50, 0.55 และ 0.60 ตามลำดับ แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นแท่งตัวอย่างทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร แล้วจึงทำการบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มโดยหุ้มด้วยพลาสติกเป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ ทำการทดสอบหาค่าการซึมผ่านของน้ำโดยหลักการของ Darcy's Law ตามมาตรฐาน ASTM D5084-90 และการทดสอบการสึกกร่อนประยุกต์ตามมาตรฐาน ASTM C944-90 จากผลการศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำมากโดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10, 15 และ 20 โมลาร์ ให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 4.91 ถึง 5.39 เซนติเมตรต่อวินาที และในแต่ละสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าต่ำสุดและสูงสุดแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5 ถึง 7 อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อเถ้าลอยเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของเถ้าลอยลดลงจึงทำให้ความเป็นสารจีโอโพลิเมอร์ลดลงตาม จึงมีช่องว่างมากขึ้น ส่วนการศึกษาการสึกกร่อน พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10, 15 และ 20 โมลาร์ ไม่ได้ส่งผลต่อค่าร้อยละการสึกกร่อนอย่างมีนัยสำคัญมากนัก โดยให้ค่าการสึกกร่อนอยู่ในช่วงร้อยละ 24.91-34.51, 25.28-33.10 และ 10.29-34.42 ตามลำดับ อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อเถ้าลอยเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้ค่าร้อยละการสึกกร่อนเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.50 ให้ค่าร้อยละการสึกกร่อนต่ำสุด และอายุการบ่มมากขึ้นจะส่งผลให้การสึกกร่อนลดลง

**คำสำคัญ:** ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ การสึกกร่อน เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ เม็ดดินเหนียวเฝามวลเบา

#### Abstract

This paper studied the permeability and abrasion resistance of fly ash based geopolymer filled with lightweight expanded clay aggregate to study for the effects of concentration of sodium hydroxide and the ratio of sodium silicate to the concentration of sodium hydroxide that affected the permeability and abrasion resistance. Dry soft clay form bored pile, collected from soil layer 2-3 meter depth, was formed into spherical-shape aggregate with 0.5 and 1.0 centimeter diameter, then fried at 1200 °C for 30 minutes. The lightweight expanded clay aggregates were mixed with sodium hydroxide solution at 10, 15, and 20 molars. Sodium silicate to sodium hydroxide ratio was about 0.67 and the ratios of alkali solvent to fly ash were 0.50, 0.55, and 0.60, respectively. The mixture was formed into cylindrical shape with further 10 centimeter diameter and 20 centimeter height, then cured in an oven at 60 °C for 48 hours, curing was carried out in plastic bag for 3, 7, 14, and 28 days, respectively. The permeability test was studied using Darcy's Law following ASTM D 5084-90 and the abrasion resistance followed ASTM C 944-90 standard.

The results showed that the concentration of solution of sodium hydroxide didn't affect the value of permeability. For the concentration of sodium hydroxide at 10, 15 and 20 molar, it showed the permeability value in the range of 4.91-5.39 centimeter per second. Each sodium hydroxide concentration showed minimum and maximum of about 5-7 percent difference. Increasing (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH)/Fly ash, then decreased the permeability because the amount of fly ash was low in the geopolymer. For the study of abrasion resistance, it showed that the concentration of sodium hydroxide at 10, 12, and 20 molar didn't affect to the percentage of the abrasion resistance. The percentages of abrasion resistance were 24.91-34.51, 25.28-33.10 and 10.29-34.42, respectively. Increasing the ratio of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH to the fly ash had a tendency to increase the percentage of abrasion resistance. The ratio of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH to the fly ash equal to 0.50, gave the lowest percentage of abrasion resistance. Finally, the increase in curing reduce the abrasion.

**Keywords:** Permeability, Abrasion Resistance, Fly Ash Geopolymer, Lightweight Expanded Clay Aggregate

## 1. ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการผลิตคอนกรีตพูนหรือคอนกรีตมวลเบา ออกจำหน่ายเนื่องจากมีข้อดีหลายประการคือ น้ำหนักเบา กันความร้อน ระบายน้ำได้อย่างรวดเร็วเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในแง่ของการสะท้อนความร้อนสู่ชั้นบรรยากาศ ทำให้โครงสร้างของอาคารมีความประหยัด และลดพลังงานจากการใช้เครื่องปรับอากาศ ตามลำดับ และสามารถกันเสียงได้ดีเนื่องจากตัวเนื้อวัสดุตั้งกล่าวมีความพูนทำให้สามารถลดเสียงรบกวนจากภายนอกอาคาร และยังทนไฟได้ดี (สนธยาและคณะ, 2554)

