



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การปรับปรุงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ด้วยตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำ

Improvement of Compressive Strength of Geopolymer with Soil Sediment from Water Supply System

นามผู้วิจัย

นางสาววิมลชนา ถนอมกิจนุรักษ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ศุภวิทย์ สถาปนจารุ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ด้วยตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำ

Improvement of Compressive Strength of Geopolymer with Soil Sediment from
Water Supply System

โดย

นางสาววิมลชนา ถนอมกิจนุรักษ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิมณทนา ถนอมกิจนุรักษ์ 2556: การปรับปรุงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ด้วยตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำ ประิญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม) สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์, Ph.D. 82 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการนำเ้าลอกจากการเผาถ่านหินและตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำที่เกิดขึ้นจากโรงไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ร่วมกันในรูปแบบของจีโอโพลิเมอร์ ทำการผสมเ้าลอกับสารละลายต่างในอัตราส่วน 1:0.45 โดยน้ำหนัก ซึ่งสารละลายต่างคือ โซเดียมซัลไฟด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อบ่มจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ทำให้กำลังอัดสูงกว่าและเร็วกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมต่างๆ หลังการอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 3 7 14 และ 28 วัน พบว่ากำลังอัดจีโอโพลิเมอร์ (เ้าลอกและสารละลายต่าง) และจีโอโพลิเมอร์ผสมทรายมีค่า 336 และ 442 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การเพิ่มสารละลายต่างที่ต่างกัน 1:0.45 1:0.7 และ 1:1 พบว่าการเพิ่มสารละลายต่างมากขึ้นทำให้กำลังอัดต่ำลง จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 10 20 30 และ 40 ของน้ำหนักเ้าลอกมีค่า 312 375 445 และ 471 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทราย โดยใช้ตะกอนดินทดแทนทรายร้อยละ 10 20 และ 30 ของน้ำหนักทรายมีค่า 485 549 และ 573 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ การเติมตะกอนดินช่วยเพิ่มกำลังอัดได้และการใช้ตะกอนดินร่วมกับทรายยังสามารถเพิ่มกำลังอัดขึ้นได้อีก อย่างไรก็ตามจีโอโพลิเมอร์มีขีดจำกัดในการเติมตะกอนดินเนื่องจากสมบัติการดูดซับน้ำของตะกอนดิน จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำจีโอโพลิเมอร์มาทำเป็นบล็อกประสาน พบว่าเมื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 14 และ 28 วัน มีค่ากำลังอัดสูงกว่าบล็อกประสานผสมปูนซีเมนต์ การรับกำลังอัดของบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินและบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทรายมีค่า 35 และ 43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ผลการศึกษาแสดงว่าตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำมีศักยภาพในการนำมาใช้ทดแทนทรายในจีโอโพลิเมอร์และการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Vimantana Tanomgitnuruk 2013: Improvement of Compressive Strength of Geopolymer with Soil Sediment from Water Supply System. 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. 82 pages.

This research is the waste utilization of coal fly ash from lignite and soil sediment from water supply system in power plant for producing geopolymer. Fly ash and alkaline solution were mixed at ratio of 1:0.45 (w/w) which solution content was sodium silicate and sodium hydroxide solution concentration 10 M at ratio of 1:1 (w/w). The result showed compressive strength of geopolymer treated at 65°C was higher compressive strength and faster forming than the one treated at room temperature. The different contents of geopolymer samples were treated at 65°C for 48 hours and compressive strength were tested at the sample ages 3, 7, 14 and 28 days, compressive strength of geopolymer (fly ash and alkaline solution) and geopolymer with sand were 336 and 442 ksc. Alkaline solution ratio were tested at 1:0.45 1:0.7 and 1:1 and the result showed compressive strength decreased when alkaline solution ratio increased. Geopolymer with sediment weight at ratio 10, 20, 30 and 40 % of fly ash, showed compressive strength 312, 375, 445 and 471 ksc respectively, while geopolymer with sand and sediment which replaced sand at ratio 10, 20 and 30 % by weight were 485, 549 and 573 ksc, respectively. Mixing sediment in geopolymer enhanced compressive strength, but mixing sand and sediment showed higher effect. However, mixing limitation was related to water absorption property of sediment. Feasibility Study of geopolymer utilization was interlock-block making. Geopolymer blocks were tested at sample ages 14 and 28 days to compare with cement mixing interlock-block, and compressive strength of geopolymer interlock-block was higher. The result of mixing sediment, sand and sediment showed compressive strength at the block age 28 days were 35 and 43 ksc. This research showed the potential of sediment from water supply system for utilization as mixing material in geopolymer and for product development.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา คอยให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ตลอดจนชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ และ ให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ โรงไฟฟ้าแก่งคอย 2 จังหวัดสระบุรี ที่สนับสนุนในงานวิจัยนี้ รวมถึงพี่ๆ ที่คณะ วิศวกรรมศาสตร์ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่ได้ให้ความ ช่วยเหลือ มอบความห่วงใยและคอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาแก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา และ ขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือ ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ซึ่งมิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุกๆ ท่าน ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

