



วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนักด้วยการใช้มวลรวมผสม

Development of Compressive Strength of Geopolymer from Bottom Ash Using Mixed Aggregate

โดย

นางสาวอรรวิณี นุ่มนึ่ง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อรรวินท์ นุ่มนึ่ง 2557: การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนักด้วยการใช้มวลรวมผสม ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม) สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์, Ph.D.

86 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์โดยการนำเถ้าหนักจากการเผาถ่านหินมาเป็นวัสดุหลักแทนเถ้าลอย เพื่อการนำไปใช้ในการผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตและการเพิ่มกำลังอัดด้วยการผสมตะกอนดินจากระบบการผลิตน้ำของโรงไฟฟ้า จากการศึกษาอัตราส่วนระหว่างเถ้าหนักกับสารละลายต่าง (โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก) พบว่าอัตราส่วน 1:0.7 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้กำลังอัดสูงสุดที่ 38.40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่กรณีที่มีการผสมมวลรวมเพื่อเพิ่มกำลังอัดนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1 โดยน้ำหนัก การศึกษาการบ่มจีโอโพลิเมอร์พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ให้กำลังอัดที่สูงและเร็วกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง จึงใช้เงื่อนไขในการเตรียมตัวอย่าง ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมส่วนผสมและอัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลา 7 14 และ 28 วัน พบว่ากำลังอัดจีโอโพลิเมอร์ผสมทรายอัตราส่วน 1:1.35 มีค่าลดลงเป็น 11.62 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 10 20 30 และ 40 ของน้ำหนักเถ้าหนักมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นเป็น 26.08 67.78 106.07 และ 104 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อนำจีโอโพลิเมอร์ผสมกับตะกอนดินและทรายด้วยอัตราส่วน 1:1.35 มีค่ากำลังอัดเมื่อใช้ตะกอนดินร้อยละ 10 20 และ 30 แทนที่ทรายเป็น 45.25 87.44 และ 97.78 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นชนิดและปริมาณของมวลรวมที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณาให้เหมาะสมเพื่อเลือกใช้ในการผลิตเป็นชิ้นส่วนคอนกรีต และขีดจำกัดของปริมาณสารละลายต่างที่ใช้รวมทั้งปริมาณของการผสมมวลรวมมีผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Orawin Numnim 2014: Development of Compressive Strength of Geopolymer from Bottom Ash Using Mixed Aggregate. Master of Science (Environmental Technology and Management), Major Field: Environmental Technology and Management, Department of Environmental Technology and Management. Thesis Advisor: Assistant Professor Jukkrit Mahujchariyawong, Ph.D. 86 pages.

This research focused on the development of geopolymer using bottom ash from lignite power plant as the main material instead of fly ash. Sediment from water supply system in power plant was mixed to improve the compressive strength of concrete element. The study on ratio of bottom ash and alkaline solution (sodium silicate and 10 M sodium hydroxide at ratio of 1:1 (W/W) showed ratio 1:0.7 (W/W) gave the highest compressive strength at 38.40 Kgf/cm<sup>2</sup>. However in the case of mixing aggregate, the proper ratio of geopolymer with sediment is 1:1 (W/W). The result also showed geopolymer which treated at 65°C for 48 hours was higher compressive strength and faster forming than the one treated at room temperature. The compressive strength test of geopolymer mixing the different kinds of aggregate, different ratio and different curing time (7, 14 and 28 days) showed that geopolymer with sand at ratio 1:1.35 was decreased to 11.62 Kgf/cm<sup>2</sup>, geopolymer with sediment at ratio 10, 20, 30 and 40% of bottom ash weight was 26.08, 67.78, 106.07 and 104 Kgf/cm<sup>2</sup>, respectively. Geopolymer with sand and sediment (ratio 1:1.35) which replaced sand at ratio 10, 20 and 30% of sand, were 45.25, 87.43, and 97.77 Kgf/cm<sup>2</sup>, respectively. Therefore, kind and quantity of aggregate were the important factor concerning to select for concrete element application, and alkaline solution could be limited factor and affect to mixing aggregate for the compressive strength property of geopolymer.

\_\_\_\_\_  
Student's signature

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้โดยการอุปการะและช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำด้านการเรียนและการทำงานวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้อง ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ศุภวิทย์ สถาปนจารุ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ขงศักดิ์ ขจรผดุงกิตติ สำหรับคำแนะนำในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม ที่ให้ข้อมูลและความรู้ต่างๆ ในการศึกษา ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือในการทำงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยสนับสนุนให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

อรรวิทย์ นุ่มนึ่ง

เมษายน 2557

## สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	57
สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุป	68
ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ภาคผนวก	77
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	86

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุพอลิโซลัน ตามมาตรฐาน ASTM C618	7
2	องค์ประกอบทางเคมีของเจ้าหน้าที่จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง	9
3	คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเถ้าตะกอนประปา	16
4	คุณสมบัติของตะกอนประปาเผาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618	19
5	สรุปความผันแปรของกำลังอัด	40
6	อัตราส่วนการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อหาอัตราส่วนสารละลายต่างที่เหมาะสม	52
7	อัตราส่วนการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อหาอุณหภูมิในการบ่มที่เหมาะสม กรณีศึกษา (1) อุณหภูมิห้อง (2) อุณหภูมิตู้อบ	53
8	อัตราส่วนการผสมของจีโอโพลิเมอร์เติมทรายกับจีโอโพลิเมอร์ปกติ	54
9	อัตราส่วนการผสมของจีโอโพลิเมอร์ที่มีตะกอนดินต่างกัน	54
10	อัตราส่วนการผสมของจีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของตะกอนดินและทราย	55
11	การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วน สารละลายต่างต่างกัน	59
12	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มในอุณหภูมิต่างกัน	60
13	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีและไม่มีส่วนผสม ของทราย	61
14	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนการผสม ตะกอนดินต่างกัน	62
15	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีการผสมตะกอนดิน ร่วมกับทราย	64

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
1 ผลการวิเคราะห์ตะกอนของโรงไฟฟ้าเป็นชนิด non-hazardous waste	79
2 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมอัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง 0.6	80
3 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมอัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง 0.7	80
4 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมอัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง 0.8	80
5 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมอัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง 1	81
6 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส	81
7 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง (35 องศาเซลเซียส)	81
8 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมทราย 135 กรัม	82
9 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมทราย 200 กรัม และน้ำ 50 กรัม	82
10 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมทราย 275 กรัม และน้ำ 100 กรัม	82
11 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 10 ของเถ้าหนัก	83
12 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 20 ของเถ้าหนัก	83
13 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 30 ของเถ้าหนัก	83
14 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 40 ของเถ้าหนัก	84
15 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทราย ร้อยละ 10 ของทราย	84
16 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทราย ร้อยละ 20 ของทราย	84
17 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทราย ร้อยละ 30 ของทราย	85

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนผังการผลิตน้ำประปา	13
2	แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เรซิน	23
3	โครงสร้างการเชื่อมพันธะของสารจีโอโพลิเมอร์และโพลิไซอะเลต	24
4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ $Si^{4+}$ กับระยะเวลาการชะละลายของ โซเดียมไฮดรอกไซด์	25
5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ $Al^{3+}$ กับระยะเวลาการชะละลายของ โซเดียมไฮดรอกไซด์	26
6	การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์	28
7	แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกดซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านทาน ต่อการแตกด้านข้างของก้อนตัวอย่าง (confining stress)	37
8	ก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่ CAP หัวและไม่ CAP หัว	38
9	ขั้นตอนการผสมเถ้าหนักและสารละลายต่าง	49
10	ขั้นตอนการเทจีโอโพลิเมอร์ลงในแบบหล่อตัวอย่าง	49
11	ขั้นตอนการหุ้มแบบหล่อตัวอย่างด้วยพลาสติกก่อนนำเข้าตู้อบ	50
12	ขั้นตอนการแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อ	50
13	ชิ้นงานที่พร้อมสำหรับการทดสอบ	51
14	ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอโพลิเมอร์	51
15	ลักษณะของเถ้าหนักก่อนและหลังการนำไปบดและร่อน	57
16	ตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำเพื่อหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าแก่งคอย 2 จังหวัดสระบุรี	58
17	ผลของอัตราส่วนตะกอนดินและระยะเวลาในการบ่มต่อกำลังรับแรงอัด	63

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	ผลของอัตราส่วนการผสมตะกอนดินร่วมกับทรายและระยะเวลาในการบ่ม ต่อกำลังรับแรงอัด	65
19	แนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์	65
20	ผลของส่วนผสมและอัตราส่วนต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดของ จีโอโพลิเมอร์	66

## การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนักด้วยการใช้

### มวลรวมผสม

#### Development of Compressive Strength of Geopolymer from Bottom Ash Using

#### Mixed Aggregate

### คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าถ่านหินเกิดขึ้นหลายแห่งซึ่งต้องใช้เชื้อเพลิงจากถ่านหินเป็นจำนวนมาก ผลพลอยได้จากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง คือ เถ้าถ่านหิน การผลิตไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิง ประมาณวันละกว่า 40,000 ตัน ซึ่งก่อให้เกิดเถ้าถ่านหินลิกไนต์ออกมาประมาณวันละ 10,000 ตัน ซึ่งปริมาณเถ้าถ่านหินที่เหลือจากกระบวนการเผาถ่านหินเกิดขึ้นในอัตราส่วนเถ้าลอย (fly ash) ร้อยละ 80 ต่อปี และเถ้าหนัก (bottom ash) ร้อยละ 20 ต่อปี โดยที่ปัจจุบันเถ้าลอยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ เช่น เป็นสารทดแทนปูนซีเมนต์ ส่วนเถ้าหนักยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ และยังคงต้องจัดการด้วยวิธีการฝังกลบ ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่มากในการฝังกลบ นอกจากนี้กระบวนการในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ออกมาจำนวนมาก ถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมด เนื่องมาจากการพลังงานสูงมากจากการระเบิดวัสดุ การย่อย การลำเลียง การบด การเผาโดยการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาซีเมนต์ที่สูงเพื่อเผาแคลเซียมคาร์บอเนต และในกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นก็ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย โดยการผลิตปูนซีเมนต์ทุกๆ 1 ตันจะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่บรรยากาศ 1 ตัน เช่นกัน ดังนั้นจึงมีการพยายามที่จะลดการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง โดยมีการนำวัสดุเหลือทิ้งจากผลพลอยได้ในอุตสาหกรรม ที่เป็นสารปอซโซลาน (pozzolanic materials) ที่ประกอบด้วยซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบ นำมาใช้ผลิตเป็นวัสดุที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) เพื่อเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งวัตถุประสงค์ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์สามารถหาได้ทั่วไป และในการผลิตจีโอ

โอโพลิเมอร์ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้อุณหภูมิสูงในการผลิต

การทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะใช้หลักการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนและอะลูมิเนียม โดยการชะซิลิกอนและอะลูมิเนียมในสารละลายต่างความเข้มข้นสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชันได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Davidovits, 1999) สามารถรับแรงอัดได้สูงในระยะเวลาการบ่มที่สั้น แต่การศึกษาการใช้เจ้าหน้าที่ในงานคอนกรีตในประเทศไทยได้รับความนิยมน้อยกว่าการใช้ถ้ำลอย เนื่องจากเจ้าหน้าที่มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับถ้ำลอย แต่มีขนาดใหญ่กว่าและมีองค์ประกอบทางแร่ที่แตกต่างกัน จากการศึกษาคุณสมบัติปอซโซลานิกของเจ้าหน้าที่พบว่าเจ้าหน้าที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับสารละลายต่างและให้ค่ากำลังอัดที่สามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้ โดยการบดเจ้าหน้าที่ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อแตกอนุภาคทำให้เกิดปฏิกิริยากับสารละลายต่างได้ดีขึ้น โดยปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นที่ผิวของเจ้าหน้าที่ (อุบลลักษณ์ และปริญญา, 2551) ดังนั้นเมื่อนำเจ้าหน้าที่ที่มีขนาดเหมาะสมผสมกับสารละลายต่างก็สามารถเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสาน และสามารถรับกำลังอัดได้ (Cheriat *et al.*, 1999) จึงมีการศึกษาการนำเจ้าหน้าที่มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างมากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้

นอกจากนี้โรงไฟฟ้ายังมีของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำเพื่อหล่อเย็น คือตะกอนดินซึ่งเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากทุกวัน ได้มีการศึกษาของบุญฤทธิ์ (2550) ทำการศึกษาการทำจีโอโพลิเมอร์จากตะกอนประปา โดยใช้ทดแทนถ้ำลอยซึ่งเป็นวัสดุเริ่มต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เพสต์ พบว่าการแทนที่ถ้ำลอยด้วยตะกอนประปาสูงสุดที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยได้กำลังอัดที่ไม่แตกต่างทางสถิติกับจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอย ดังนั้นการนำตะกอนดินเหล่านี้มาใช้ประโยชน์โดยการจัดการของเสียให้กลายเป็นวัสดุดิบจะช่วยลดภาระและต้นทุนในการจัดการตะกอนดินของโรงไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่ง

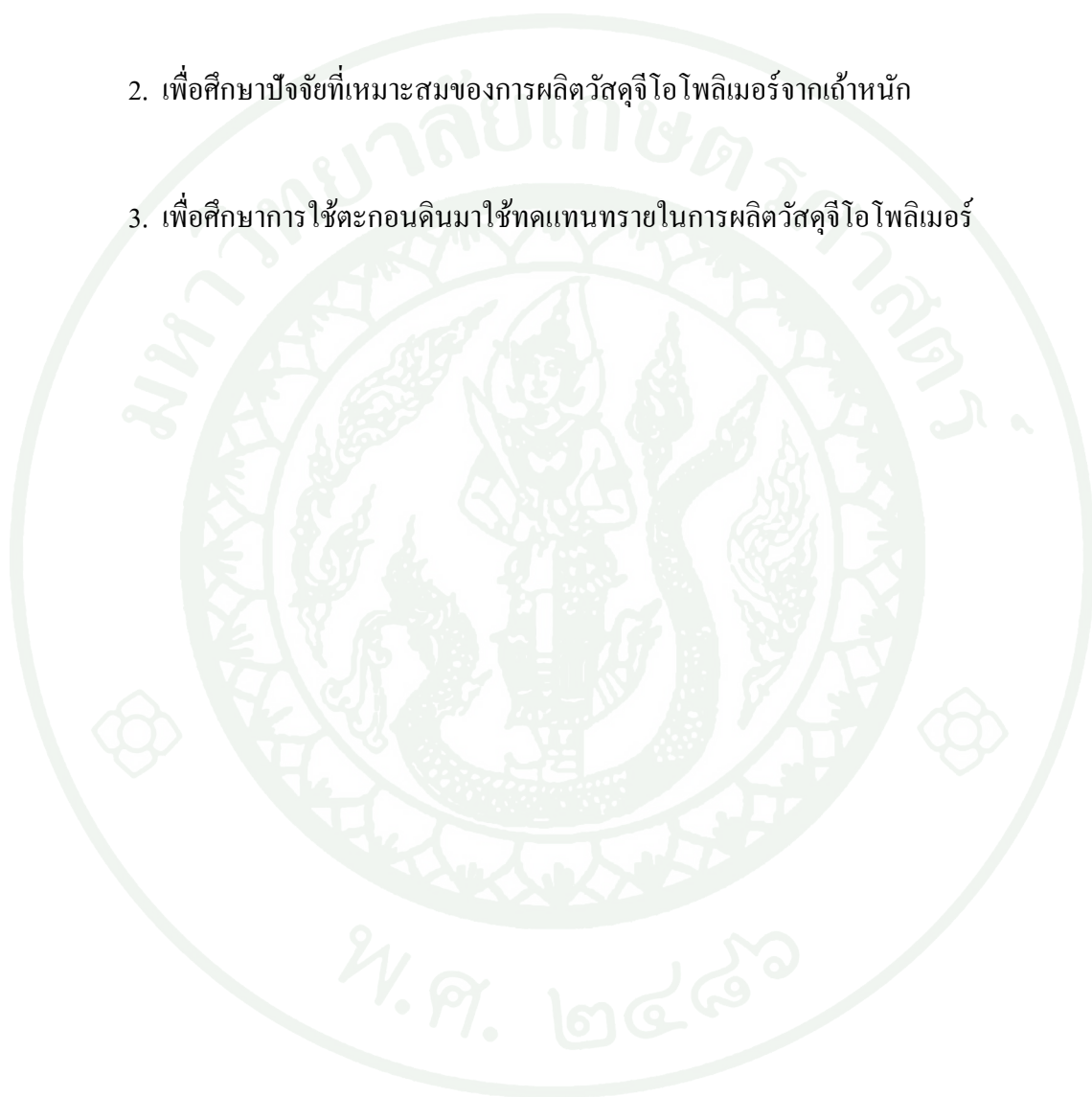
งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเจ้าหน้าที่กึ่งไนต์ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งปริมาณมากจากการเผาถ่านหินกึ่งไนต์ของโรงผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้เป็นวัสดุดิบหลักในการผสมรวม

กับตะกอนดินที่เกิดจากกระบวนการหล่อเย็นของการผลิตน้ำของโรงไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนัก และผลของอัตราส่วนในการผสมตะกอนดินและทรายในจีโอโพลิเมอร์ที่มีต่อคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด เพื่อพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ให้มีค่ากำลังรับแรงอัดที่เหมาะสมต่อการใช้งานด้านต่างๆ และยังเป็นการใช้ประโยชน์จากของเหลือทิ้งของโรงงานที่ต้องได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมอีกทางหนึ่งด้วย



## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการนำเถ้าหนักจากโรงไฟฟ้ามาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตวัสดุ  
จีโอโพลิเมอร์
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนัก
3. เพื่อศึกษาการใช้ตะกอนดินมาใช้ทดแทนทรายในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์



## การตรวจเอกสาร

### 1. วัสดุปอซโซลาน (pozzolanic material)

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีต หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีต ให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น

American Society for Testing and Materials (ASTM C 618) ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน”

#### 1.1 แหล่งที่มาของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่

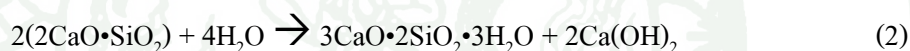
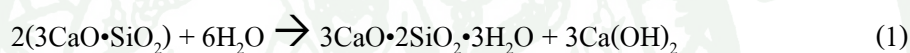
1.1.2 ปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต (artificial pozzolan) ได้แก่ ซิลิกาฟูม เถ้าแกลบ เถ้าลอย เถ้าหนัก ซึ่งเถ้าลอยและเถ้าหนักนี้เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่ถูกบดในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยคุณภาพและปริมาณของเถ้าสามารถแปรผันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ชนิดของถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินที่บด อุณหภูมิที่ใช้เผาถ่านหิน ระบบการดักจับเถ้า เป็นต้น

1.1.1 ปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (natural pozzolan) ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธ (diatomaceous earth) เถ้าภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ

เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำปอซโซลานจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อนและสะพาน เพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากซัลเฟต และช่วยในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างต่างกับซิลิกา นอกจากนี้ยังมีเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกทางหนึ่งด้วย

## 1.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุปอซโซลาน ในสภาวะที่มีน้ำพอเหมาะจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้เป็นสารประกอบใหม่ในกลุ่มของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ดังสมการที่ (1) และ (2)



ปฏิกิริยาที่ (1) และ (2) ยังไม่สิ้นสุดหากส่วนผสมของคอนกรีตมีวัสดุปอซโซลานผสมอยู่ นั่นคือซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) จะเข้าทำปฏิกิริยากับต่าง คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ดังสมการที่ (3) และ (4)



ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาข้างต้นคือ  $x\text{CaO}\cdot y\text{SiO}_2\cdot z\text{H}_2\text{O}$  เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ  $x\text{CaO}\cdot y\text{Al}_2\text{O}_3\cdot z\text{H}_2\text{O}$  เรียกว่า แคลเซียมอะลูมินาไฮเดรต (CAH) และค่า  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ในสมการเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของแคลเซียม ซิลิกา และอะลูมินา โดยที่สารทั้งสองจะทำให้กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตสูงขึ้น โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อถ้าอุณหภูมิมีความละเอียดมาก

ขึ้น (ชัย และปริญญา, 2549) และทางด้านกายภาพนั้นอนุภาคที่เล็กของวัสดุปอซโซลานทำให้สามารถแทรกตัว (filler) เข้าไปอยู่ในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่างๆ กันในคอนกรีตส่ง ผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้อัตราการซึมน้ำของคอนกรีตลดลงตามไปด้วย

### 1.3 คุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618

เถ้าลอยเป็นเถ้าที่มีคุณสมบัติของการเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยองค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอย คือ ซิลิกาไดออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของเถ้าลอยในมาตรฐาน ASTM C 618 ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618