ในกระบวนการผลิตคอนกรีตพูนหรือคอนกรีตมวลเบาต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูงและใช้เงินลงทุนในการผลิตอย่างมาก ทำให้ราคาของคอนกรีตมวลเบาที่มีราคาแพงทำให้การใช้คอนกรีตพูน หรือคอนกรีตมวลเบา ดังกล่าวในท้องถิ่นไม่สามารถเข้าถึงได้ คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าคอนกรีตพูนจะมีน้ำหนักเบาและมีความเป็นฉนวนได้อยู่ที่มวลรวมหยาบของส่วนผสมจึงได้แนวคิดที่จะทดแทนมวลรวมหยาบด้วยเม็ดดินเหนียวเฟามวลเบา (Lightweight expanded clay aggregate) ซึ่งเป็นการนำดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่ำมาก มาทำการปั้นเป็นก้อนรูปทรงกลม ให้มีลักษณะคล้ายวัสดุมวลรวม (Aggregates) แล้วนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนสูงภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 600-1200 องศาเซลเซียส ทำให้เนื้อดินเหนียวเปลี่ยนสภาพโครงสร้างอย่างถาวรได้ดินเหนียวเฟามวลเบา ซึ่งเม็ดดินเหนียวเฟามวลเบาจัดเป็นวัสดุมวลรวมหยาบเบา (Lightweight aggregate) ตามมาตรฐาน ASTM C 331 ที่ระบุให้มีหน่วยน้ำหนักระหว่าง 600 - 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเทียบกับ 1,100 - 1,750 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ของมวลรวมปกติ ส่วนคอนกรีตจะถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตแทนการใช้ปูนซีเมนต์ และยังเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์มีการปล่อยก๊าซที่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ โดยปูนซีเมนต์จำนวน 1 ตัน ที่ผลิตจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ออกมาจำนวน 1 ตัน เช่นกัน หรือประมาณร้อยละ 5-8 ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโลก (Worrell et.al., 2001) ดังนั้นเพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงนำเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ (Fly ash geopolymer) เป็นทางเลือกหนึ่ง ที่เป็นไปได้ที่จะนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ โดยจีโอโพลิเมอร์เป็นการพัฒนาสารซีเมนต์ใหม่โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งใช้สารประกอบซิลิกา (Silica, SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Alumina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นองค์ประกอบในการทำวัสดุซีเมนต์ โดยใช้หลักการทำปฏิกิริยาหลุ่โซ่ที่เกิดจากซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ให้เป็นโมเลกุลหลุ่โซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ โดยการทำให้ปฏิกิริยาหลุ่โซ่ที่เกิดจากซิลิกาและอลูมินาจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง (Alkali solution) เช่น สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เป็นต้น โดยให้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น (Heat Activated) จะได้สารซีเมนต์ที่มีความสามารถในการรับกำลังอัด ความคงทน และความต้านทานความร้อนได้

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น คณะผู้วิจัยได้ศึกษาวิจัยในส่วนคุณสมบัติความสามารถในการซึมผ่านของน้ำและการสึกกร่อน เพื่อประยุกต์ใช้งานวัสดุก่อสร้างราคาต่ำในอนาคต เช่น บล็อกปูพื้นบาทวิถี งานซ่อมแซมพื้นถนน เป็นต้น ส่วนการศึกษาวิจัยเชิงวิศวกรรมนั้นได้ทำการศึกษาไปก่อนหน้านี้แล้ว (สำเนียงและคณะ, 2560) โดยที่จะพัฒนาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์พูนมวลเบาด้วยเม็ดดินเหนียวเฟามวลเบา และเป็นการหาแนวทางในการนำวัสดุพื้นถิ่นมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีคุณภาพเหมาะสม และราคาต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างประเภทเดียวกันที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ทั้งยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นอีกด้วย

## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเถ้าลอยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติความสามารถในการซึมผ่านของน้ำและการสึกกร่อนของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์พูนมวลเบาด้วยเม็ดดินเหนียวเฟามวลเบาที่อัตราส่วนและอายุการบ่มที่แตกต่างกัน

### 3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คอนกรีตพรุน (Pervious concrete) หรือเรียกอีกอย่างว่าคอนกรีตที่ไม่มีมวลละเอียด (No-fine concrete) ซึ่งเป็นคอนกรีตมวลเบา (Lightweight concrete) ชนิดหนึ่ง (Neville, 1995) มีการนำมาใช้ในงานก่อสร้างเป็นเวลานานกว่า 30 ปี ในหลายประเทศในยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่น (Schaefer *et.al.*, 2006) โดยทั่วไปคอนกรีตพรุนจะมีการยุบตัวของคอนกรีตเป็นศูนย์ มวลหยาบมีขนาดคละไม่ต่อเนื่อง ไม่มีมวลละเอียดผสมอยู่ จากตามรายงานของ ACI 522 (2010) ระบุไว้ว่าคอนกรีตพรุนโดยทั่วไปมีกำลังอัด กำลังรับแรงดึงต่ำซึก และความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป มีกำลังรับแรงอัดระหว่าง 2.8-28 เมกะปาสคาล มีขนาดโพรงระหว่าง 2-8 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนช่องว่างระหว่างร้อยละ 18-35 และกรณีคอนกรีตพรุนสดจะต้องมีความชื้นเหลือพอเหมาะโดยกำหนดค่าการไหลอยู่ในช่วง 170-180 มิลลิเมตร ระบุตาม JIS R 5201 (1997) คอนกรีตพรุนได้มีผู้ศึกษาหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ โดยรัฐศักดิ์และคณะ, 2560 ได้กล่าวไว้ว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตพรุนมีค่าอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 10 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งจะให้ค่าสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป

การนำไปประยุกต์ใช้งานของคอนกรีตพรุนสามารถนำไปใช้ได้หลายอย่าง อาทิเช่น ใช้เป็นพื้นทางในสวนสาธารณะ พื้นทางจราจรที่มีการรับน้ำหนักไม่มากนัก สนามเทนนิส ทางเท้า ในโรงเรือนเพาะชำ และงานทางด้านวิศวกรรมโยธาหรืองานตกแต่งทางสถาปัตยกรรมต่างๆ (Haselbach *et.al.*, 2006; Bentz, 2008; Scholz and Grabowiecki, 2007) โดยจะกล่าวได้ว่าคอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่า สารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอโพลิเมอร์ ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมี ชาวฝรั่งเศส ได้ให้นิยามจีโอโพลิเมอร์ ว่าเป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบ เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นโดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน ซึ่งมีองค์ประกอบของ ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นหลัก (ศักดิ์กรินทร์, 2551) เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate solution) และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้กำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานแบบเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สารปอซโซลานที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เถ้าลอย และดินขาวเผา (สำเนียงและคณะ, 2560)

จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮดรเจนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน โดยจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของ ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>), อลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และ ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) เกิดปฏิกิริยาโดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer chain เกิดขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วย โดยการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจากการวิจัยพบว่าสามารถใช้เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินา ในการทำจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดี เช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยการผสมเถ้าลอยกับสารเร่งปฏิกิริยา (activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60-100 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งที่ใช้เป็นสารพวก อัลคาไลไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต

เม็ดดินเหนียวเบา (Lightweight expanded clay aggregates) ผลิตมาจากดินเหนียวอ่อน (Soft clay) หรือหินชนวน (Slate) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่ำ เมื่อนำมาทำการปั้นเป็นก้อนทรงกลมให้มีลักษณะคล้ายวัสดุมวลรวม (Aggregates) แล้วนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนสูงภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 600-1200 องศาเซลเซียส ทำให้เนื้อดินเหนียวเปลี่ยนสภาพโครงสร้างอย่างถาวรได้ดินเหนียวเผา ซึ่งเรียกว่า เม็ดดินเหนียวเบา (Lightweight expanded clay aggregates) ซึ่งได้ถูกเรียกชื่อทั้งทางด้านการวิชาการและด้านการค้าว่า "เลก้า" (LECA) สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธาได้มากมาย อาทิเช่น ใช้แทนวัสดุมวลรวมในงานคอนกรีตทำคอนกรีตมีน้ำหนักเบาขึ้น การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค เช่น เพื่อลดแรงดันดินด้านข้างที่กระทำต่อกำแพงกันดิน งานลาดดิน ใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางสำหรับงานถนน และในปัจจุบันได้นำมาใช้ร่วมกับงานอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเช่น อาคารสีเขียว (Greenhouse) เป็นต้น (สำเนียงและคณะ, 2560)



รูปที่ 1 ลักษณะผิวชั้นนอกและผิวชั้นในของเม็ดดินเหนียวเบา

ที่มา: สำเนียงและวารสาร, 2556

#### 4. วิธีดำเนินการวิจัย

##### 4.1 วิธีการเตรียมวัสดุอุปกรณ์

4.1.1 ดินเหนียวอ่อนที่ใช้ศึกษาเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครจำนวน 1 แหล่ง โดยได้มาจากการก่อสร้างท่าเสาเข้ม เจาะ ณ ตำแหน่ง 13°56'25.8"N, 100°25'06.3"E ถนนกาญจนาภิเษก ตำบลบางบัวทอง อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี โดย ตัวอย่างดินที่จัดเก็บจะเลือกดินเหนียวที่ระดับตั้งแต่ 2 ถึง 6 เมตร ซึ่งเป็นชั้นของดินเหนียวอ่อน ตัวอย่างทั้งหมดที่จัดเก็บได้ทั้งหมดจะ ถูกนำไปใส่ในกระสอบแล้วนำไปเก็บยังห้องจัดเก็บวัสดุเพื่อทำการป่นขึ้นรูปต่อไป

4.1.2 เถ้าลอย (Fly ash) ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

4.1.3 น้ำ ใช้ในการทดลองเป็นน้ำประปาที่มีความสะอาด

4.1.4 กำหนดให้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เท่ากับ 0.67 และอัตราส่วนสารละลาย ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ) ต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.50, 0.55, 0.60 กำหนดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เท่ากับ 10, 15 และ 20 โมลาร์ ตามลำดับ

4.1.5 กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างเม็ดดินเม็ดดินเหนียวเฝ้ามวลเบาขนาดรูปร่าง 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร เท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก และกำหนดอัตราส่วนผสมกับสารจีโอโพลีเมอร์เท่ากับ 487.48 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

4.1.6 การเตรียมเม็ดดินที่มีรูปร่างเป็นแบบทรงกลม ที่มีขนาดรูปร่าง 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร โดยทำการเผาตัวอย่างดินเหนียวที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเผา 30 นาที จะได้เม็ดดินเหนียวเฝ้ามวลเบา

4.1.7 แบบหล่อจีโอโพลีเมอร์ใช้แบบหล่อรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 10 เซนติเมตร และความสูงเท่ากับ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ

##### 4.2 ระเบียบวิธีการทดสอบ

4.2.1 แต่งตัวอย่างทดสอบ กำหนดให้จีโอโพลีเมอร์แข็งตัว ณ อุณหภูมิห้องประมาณ 22-27 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน แล้วถอดแบบนำไปหุ้มด้วยพลาสติกใส ทำการบ่ม ณ อุณหภูมิห้องประมาณ 22-27 องศาเซลเซียส อีกครั้งหนึ่งเป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 2) เมื่อครบอายุ การบ่มดังกล่าวนำตัวอย่างมาวัดขนาด ความสูง และชั่งน้ำหนัก เพื่อหาความหนาแน่น แล้วทำการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของน้ำและการสึกกร่อน โดยการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของน้ำจะทดสอบที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่านั้น



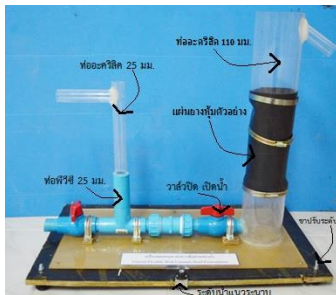
(ก) ตัวอย่างในแบบหล่อรูปทรงกระบอก



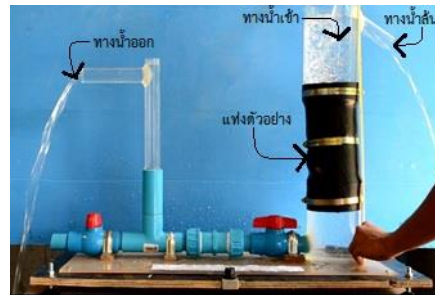
(ข) ตัวอย่างหลังถอดออกจากแบบหล่อ

#### รูปที่ 2 แสดงแท่งตัวอย่างทดสอบ

4.2.2 การทดสอบหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of permeability) โดยหลักการของ Darcy's Law ตามมาตรฐาน ASTM D 5084-90 (Crouch et al, 2006) โดยวิธีการทดสอบแบบความดันคงที่ (Constant head test) (ดังแสดงในรูปที่ 3)



(ก) เครื่องมือและอุปกรณ์



(ข) ลักษณะการทดสอบ

#### รูปที่ 3 การทดสอบหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ

4.2.3 การทดสอบการสึกกร่อน (Abrasion resistance) ประยุกต์ตามมาตรฐาน ASTM C 944-99 โดยทำการขัดสีที่ผิวหน้าตัวอย่างเป็นเวลา 2 นาที ใช้ความเร็วรอบของเครื่องมือเท่ากับ 200 รอบต่อนาที มีน้ำหนักของหัวขัดสีเท่ากับ 245.24 กรัม และแกนเหล็กของหัวขัดสีเท่ากับ 6 มิลลิเมตร (ดังแสดงในรูปที่ 4)



รูปที่ 4 การทดสอบการสึกกร่อน

## 5. ผลและวิจารณ์

### 5.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี

ผลศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและดินเหนียวอ่อน โดยใช้เครื่องมือ X-Ray Fluorescence spectrometer (XRF) รุ่น Bruker model 58 Tiger โดยระเบียบวิธี Best Detection-Vac34mm ได้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและดินเหนียวอ่อน โดย X-Ray Fluorescence (XRF)