คุณสมบัติทางเคมี (ปริมาณร้อยละ)	ชนิดตามมาตรฐาน ASTM C618		
	N	F	C
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> น้อยที่สุด	70	70	50
SO <sub>3</sub> มากที่สุด	4	5	5
Na <sub>2</sub> O มากที่สุด	1.5	1.5	1.5
การสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้(LOI) มากที่สุด	10	6	6

ที่มา: Annual Book of ASTM Standards C618 (2001)

## 2. เถ้าหนัก (bottom ash)

### 2.1 การเกิดเถ้าถ่านหิน

การใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นเป็นการเผาไหม้ถ่านหิน เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำจนน้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำดังกล่าวจะไปหมุนกังหันไอน้ำ (steam turbine) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) เพื่อผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าต่อไป

ถ่านหินเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ถ่านหินคือวัตถุดิบที่ตกตะกอนทับถมและเจือปนอยู่ในเนื้อถ่านหิน เมื่อเผาถ่านหินให้ลุกไหม้ภายในห้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง แร่ธาตุในถ่านหินจะเปลี่ยนสภาพเป็นออกไซด์หลายชนิด โดยมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ ประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ถ่านหินที่เกิดขึ้นแบ่งเป็นถ่านลอย ร้อยละ 80 และถ่านหนัก อีกร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของปริมาณถ่านหินทั้งหมด ในการเผาไหม้ถ่านหินในห้องเผาไหม้ มีผงถ่านหินส่วนมากจะถูกหลอมจนมีลักษณะส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเล็กๆ ถ่านหินส่วนนี้จะถูกความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้พัดลอยออกไปทางด้านบนของห้องเผาไหม้ แล้วลมร้อนจะถูกทำให้เย็นลงอย่างกะทันหัน ผงถ่านหินที่มาพร้อมกับลมร้อนก็จะแข็งตัวเป็นผงละเอียดเล็กๆ เราเรียกส่วนนี้ว่า ถ่านลอย และผงถ่านหินอีกส่วนหนึ่งจะถูกหลอมรวมตัวกันเป็นก้อน โตขึ้นเมื่อน้ำหนักมากขึ้นจะหล่นลงสู่ก้นเตา เราเรียกถ่านส่วนนี้ว่า ถ่านหนักหรือถ่านก้นเตา และถูกลำเลียงออกจากเตาโดยระบบสายพานเหล็ก (scraper conveyor) ส่งไปเก็บไว้ในไซโลเพื่อนำไปกำจัดทิ้งต่อไป และบางส่วนของอนุภาคถ่านจะไปปะทะกับผนังเตาและหลอมติดกันทำให้อนุภาคถ่านสะสมรวมตัวเป็นก้อนใหญ่ เมื่อรับน้ำหนักไม่ไหวก็จะหลุดตกลงสู่ก้นเตาซึ่งเรียกถ่านส่วนนี้ว่า แสลด (slag) การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายการผลิตแห่งประเทศไทยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง กากที่เหลือจากการเผาถ่านหินประกอบด้วยถ่านหินประมาณร้อยละ 80 และถ่านหนักอีกประมาณร้อยละ 20

## 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านหนัก

ถ่านหนักจะลักษณะค่อนข้างใหญ่ มีสีเทาหรือดำปนกันอยู่ โดยมีอนุภาคมีลักษณะเป็นก้อนที่มีลักษณะไม่สมมาตรพื้นที่ผิวจะมีรูพรุน มีความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.1 – 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความหนาแน่นรวม (bulk density) เป็น 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมี

ความหนาแน่นสูงสุด (maximal density) เป็น 1,200 – 1,620 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดของ  
 ใต๋หนักจะอยู่ในช่วงของกรวดละเอียด (fine gravel) ไปจนถึงทรายละเอียด (fine sand) ซึ่งส่วนใหญ่  
 ใต๋หนักจะมีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงของเม็ดทราย (sand-sized) โดยที่ร้อยละ 50 -90  
 สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4 เมช ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร และร้อยละ 10 – 60  
 สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร

### 2.3 คุณสมบัติทางเคมีของใต๋หนัก

องค์ประกอบทางเคมีของใต๋หนักจะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ของซิลิกา อะลูมินา  
 และเหล็ก นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยแคลเซียม แมกนีเซียม ซัลเฟต และสารประกอบอื่นๆ อีก  
 เล็กน้อย โดยองค์ประกอบทางเคมีของใต๋หนักนี้จะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาหรือชนิดของถ่านหิน (ธวัช  
 ชัย, 2552) องค์ประกอบทางเคมีของใต๋หนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของใต๋หนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

องค์ประกอบหลักทางเคมี	ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก)
SiO <sub>2</sub>	38.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.1
CaO (and free lime)	18.9
Others	21.5
LOI	2.9

ที่มา: วิเชียรและอุบลลักษณ์ (2552)

จะเห็นว่าใต๋หนักมีปริมาณออกไซด์ของ SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นองค์ประกอบหลัก  
 คล้ายคลึงกับใต๋ลอย ตามมาตรฐานของวัสดุพอลิโพรพิลีนในตารางที่ 1 ใต๋หนักจึงมีคุณสมบัติเป็น

สารปอซโซลานได้ และมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุเติมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เหมือนกับเถ้าลอย

สำหรับเถ้าหนักยังไม่มีข้อกำหนดขององค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเถ้าลอยซึ่งมีข้อกำหนดขององค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 ตามตารางที่ 1 โดยใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ซึ่งแบ่งชั้นคุณภาพออกเป็นชั้นคุณภาพ C และชั้นคุณภาพ F โดยที่ชั้นคุณภาพ C และชั้นคุณภาพ F ซึ่งมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เป็นไปตามมาตรฐานของคุณสมบัติวัสดุปอซโซลานที่ได้แสดงไปแล้วข้างต้น ทั้งนี้การกำหนดองค์ประกอบดังกล่าวเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าเถ้าหนักมีส่วนประกอบที่สามารถเกิด ปฏิกิริยาได้อย่างเพียงพอมากน้อยเพียงใด นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวอีกด้วย

#### 2.4 การนำเถ้าหนักไปใช้ประโยชน์

ปัจจุบันมีการนำเถ้าหนักไปใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้งานทางด้านโยธาต่างๆ เช่น การใช้เป็นวัสดุรองพื้นถนน การใช้ทดแทนหินฝุ่นในงานแอสฟัลต์คอนกรีต การใช้เถ้าหนักในการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรัง เพื่อพัฒนาคุณภาพของวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างทาง การนำเถ้าหนักผสมกับวัสดุมวลรวมละเอียดในงานคอนกรีตถนน การใช้เถ้าหนักเพื่อการผลิตทางการเกษตร การผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนัก การผลิตวัสดุฉนวนความแข็งแรงสูงจากเถ้าหนักเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง และยังใช้เป็นวัตถุเติมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เพื่อเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าหนักที่มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อนำมาผสมและแทนที่ปูนซีเมนต์โดยปรับปรุงสมบัติบางประการสามารถเพิ่มสมบัติด้านการรับกำลัง มีความแข็งแรงและความคงทนในการใช้งาน อีกทั้งช่วยลดต้นทุนได้อีกทางหนึ่งด้วย จึงทำให้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากเถ้าหนัก ซึ่งได้แก่

ภากร (2550) ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนัก โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วันเป็นตัวชี้วัด และมีตัวแปรในการศึกษา คือความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิในการบ่มร้อน วิธีการให้อุณหภูมิในการบ่มร้อน ความละเอียดของเถ้าหนัก จากการศึกษาพบว่าเถ้าหนักมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เช่นเดียวกับเถ้าลอย และสามารถพัฒนาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนักเพื่อใช้ในการงานคอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอนาคตได้

วัชรพงษ์ (2551) ได้ศึกษาการนำเถ้าหนักซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยวิธีการบ่มไอน้ำที่อุณหภูมิสูง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ทรายแม่น้ำ เถ้าหนักแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และผงอะลูมิเนียม เป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยอัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ คือ 55:40:5 ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.29 และที่ 50:40:10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.3 ส่วนอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าหนักที่ใช้คือ 0 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และผงอะลูมิเนียมที่ใช้เติมลงไป คือ 0.2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่ากำลังอัด ความหนาแน่น และค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเถ้าหนักที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้น และผลการวิเคราะห์ลักษณะฐานฐานวิทยาจะปรากฏเฟสของ tobermorite ขึ้นในคอนกรีตมวลเบาชนิดนี้

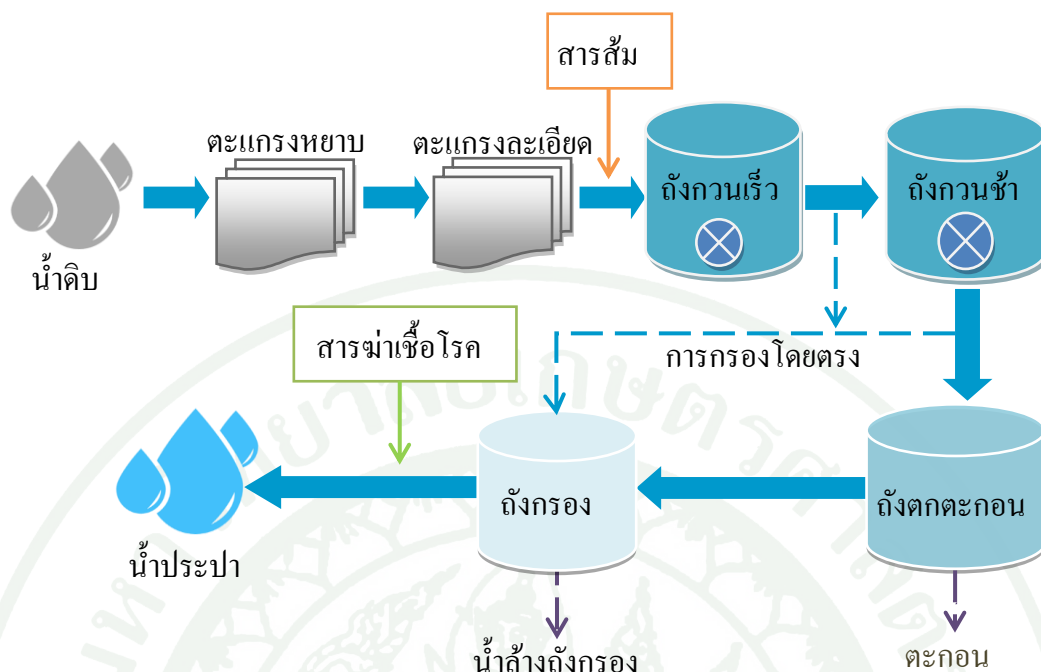
Bai *et al.* (2005) ได้ศึกษากำลังอัด (compressive strength) และการหดตัวแบบแห้ง (drying shrinkage) ของคอนกรีตที่มีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าหนักที่ 0% 30% 50% 70% และ 100% โดยมวล พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกัน (w/c) ค่ากำลังอัดและค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาณเถ้าหนักเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าการยุบตัว (slump) เดียวกัน ค่ากำลังอัดที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าของคอนกรีตมาตรฐาน ส่วนค่าการหดตัวแบบแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์เถ้าหนักที่ทดแทนทรายมากกว่า 30% ขึ้นไป และพบว่าที่ 30% เถ้าหนักจะให้ค่าที่ดีที่สุด โดยจะมีค่ากำลังอัดระหว่าง 40 ถึง 60 MPa และไม่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

### 3. ตะกอนประปา

น้ำประปาที่ได้มาจากแม่น้ำหรือลำคลองจะมีอนุภาคและสารแขวนลอยปะปนกันอยู่ ยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ได้ จึงต้องมีการปรับปรุงความสะอาดของน้ำก่อนการนำไปใช้ กระบวนการหลักที่นำมาใช้ในการทำน้ำให้สะอาด โดยการเติมสารสร้างตะกอน การกวนเร็ว การตกตะกอน การกรอง และการฆ่าเชื้อโรค ตะกอนประปาเป็นตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำประปา จัดเป็นตะกอนอนินทรีย์ชนิดชอบน้ำ (inorganic hydrophilic sludge) สามารถละลายน้ำได้ เกิดจากกระบวนการทำให้น้ำดิบกลายเป็นน้ำใส โดยมีการเติมสารเพื่อทำให้สารแขวนลอยตกตะกอน การเติมสารเคมีลงไปทำให้สารแขวนลอยมีการรวมตัวกันเกิดการตกตะกอน โดยสารเคมีที่นิยมใช้คือ สารส้ม (aluminium sulfate;  $Al_2(SO_4)_3$ ) เพราะมีราคาถูก และเนื่องจากสารส้มมีประจุบวกมากซึ่งสามารถจับกับประจุลบกับตะกอนแขวนลอย เกิดการรวมตัวเป็นตะกอนจนมีน้ำหนักมากขึ้น น้ำที่ได้จึงมีความใส ตะกอนดินที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการจึงต้องมีการกำจัด โดยส่วนใหญ่จะกำจัดโดยการนำไปถมที่หรือนำไปทำปุ๋ยหมัก สารส้มมีลักษณะเป็นเม็ดหรือผงของแข็ง มีสีขาว ไม่มีกลิ่น น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 342.14 ความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 1.7 ความสามารถในการละลายน้ำ ( $K_{sp}$ ) (กรัม/100 มล.) เท่ากับ 28 ที่อุณหภูมิสูงกว่า 650 องศาเซลเซียส สารนี้จะสลายตัวให้สารอลูมิเนียมออกไซด์และซัลเฟตไตรออกไซด์ได้

#### 3.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา

ระบบผลิตน้ำประปาเป็นระบบที่มีหน้าที่ปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน ทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ เพื่อให้ น้ำดิบที่เข้าระบบได้คุณภาพ โดยกระบวนการผลิตน้ำประปานั้นจะแตกต่างกันตามคุณภาพของน้ำดิบ น้ำประปาที่ผลิตได้จะต้องได้คุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด การผลิตน้ำประปาจากกระบวนการพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไปนั้นจะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้



ภาพที่ 1 แผนผังการผลิตน้ำประปา

ที่มา: ดวงกมล และคณะ (2547)

3.1.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ หรือการบำบัดขั้นต้น (pre-treatment of water) โดยขณะที่น้ำดิบสัมผัสกับอากาศ และแสงแดดแล้วก่อให้เกิดการตกตะกอนตามธรรมชาติ และมีการแยกวัสดุที่ปนมากับน้ำ เช่น เศษสวะ เศษไม้ สำหรับหรือพีชน้ำ ถุงพลาสติก โดยใช้ตะแกรงหยาบ และตะแกรงละเอียด

3.1.2 การเพิ่มออกซิเจนและการเติมสารเคมี โดยจะเพิ่มออกซิเจนและการเติมสารเคมีในอัตราส่วนที่เหมาะสมลงไปในท่อลำเลียงน้ำดิบ อัตราส่วนการเติมสารเคมีจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบในแต่ละฤดูกาล การเติมอากาศเพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำและช่วยกำจัดเหล็ก แมงกานีส ที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมาเหล่านี้อาจมีหรือไม่มีก็ได้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบ

3.1.3 การตกตะกอนหรือการรวมตะกอนทางเคมี (chemical coagulation and flocculation) แยกตะกอนออกจากน้ำดิบโดยการเติมสารสร้างตะกอนชนิดต่างๆ ได้แก่ สารส้ม

(aluminium sulfate or alum,  $Al_2(SO_4)_3$ ) สาร Ferric Chloride สาร Polyaluminum Chloride (PAC) และสารโพลีเมอร์ โดยสิ่งที่เติมเข้าไปในกระบวนการผลิตเหล่านี้อาจตกค้างอยู่กับตะกอนและมีผลต่อการพัฒนาไปใช้ประโยชน์ เมื่อน้ำดิบไหลเข้าสู่ถังตกตะกอน สารเคมีจะถูกกวนให้สัมผัสกับสารแขวนลอย และทำปฏิกิริยากับตะกอนหรือความขุ่นที่อยู่ในน้ำ แล้วจับเป็นก้อนเล็กๆแล้วค่อยๆ มีขนาดโตขึ้น ตะกอนหนักจะตกลงสู่พื้นล่างของถังตกตะกอน ซึ่งทำได้โดยการควบคุมความเร็วในการไหลของน้ำในถัง เม็ดตะกอนที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำจะค่อยๆ ตกลงสู่ก้นถังตามแรงโน้มถ่วงของโลก เม็ดตะกอนขนาดใหญ่เกือบทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากน้ำในขั้นตอนนี้ สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าน้ำที่ไหลผ่านออกจากถังตกตะกอนจะมีความใสแต่ยังอาจมีตะกอนขนาดเล็กที่หลุดลอยออกไปได้บ้าง

ในการกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ในรูปของความขุ่น สี กลิ่นและเชื้อโรคออกจากน้ำ โดยมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่สำคัญคือ โคแอกกูเลชันหรือการสร้างแกนตะกอน (coagulation) ฟล็อกกูเลชันหรือการรวมตะกอน (flocculation) (ทวิศักดิ์, 2554)

ก. โคแอกกูเลชัน (coagulation) การสร้างแกนตะกอนเป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคความขุ่นที่อยู่ในน้ำสูญเสียเสถียรภาพและจับตัวกับสารสร้างแกนตะกอน เกิดเป็นเม็ดตะกอนขนาดเล็กซึ่งจะรวมกันจนเป็นตะกอนที่โตพอที่จะถูกกำจัดออกจากน้ำได้ง่ายขึ้น การสร้างแกนตะกอนทำได้ด้วยการกวนเร็วเพื่อให้สารสร้างตะกอนสัมผัสกับน้ำและสารแขวนลอยในน้ำอย่างทั่วถึง สารสร้างตะกอนมาจากการเติมสารเคมี จะเกิดปฏิกิริยาเคมีในน้ำและจับอนุภาคความขุ่นเกิดเป็นแกนตะกอนขึ้น

ข. ฟล็อกกูเลชัน (flocculation) การรวมตะกอนเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากการสร้างแกนตะกอนหรือโคแอกกูเลชัน โดยมีหลักการคือการให้กลุ่มของสารแขวนลอยที่สัมผัสกับสารตกตะกอนเรียบร้อยแล้วฟล็อก (floc) ที่เกิดขึ้นได้สัมผัสกันอย่างทั่วถึงด้วยการกวนน้ำอย่างช้าๆ และนานเพียงพอ ทำให้เม็ดตะกอนและสารปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำเกาะยึดและรวมตัวกันจนมีอนุภาคใหญ่ขึ้น กระทั่งเม็ดตะกอนมีน้ำหนักและขนาดโตพอที่จะตกตะกอนออกจากน้ำได้

3.1.4 การกรอง น้ำที่ไหลออกจากถังตกตะกอนยังคงมีตะกอนแขวนลอยขนาดเล็กอยู่บ้าง การกรองจึงเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่จะดักจับตะกอนแขวนลอยที่ปะปนอยู่ในน้ำเพื่อแยกเอาของแข็งที่มีขนาดเล็กจนไม่สามารถตกตะกอนได้ออกจากน้ำเพื่อให้ น้ำมีความใสหรือความขุ่นต่ำก่อนที่จะถูกส่งไปสู่กระบวนการฆ่าเชื้อโรค

3.1.5 การฆ่าเชื้อโรค น้ำที่ผ่านการกรองจะต้องผ่านกระบวนการใส่ก๊าซคลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรต์เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ แบคทีเรีย และโปรโตซัว โดยคลอรีนจะฆ่าเชื้อต่างๆ ปริมาณคลอรีนที่ใส่ต้องไม่น้อยจนไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ และไม่มากจนส่งผลต่อผู้บริโภค น้ำประปาที่ได้จะมีค่าคลอรีนคงเหลือในน้ำประปาไม่ต่ำกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่พบแบคทีเรีย และเชื้อโรคระบาดทางน้ำ

## 3.2 คุณสมบัติของตะกอนประปา

### 3.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตะกอนประปา

ตะกอนประปาที่เกิดขึ้นเกิดจากสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำดิบ และมีเนื้อละเอียด เป็นปุ๋ยค่อนข้างสม่ำเสมอ เนื้อตะกอนเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง ซึ่งจำแนกได้อยู่ในกลุ่มดินละเอียด (ปริศนา, 2545) และเกิดจากการเคลื่อนย้ายวัสดุต้นกำเนิดดินโดยอิทธิพลของน้ำไหลตะกอนนี้เมื่อเปลี่ยนสภาพเป็นดินจะเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ และเมื่อนำตะกอนประปามาทำการบดละเอียดและทำการเผาที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 550-1000 องศาเซลเซียส จะได้อนุภาคของตะกอนที่มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และมีพื้นผิวแบบขรุขระ (ชเนศ, 2546) ซึ่งแตกต่างกับเถ้าลอยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูง ซึ่งได้รูปร่างกลมขนาดของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับขั้นตอนการคัดขนาดของตะกอน