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอย (ร้อยละ)	ดินเหนียวอ่อน (ร้อยละ)
SiO <sub>2</sub>	29.7	58.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.6	19.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO	12.8	5.23
CaO	22.3	0.562
Na <sub>2</sub> O	2.27	1.05
K <sub>2</sub> O	2.03	1.93
TiO <sub>2</sub>	0.303	0.842
MgO	2.57	2.12
SO <sub>3</sub>	7.11	1.65
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.270	-
BaO	0.154	-
Cl	-	0.506
MnO	-	0.116
LOI	0.94	-

จากตารางที่ 1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย พบว่า มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ร้อยละ 29.7 เป็นส่วนประกอบหลักทางเคมี และมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 22.3 เป็นส่วนประกอบรอง ซึ่งเมื่อรวม SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีค่าร้อยละ 57.1 โดยน้ำหนัก พบว่า เถ้าลอยจัดอยู่ใน Class C Fly ash ซึ่งมีค่ามากกว่าร้อยละ 50 ตามมาตรฐาน ASTM C618-05 ส่วนตัวอย่างดินเหนียวอ่อนพบว่า มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ร้อยละ 58.5 เป็นส่วนประกอบหลักทางเคมี และมีอะลูมิเนียมออกไซด์ ร้อยละ 19.3 เป็นส่วนประกอบรอง ตามลำดับ

## 5.2 ผลคุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดดินเหนียวเฝามวลเบา

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดดินเหนียวเฝามวลเบา ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะรวม (อิมตัวผิวแห้ง) ค่าหน่วยน้ำหนักมวลรวมทั้งแบบหลวมกับแบบกระทุ้งแน่น และค่าปริมาณช่องว่างของมวลรวมเม็ดดินเหนียวเฝามวลเบา ได้ผลดังตารางที่ 2

คุณสมบัติทางกายภาพ	ผลการทดลอง
ความถ่วงจำเพาะรวม (อิมตัวผิวแห้ง)	1.05
ปริมาณช่องว่างของมวลรวม (ร้อยละ)	51.25
หน่วยน้ำหนักของมวลรวมแบบหลวม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	494.5
หน่วยน้ำหนักของมวลรวมแบบกระทุ้งแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	548.5

จากตารางที่ 2 ผลคุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดดินเหนียวเฝามวลเบา พบว่า เม็ดดินเหนียวเฝามวลเบาให้ค่าความถ่วงจำเพาะรวม (อิมตัวผิวแห้ง) เท่ากับ 1.05 ให้ค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมธรรมชาติ เศษคอนกรีต และเศษคอนกรีตบล็อกซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.70, 2.53 และ 2.45 ตามลำดับ (กฤตศักดิ์และคมกริช, 2554) ให้ค่าปริมาณช่องว่างของมวลรวมร้อยละ 51.25 และให้ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมแบบหลวมและแบบกระทุ้งแน่นเท่ากับ 494.5 และ 548.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมธรรมชาติ เศษคอนกรีต และเศษคอนกรีตบล็อกซึ่งมีค่าเท่ากับ 1437, 1342 และ 1230 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (กฤตศักดิ์และคมกริช, 2554) เนื่องจากเนื้อของเม็ดดินเหนียวเฝามวลเบาเองมีความพรุนและมีความหนาแน่นน้อยกว่า



(ก) เม็ดดินเหนียวก่อนเฝา

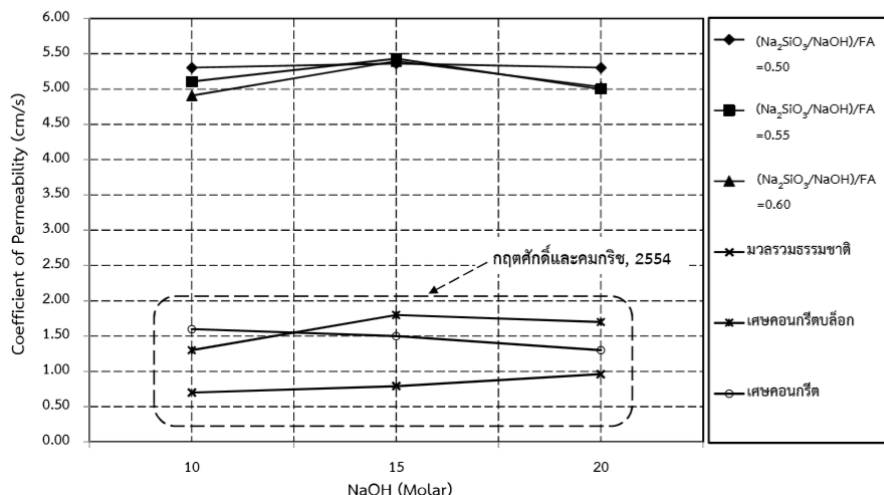


(ก) เม็ดดินเหนียวหลังเฝา

## รูปที่ 5 ตัวอย่างเม็ดดินเหนียวมวลเบา

## 5.3 ผลการทดสอบหาค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ

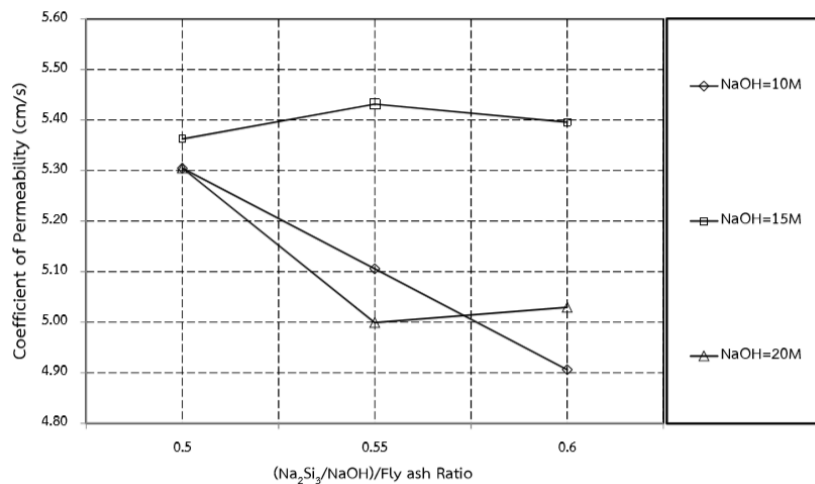
5.3.1 พิจารณาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำที่อายุการบ่ม 28 วัน (ดังแสดงในรูปที่ 6)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ

จากรูปที่ 6 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำของจีโอโพลิเมอร์พูนมวลเบา พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำมากนัก โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10, 15 และ 20 โมลาร์ ให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 4.91 ถึง 5.39 เซนติเมตรต่อวินาที และในแต่ละโมลาร์ มีค่าต่ำสุดและสูงสุดแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5 ถึง 7 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ กฤตศักดิ์และคมกริช (2554) ซึ่งมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 0.75 ถึง 1.80 เซนติเมตรต่อวินาที พบว่า มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันเพียงแต่ค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำสูงกว่าทั้งหมดมวลรวมธรรมชาติ เศษคอนกรีตบล็อก และเศษเศษคอนกรีต ประมาณ 4 เท่า เนื่องจากเม็ดดินเหนียวเฟวมวลเบามีพื้นที่การยึดติดกันระหว่างเม็ดค่อนข้างน้อยจึงทำให้เกิดช่องว่างค่อนข้างมากกว่าวัสดุมวลรวมดังกล่าว

5.3.2 พิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำที่อายุการบ่ม 28 วัน (ดังแสดงในรูปที่ 7)

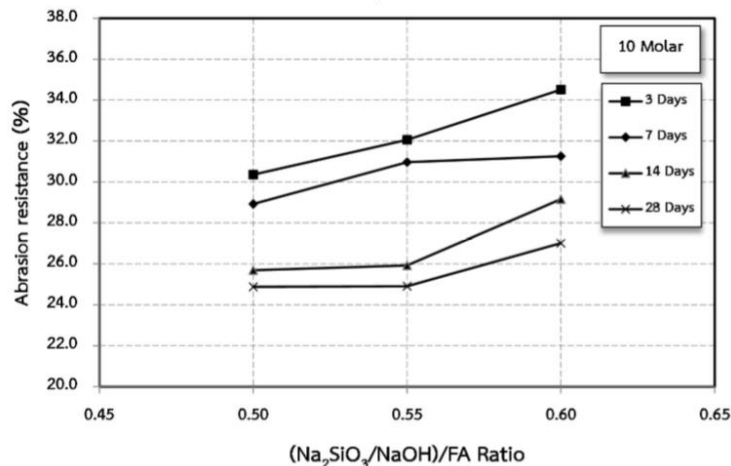


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ

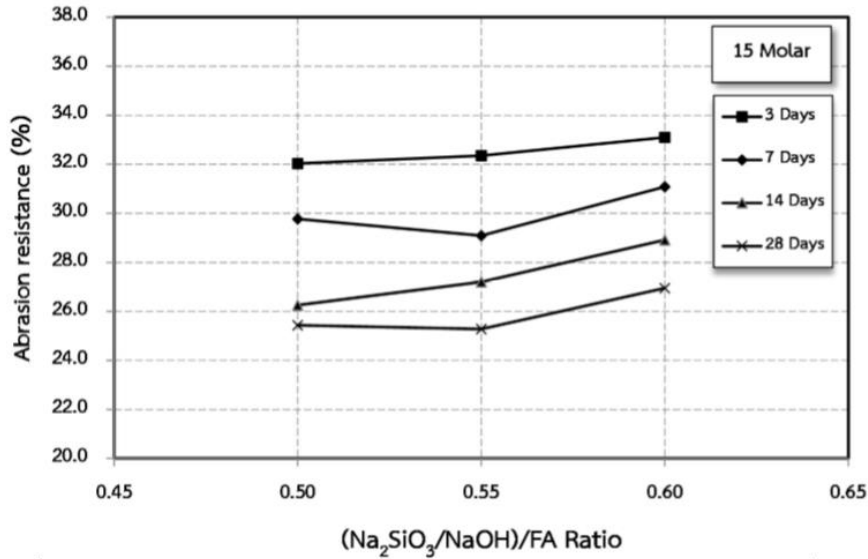
จากรูปที่ 7 อิทธิพลของอัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำของจีโอโพลิเมอร์พูนมวลเบา พบว่า อัตราส่วนสารละลายต่อค่าละลายเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของค่าละลายลดลงจึงทำให้ความเป็นสารจีโอโพลิเมอร์ลดลงตาม จึงมีช่องว่างมากขึ้นยกเว้นที่อัตราส่วน 0.55 และ 0.6 ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