### 3.2.2 คุณสมบัติทางเคมีของตะกอนประปา

สมบัติทางเคมีของตะกอนประปาเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งหมายถึงร้อยละสารประกอบที่เจือปนในเนื้อตะกอนประปา จากการวิเคราะห์โดยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) ของ

จิตรกร (2543) พบว่าเนื้อตะกอนมีออกไซด์ของซิลิกอน อลูมิเนียมและเหล็กเป็น สารประกอบหลัก ดังตารางที่ 3 เนื่องจากซิลิกอนเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของแร่ปฐมภูมิ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ อนุภาคทราย และทรายแป้งที่อยู่ในตะกอน ส่วนออกไซด์ของอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบสำคัญใน แร่อะลูมิเนียมซิลิเกต และจากการตกค้างของสารเคมีที่ใช้สร้างตะกอน และเหล็กออกไซด์จะรวมมา กับแร่ดินเหนียวที่มีในตะกอน

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของถ้ำตะกอนประปา

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ น้อยที่สุด	90.36
$\text{SO}_3$ มากที่สุด	0.19
MgO	1.27
$\text{Na}_2\text{O}$ มากที่สุด	0.69
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (มากที่สุด)	3.04
ปริมาณความชื้น (มากที่สุด)	0.78

ที่มา: จิตรกร (2543)

### 3.3 คุณสมบัติทั่วไปของตะกอนดินจากการผลิตน้ำประปา

#### 3.3.1 อุดมด้วยสารอินทรีย์

#### 3.3.2 ขาดสารอินทรีย์ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช

#### 3.3.3 ขาดสารกลุ่ม fiber

#### 3.3.4 มีปริมาณสารอลูมิเนียมสูงกว่าดินทั่วไป สารอะลูมิเนียมดังกล่าวได้มาจากการใช้สารส้มเป็นตัวตกตะกอน

#### 3.3.5 ปริมาณมวลสารที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน

#### 3.3.6 มีปริมาณตะกอนดินมากเพียงพอที่จะเป็นวัตถุดิบในเชิงอุตสาหกรรม

### 3.3.7 ตะกอนดินมีคุณสมบัติเป็นเนื้อดินเบา อุ่นน้ำ จะพองตัวได้เมื่อชุ่มน้ำ

## 3.4 การใช้ประโยชน์จากตะกอนประปา

ปัจจุบันมีการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากตะกอนดินจากการผลิตน้ำประปาเพิ่มมากขึ้น ตะกอนประปาไม่เหมาะสำหรับการใช้ถมที่โดยทั่ว ๆ ไป เนื่องจากคุณสมบัติของการเป็นเนื้อดินเบา พองตัวเมื่อชุ่มน้ำ ขาดสารอินทรีย์ แต่ตะกอนประปาสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นได้มากมาย อาทิเช่น การปรุงแต่งด้วยอินทรีย์สาร หรือปุ๋ยในกลุ่มปุ๋ยหมัก เพื่อเพิ่มปริมาณ fiber และแร่ธาตุที่จำเป็นสำหรับพืช ในประเทศญี่ปุ่นมีโครงการในลักษณะนี้ เพื่อผลิตดินวิทยาศาสตร์ที่มีความต้องการของตลาด โดยเฉพาะตลาดปลูกไม้ดอกไม้ประดับ ทำกระถางสำหรับปลูกพืช และยังสามารถนำมาทำเซรามิก เครื่องปั้นดินเผาได้ด้วย เนื่องจากคุณสมบัติของตะกอนดินที่ขาดสารกลุ่ม fiber กากใยและขาดสารอินทรีย์ จึงมีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นเครื่องปั้นดินเผา โดยที่หากตะกอนดินดังกล่าวนี้ มีปริมาณของมวลสารอะลูมิเนียมผสมอยู่ เครื่องปั้นดินเผาที่ได้ก็จะมีลักษณะเฉพาะตัว ซึ่งไม่เหมือนการทำเครื่องปั้นดินเผาจากที่อื่นๆ จากการวิจัยของภานุ (2550) ที่ได้ทำการศึกษาผลของการพัฒนาตะกอนดินประปาที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและรูปแบบของเครื่องปั้นดินเผา พบว่าส่วนผสมมีความเหนียวสามารถนำมาขึ้นรูปได้อยู่ในช่วงระหว่างดินตะกอนร้อยละ 50-70 ทนไฟได้โดยไม่หลอมที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส สีหลังเผาเป็นโทนสีแดงเข้ม เมื่อนำไปพัฒนารูปแบบสามารถนำไปผลิตได้ในรูปแบบของเครื่องปั้นดินเผาชนิดสโตนแวร์

งานวิจัยของกฤษณะ (2546) ที่ได้ทำการศึกษาศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์ตะกอนดิน จากกระบวนการปรับคุณภาพน้ำของโรงไฟฟ้าวังน้อย เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ตะกอนดิน และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนดิน ซึ่งได้ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตะกอนดิน และศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์ โดยใช้ตะกอนดินแทนที่ปูนซีเมนต์ในรูปซีเมนต์มอร์ต้าร์ แทนที่ดินลูกรังในรูปบล็อกประสานดินซีเมนต์ แทนที่ดินเหนียวในรูปอิฐมอญ และรูปเครื่องปั้นดินเผา ซึ่งจากการศึกษาพบว่าทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือ การแทนที่ดินลูกรังในรูปบล็อกประสานดินซีเมนต์ โดยใช้สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์:ตะกอนดิน:ดินลูกรัง เท่ากับ 2:2:5 โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีกำลังรับแรงอัด 82.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุบ่ม 28

วัน ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน มอก. ที่กำหนดไว้ 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าตะกอนดินมีความสามารถที่จะใช้เป็นวัสดุติดตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ทั้งนี้ควรคำนึงถึงการนำไปใช้งานในแต่ละประเภทด้วย

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำตะกอนดินไปผลิตเป็นบล็อกประสาน เช่นงานวิจัยของ สมบูรณ์ และอดิสร (2552) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินจากน้ำประปามาเป็นวัสดุผสมในการทำบล็อกประสาน โดยทดสอบคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัด และร้อยละการดูดซึมน้ำตาม มอก. (57-2530) ซึ่งมีการทดสอบโดยการนำตะกอนดินมาใช้ผสมบล็อกประสานปูพื้นในปริมาณตะกอนประปาร้อยละ 0 10 20 30 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักเทียบกับทรายและหินเกล็ดบ่มที่ 3 7 14 และ 28 วัน จากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและค่าด้านทานการดูดซึมน้ำ พบว่าอัตราส่วนที่มีตะกอนดินผสมอยู่ร้อยละ 60 และใช้ w/c เท่ากับ 0.6 เหมาะสมที่สุด คุณสมบัติของบล็อกประสานในงานวิจัยนี้ มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 96 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 15 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก และเป็นอัตราส่วนที่มีตะกอนดินผสมอยู่มากที่สุด แสดงให้เห็นว่าตะกอนดินสามารถนำมาเป็นวัสดุผสมในการทำบล็อกประสานได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ

ณิชาดา และคณะ (2552) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนเคมีจากกระบวนการผลิตน้ำประปาบางเขน โดยเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในซีเมนต์มอร์ตาร์ และอิฐบล็อกประสาน โดยกากตะกอนเคมีที่ศึกษานั้นมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งคล้ายกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ทดสอบกำลังอัดสามารถสรุปได้ว่าตะกอนเคมีจากน้ำประปาสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมในการทำบล็อกประสานปูพื้นและทดแทนปูนซีเมนต์ สามารถใช้งานก่อและฉาบมีความเป็นไปได้อย่างมากในการนำไปใช้งานได้จริง

การศึกษาของเพิ่มพล (2546) เกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนด้วยเครื่อง X-ray Diffraction พบว่า องค์ประกอบของธาตุหลักมี 8 ธาตุ ที่พบมากตามลำดับ ดังนี้ ซิลิคอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) โซเดียม (Na) ไททานเนียม (Ti) แมงกานีส (Mn) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของธนศ (2546) ว่าองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของตะกอนเป็นปริมาณของซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) รวมกับอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ตาม

มาตรฐานวัสดุปอซโซลาน เช่นเดียวกับการศึกษาของ Yan and Sagoe-Crentsil (2012) ที่ศึกษาการนำตะกอนดินจากกระบวนการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่โดยนำตะกอนที่เป็นของเสียจากกระบวนการมาใช้พบว่าสามารถนำมาทำจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้

บุญฤทธิ์ (2550) ได้ศึกษาการทำจีโอโพลิเมอร์จากกากตะกอน โดยการนำตะกอนจากโรงผลิตน้ำบางเขนมาใช้ทดแทนเถ้าลอยซึ่งเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต ซึ่งศึกษา อัตราส่วนการกระตุ้น อุณหภูมิในการเผาตะกอนประปา และอัตราส่วนการแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปา จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของสารกระตุ้น  $\text{Na}_2\text{SiO}_4:\text{NaOH}$  เท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก (กำลังรับแรงอัด 672 ksc ) และพบว่าการแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาได้สูงสุดที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ได้กำลังรับแรงอัดที่ไม่มี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย(ตัวควบคุม) และเมื่อการแทนที่เพิ่มมากขึ้นที่ร้อยละ 30-50 กำลังรับแรงอัดจะลดลง แต่ยังอยู่ในช่วงที่ดี (300-500 ksc) ซึ่งคุณสมบัติของตะกอนประปาเผาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618 แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของตะกอนประปาเผาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618

คุณสมบัติทางเคมี (ปริมาณร้อยละ)	ตะกอนประปาเผา (°C)			มาตรฐานASTMC618		
	500	650	800	N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ น้อยที่สุด	88.73	93.79	94.62	70	70	50
$\text{SO}_3$ มากที่สุด	0.26	0.28	0.06	4	5	5
MgO	0.81	0.82	1.10	5	5	5
$\text{Na}_2\text{O}$ มากที่สุด	0.36	0.37	0.37	1.5	1.5	1.5
การสูญเสียเนื่องจากเผาใหม่ (LOI) มากที่สุด	8.64	3.04	2.97	10	6	6

ที่มา: บุญฤทธิ์ (2550)

นอกจากนี้การศึกษาของ Husillos *et al.* (2010) วิเคราะห์ตะกอนประปาของกระบวนการผลิตน้ำ พบว่าองค์ประกอบของตะกอนดินที่เกิดจากการผลิตน้ำประปา พบแร่ที่เป็นองค์

ประกอบหลักในตะกอนดิน ซึ่งคล้ายคลึงกับดิน เช่น ควอทซ์ แคลไซต์ และไมก้า รวมทั้งมีซิลิกาอะลูมินาอยู่สูง ซึ่งจะสามารถนำไปใช้กับงานทางด้านอุตสาหกรรมพื้นฐานอื่นได้

ตะกอนดินยังสามารถนำมาเป็นสาร additive ในการปรับปรุงของเสียจากชุมชน หรือโรงงานน้ำตาล ให้เป็นดินที่มีคุณภาพ ทั้งนี้เพราะกากของเสียที่ผ่านการบำบัดของน้ำเสียชุมชน หรือโรงงานน้ำตาลจะมีปริมาณสารอินทรีย์สูงเกินไปและบางครั้งส่งกลิ่นเหม็น เนื่องจากผ่านขบวนการหมักไม่สมบูรณ์ การนำ กากตะกอนจากการผลิตน้ำประปา มารวมกับกากของเสียจากชุมชนหรือโรงงานน้ำตาลจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

#### 4. จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer)

##### 4.1 ความหมายและโครงสร้างของวัสดุจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ เรียกอีกอย่างว่า พอลิไซอะเลต (polysialate) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้จีโอโพลิเมอร์สามารถเกิด การก่อตัวแข็งแรงและให้กำลังอัดได้ การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ และโครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์แสดงได้ดังสมการที่ (5)



โดย	M	คือ ธาตุอัลคาไลน์
	-	คือ การยึดเกาะพันธะ (bond)
	z	คือ จำนวนโมเลกุลของ $\text{SiO}_2$ เท่ากับ 1 2 หรือ 3
	n	คือ จำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่ หรือ degree of polymerization
	w	คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

สารจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) รวมตัวกันเป็นสารเชื่อมประสานในลักษณะของสายโซ่โพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) ของ  $[\text{AlO}_4]^-$  และ  $[\text{SiO}_4]^+$  โดยมีโลหะอัลคาไล เช่น โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) หรือโพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) ในการทำให้ประจุสมดุล ณ ตำแหน่งของ  $[\text{AlO}_4]^-$  การสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากดังกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงทำให้การใช้พลังงานลดลงไปมากและต้นทุนในการผลิตต่ำลง

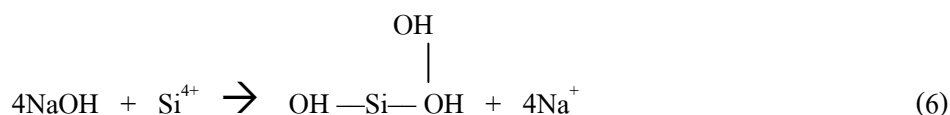
#### 4.2 ปฏิกริยาการเกิดสารจีโอโพลิเมอร์

Davidovits (1999) ได้อธิบายถึงปฏิกริยาจีโอโพลิเมอร์ไว้ว่า สารจีโอโพลิเมอร์เป็นสารจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ที่มีส่วนประกอบเป็นสารลักษณะอสัณฐาน (amorphous) และสารกึ่งผลึก (semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบที่มีอะลูมินาและซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกริยา เมื่อผสมสารละลายอัลคาไลจะสามารถเกิดปฏิกริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่า และก่อตัวให้กำลังรับแรงได้ดี ปฏิกริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกริยาของซีเมนต์เพสต์ เป็นการทำให้ปฏิกริยาโพลิเมไรเซชัน (polymerization) แบบกลั่นตัว (condensation) ซึ่งในภาพที่ 2 แสดงแบบจำลองการเกิดปฏิกริยาจีโอโพลิเมไรเซชัน โดยการเกิดปฏิกริยาจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

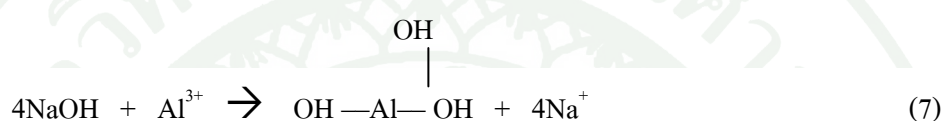
##### 4.2.1 ปฏิกริยาการละลาย (dissolution)

ปฏิกริยาการละลายจะเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตซึ่งอยู่ในวัสดุป่อโซลันผสมกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดการละลายของสารประกอบต่างๆ ออกมา โดยอะลูมิเนียม (aluminium; Al) และซิลิกอน (silicon; Si) จะถูกชะละลายออกมามากเนื่องจากเป็นสารหลักที่อยู่ในวัสดุตั้งต้น เมื่อเกิดการละลายมากขึ้นส่วนหนึ่งของวัสดุจะถูกทำลายที่ผิว ทำให้เกิดเป็นช่องที่ผิว และสารละลายสามารถเข้าไปทำปฏิกริยาได้ง่ายขึ้น จนได้เป็นหน่วยพีระมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si และ Al ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบสี่แขนกับออกซิเจน (O) ซึ่งหน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวและมีการจัดเรียงตัวใหม่ใน

ลักษณะของเจล (Fernandez-Jimenez *et al.*, 2004) สมการจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้แสดงไว้ตั้งสมการที่ (6) และ (7)



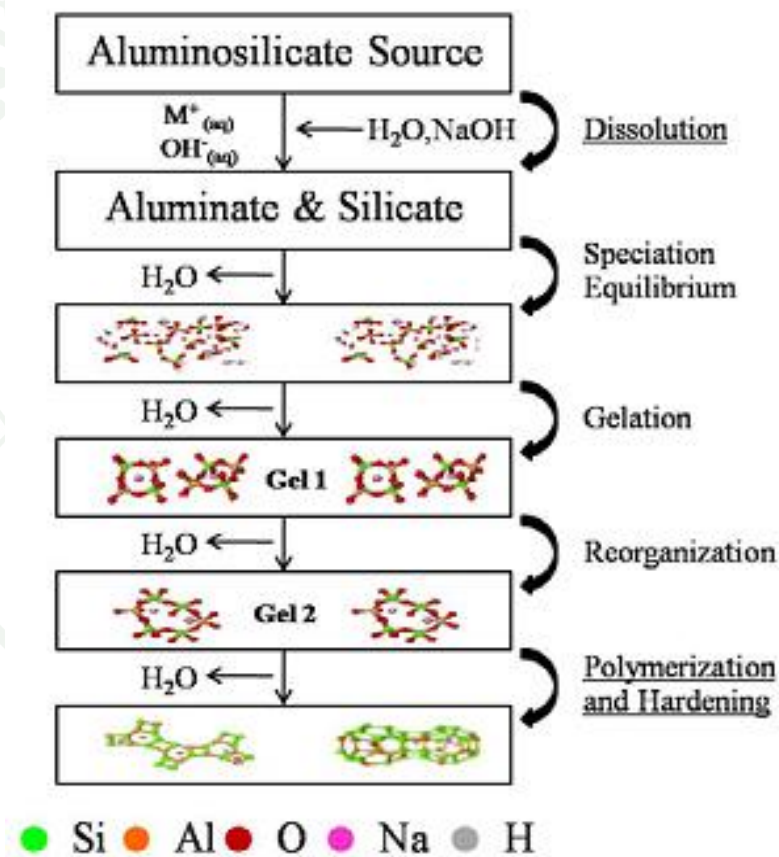
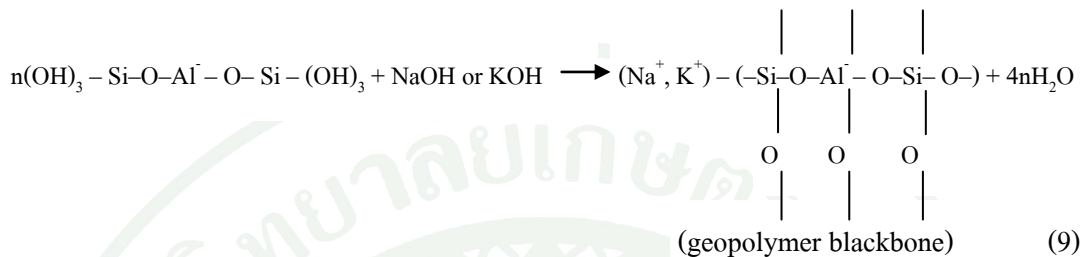
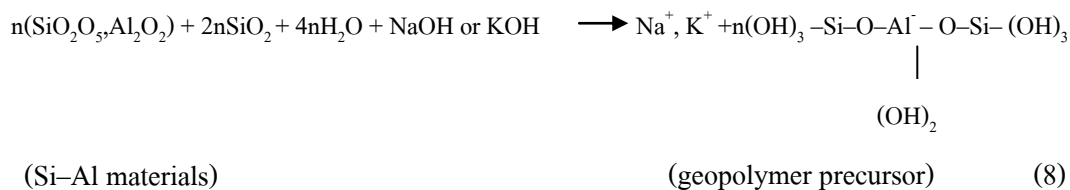
Silicate