#### 5.4 ผลการทดสอบหาค่าการสึกกร่อน

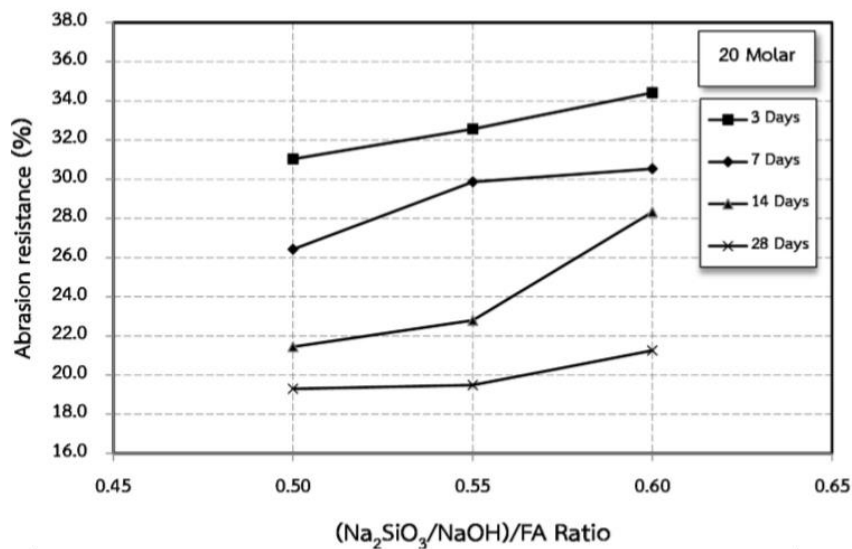
พิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10, 15 และ 20 โมลาร์ อายุการบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน ที่ส่งผลต่อค่าการสึกกร่อน (ดังแสดงในรูปที่ 8, 9 และ 10 ตามลำดับ)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อค่าร้อยละการสึกกร่อนที่ผิวหน้า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH ต่อเกลือลอยกับค่าร้อยละการสึกกร่อนที่ผิวหน้า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH ต่อเกลือลอยกับค่าร้อยละการสึกกร่อนที่ผิวหน้า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 โมลาร์

จากรูปที่ 8, 9 และ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH ต่อเกลือลอยกับค่าร้อยละการสึกกร่อนที่ผิวหน้า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10, 15 และ 20 โมลาร์ ตามลำดับ พบว่า อัตราส่วนสารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH ต่อเกลือลอยเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้ค่าร้อยละการสึกกร่อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของเกลือลอยลดลงจึงทำให้ความเป็นสารจีโอโพลิเมอร์ลดลงตามไปด้วย ส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างเม็ดดินเฝ้ามวลเบาตกลงเช่นเดียวกัน โดยที่อัตราส่วนสารละลาย Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH ต่อเกลือลอยเท่ากับ 0.50 ให้ค่าร้อยละการสึกกร่อนต่ำสุด ส่วนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10, 15 และ 20 โมลาร์ ไม่ได้ส่งผลต่อค่าร้อยละการสึกกร่อนอย่างมีนัยสำคัญมากนัก โดยให้ค่าการสึกกร่อนอยู่ในช่วงร้อยละ 24.91-34.51, 25.28-33.10 และ 10.29-34.42 ตามลำดับ ส่วนพิจารณาอายุการบ่มที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นจะส่งผลให้การกัดกร่อนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนากำลังรับแรงอัดกับอายุการบ่ม (สำเนียงและคณะ, 2560)



## 6. สรุปผล

6.1 เม็ดดินเหนียวเฟามวลเบา มีค่าความถ่วงจำเพาะรวม (อิมพัลฟ์เวต) เท่ากับ 1.05 ปริมาณช่องว่างของมวลรวมร้อยละ 51.25 และค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมแบบหลวมและแบบกระทุ้งแน่นเท่ากับ 494.5 และ 548.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