Aluminate

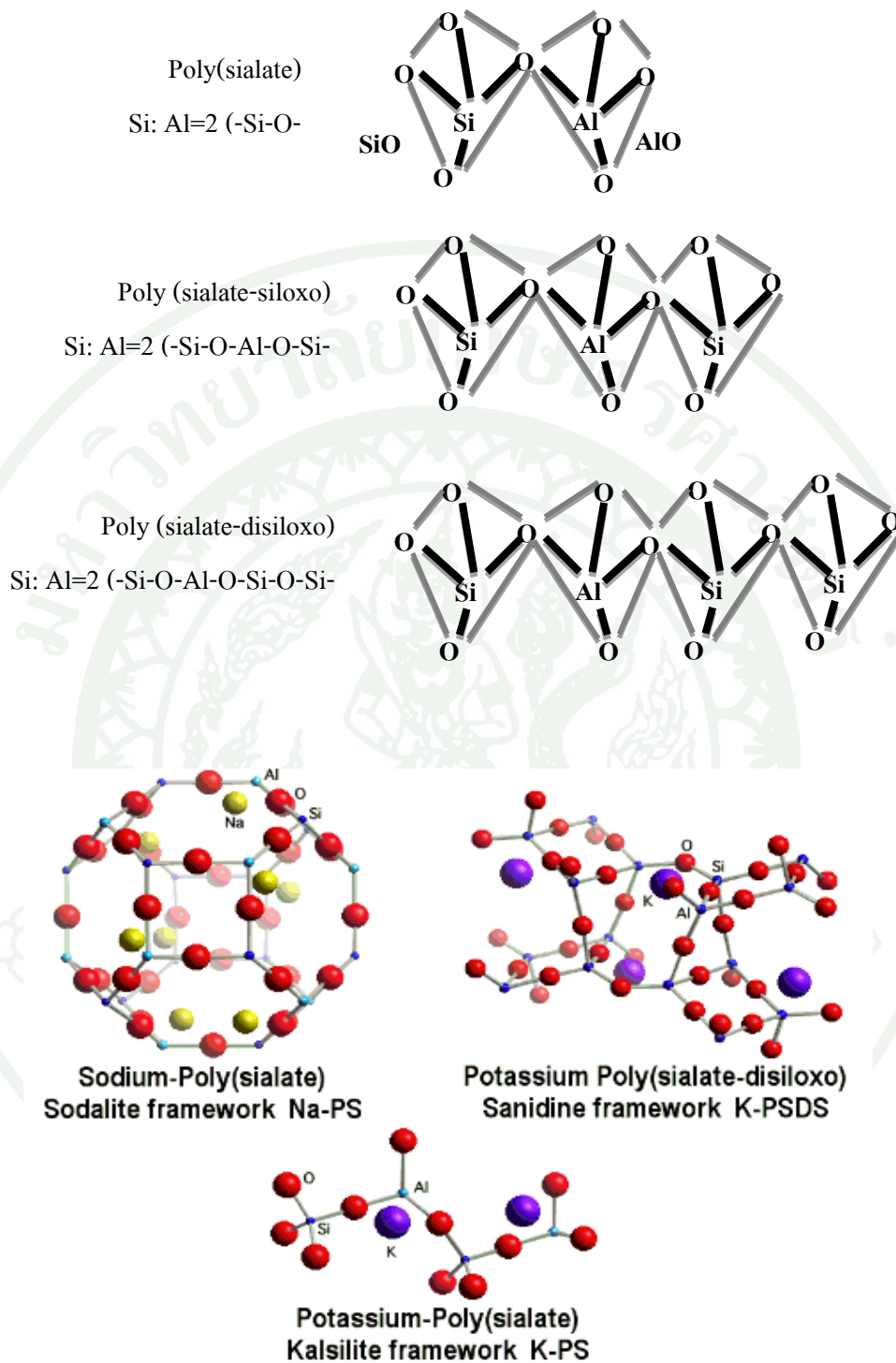
#### 4.2.2 ปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ (condensation-polymerization)

ในปฏิกิริยาการควบแน่นจะเกิดการรวมตัวกันของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาการชะละลายในเบื้องต้น กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นและปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมา หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของโพลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (meta-stable) ที่มีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยหน่วยพีรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สาม และสี่หน่วย ได้แก่ โพลีไซอะเลต (polysialate; PS) โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (polysialate siloxo; PSS) และโพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (polysialate disiloxo; PSDS) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3 ปริมาณของ  $\text{SiO}_4$  เพิ่มขึ้นจากหนึ่งหน่วยเป็นสามหน่วย เมื่อปฏิกิริยาเกิดมากขึ้นการเชื่อมโยงของโพลิเมอร์ที่เชื่อมโยงขวางกันก็จะเกิดมากขึ้น และหนาแน่นขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างที่แน่นสามารถรับแรงได้ ปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชันของจีโอโพลิเมอร์ยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างชัดเจน ซึ่ง Hua and Deventer (1999) ได้เสนอกลไกความน่าจะเป็นในการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (8) และ (9)



ภาพที่ 2 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์

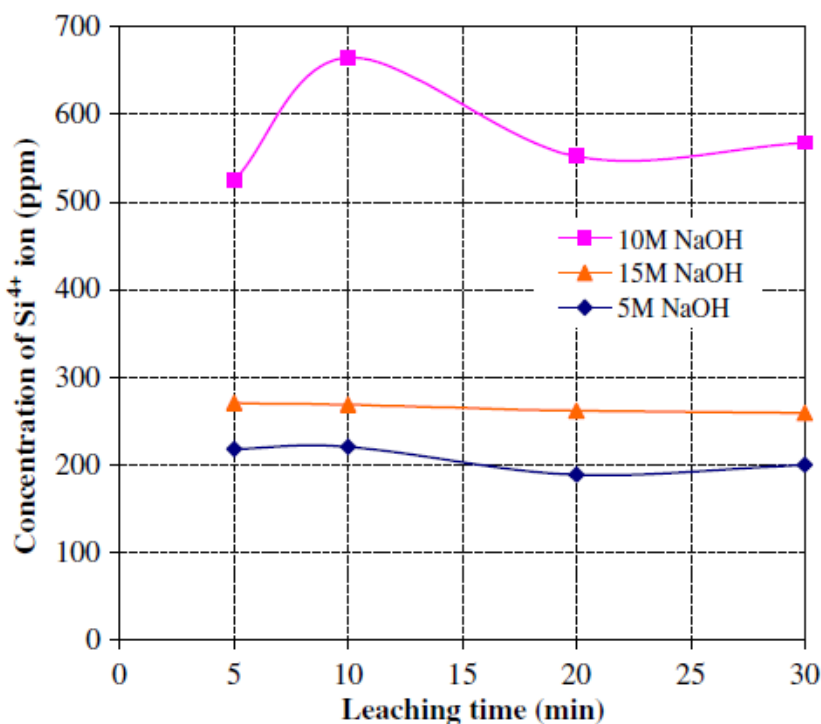
ที่มา: รัชรัฐศรม์ (2553)



ภาพที่ 3 โครงสร้างการเชื่อมพันธะของสารจีโอโพลิเมอร์และโพลิไซอะเลต

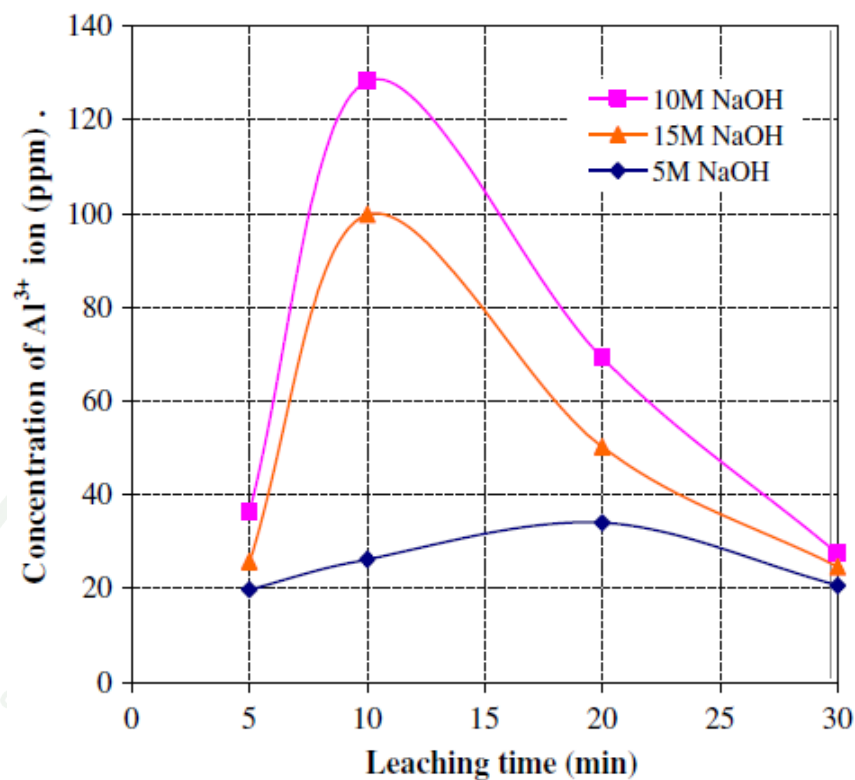
ที่มา: รัชรัศม์ (2553)

วัสดุหลายชนิดที่มีศักยภาพเหมาะสมที่สามารถนำมาผลิตจีโอโพลิเมอร์ และค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสมและการบ่มรวมทั้งปัจจัยด้านอื่นด้วย ซึ่งจากการศึกษาของ Rattanasak and Chindaprasirt (2009) ทำการศึกษาการชะของเถ้าลอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ 10 โมลาร์ และ 15 โมลาร์ ด้วยวิธีการผสมแตกต่างกัน ผลจากการศึกษาพบว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ จะมีการชะ  $Al^{3+}$  และ  $Si^{4+}$  ออกมาในปริมาณที่สูง โดยการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามด้วยสารละลายโซเดียมซัลเฟต



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ  $Si^{4+}$  กับระยะเวลาการชะละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ที่มา: Rattanasak and Chindaprasirt (2009)



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ  $Al^{3+}$  กับระยะเวลาการชะละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ที่มา: Rattanasak and Chindaprasirt (2009)

#### 4.3 การสังเคราะห์ซีโอพอลิเมอร์

วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุซีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วย

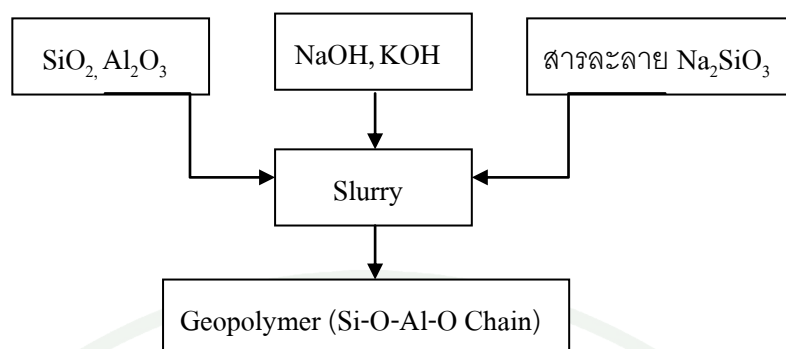
4.3.1 สารปอซโซลานตั้งต้น คือ วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถชะละลายได้ง่าย วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (artificial pozzolan) และปอซโซลานจากธรรมชาติ (natural pozzolan) ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอย เถ้าหนัก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ปัจจุบันได้มีการนำเอาปอซโซลานชนิดนี้ไปใช้

ประโยชน์ในการสร้างเขื่อนและสะพาน เพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่วนปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ดินไดอะตอมลำปาง (diatomaceous earth) เถ้าภูเขาไฟ ดินขาว ซึ่งวัสดุเหล่านี้ก่อนนำไปใช้งานต้องผ่านกระบวนการต่างๆ ก่อน เช่น การเผา การทำให้แห้ง เป็นต้น

4.3.2. อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ ที่นิยมใช้กัน ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารทั้ง 2 ชนิดสามารถให้ความเป็นด่างสูงและใช้ได้ดี โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากราคาไม่แพง หาได้ง่ายและให้อิโพลิเมอร์คุณภาพดี โซเดียมไฮดรอกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลว หมายถึง สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ ลักษณะทั่วไปเป็นของเหลวข้น ไม่มีสีและโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดแข็ง หมายถึง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นเกล็ด ลักษณะทั่วไป เป็นของแข็ง สีขาวสะอาดชนิดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดแข็ง ซึ่งจะถูกนำมาละลายตามความเข้มข้นที่ต้องการ

4.3.3 สารประกอบซิลิเกต ที่ใช้กันเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งเป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำ จัดเป็นด่าง ลักษณะทั่วไปไม่มีสี หรือมีสีเทาอ่อน โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรม

4.3.4 น้ำ สารจีโพลิเมอร์ต้องการน้ำเพื่อให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้ดี และสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำกลั่น โดยแผนผังการเกิดสารจีโพลิเมอร์ ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์

ที่มา: ปริญญา (2549)

#### 4.4 ประโยชน์ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่มีความคงทนแข็งแรง ทนต่อสภาวะอากาศ และสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงและคงตัวได้เร็วกว่าคอนกรีตและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการทำในระยะเวลาสั้นๆ เช่น งานซ่อมถนน ทางวิ่งในสนามบิน หรืองานหล่อแบบต่างๆ มีความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านได้ต่ำซึ่งมีค่าเท่ากับ  $10^{-9}$  cm/s และมีความคงทนต่อการกัดกร่อนของกรด เป็นต้น (Davidovits *et al.*, 2002) และยังสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การนำไปใช้ในงานก่อสร้างหรืองานคอนกรีตและมอร์ตาร์ ซ่อมผิวทางหรือซ่อมโครงสร้างต่างๆ เนื่องจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์บางตัวสามารถให้กำลังอัดได้ในเวลาอันรวดเร็ว งานตกแต่ง ตลอดจนงานอุตสาหกรรมไฟฟ้า เครื่องบิน การนำไปใช้ในงานอื่นๆ เช่น การทำอิฐทนไฟ การทำวัสดุตกแต่งเพื่อความสวยงาม การนำไปใช้กับอุตสาหกรรมเครื่องบิน และอุตสาหกรรมไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านนี้เริ่มนำมาใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศแล้ว นอกจากนี้ จีโอโพลิเมอร์ยังมีคุณสมบัติและประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้แก่

#### 4.4.1 ด้านการศึกษา

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี วัสดุนี้นี้มีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสารโพลีไซอะเลต (polysialate) ที่ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต [Si-O-Al-O] จากสูตร

ถ้า  $z$  มีค่าเป็น 1 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลต (PS)

ถ้า  $z$  มีค่าเป็น 2 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไซโลโซ (PSS)

ถ้า  $z$  มีค่าเป็น 3 จะเรียกว่า โพลีไซอะเลตไดไซโลโซ (PSDS)

โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si : Al จะบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของการใช้งานวัสดุนั้นๆ ตัวอย่างการใช้งานของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ เป็นดังนี้

อัตราส่วนของ Si : Al = 2 : 1 เหมาะสมสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต

อัตราส่วนของ Si : Al = 3 : 1 เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาสและวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตไททานเนียมที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 200-1,000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนของ Si : Al = 20 : 1 ถึง 35 : 1 ได้สารที่มีโครงสร้างของพอลิเมอร์เชื่อมขวางกันมากขึ้นทำให้สามารถนำไปใช้เป็นไฟเบอร์กลาสที่มีประสิทธิภาพสูง (high performance fiber composites)

#### 4.4.2 ด้านอุตสาหกรรม

วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถผลิตได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิการบ่มที่ต่ำ โดยการผสมวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลักกับสารละลายอัลคาไลน์ จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ จะได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงเทียบเท่ากับการผลิต

คอนกรีตจากปูนซีเมนต์ วัสดุอิโพลีเมอร์ที่สัดส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้าง งานขนส่ง และงานโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ โดยให้คุณสมบัติที่ดี เช่น ประสิทธิภาพด้านเชิงกลที่สูง ผิวหน้าที่แข็ง สามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 1,200 องศาเซลเซียส มีความต้านทานเป็นเลิศ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุอิโพลีเมอร์สามารถแทนวัสดุทางการก่อสร้าง เช่น อิฐ พื้นเซรามิก และซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี

#### 4.4.3. ด้านเศรษฐศาสตร์และสังคม

การใช้วัสดุอิโพลีเมอร์ในงานก่อสร้างต้องคำนึงถึงผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมและทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกสูงมาก ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน แต่สำหรับวัสดุอิโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์จัดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาโลกร้อนได้ เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ต้องใช้ความร้อนสูงในการปรับสภาพหินปูนเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์และไม่มีสารปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ

### 4.5 คุณสมบัติของวัสดุอิโพลีเมอร์

#### 4.5.1 ความแข็งแรง

วัสดุอิโพลีเมอร์จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงในระยะเวลาอันสั้น เช่นเดียวกับการผลิตคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ วัสดุอิโพลีเมอร์จะมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ คือสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง และให้ค่ากำลังอัดที่เป็นที่ยอมรับได้ในระยะเวลาอันสั้น ในบางกรณีพบว่าวัสดุอิโพลีเมอร์ที่สัดส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้าง งานขนส่ง และงานโครงสร้างขนาดใหญ่ได้ โดยให้คุณสมบัติที่ดี เช่น ประสิทธิภาพด้านเชิงกลที่สูง ผิวหน้าที่แข็ง มีความเสถียรทางความร้อน และความทนทานต่อกรดสูง

#### 4.5.2 ความทนความร้อน

วัสดุจีโอโพลิเมอร์สามารถทนความร้อนได้ถึง 1,200 องศาเซลเซียส (กานู, 2550) และทนต่อเปลวไฟได้ถึง 50 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร โดยไม่มีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ไม่เกิดควันเมื่อได้รับฟลักซ์ทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเหมือนโพลิเมอร์อินทรีย์ ดังนั้นวัสดุจีโอโพลิเมอร์จึงมีศักยภาพในการใช้งานทางอุตสาหกรรมยานยนต์ได้

#### 4.5.3 ความสามารถในการยึดตรึงโลหะหนัก

การตรึง (immobilization) ของเสียที่มีพิษด้วยการผสมของเสียดังกล่าวในวัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะที่คล้ายกับซีโอไลต์ (zeolite) หรือเฟลด์สปาทรอยด์ (feldspathoids) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับของเสียทางเคมีที่ดี หรือทำของเสียเป็นก้อน (solidify) ของเสียทางเคมีประเภทนี้ ได้แก่ ไอออนของโลหะหนักและกากของเสียนิวเคลียร์ วัสดุจีโอโพลิเมอร์จะมีโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถตรึงของเสียที่มีพิษไม่ให้ถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ โดยของเสียที่มีพิษจะถูกกักอย่างหนาแน่นภายในโครงสร้างสามมิติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์

จากการศึกษาของบุษราภรณ์ (2550) ได้ทำการศึกษาการใช้จีโอโพลิเมอร์เพื่อเก็บกักโลหะหนัก โดยใช้ถ้ำลอยเป็นวัสดุหลักในการทำจีโอโพลิเมอร์เพื่อเก็บกักโลหะหนักจากตะกอนน้ำเสียโรงสูบสังกะสี นำมาทดสอบความแข็งแรงในรูปของกำลังรับแรงอัดและหาปริมาณแคลเซียม ตะกั่ว และโครเมียมที่ถูกชะละลายจากจีโอโพลิเมอร์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมตะกอนโลหะหนักในทุกๆสัดส่วนที่ศึกษาสามารถเก็บกักโลหะหนักได้ โดยให้ค่าชะละลายต่ำกว่าค่ามาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม

## 5. กำลังรับแรงอัด (compressive strength)

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (strength) เป็นคุณสมบัติสำคัญของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ซึ่งจะแสดงถึงความสามารถในการรับแรงของคอนกรีต โดยการทดสอบกำลังของคอนกรีต ซึ่งสมบัติของคอนกรีตในขณะที่ยังอยู่ในสภาพเหลวจะมีความสำคัญเพียงขณะก่อสร้างเท่านั้น ในขณะที่สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ กำลัง ความทนทาน และการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเป็นเพียงส่วนหนึ่งของคุณสมบัติในด้านกำลัง และจะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตนั้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งสองลักษณะจะมีผลต่อกันและกัน การที่จะได้คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วดี จะต้องมาจากการเลือกอัตราส่วน ผสมเพื่อให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลวมีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน

### 5.1 ธรรมชาติของกำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

#### 5.1.1 กำลังของมอร์ตาร์

กำลังของมอร์ตาร์มีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยกำลังของมอร์ตาร์นี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ตาร์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ degree of hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความพรุนจะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับอย่างมากกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

การเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ ปริมาณ กำลัง ลักษณะผิว ขนาดใหญ่สุด การดูดซึม และแร่ธาตุต่างๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังดึง น้อยกว่ากำลังอัด โดยอัตราส่วนของกำลังดึงต่อกำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น

### 5.1.2 กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม

สำหรับกำลังของมอร์ตาร์ที่กำหนดให้ความสามารถต้านแรงของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังของหินและแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ตาร์ แต่โดยทั่วไปกำลังของมวลรวมจะสูงเป็นหลายเท่าของกำลังของมอร์ตาร์ ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจะเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดให้กำลังของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้หินขนาดใหญ่ขึ้น เพราะหินขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดน้ำใต้หินมากขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ตาร์ลดลง

มวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำหรือปานกลางมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง การเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลังอัด รวมทั้งถ้าใช้หินที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตดีขึ้น

### 5.1.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์

แรงยึดเหนี่ยวนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่าง ลักษณะผิวของมวลรวม และลักษณะทางเคมี คือ ปฏิกริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่างๆ ในเนื้อมวลรวม นอกจากนี้ทิศทางการหล่อและทิศทางการให้น้ำหนักจะมีผลต่อกำลังอัดเช่นกัน โดยจะมีผลต่อกำลังดึงมากกว่ากำลังรับแรงอัดด้วยเหตุผลที่ว่า จะเกิดช่องว่างทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ตาร์ต่ำลง

## 5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

### 5.2.1 คุณสมบัติของวัสดุผสม

ก. ปูนซีเมนต์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมากทั้งนี้ เพราะปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้แม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกัน หากมีความละเอียดแตกต่างกันแล้ว อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตก็จะแตกต่างกันไปด้วยคือ ถ้าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน

ข. มวลรวม มวลรวมมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ตามมวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อยซึ่งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบจะให้กำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าพวกกรวดที่มีผิวเกลี้ยง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน เพราะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่ จะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก สำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถเท่าได้เท่ากัน ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ จึงมักให้กำลังดีกว่า ส่วนขนาดคละของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตในแง่ที่ว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีส่วนขนาดคละไม่เหมาะสม ก็มีส่วนละเอียดมากเกินไปนั้นจะต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีส่วนคละที่ดี เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถเท่าได้เท่ากัน อีกทั้งยังก่อให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงได้ นอกจากนี้ความสะอาดของมวลรวมก็จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน

ค. น้ำ มีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใสและปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ น้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมอยู่จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะต้นสูง น้ำขุ่นหรือน้ำที่มีสารแขวนลอยปนอยู่จะทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

### 5.2.2 การทำคอนกรีต

ก. การซังดวงส่วนผสม การซังดวงส่วนผสม หากใช้การดวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการซังส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากอัตราส่วนผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้ อัตราส่วนผสม จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง โดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

ข. การผสมคอนกรีต การผสมคอนกรีตจะต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อให้มีน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์กระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมได้อย่างเต็มที่ ดังนั้น การผสมคอนกรีต หากกระทำอย่างไม่ทั่วถึงจะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่คงที่ได้

ค. การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเพราะหากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะลำเลียงหรือเทจะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตแน่นตัวหากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะเกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อคอนกรีตมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงได้

### 5.2.3 การบ่มคอนกรีต

ก. ความชื้น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำนั้นจะค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ถ้ามีความชื้นอยู่ตลอดเวลา ถ้าซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตไม่มีความชื้นอยู่คอนกรีตก็จะไม่มีการเพิ่มกำลังอีกต่อไป ในทางปฏิบัติเรามักจะบ่มคอนกรีตจนถึงอายุ 28 วัน ดังนั้น เมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที

ข. อุณหภูมิ หากอุณหภูมิสูงในขณะที่บ่มจะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตถูกเร่งได้เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิต่ำกว่า

ค. เวลาที่ใช้ในการบ่ม หากสามารถบ่มคอนกรีตให้ขึ้นอยู่ตลอดเวลาได้ยาวนานเท่าใดจะยิ่งได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

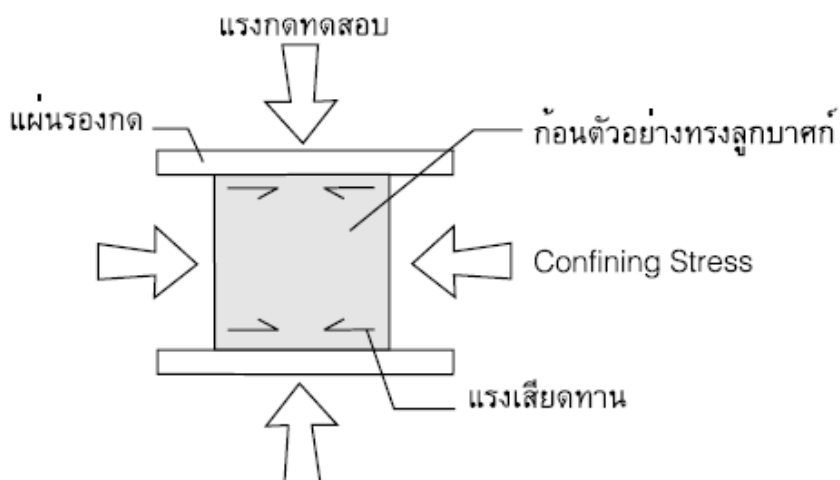
#### 5.2.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ควรพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตดังนี้

- ขนาดและลักษณะของแท่งทดสอบ
- วิธีการทำตัวอย่าง
- ความชื้นในแท่งทดสอบ
- อัตราการกด
- เครื่องทดสอบ

ในทางปฏิบัติคอนกรีตจะได้รับทั้งแรงกด แรงดึง หรือแรงเฉือนใน 2 ทิศทางหรือมากกว่านั้นแต่การทดสอบที่สะดวกที่สุดที่กระทำในห้องทดสอบ คือ การทดสอบกำลังอัดด้วยวิธี Uniaxial Compression Test ซึ่งกำลังอัดของคอนกรีตที่ทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวที่อายุ 28 วัน ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายให้เป็นดัชนีทั่วไปในการวัดกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งการทดสอบทำโดยการหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตมาตรฐาน ซึ่งที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายมี 2 รูปทรง

รูปทรงลูกบาศก์ เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษ ขนาดที่ใช้ คือ 15x15x15 เซนติเมตร และรูปทรงกระบอก เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอเมริกา ขนาดที่ใช้ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร หลังจากคอนกรีตแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก ต่อจากนั้นจึงนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในน้ำ เพื่อรอการทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด



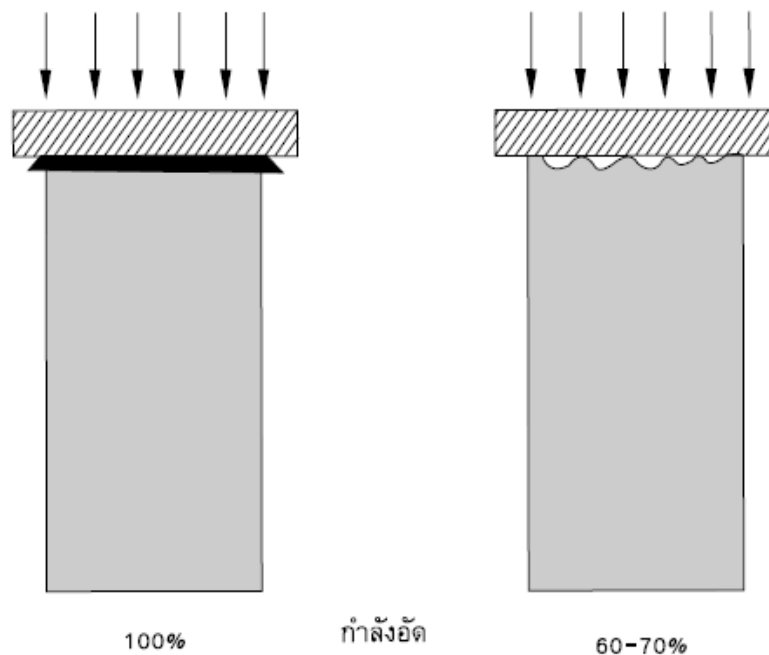
ภาพที่ 7 แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกดซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการแตกด้านข้างของก้อนตัวอย่าง (confining stress)

ที่มา: ชัชวาล (2539)

กำลังรับแรงอัดของทั้ง 2 รูปทรงที่ได้จากเครื่องทดสอบ จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่แตกต่างกัน ถึงแม้จะใช้ส่วนผสมของคอนกรีตเดียวกัน โดยกำลังอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทั้งนี้เนื่องจาก

ก. องค์ประกอบเรื่องความชะลูด กล่าวคือ รูปทรงกระบอกมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (slenderness ratio) มากกว่ารูปทรงลูกบาศก์ ซึ่งอัตราส่วนความชะลูดดังกล่าวส่งผลให้กำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกต่ำกว่ารูปทรงลูกบาศก์

ข. ขณะที่กดก้อนตัวอย่างนั้น ก้อนตัวอย่างจะแตกออกด้านข้าง ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกด แรงเสียดทานดังกล่าวจะก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการแตกด้านข้างของก้อนตัวอย่างที่เรียกว่า confining stress ดังภาพที่ 7 โดยค่า confining stress นี้จะมีค่ามากถ้าผิวสัมผัสของก้อนตัวอย่างกับเครื่องกดมีค่ามาก ดังนั้นผลทดสอบกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์จึงให้ค่าสูงกว่ารูปทรงกระบอก



ภาพที่ 8 ก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่ CAP หัวและไม่ CAP หัว

ที่มา: ชัชวาล (2539)

ในทางปฏิบัตินั้นผิวด้านบนของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกมักจะไม่เรียบ ทำให้ผลการทดสอบผิดพลาดได้ ดังนั้นก่อนการทดสอบจะต้องทำการ Cap ก้อนตัวอย่างทั้ง 2 ด้านด้วยก้ำมะถันเสียก่อน เพื่อให้ผิวทั้ง 2 ด้านของตัวอย่างเรียบ และเพื่อให้แนวแกนของแท่นตัวอย่างได้ฉากกับแนวราบกึ่งจาก Cap เสร็จเรียบร้อย และก้ำมะถันแห้งดีแล้วก็สามารถนำก้อนตัวอย่างเข้าทดสอบได้ ส่วนก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์นั้นไม่ต้อง Cap ก้อนตัวอย่างเพราะมีผิวด้านข้างอีก 4 ด้านเรียบที่สามารถนำมาทดสอบได้

### 5.3 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

น้ำหนักที่กดอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างจึงจะให้กำลังอัดที่ถูกต้อง ซึ่งจะเกิดได้ดังนี้

5.3.1 ก้อนตัวอย่างต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลาง และแกนของก้อนตัวอย่างต้องอยู่ในแนวตั้ง

5.3.2 แผ่นรองกดต้องอยู่ในแนวตั้งฉากกับแกนของก้อนตัวอย่าง

5.3.3 แผ่นรองกดต้องเคลื่อนตัวได้เล็กน้อย

5.3.4 แผ่นรองกดจะต้องเรียงเป็นระนาบ

5.3.5 ถ้าต้องใช้วัสดุ Cap ก้อนตัวอย่าง ควรจะเลือกวัสดุที่มีกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่น

ใกล้เคียงกับของคอนกรีต

#### 5.4 การประเมินผลการทดสอบ

ความผันแปรของกำลังอัดตัวอย่างคอนกรีต กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับการควบคุมทั้งวัตถุดิบ ขบวนการผลิต และขบวนการทดสอบ ซึ่งเมื่อสรุปจะได้ว่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าผันแปรอันเนื่องมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการ คือ

5.4.1 การผันแปรเนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีต (ผันแปรในขบวนการผลิต)

5.4.2 การผันแปรเนื่องจากการทดสอบ (ผันแปรในขบวนการควบคุมคุณภาพ) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5

## ตารางที่ 5 สรุปความผันแปรของกำลังอัด

การผันแปรในสมบัติของคอนกรีตเอง	การผันแปรเนื่องจากการทดสอบ
การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	วิธีการสูมตัวอย่างไม่เหมาะสม
- ควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมไม่พอดี	วิธีการเตรียมตัวอย่างไม่แน่นอน
- ความชื้นในหินและทรายมีมาก การผันแปรในปริมาณความต้องการน้ำในส่วนผสม	- ปริมาณการกระทุ้ง
- ขนาดคละของหินและทราย	- การเคลื่อนย้ายตัวอย่าง
- วัสดุผสมมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ	- การดูแลตัวอย่างคอนกรีตสด
การผันแปรในคุณภาพและอัตราส่วนผสมของวัสดุ	การเปลี่ยนแปลงจากการบ่ม
- หิน, ทราย	- อุณหภูมิ
- ซีเมนต์	- ความชื้น
	วิธีดำเนินการทดสอบไม่ดี
	- การหล่อฝ่า
	- การทดสอบกำลังอัด

ที่มา: ชัชวาล (2539)

### 5.5 สาเหตุที่กำลังอัดไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

การที่กำลังอัดของคอนกรีตได้ค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดนี้อาจมีสาเหตุมาจากหลายๆ ประการ อันได้แก่

5.5.1 ใช้อัตราส่วนผสมไม่เหมาะสม

5.5.2 ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ

5.5.3 ควบคุมปริมาณฟองอากาศไม่ดี

5.5.4 การผสมไม่ดีพอ

- 5.5.5 มีสารอินทรีย์ต่างๆ มากเกินข้อกำหนด
- 5.5.6 ใช้หินทรายที่สกปรก
- 5.5.7 ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่ไม่มีประสิทธิภาพ
- 5.5.8 การลำเลียงและการทดสอบไม่ถูกต้อง
- 5.5.9 การอัดแน่นไม่ถูกต้อง
- 5.5.10 การบ่มไม่เพียงพอ

## 6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต้องมีการศึกษาในด้านสมบัติเพื่อที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ดังผลงานวิจัยต่อไปนี้

วิมณฑนา (2556) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยจากการเผาถิกไนต์และตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำที่เกิดขึ้นจากโรงไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ร่วมกันในรูปแบบของจีโอโพลิเมอร์ ทำการผสมเถ้าลอยกับสารละลายต่างในอัตราส่วน 1:0.45 โดยน้ำหนัก ซึ่งสารละลายต่างคือ โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อบ่มจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ทำให้กำลังอัดสูงกว่าและเร็วกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง จีโอโพลิเมอร์ (เถ้าลอยและสารละลายต่าง) และจีโอโพลิเมอร์ผสมทรายมีค่า 336 และ 442 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การเพิ่มสารละลายต่างที่ต่างกัน 1:0.45 1:0.7 และ 1:1 พบว่าการเพิ่มสารละลายต่างมากขึ้นทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำลง จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 10 20 30 และ 40 ของน้ำหนักเถ้าลอยมีค่า 312 375 445 และ 471 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทราย โดยใช้ตะกอนดินทดแทนทรายร้อยละ 10 20 และ 30 ของน้ำหนักทรายมีค่า 485 549 และ 573 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ การเติมตะกอนดินช่วยเพิ่มกำลังอัดได้และการใช้ตะกอนดินร่วมกับทรายยังสามารถเพิ่มกำลังอัดขึ้นได้อีก อย่างไรก็ตามจีโอโพลิเมอร์มีขีดจำกัดในการเติมตะกอนดินเนื่องจากสมบัติการดูดซับน้ำของตะกอนดิน จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการ

นำจีโอโพลิเมอร์มาทำเป็นบล็อกประสาน พบว่าเมื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดสูงกว่าบล็อกประสานผสมปูนซีเมนต์ การรับกำลังอัดของบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินและบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทรายมีค่า 35 และ 43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาแสดงว่าตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำมีศักยภาพในการนำมาใช้ทดแทนทรายในจีโอโพลิเมอร์และการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์

งานวิจัยของ *Isaia et al.* (2003) ทำการศึกษากำลังอัดทั้งสองของเถ้านหินและเถ้าแกลบเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 12.5 25 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงโดยใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 0.50 และ 0.65 โดยหินปูนบดถูกนำมาพิจารณาเพื่อหาค่าการอัดตัวของเถ้าแกลบและเถ้านหิน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ให้กำลังอัดที่สูง (65 MPa) และการแทนที่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อายุ 28 และ 91 วันนั้น กำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคมีค่าสูงกว่ากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายท่านพยายามนำเถ้านหินมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในคอนกรีต เช่น *Nisnevich* (1997) ได้ทำการทดลองใช้เถ้ากั้นเตาที่มีรูพรุนสูงมาเป็นมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีตและนำเถ้านหินมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อทำคอนกรีตมวลเบา โดยใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันคือ 0.4 0.5 0.6 0.8 และ 0.9 สำหรับเถ้านหินถูกนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลจากการทดสอบพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าน้อยลงตามความหนาแน่นที่น้อยลง และสามารถลดความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาให้มีค่าต่ำสุดอยู่ระหว่าง 1,127-1,320 กก./ม.<sup>3</sup> ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.9

*Jaturapitakkul and Cheerarot* (2003) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้านหินจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้า แม่เมาะมาเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต โดยเก็บตัวอย่างเถ้านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาปรับปรุงคุณภาพโดยกรรมวิธีการบดจนกระทั่งมีปริมาณข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เถ้านหินก่อนและหลังการบดถูก

นำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสำหรับมอร์ตาร์ และแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสำหรับคอนกรีต ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 25 35 และ 45 MPa ผลการทดลองสรุปว่าถ้าหนักก่อนบดไม่สามารถใช้แทนที่วัสดุประสานได้เนื่องจากมีความต้องการน้ำสูงส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำมาก ซึ่งไม่ผ่านข้อกำหนดของ American Society for Testing and Materials อย่างไรก็ตามการปรับปรุงคุณภาพของถ้าหนักจนมีขนาดอนุภาคข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่วัสดุประสานในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตได้เป็นอย่างดี

Sathonsaowaphaka *et al.* (2009) ได้ศึกษาการใช้ถ้าหนักจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้ามาทำเป็นจีโอโพลิเมอร์ โดยใช้โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เป็นตัวผสม และบ่มด้วยความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริyajีโอโพลิเมโรเซชัน ทำการศึกษาความละเอียดของถ้าหนัก อัตราส่วนสารละลายต่างต่อถ้าหนัก อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าถ้าหนักสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดิบในการทำ จีโอโพลิเมอร์ ได้ การเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เล็กน้อยช่วยทำให้ความสามารถในการเทได้ดีขึ้น ในขณะที่ยังคงความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ความสามารถในการเทได้ และความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์สามารถปรับปรุงได้ด้วยการเพิ่มความละเอียดของถ้าหนัก ซึ่งการบดถ้าหนักเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและการเกิดปฏิกิริยา และเป็นการทำลายรูของอนุภาคถ้าหนัก ความสามารถในการเทได้จะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  และความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีความหนืดสูงของ โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วงที่สามารถใช้งานได้จะอยู่ที่ อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ  $\text{NaOH}$  ระหว่าง 0.67–1.5 และความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ระหว่าง 7.5–12.5 โมลาร์ นอกจากนี้พบว่า การเติมน้ำลงไปจะพบว่ามีผลมากที่สุดในการเพิ่มการไหลได้และไปลงความแข็งแรงลงเล็กน้อยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เล็กน้อยช่วยทำให้ความสามารถในการเทได้ดีขึ้นในขณะที่ยังคงความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ภากร (2550) ได้ศึกษาสมบัติพื้นฐานของส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์จากถ้าหนัก โดยทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน เป็นตัวชี้วัดและมีตัวแปรในการศึกษาคือ

ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิในการบ่มร้อน วิธีการให้อุณหภูมิในการบ่มร้อน ความละเอียดของเถ้านัก จากการศึกษาพบว่าเถ้านักมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เช่นเดียวกับเถ้าลอย และสามารถพัฒนาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้านักเพื่อใช้ในงานคอนกรีตแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอนาคตได้

Kurama and Kaya (2007) ได้ศึกษาการนำเถ้ากั้นเตา (CBA) ที่ได้จากโรงไฟฟ้า Tuncbilek ที่ประเทศตุรกี มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีต โดยมีการทดลองใช้เถ้านัก 25% แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้ากั้นเตาสามารถจัดเก็บได้โดยกระบวนการต่อไปนี้ แบ่งตามขนาดอนุภาค แยกขนาดใหญ่และขนาดกลาง และการแยกโดยใช้ไฟฟ้าสถิต ผลการศึกษาพบว่า สามารถใช้เถ้ากั้นเตา 10% แทนวัสดุฉนวนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และช่วยให้คุณสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถใช้เถ้ากั้นเตาในอุตสาหกรรมคอนกรีตได้

เรืองรุชดี และชัย (2543) ได้ศึกษาศักยภาพของเถ้านักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเพื่อใช้เป็นวัสดุพอลิโซลัน โดยปรับปรุงคุณภาพเถ้านักด้วยการบดให้มีความละเอียดมากขึ้น จากนั้นทดสอบคุณสมบัติด้านกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และกำลังอัดของมอร์ตาร์ เมื่อใช้เถ้านักและเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลจากการศึกษาพบว่าเถ้านักก่อนการบดมีขนาดใหญ่และรูปร่างไม่แน่นอน และมีรูพรุนสูง การบดเถ้านักทำให้รูพรุนแรกออกและมีความละเอียดมากขึ้น ส่วนเถ้าถ่านหินมีลักษณะกลม องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน เถ้านักก่อนและหลังการบดมีค่าต่างกันเล็กน้อย กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้านักก่อนการบดมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินและมอร์ตาร์มาตรฐานอย่างมาก แต่เมื่อใช้เถ้านักที่บดละเอียดเป็นส่วนผสมพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์จะสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุตั้งแต่ 60 วันขึ้นไป ถ้าใช้เถ้านักบดละเอียดในอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีกำลังอัดที่อายุ 7 วันมากกว่าร้อยละ 80 ของมอร์ตาร์มาตรฐานและมีค่าถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีกำลังอัดที่อายุ 7 วันมากกว่าร้อยละ 80 ของมอร์ตาร์มาตรฐานและมีค่าถึงร้อยละ 94 ที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเถ้านักบดละเอียดเป็นวัสดุพอลิโซลันที่ดีมากชนิดหนึ่ง

Tangpagasit *et al.* (2005) ศึกษาการอัดตัวของอนุภาคและปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้านหินที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน 3 ขนาด โดยนำทรายแม่น้ำมาบดให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใกล้เคียงกับเถ้านหินทั้ง 3 ขนาด จากนั้นมาผ่านกระบวนการเพื่อทำเป็นวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials เพื่อให้มั่นใจว่าทรายบดจะไม่ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์และน้ำ วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่างถูกนำมาพิจารณาหาค่าการอัดตัวของอนุภาคของเถ้านหิน ผลการทดสอบพบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้านหินที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.7 และ 160 ไมโครเมตรนั้น ที่อายุช่วงต้น (28 วัน) กำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคมีค่าสูงกว่ากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน อย่างไรก็ตามที่อายุช่วงปลาย (90 วัน) กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจึงมีค่าสูงกว่า

## อุปกรณ์และวิธีการ

### วัตถุดิบและสารเคมี

#### 1. วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

1.1 ถ้ำก้นเตา (bottom ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง บดให้มีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (รูเปิด 45 ไมครอน) โดยมีผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบหลักทางเคมีตามตารางที่ 2

1.2 ตะกอนดินจากโรงไฟฟ้าแก่งคอย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 นำส่วนที่ผ่านตะแกรงมาใช้ (รูขนาดประมาณ 150 ไมครอน) โดยมีผลวิเคราะห์ตามตารางผนวกที่ 1

1.3 ทราย มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ทรายที่มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ 0.15 และน้อยกว่า 0.15 มิลลิเมตร

1.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, commercial grade, AGC chemicals, Thailand)

1.5 โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งมีองค์ประกอบของ  $\text{Na}_2\text{O}$  15.32% ,  $\text{SiO}_2$  32.87% และน้ำ 51.81% โดยมวล

1.6 น้ำมันสำหรับทาแบบหล่อตัวอย่าง

1.7 น้ำปราศจากไอออน

### อุปกรณ์

#### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

1.1 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ขนาด 3,000 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม

1.2 เครื่องทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัด (compressive testing machine)

- 1.3 แบบหล่อตัวอย่างทองเหลืองรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร
- 1.4 เครื่องผสม ขนาด 2.5 ลิตร ยี่ห้อ OTTO รุ่น HM-009
- 1.5 hot air oven ยี่ห้อ JSR รุ่น JSOF-100
- 1.6 เครื่องแก้ว
- 1.7 ขวดปริมาตร (volumetric flask ) ขนาด 1,000 มล.
- 1.8 ตะแกรงร่อนเบอร์ 4
- 1.9 ตะแกรงร่อนเบอร์ 325
- 1.10 พลาสติกสำหรับไว้ห่อ

## วิธีการ

### 1. การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัยจีโอโพลิเมอร์คือ ถ้ำหนักจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ที่เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งถ้ำหนักมีองค์ประกอบทางเคมีตามตารางที่ 2 ถ้ำหนักจำเป็นต้องมีการนำไปบดให้มีขนาดเล็กลง โดยบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 และการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ยังใช้ตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปา เพื่อหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าแก่งคอย 2 จังหวัดสระบุรี เป็นวัตถุดิบซึ่งตะกอนดินที่ใช้ในการวิจัยเป็น non-hazardous waste จากผลวิเคราะห์และการพิจารณาของกรมโรงงานอุตสาหกรรม โดยจะนำตะกอนดินมาทำให้แห้งและลดขนาดตะกอนดิน จากนั้นนำมาร่อนจะได้ตะกอนดินที่ละเอียด ส่วนทรายจะใช้ทรายแม่น้ำละเอียดสำหรับก่อสร้าง นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ส่วนสารละลายต่างที่ใช้ในการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ผสมทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนนำมาใช้

## 2. การขึ้นรูปตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ในแบบหล่อ

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบตัวอย่าง ทำการผสมเถ้าหนักกับสารละลายต่าง ในอัตราส่วนการผสม 1:1 โดยน้ำหนัก โดยจะทำการผสมเถ้าหนักกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อน ผสมให้เข้ากันประมาณ 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมให้เข้ากันอีกประมาณ 1 นาที โดยอัตราส่วนในการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ คือ 1:1 โดยน้ำหนัก จากนั้นใช้สูตรการผสมตัวอย่างต่าง ๆ ตามที่กำหนดคือ เถ้าหนักกับสารละลายต่าง เถ้าหนักกับสารละลายต่างร่วมกับเติมทราย เถ้าหนักกับสารละลายต่างร่วมกับตะกอนดิน เถ้าหนักกับสารละลายต่างร่วมกับการเติมทรายและตะกอนดิน เมื่อผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วให้เทจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อตัวอย่างขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร ซึ่งได้ทาน้ำมันไว้ให้ทั่วเพื่อความสะดวกในการแกะออกจากแบบหล่อ แล้วหุ้มแบบหล่อด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ หลังจากนั้นส่วนหนึ่งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อใช้เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่นำไปอบด้วย hot air oven ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน นำตัวอย่างไปเข้าเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดและบันทึกผลกำลังรับแรงอัด ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยในการเตรียมตัวอย่างกับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ ในแต่ละสูตรจะทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการผสมเข้ากันและสารละลายต่าง



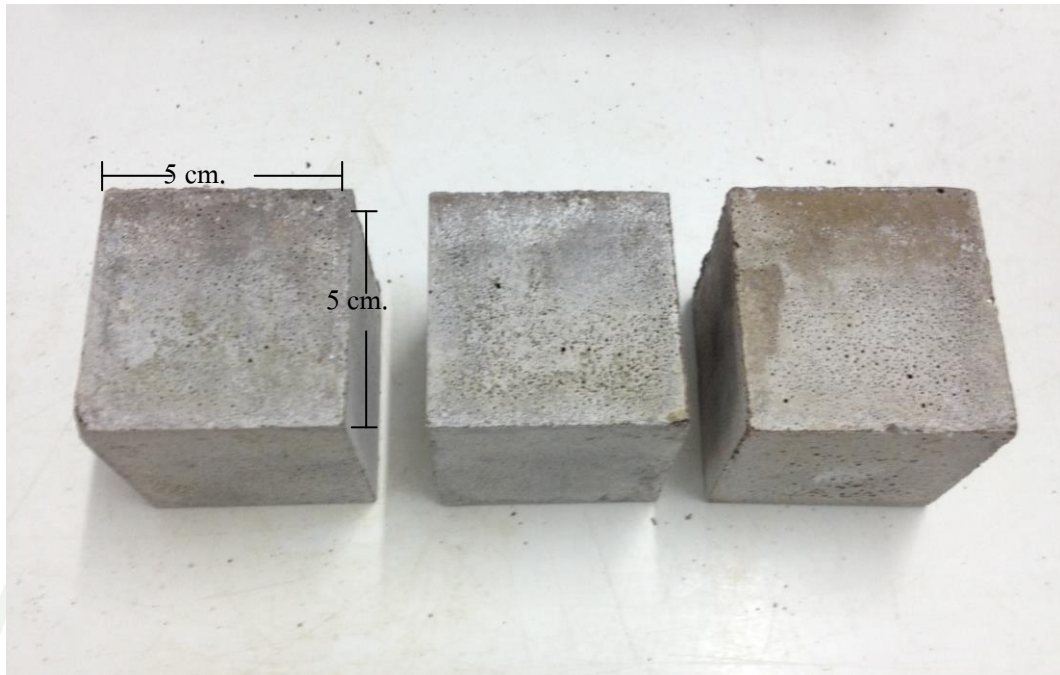
ภาพที่ 10 ขั้นตอนการเทจีโอโพลิเมอร์ลงในแบบหล่อตัวอย่าง



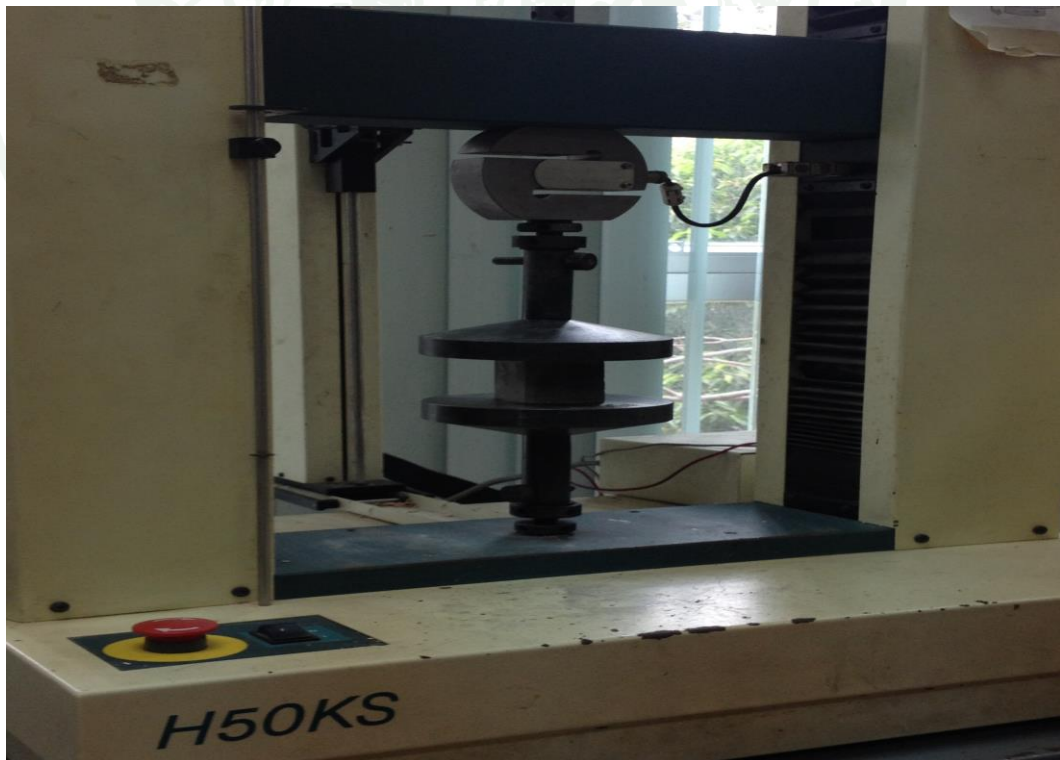
ภาพที่ 11 ขั้นตอนการหุ้มแบบหล่อตัวอย่างด้วยพลาสติกก่อนนำเข้าตู้อบ



ภาพที่ 12 ขั้นตอนการแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อ



ภาพที่ 13 ชิ้นงานที่พร้อมสำหรับการทดสอบ



ภาพที่ 14 ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนจีโอโพลิเมอร์

### 3. อัตราส่วนการผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

#### 3.1 อัตราส่วนการผสมตัวอย่างที่ใช้อัตราส่วนสารละลายต่างแตกต่างกัน

การศึกษาอัตราส่วนการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อหาอัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่างที่เหมาะสม โดยสารละลายต่างที่ใช้คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (alkali activator) เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง เป็น 1:0.6 1:0.7 1:0.8 และ 1:1 โดยน้ำหนัก ตามตารางที่ 6 จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ อายุ 7 14 และ 28 วัน

ตารางที่ 6 อัตราส่วนการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อหาอัตราส่วนสารละลายต่างที่เหมาะสม

อัตราส่วนสารที่ เปลี่ยนแปลง	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)	NaOH (g)	bottom ash (g)
0.6	30	30	100
0.7	35	35	100
0.8	40	40	100
1	50	50	100

#### 3.2 อัตราส่วนการผสมตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิในการบ่มที่แตกต่างกัน

อัตราส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อเลือกอุณหภูมิในการบ่ม กรณีศึกษา (1) อุณหภูมิห้อง (2) อุณหภูมิตู้อบ ผสมอัตราส่วนของเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนในการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน (alkali activator) Na<sub>2</sub>SiO ต่อ NaOH เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก เมื่อผสมเสร็จแล้ว ชูตหนึ่งนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และอีกชูตหนึ่งนำไปเก็บที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน อัตราส่วนในการผสมตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 อัตราส่วนการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อหาอุณหภูมิในการบ่มที่เหมาะสม

กรณีศึกษา (1) อุณหภูมิห้อง (2) อุณหภูมิตู้อบ

อุณหภูมิ (°C)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)	NaOH (g)	bottom ash (g)
อุณหภูมิตู้อบ (65 °C)	50	50	100
อุณหภูมิห้อง (35 °C)	50	50	100

### 3.3 อัตราส่วนการผสมของจีโอโพลิเมอร์ที่มีและไม่มีส่วนผสมของทราย

อัตราส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อเลือกปริมาณทรายที่เหมาะสม ผสมอัตราส่วนของเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนในการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน (alkali activator) Na<sub>2</sub>SiO ต่อ NaOH เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก ผสมทราย 135 200 275 กรัม น้ำ 50 และ 100 กรัม บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน อัตราส่วนในการผสมตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8 อัตราส่วนการผสมของจีโอโพลิเมอร์เต็มทราวยกับจีโอโพลิเมอร์ปกติ

ส่วนผสมทราย (g)	น้ำ (g)	bottom ash (g)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)	NaOH (g)
0	0	100	50	50
135	0	100	50	50
200	50	100	50	50
275	100	100	50	50

### 3.4 อัตราส่วนการผสมของจีโอโพลิเมอร์ที่มีปริมาณตะกอนดินต่างกัน

การศึกษ้อัตราส่วนการผสมของจีโอโพลิเมอร์ที่มีปริมาณตะกอนดินต่างกัน ผสมอัตราส่วนของเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนในการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน (alkali activator) Na<sub>2</sub>SiO ต่อ NaOH เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก แล้วทำการผสมตะกอนดินลงไป ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 ของเถ้าหนัก จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ อายุ 7 14 และ 28 วัน อัตราส่วนการผสมตามตารางที่ 9

ตารางที่ 9 อัตราส่วนการผสมของจีโอโพลิเมอร์ที่มีตะกอนดินต่างกัน

% ของเถ้าหนัก	ปริมาณตะกอน (g)	อัตราส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์		
		bottom ash (g)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)	NaOH (g)
10	10	100	50	50
20	20	100	50	50
30	30	100	50	50
40	40	100	50	50

### 3.5 อัตราส่วนการผสมของจีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของตะกอนดินและทราย

อัตราส่วนการผสมของจีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของตะกอนดินและทราย เติมตะกอนในอัตราส่วนทดแทนทรายร้อยละ 10 20 และ 30 ของทราย โดยมีอัตราส่วนในการผสมมวลรวมเดิมมีปริมาณที่ 135 กรัม ต่อเก้าหนัก 100 กรัม สารละลายต่างที่ใช้คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วน (alkali activator)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ  $\text{NaOH}$  เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของเก้าหนักต่อสารละลายต่าง เป็น 1:1 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ อายุ 7 14 และ 28 วัน อัตราส่วนการผสมตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 อัตราส่วนการผสมของจีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของตะกอนดินและทราย

% ของทราย	ตะกอนดิน (g)	ทราย (g)	อัตราส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์		
			bottom ash (g)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (g)	$\text{NaOH}$ (g)
10	13.5	121.5	100	50	50
20	27	108	100	50	50
30	40.5	94.5	100	50	50

## 4. วิธีการทดสอบ

4.1 นำชิ้นงานที่แกะออกจากแบบหล่อเรียบร้อยแล้ว วางลงบนแท่นทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด

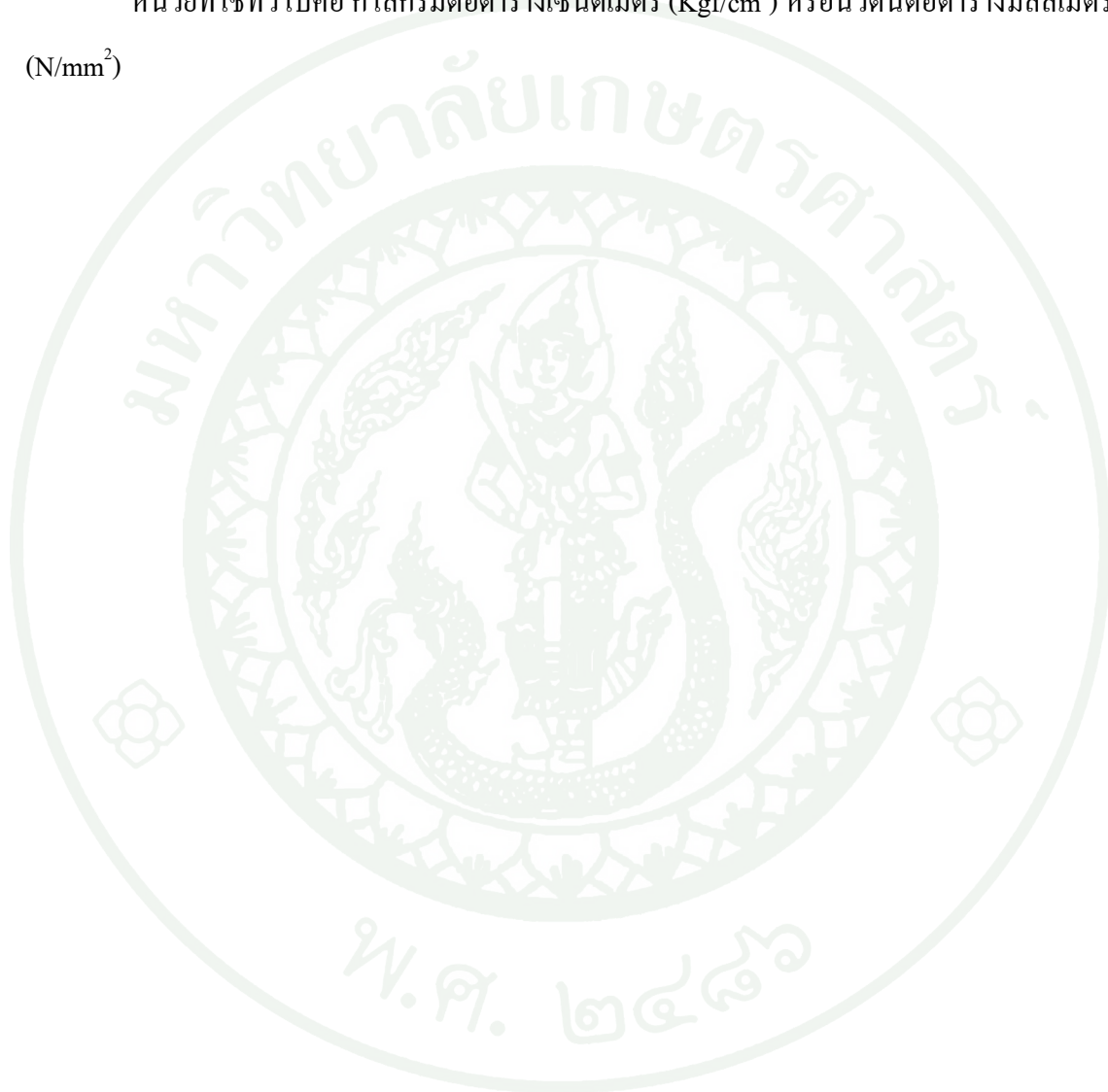
4.2 เปิดเครื่องทดสอบ โดยในการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ อัตราที่ใช้ คือ 1.4 - 3.4 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร/วินาที

4.3 กดก่อนตัวอย่างจนแตก บันทึกค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้

4.4 นำค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ และพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่ากำลังอัดประลัย

$$\text{กำลังอัดประลัยของคอนกรีต} = \frac{\text{น้ำหนักกดประลัย}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง}}$$

หน่วยที่ใช้ทั่วไปคือ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{Kgf/cm}^2$ ) หรือนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ( $\text{N/mm}^2$ )



## ผลและวิจารณ์

### 1. ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากการเตรียม

เจ้าหน้าที่ใช้ในการทำจีโอโพลิเมอร์ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยเจ้าหน้าที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบและผงละเอียดปนกันอยู่แต่มีส่วนของเม็ดหยาบมากกว่า และมีสีเทาถึงดำ เจ้าหน้าที่จำเป็นต้องนำไปบดให้มีขนาดเล็กลง โดยบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 จะได้เจ้าหน้าที่ละเอียดมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 15 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทางเคมีในรูปออกไซด์ของเจ้าหน้าที่จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ที่ทดสอบด้วยเครื่อง X-ray fluorescence (XRF) พบว่ามีองค์ประกอบหลักทางเคมี ได้แก่  $\text{SiO}_2$  38.8 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  12.8 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  5.1 % และ  $\text{CaO}$  18.9 % โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 15 ลักษณะของเจ้าหน้าที่ก่อนและหลังการนำไปบดและร่อน