6.2 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำมาก โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10, 15 และ 20 โมลาร์ ให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 4.91 ถึง 5.39 เซนติเมตรต่อวินาที และในแต่ละโมลาร์ มีค่าต่ำสุดและสูงสุดแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5 ถึง 7

6.3 อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อเกลือยเพิ่มขี้มีแนวโน้มทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำมีค่าลดลง

6.4 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10, 15 และ 20 โมลาร์ ไม่ได้ส่งผลต่อค่าร้อยละการสึกกร่อนอย่างมีนัยสำคัญมากนัก โดยให้ค่าการสึกกร่อนอยู่ในช่วงร้อยละ 24.91-34.51, 25.28-33.10 และ 10.29-34.42 ตามลำดับ

6.5 อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อเกลือยเพิ่มขี้มีแนวโน้มให้ค่าร้อยละการสึกกร่อนเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อเกลือยเท่ากับ 0.50 ให้ค่าร้อยละการสึกกร่อนต่ำสุด

6.6 อายุการบ่มมากขึ้นจะส่งผลให้การสึกกร่อนลดลง

## 7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พื้นที่ศาลายา ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2560 และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พื้นที่ศาลายา และมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ที่สนับสนุนพื้นที่สำหรับงานวิจัย นายกิตติศักดิ์ บุญประเสริฐศักดิ์ดา นายศุภสิทธิ์ แจ่มจำรัส นางสาวศิริกาญจน์ สัตยเดช นายสุรพงษ์ ภาคภูมิ และนาย อภิรัตน์ ทรัพย์วิไลพร นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่ช่วยทำการทดสอบและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการปฏิบัติการวัสดุศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่ให้ความร่วมมือในการทำวิจัยสำเร็จจุลวง

## 8. เอกสารอ้างอิง

- กฤตศักดิ์ สิทธิ และคมกริช กองเพชร, 2554, จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตพูนจากเศษคอนกรีต, ปริญญาโทปริญญาตรี, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 21-24.
- รัฐศักดิ์ พรหมมาศ, ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล และปิยะพงศ์ กีสวัสดิ์คอน, 2560, การพัฒนาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตพูน โดยใช้จุลินทรีย์ประสิทธิภาพเป็นส่วนผสม, วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม, หน้า 76.
- ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2551, วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Material), วารสารคอนกรีต ฉบับที่ 3 เมษายน, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- สนธยา ทองอรุณศรี, วิไลพร นุ่นภักดี, ศรายุทธิ์ หลีกแก้วสาย และ อรวรรณ ปัญญาภาค, 2554, การพัฒนาคอนกรีตบล็อกพูนสำหรับอาคารประหยัดพลังงาน, วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม.
- สำเนียง องสุพันธ์กุล, วราธร แก้วแสง และจิรัฐดี บรรจงศิริ, 2560, กำลังรับแรงอัดและดัดของจีโอโพลิเมอร์เม็ดดินเหนียวเฟามวลเบาสำหรับอาคารประหยัดพลังงาน, การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ครั้งที่ 2 (นวัตกรรมอาคาร 2560 : อาคารอัจฉริยะอย่างยั่งยืน), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พื้นที่ศาลายา.
- สำเนียง องสุพันธ์กุล, วราธร แก้วแสง, 2556, เม็ดดินเฟามวลเบาจากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง, การประชุมทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, ครั้งที่ 10, ธันวาคม, หน้า 1430- 1440.
- American Concrete Institute (ACI), 2010, ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete, Detroit, USA.
- ASTM D 5084-90, 1993, Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08, pp 1199-1206.
- ASTM C 944-99, 2005, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method, American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, Philadelphia, U.S.A.
- ASTM C618-05, 2005, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, Philadelphia, U.S.A.

- Crouch, L., Smith, N., Walker, A., Dunn, T., Sparkman, A., 2006, Determining Pervious PCC Permeability with a Simple Triaxial Flexible-Wall Constant Head Permeameter, Accepted for 2006 NRMCA Concrete Technology Forum, May 24-25.
- Haselbach, L.M., Valavala, S., and Montes, F., 2006, "Permeability Predictions for Sand-Clogged Portland Cement Pervious Concrete Pavement Systems," Journal of Environmental Management, 81., 42-49.
- Japanese Standards Association, 1997, JIS R 5201: Physical testing methods of cement, Tokyo, Japan.
- Naville, A.M., 1995, Properties of Concrete, Englewood Cliffs, NJ, Prentice.
- Schaefer, V.R., Wang, K., Sulieman, M.T., and Keven, J.T., 2006, "Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates," A Report from the National Concrete Pavement Technology Center (CP Tech Center), Ames, IA: Iowa State University.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Meida, L.O., 2001, "Carbon dioxide emissions from the global cement industry," Annual Review of Energy and the Environment 26, 303-329.