ตะกอนดินที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงไฟฟ้าแก่งคอย 2 จังหวัดสระบุรี โดยตะกอนดินที่ได้นั้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างของแข็งแขวนลอยที่อยู่ในน้ำดิบกับสารเคมีที่เติมลงไปในการสร้างตะกอน ลักษณะของตะกอนเป็นสีน้ำตาล เนื้อมีความละเอียด ดังภาพที่ 16 และจากตารางผนวกที่ 1 ตารางแสดงการวิเคราะห์โลหะหนักของตะกอนจากโรงไฟฟ้าแก่งคอย เป็นชนิด non-hazardous waste จากการทดสอบตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม แสดงถึงคุณสมบัติที่ไม่มีความเป็นพิษของตะกอนดินจึงสามารถนำมาใช้งานได้



ภาพที่ 16 ตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำเพื่อหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าแก่งคอย 2 จังหวัดสระบุรี

## 2. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ชนิดต่างๆ

เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด คือ ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน นำชิ้นงานไปทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM C109 จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ โดยผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดเป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง

### 2.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่างๆที่เหมาะสม

อัตราส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อหาอัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่างๆที่เหมาะสม โดยอัตราส่วน (alkali activator)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อ  $\text{NaOH}$  เป็น 1:1 (w/w) โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่างๆเป็น 1:0.6 1:0.7 1:0.8 และ 1:1 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนสารละลายต่าง  
ต่างกัน

อัตราส่วนเถ้าหนัก ต่อสารละลายต่าง	การทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังการบ่ม (Kgf/cm <sup>2</sup> )			ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
1:0.6	32	31.33	28.33	1.95
1:0.7	41.40	40	38.40	1.50
1:0.8	22.67	27	27.73	2.74
1:1	16.33	22.13	26.40	5.05

จากตารางที่ 11 พบว่า อัตราส่วนเถ้าต่อสารละลายต่างที่ 1:0.7 โดยน้ำหนักให้ค่ากำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์ได้ดีที่สุดแต่จะไม่สามารถผสมทรายเพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อจีโอโพลิเมอร์เข้าไปได้อีก เนื่องจากส่วนผสมมีความร่วนไม่สะดวกต่อการเทเข้าแบบหล่อตัวอย่าง จึงต้องเลือกใช้ อัตราส่วนเถ้าต่อสารละลายต่างที่ 1:1 โดยน้ำหนักเพื่อที่จะสามารถเพิ่มวัสดุที่จะผสมลงไปให้ได้ ปริมาตรคอนกรีตมากขึ้น

## 2.2 ผลการศึกษาปัจจัยของสารละลายต่างและอุณหภูมิในการบ่ม

อัตราส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อเลือกอุณหภูมิในการบ่ม กรณีศึกษา (1) อุณหภูมิห้อง (2) อุณหภูมิตู้อบ อัตราส่วนในการผสม bottom ash: alkali activator เป็น 1:0.7 โดย น้ำหนัก และสารละลายต่างที่ใช้เป็น โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน 1:1 โดย น้ำหนัก บ่มเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มในอุณหภูมิต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	การทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังการบ่ม (Kgf/cm <sup>2</sup> )			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
35 (อุณหภูมิห้อง)	15.27	27.20	30.67	8.08
65 (อุณหภูมิตู้อบ)	41.40	40	38.40	1.50

ผลจากการทดลองในตารางที่ 12 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการบ่มคือ 65 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้องแล้วพบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยเช่นกัน จากการทดลองนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทำจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนัก โดยเมื่อเถ้าสัมผัสกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการชะละลายซิลิกา (Si<sup>4+</sup>) และอะลูมินา (Al<sup>3+</sup>) จากเถ้าหนัก (Chindaprasirt *et al.*, 2007) ปริมาณของการชะละลายขึ้นกับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเวลาที่ใช้ในการชะละลายจะมีผลต่อกำลังรับแรงอัด เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงไปส่งผลให้ช่วงแรกเกิดการตกตะกอนของ aluminosilicate ทำให้ความแข็งแรงลดลง (Somna *et al.*, 2011) จากตารางที่ 12 กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นยังเป็นผลมาจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่ม ซึ่งความร้อนจากการบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วและสมบูรณ์ขึ้น และยังมีผลต่อกำลังอัด โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น ดังนั้นการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนักควรบ่มที่อุณหภูมิประมาณ 65 องศาเซลเซียสในการทดลองต่อไป

### 2.3 ผลการศึกษาผลกระทบของการเติมทรายเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์ปกติ

ในการศึกษาอัตราส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อเลือกปริมาณทรายที่เหมาะสม สารละลายต่างที่ใช้เป็นโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ผสมเถ้าหนัก

กับสารละลายต่างเป็น 1:1 โดยน้ำหนัก จากนั้นผสมทราย 135 200 275 กรัม น้ำ 50 และ 100 กรัม บ่ม ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ส่วนผสมของทรายที่เหมาะสมคือ 135 กรัม ซึ่งมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าอัตราส่วนอื่น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของวิมัทนา (2556) ที่ทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอย โดยศึกษาจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมทรายที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า ส่วนผสมของทรายที่เหมาะสมคือ 135 กรัม และการเพิ่มทรายช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด แต่การเพิ่มทรายมากเกินไปทำให้ต้องผสมน้ำเพิ่มเข้าไปเพื่อความสะดวกในการขึ้นรูปของจีโอโพลิเมอร์ แต่ปริมาณน้ำที่เพิ่มนั้นไม่มีประโยชน์ต่อปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน โดยน้ำส่วนเกินจะอยู่ในโพรงของเนื้อจีโอโพลิเมอร์และจะระเหยออกมาในระหว่างการบ่ม ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีรอยแตกร้าวได้ซึ่งส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง (Chindaprasirt *et al.*, 2009) เช่นเดียวกับการเพิ่มทรายโดยไม่มีการเพิ่มสารละลายต่าง (Temuujin *et al.*, 2010)

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีและไม่มีส่วนผสมของทราย

ส่วนผสมทราย:น้ำ (g/g)	การทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังการบ่ม (Kgf/cm <sup>2</sup> )			ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
0 : 0	16.33	22.13	26.40	5.05
135 : 0	10.19	11.23	11.62	0.74
200 : 50	7.11	6.05	6.62	0.53
275 : 100	1.93	2.46	1.77	0.36

จากตารางที่ 13 จีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของน้ำ 100 กรัม จะให้กำลังรับแรงอัดที่น้อยที่สุด เนื่องมาจากจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะที่ขึ้นอยู่ และเมื่อน้ำระเหยออกไปทำให้ก้อนมีโพรงหรือรอยแตกร้าวซึ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดที่น้อยลง ส่วนจีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของน้ำ 50

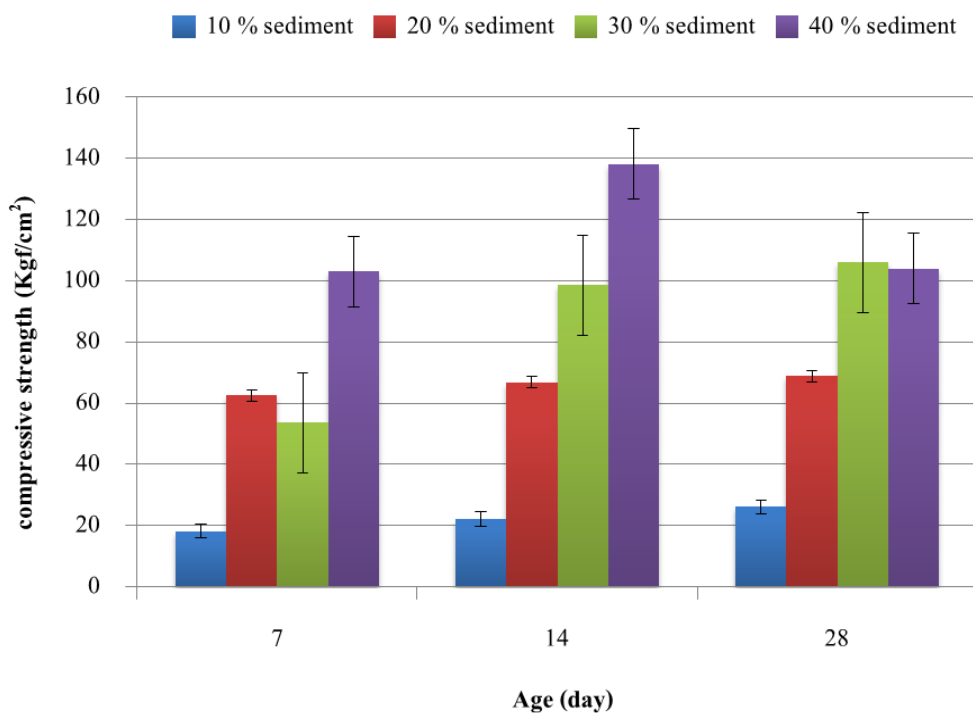
กรั้ม พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ยังคงน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสมน้ำซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุด

#### 2.4 ผลการศึกษาอัตราส่วนตะกอนดินที่แตกต่างกันต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัด

จีโอโพลิเมอร์เติมตะกอนดินในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยการเติมตะกอนดินในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 ของเจ้าหน้าที่ นำบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 7 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ได้ตามตารางที่ 14

ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนการผสมตะกอนดินต่างกัน

ส่วนผสมตะกอนดิน (ร้อยละของเจ้าหน้าที่)	การทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังการบ่ม (Kgf/cm <sup>2</sup> )			ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
10	18.22	22.14	26.08	3.93
20	62.53	66.77	68.78	3.19
30	53.60	98.50	106.07	28.36
40	103	138.13	104	20



หมายเหตุ % sediment คือ ร้อยละของตะกอนดินต่อเจ้าหน้าที่

ภาพที่ 17 ผลของอัตราส่วนตะกอนดินและระยะเวลาในการบ่มต่อกำลังรับแรงอัด

ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเจ้าหน้าที่กับสารละลายต่างและเติมตะกอนดินในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยการเติมตะกอนดินในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 ของเจ้าหน้าที่ บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าอัตราส่วนการผสมตะกอนดินที่เพิ่มมากขึ้นในจีโอโพลิเมอร์ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้มากขึ้นตามไปด้วย เมื่อเติมตะกอนดินร้อยละ 40 ของเจ้าหน้าที่ ระยะเวลาบ่ม 14 วันมีความสามารถในการรับแรงอัด 138.13 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรซึ่งเป็นกำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดในการเติมตะกอนดินร่วมกับจีโอโพลิเมอร์ แสดงให้เห็นว่าตะกอนดินสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ได้ ตามผลในตารางที่ 14 และการเปรียบเทียบในภาพที่ 17

## 2.5 ผลของอัตราส่วนของตะกอนดินและทรายต่อการทดสอบกำลังรับแรงอัด

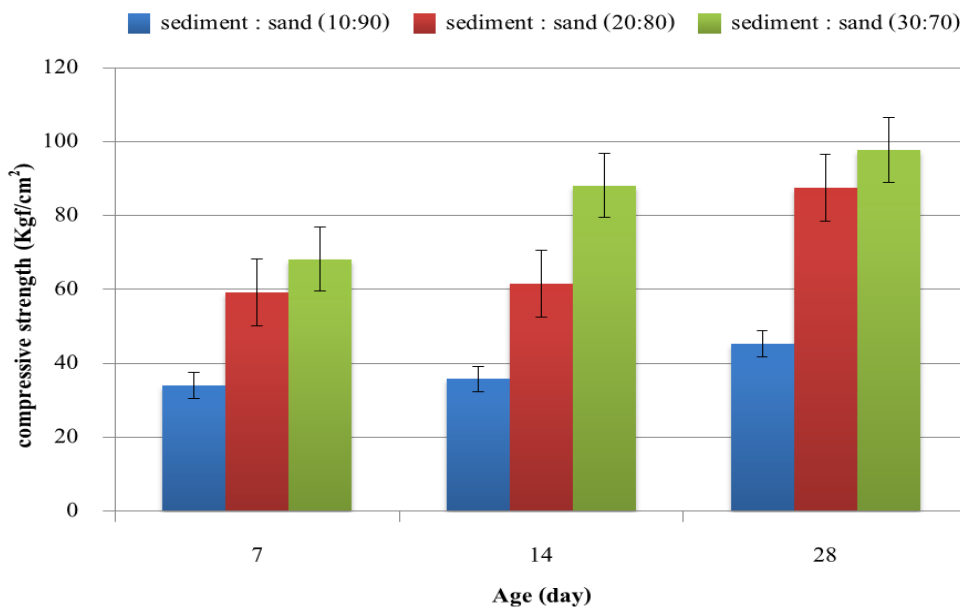
จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินและทราย ในอัตราส่วนทดแทนทรายร้อยละ 10 20 และ 30 ของทราย โดยมีอัตราส่วนในการผสมมวลรวมเดิมมีปริมาตรที่ 135 กรัม ต่อแฉ้าหนัก 100 กรัม

ผลการทดลองตามตารางที่ 15 จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินและทราย เมื่อทดสอบกำลังอัดที่ 7 14 และ 28 วัน พบว่าตะกอนดินผสมร่วมกับทรายร้อยละ 10 ของทราย ได้ค่ากำลังรับแรงอัด 34.02 35.76 และ 45.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนผสมตะกอนดินร่วมกับทรายร้อยละ 20 ของทราย ได้ค่ากำลังรับแรงอัด 59.17 61.47 และ 87.43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนผสมตะกอนดินร่วมกับทรายร้อยละ 30 ของทราย ได้ค่ากำลังอัด 68.23 88.17 และ 97.77 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีการผสมตะกอนดินร่วมกับทราย

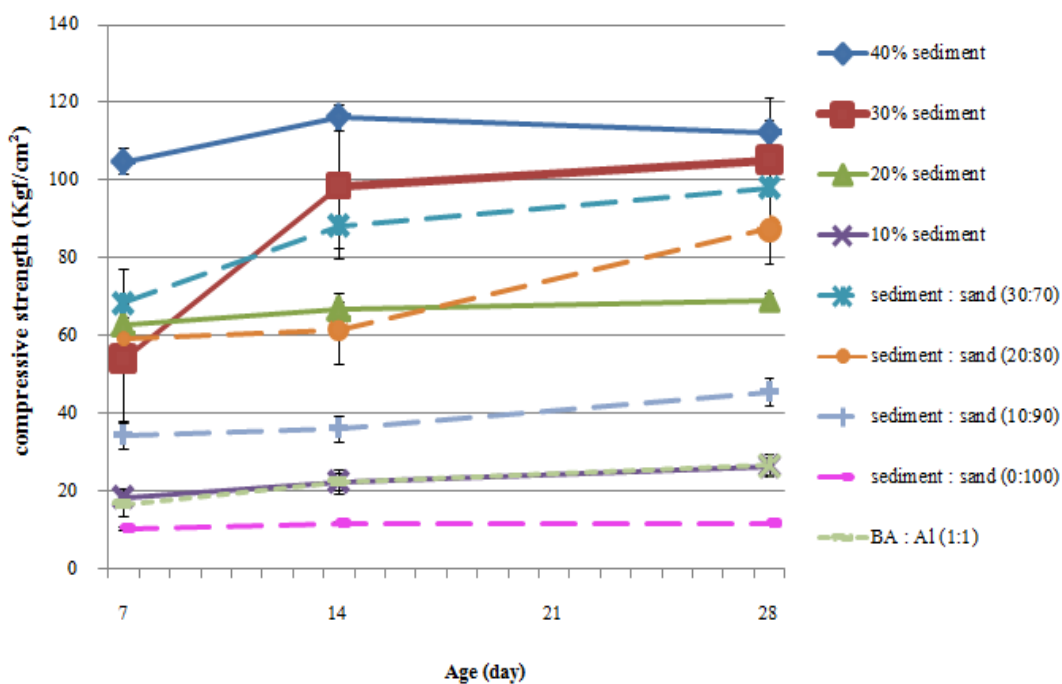
ตะกอนดิน: ทราย (%)	แฉ้าหนัก: มวลรวม 1:1.35 (g)	การทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังการบ่ม (Kgf/cm <sup>2</sup> )			ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
		7 วัน	14 วัน	28 วัน	
0	100 : (0+0)	10.19	11.50	11.62	0.79
10:90	100 : (13.5+121.5)	34.02	35.76	45.25	6.04
20:80	100 : (27.0+108.0)	59.17	61.47	87.43	15.69
30:70	100 : (40.5+94.5)	68.23	88.17	97.77	15.07

อัตราส่วนการผสมตะกอนดินร่วมกับทราย โดยการนำตะกอนดินมาแทนที่ทราย พบว่าเมื่อเพิ่มตะกอนดินมากขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามไปด้วย ระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มมากขึ้นทำให้มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นด้วยในทุกอัตราส่วน กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้คือ อัตราส่วนตะกอนดินร้อยละ 30 และทรายร้อยละ 70 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 97.77 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งแสดงในภาพที่ 18



หมายเหตุ sediment:sand หมายถึง มวลรวมของตะกอนดิน:ทราย ตัวเลขแสดงร้อยละ

ภาพที่ 18 ผลของอัตราส่วนการผสมตะกอนดินร่วมกับทรายและระยะเวลาในการบ่มต่อกำลังอัด

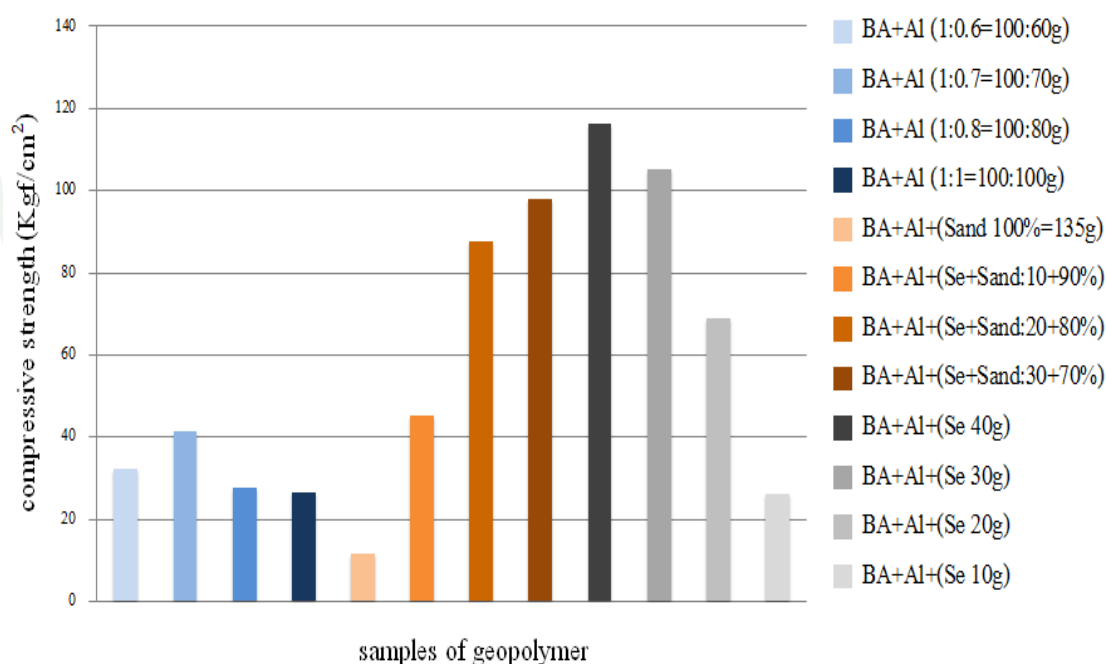


หมายเหตุ BA; bottom ash-เถ้าหนัก, Al; alkali solution-สารละลายด่าง (NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>),

Se; sediment-ตะกอนดิน, sand; ทราย และตัวเลขแสดงร้อยละ

ภาพที่ 19 แนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์

จากภาพที่ 19 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มซึ่งเป็นเช่นเดียวกับคอนกรีตทั่วไป มวลรวมที่ใช้ทรายอย่างเดียวให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าตัวควบคุม (BA:Al) ตั้งแต่สัปดาห์แรกจนถึงวันที่ 28 ส่วนกลุ่มตัวอย่างที่ผสมตะกอนดินมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น แต่การเติมตะกอนดินร้อยละ 10 ไม่มีความแตกต่างไปจากตัวควบคุม การพัฒนากำลังรับแรงอัดให้ได้ค่าสูงสุดจึงเป็นการผสมตะกอนดินร้อยละ 40 ของเจ้าหน้าที่เมื่อผสมทรายร่วมกับตะกอนดินเพื่อให้ได้ปริมาณคอนกรีตที่มากขึ้นและมีอัตราส่วนของมวลรวมเช่นเดียวกับคอนกรีตทั่วไปคือ 1:1.35 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างในกลุ่มนี้สูงมากขึ้นตามอัตราส่วนตะกอนดินต่อทรายที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปัจจัยในการเพิ่มมวลรวมขึ้นอยู่กับปริมาตรสารละลายต่าง จึงสามารถหาอัตราส่วนในการผสมที่ดีที่สุดคือ เจ้าหน้าที่:มวลรวม (ตะกอนดิน+ทราย) เป็น 100:135 (40.5+94.5) กรัม ถึงแม้ให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าการผสมตะกอนดินเพียงอย่างเดียวแต่ก็เพียงเล็กน้อย



หมายเหตุ BA; bottom ash-เจ้าหน้าที่, Al; alkali activator-สารละลายต่าง (NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>),

Se; sediment-ตะกอนดิน, sand; ทราย

ภาพที่ 20 ผลของส่วนผสมและอัตราส่วนต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์

จากภาพที่ 20 แสดงให้เห็นผลของส่วนผสมและอัตราส่วนต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ การทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะลิดิกาและอะลูมินาจากเถ้าหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงสามารถให้กำลังรับแรงอัดได้เร็วกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง การเติมตะกอนดินในจีโอโพลิเมอร์ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดตามปริมาณของตะกอนที่เติมลงไป เนื่องจากสมบัติทางเคมีของตะกอนประปาเผาจากการวิเคราะห์ของบุญฤทธิ์ (2550) พบว่าเนื้อตะกอนมีซิลิกา อะลูมินา และเหล็กออกไซด์เป็นสารประกอบหลักคือมีซิลิกา ร้อยละ 68-79, อะลูมินา ร้อยละ 12-15 และเหล็กออกไซด์ ร้อยละ 4-6 ดังนั้นตะกอนดินเผามีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานและทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างได้ จากการ ศึกษาครั้งนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมตะกอนดินร้อยละ 40 ของปริมาณเถ้าหนักระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีกำลังรับแรงอัด 138.13 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และการใช้ตะกอนดินร่วมกับทราย เมื่อเติมตะกอนดินทดแทนทรายร้อยละ 30 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดเป็น 97.77 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และปริมาณการเติมทรายและน้ำส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดที่ลดลง

ค่ามาตรฐานตาม มอก. 58-2530 ของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักกำหนดไว้ว่าความต้านแรงอัดต่ำสุดของคอนกรีตบล็อกแต่ละก้อนเป็น 20.39 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจากผลการศึกษานี้เห็นได้ว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตได้สามารถมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าค่ามาตรฐานของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ดังนั้นตะกอนดินจึงมีศักยภาพในการนำมาใช้ทดแทนทรายในจีโอโพลิเมอร์ สำหรับอัตราส่วนที่เหมาะสมนั้นต้องคำนึงถึงปริมาณสารละลายต่างๆที่ใช้ผสมในจีโอโพลิเมอร์เนื่องจากตะกอนดินมีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดีและปริมาณการเติมทรายและน้ำส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดที่ลดลง

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

งานวิจัยนี้เป็นแนวทางหนึ่งเพื่อจัดการของเสียอุตสาหกรรม ซึ่งการใช้ประโยชน์จากของเสีย โดยทำการศึกษาการใช้ตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำของโรงไฟฟ้าแก่งคอย 2 จังหวัดสระบุรี ร่วมกับการทำจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

จากการทดลองเบื้องต้น ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง ได้แก่ อัตราส่วนของเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง และอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่เหมาะสม ปริมาณของการเติมทราย และน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดลองขั้นต่อไป

การทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงให้เห็นว่า

1. จีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมด้วย อัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง 1:0.7 สามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุด แต่จะไม่สามารถเพิ่มมวลรวมเข้าไปเพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อจีโอโพลิเมอร์ที่ได้ จึงเลือกใช้อัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง 1:1 เพื่อให้ส่วนผสมไม่รวนจนเกินไปเพื่อสะดวกต่อการเทเข้าแบบหล่อ และสามารถเติมมวลรวมลงไปได้อีกเพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อจีโอโพลิเมอร์
2. การบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ให้กำลังอัดได้เร็วกว่าอุณหภูมิห้อง เนื่องจากจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วและสมบูรณ์ขึ้น และยังมีผลต่อกำลังอัด โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น
3. ปริมาณการเติมทรายและปริมาณน้ำส่งผลต่อกำลังอัดที่ลดลง เนื่องจากจากน้ำไม่มีประโยชน์ในการทำปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ และถ้าเพิ่มน้ำเข้าไปจะระเหยออกเมื่อนำไปบ่มให้ความร้อน ทำให้ก้อนจีโอโพลิเมอร์มีโพรงของน้ำที่ระเหยไปแล้วและแตกได้ง่าย ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดต่ำลง

4. ส่วนประกอบที่เหมาะสมในการผสมจีโอโพลีเมอร์ คือใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลายซิลิกาและอะลูมินาจากถ้ำหนัก นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เดิมทราย 135 กรัม เนื่องจากมีค่ากำลังอัดที่ดี นำมาใช้เป็นส่วนผสมพื้นฐานเพื่อศึกษาอัตราส่วนของตะกอนดิน อัตราส่วนของตะกอนดินร่วมกับทราย อัตราส่วนที่แตกต่างกันของสารละลายต่างต่อถ้ำหนัก ผลการศึกษาจากการนำตะกอนดินมาผสมร่วมกับจีโอโพลีเมอร์และปริมาณสารละลายต่างต่อถ้ำหนัก

5. การเติมตะกอนดินในจีโอโพลีเมอร์ช่วยเพิ่มกำลังอัดตามปริมาณของตะกอนที่เติมลงไป เนื่องจากสมบัติทางเคมีของตะกอนประปาเผาจากการวิเคราะห์ของบุญฤทธิ์ (2550) พบว่าเนื้อของตะกอนดินมีซิลิกา อะลูมินา และเหล็กออกไซด์เป็นสารประกอบหลักคือมีซิลิการ้อยละ 68-79 อะลูมินา ร้อยละ 12-15 และเหล็กออกไซด์ ร้อยละ 4-6 ดังนั้นตะกอนดินเผามีคุณสมบัติเป็นวัสดุป่อซีเมนต์และทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างได้ จากการศึกษาครั้งนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมตะกอนดินร้อยละ 40 ของปริมาณถ้ำหนักระยะเวลาในการบ่ม 14 วันมีกำลังอัด 138.13 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

6. การใช้ตะกอนดินร่วมกับทราย เมื่อเติมตะกอนดินทดแทนทรายร้อยละ 30 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วันมีกำลังอัดเป็น 97.78 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และปริมาณการเติมทรายและน้ำส่งผลต่อกำลังอัดที่ลดลง ค่ามาตรฐานตาม มอก. 58-2530 ของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักกำหนดไว้ว่าความต้านแรงอัดต่ำสุดของคอนกรีตบล็อกแต่ละก้อนเป็น 20.39 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจากผลการศึกษาเห็นได้ว่าจีโอโพลีเมอร์ที่ผลิตได้สามารถมีกำลังอัดสูงกว่าค่ามาตรฐานของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ดังนั้นตะกอนดินจึงมีศักยภาพในการนำมาใช้ทดแทนทรายในจีโอโพลีเมอร์ สำหรับอัตราส่วนที่เหมาะสมนั้นต้องคำนึงถึงปริมาตรสารละลายต่างที่ใช้ผสมในจีโอโพลีเมอร์ เนื่องจากตะกอนดินมีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดีและปริมาณการเติมทรายและน้ำส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดที่ลดลง

### ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย ในการวิจัยครั้งนี้ผลที่ได้เป็นข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแนวทางการนำตะกอนดินมาใช้ร่วมกับจีโอโพลีเมอร์ ซึ่งศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดเท่านั้น อาจมีความจำเป็นในการทดสอบคุณสมบัติด้านอื่นตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานแต่ละประเภทต่อไป
2. ควรมีการวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม เนื่องจากการผลิตต้องใช้สารเคมีเป็นตัวทำปฏิกิริยา ดังนั้นราคาของจีโอโพลีเมอร์จะขึ้นอยู่กับราคาของสารเคมีด้วย

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กฤษณะ หลาวทอง. 2546. การใช้ประโยชน์ตะกอนดินจากกระบวนการปรับคุณภาพน้ำของโรงไฟฟ้าวังน้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จิตรกร วงศ์กรเขาวลิต. 2543. คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่เกิดจากการผลิตน้ำประปาและการนำไปใช้งานเป็นวัสดุปอชโซแลนในงานคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ชัชวาล เศรษฐบุตร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. คอนกรีตผสมเสร็จจีซีแพค, กรุงเทพฯ.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2549. ปูนซีเมนต์ ปอชโซแลน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 3. ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

ณิชาดา ฉัตรสถาปัตยกรรม, มณฑล วังเวียง และ ภัทรา เพ็ชรธรรมกิริติ. 2552. การผลิตวัสดุก่อสร้างจากวัสดุเหลือทิ้ง. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ดวงกมล สุริยฉัตร, ภาสตันต์ วิชิตอมรพันธ์ และ วรธนะ เรืองสำเร็จ. 2547. การประยุกต์ใช้ตะกอนดินจากน้ำประปา. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, กรุงเทพฯ.

ทวีศักดิ์ วั่งไพศาล. 2554. วิศวกรรมการประปา. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชเนศ มุณีแนม. 2546. คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่ได้จากโรงประปาในการนำมาใช้งานเป็นวัสดุพอลิโซลาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ธวัชชัย เอี่ยมสิน. 2552. สภาพไฟวปฏิบัติกริยาพอลิโซลานิกของเถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ชัญจรณ์ เลิศโฆมิตพงศ์. 2553. การสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมล่ำปาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

บุญฤทธิ กงแก้ว. 2550. จีโอโพลิเมอร์จากกากตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

บุษราภรณ์ ทรัพย์ห้วง. 2550. การเก็บโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2547. เถ้าลอยในงานคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2549. สารจีโอพอลิเมอร์: วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 25-26 มกราคม 2549.

ปริศนา เสือแฮมเสริม. 2545. สมบัติบางประการของตะกอนแยกจากน้ำดิบของการประปานครหลวง, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เพิ่มพล กาญจนามย์. 2546. การใช้ตะกอนจากโรงงานผลิตประปาบางเขนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ภากร ไตรศิริวานิชย์. 2550. การศึกษาอีโพลิเมอร์จากถั่วกั้นเตา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ภานุ ศิริพงษ์ไพโรจน์. 2550. ผลของการพัฒนาดินตะกอนประปาที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและรูปแบบเครื่องปั้นดินเผา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2543. การใช้ถั่วลยเป็นวัสดุพอซโซลาน. การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6 ชะอำ, เพชรบุรี.

วิมณฑนา ถนอมกิจนุรักษ์. 2556. การปรับปรุงกำลังอัดของอีโพลิเมอร์ด้วยตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิเชียร ชาลี และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. 2552. การศึกษาความคงทนของวัสดุอีโพลิเมอร์จากถั่วกั้นเตา. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 14: 47-55.

วัชรพงษ์ วงศ์เขียว. 2551. การนำถั่วหนักมาใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลเบา: สมบัติเชิงกลและสมบัติการนำความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมบูรณ์ คงสมศักดิ์ศิริ และ อติสรณ์ พงษ์สุวรรณ. 2552. บล็อกประสานปูพื้นผสมตะกอนดินจากน้ำประปา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2531. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก. มอก. 58-2530.

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. 2549. วัสดุอีโพลิเมอร์. โยธาสาร 18(4): 55-60

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2551. การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ  
จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.** 13: 371-381.

American Society for Testing and Materials. C109/C 109M-02. 2002. Standard Test Method for  
Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar. **American Society for Testing and  
Materials.**

American Society for Testing and Materials. (ASTM C 618-00). 2001. Standard specification  
for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in  
concrete. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia.

Bai, Y., Darcy, F. and Basheer, P.A.M. 2005. Strength and drying shrinkage properties of  
concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. **Construction and Building  
Materials** 19: 691-697.

Cherif, M., J. Cavalcante Rocha and J. Péra. 1999. Pozzolanic properties of pulverized coal  
combustion bottom ash. **Cement and Concrete Research** 29: 1387-1391.

Chindapasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V. 2007. Workability and strength of  
coarse high calcium fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites**  
29: 224-229.

Chindapasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V. 2006. Workability and Strength of  
Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. **Cement and Concrete Composites**  
29(3): 224-229.

- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W. and Rattanasak, U. 2009. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. **Waste Management** 29: 539-543.
- Davidovits, J. 1999. Chemistry of geopolymer systems. **Terminology in Geopolymer 99 International Conference**. France.
- Davidovits, J. 2002. Environmentally driven geopolymer cement applications, pp. 1-9. *In* **Geopolymer 2002 Conference 1. ed.** Mellbourne, Australia.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. and Criado, M. 2004. Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement: a Descriptive Model. **Cement and Concrete Research** 35: 1204-1209.
- Hua, X. and Van Deventer, J.S.J. 1999. The Geopolymerisation of Natural Alumino-Silicates, pp. 43-59. **Proceedings: 2nd International conference on geopolymer**, France: Paris.
- Husillos Rodríguez N., S. Martínez Ramírez, M. T. Blanco Varela, M. Guillem, J. Puig, E. Larrotcha, J. Flores. 2010. Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. **Cement and Concrete Research** 40: 778-786.
- Isaia, G.C., A.L.G. Gastaldini and R. Morases. 2003. Physical and Pozzolanic Action of Mineral Additions on the Mechanical Strength of High Performance Concrete. **Cement and Concrete Composite** 25(1): 69-76.

Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R. 2003. Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material.

**Journal of Materials in Civil Engineering** 15(1): 48-53.

Kurama, H. and Kaya M. 2007. Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture.

**Construction and Building Materials**, Article in press.

Nisnevich, M. 1997. Improving Lightweight Concrete with Bottom Ash. **Concrete**

**International** 19(12): 56-60.

Rattanasak, U. and Chindapasirt, P. 2009. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. **Minerals Engineering** 22: 1073-1078.

Sathonsaowaphak, A., Chindapasirt, P. and Pimraksa, K. 2009. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. **Journal of Hazardous Materials** 168: 44–50.

Somna, K., C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul and P. Chindapasirt. 2011. NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. **Fuel** 90: 2118–2124.

Tangpagasit, J., Cheerarot, R., Jaturapitakkul, C. 2005. Packing Effect and Pozzolanic Reaction of Fly Ash in Mortar. **Cement and Concrete Research** 35(6): 1145-1151.

Temuujin, J., Riessen, van A. and MacKenzie, K.J.D. 2010. Preparation and characterization of fly ash based geopolymer mortars. **Construction and Building Materials** 24: 1906–1910.

Yan, S. and K. Sagoe-Crentsil. 2012. Properties of wastepaper sludge in geopolymer mortars for masonry applications. **Journal of Environmental Management**. 112: 27-32.



ภาคผนวก



ผลการทดลอง

## ผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ 1 ผลการวิเคราะห์ตะกอนของโรงไฟฟ้าเป็นชนิด Non-hazardous waste

Parameters	Unit (Dry Basis)	Method	TW	
			04556 Sludge	Standard
Arsenic	mg / Kg as As	Hydride Generation,AAS	3.64	≤ 500
Barlum	mg / Kg as Ba	Direct Aspiration,AAS	142	≤10000
Berylium	mg / Kg as Be	Direct Aspiration,AAS	<2.00	≤75
Cadmium	mg / Kg as Cd	Direct Aspiration,AAS	5.47	≤ 100
Chromium (Hexavalent)	mg / Kg as Cr <sup>6+</sup>	Colorimetric	<1.00	≤500
Chromium (Trivalent)	mg / Kg as Cr <sup>3+</sup>	Colorimetric,AAS	18.40	≤2500
Copper	mg / Kg as Cu	Direct Aspiration,AAS	41.13	≤ 2500
Cobalt	mg / Kg as Co	Direct Aspiration,AAS	23.21	≤8000
Lead	mg / Kg as Pb	Direct Aspiration,AAS	60.29	≤ 1000
Mercury	mg / Kg as Hg	Cold vaporTechnique,AAS	<0.05	≤ 20
Molybdenum	mg / Kg as Mo	Cold vaporTechnique,AAS	<30.00	≤3500
Nikel	mg / Kg as Ni	Direct Aspiration,AAS	42.74	≤2000
Selenium	mg / Kg as Se	Hydride Generation,AAS	0.06	≤100
Silver	mg / Kg as Ag	Direct Aspiration,AAS	4.43	≤500
Thallium	mg / Kg as Tl	Direct Aspiration,AAS	<10.00	≤700
Vanadium	mg / Kg as V	Direct Aspiration,AAS	<100	≤2400
Antomony	mg / Kg as Sb	Hydride Generation,AAS	<10.00	≤500
Zinc	mg / Kg as Zn	Direct Aspiration,AAS	1662	≤5000

ตารางผนวกที่ 2 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมอัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง 0.6

Days	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	No.	7	14	28
1		37	35	26
2		30	31	29
3		29	28	30
Average		32	31.33	28.33

ตารางผนวกที่ 3 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมอัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง 0.7

Days	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	No.	7	14	28
1		42	41	41.2
2		42	34	36
3		40.2	45	38
Average		41.4	40	38.4

ตารางผนวกที่ 4 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมอัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง 0.8

Days	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	No.	7	14	28
1		21	27	30.2
2		22	29	27
3		25	25	26
Average		22.67	27	27.73

ตารางผนวกที่ 5 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมอัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง 1

Days	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	No.	7	14	28
1		18	18	24.2
2		15	23.4	28
3		16	25	27
Average		16.33	22.13	26.4

ตารางผนวกที่ 6 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส  
(อัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง เป็น 1:0.7)

Days	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	No.	7	14	28
1		42	41	41.2
2		42	34	36
3		40.2	45	38
Average		41.4	40	38.4

ตารางผนวกที่ 7 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง หรือ 35 องศาเซลเซียส  
(อัตราส่วนเถ้าหนักต่อสารละลายต่าง เป็น 1:0.7)

Days	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	No.	7	14	28
1		11.8	30	33
2		9	25	29
3		25	26.6	30
Average		15.27	27.2	30.67

ตารางผนวกที่ 8 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมทราย 135 กรัม

Days	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	No.	7	14	28
1		9.45	12.58	9.63
2		10.52	9.02	12.79
3		10.59	12.09	12.43
Average		10.19	11.23	11.62

ตารางผนวกที่ 9 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมทราย 200 กรัม และน้ำ 50 กรัม

Days	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	No.	7	14	28
1		7.11	6.33	5.04
2		8.80	5.48	9.07
3		5.43	6.35	5.76
Average		7.11	6.05	6.62

ตารางผนวกที่ 10 ผลกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมทราย 275 กรัม และน้ำ 100 กรัม

Days	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	No.	7	14	28
1		1.906	2.414	2.236
2		2.081	2.548	1.829
3		1.800	2.404	1.238
Average		1.929	2.453	1.768

ตารางผนวกที่ 11 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 10 ของเถ้านัก

Days	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	No.	7	14	28
1		18.21	24.53	23.22
2		12.22	19.01	27.07
3		24.23	22.88	27.96
Average		18.22	22.14	26.08

ตารางผนวกที่ 12 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 20 ของเถ้านัก

Days	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	No.	7	14	28
1		57.5	70.4	58.10
2		60.3	70.2	46.65
3		69.8	59.7	101.6
Average		62.54	66.76	68.78

ตารางผนวกที่ 13 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 30 ของเถ้านัก

Days	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )			
	No.	7	14	28
1		60.5	95	109.80
2		41.9	95.6	93
3		58.4	104.9	115.4
Average		53.60	98.50	106.07

ตารางผนวกที่ 14 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 40 ของเจ้าหน้าที่

Days No.	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )		
	7	14	28
1	105.4	110.9	101.4
2	104.1	121.2	122.9
3	99.5	182.3	87.7
Average	103	138.13	104

ตารางผนวกที่ 15 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทราย ร้อยละ 10 ของทราย

Days No.	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )		
	7	14	28
1	33.77	27.78	38.34
2	31.82	36.26	53.66
3	36.47	43.24	43.75
Average	34.02	35.76	45.25

ตารางผนวกที่ 16 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทราย ร้อยละ 20 ของทราย

Days No.	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )		
	7	14	28
1	58.2	64.4	72
2	54.4	61.7	86.4
3	64.9	58.3	103.9
Average	59.17	61.47	87.43

ตารางผนวกที่ 17 ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทราย ร้อยละ 30 ของทราย

Days No.	Compressive strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )		
	7	14	28
1	55.9	85.9	132.6
2	78.6	92.6	81
3	70.2	86	79.7
Average	68.25	88.16	97.78

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อสกุล	นางสาวอรรณวินท์ นุ่มนึ่ง
วัน เดือน ปี เกิด	2 เมษายน พ.ศ. 2531
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์การเกษตร) มหาวิทยาลัยมหิดล
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	นำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมทางวิชาการ บัณฑิตศึกษาศิลปการระดับชาติ และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 4 (NGSC 2014) ในวันที่ 22 – 23 พฤษภาคม 2557 ณ ศูนย์มานุษยวิทยาสิรินธร
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีงบประมาณ 2556