วิมลชานา ถนอมกิจนุรักษ์
มีนาคม 2556

สารบัญ

หน้า

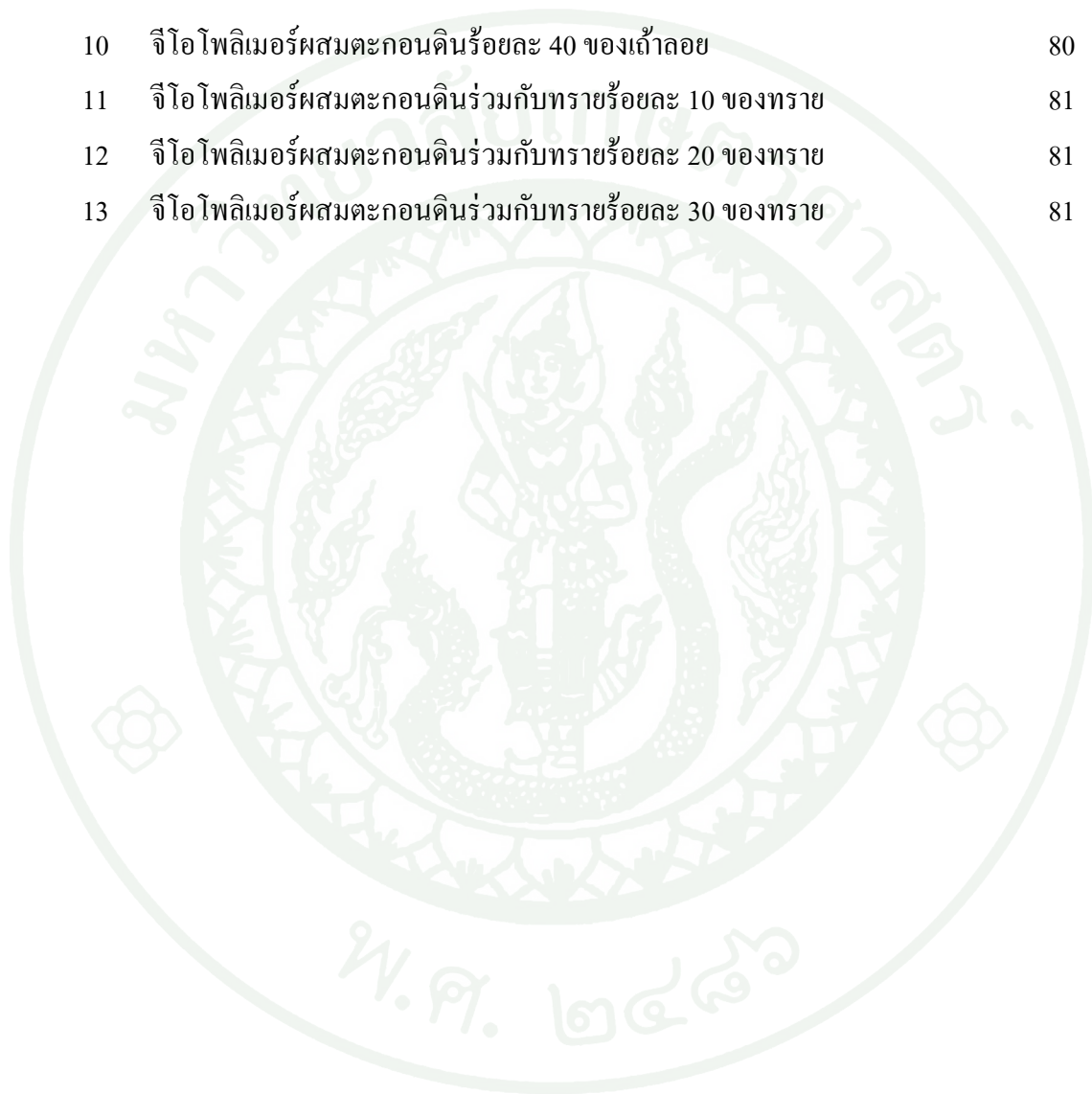
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	42
อุปกรณ์	42
วิธีการ	43
ผลและวิจารณ์	53
สรุปและข้อเสนอแนะ	67
สรุป	67
ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	70
ภาคผนวก	75
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	82

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติทางเคมีของวัสดุพอลิโพรพิลีน ตามมาตรฐาน ASTM C618	6
2	ส่วนประกอบทางเคมีของตะกอนดิน	11
3	สมบัติของตะกอนประปาเผาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618	12
4	สรุปความผันแปรของกำลังอัด	36
5	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง	43
6	การเปรียบเทียบการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	50
7	สัดส่วนในการผสมทรายและน้ำเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม	51
8	กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้สารละลายต่างต่างกันหลังบ่มตามช่วงเวลา	55
9	กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มในอุณหภูมิและระยะเวลาบ่มต่างกัน	56
10	กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนการผสมทรายต่างกัน	57
11	กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนการผสมตะกอนดินที่ต่างกัน	61
12	กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีการผสมตะกอนดินและทราย	63
ตารางผนวกที่		
1	ผลการวิเคราะห์ตะกอนของโรงไฟฟ้าเป็นชนิด Non-hazardous waste	77
2	ผลการทดสอบหาขนาดของทรายละเอียด	78
3	อัตราส่วนเถ้าลอยและตะกอนดินต่อสารละลายต่าง 0.7	78
4	อัตราส่วนเถ้าลอยและตะกอนดินต่อสารละลายต่าง 1	78
5	อัตราส่วนเถ้าลอยและตะกอนดินผสมทรายต่อสารละลายต่าง 0.7	79
6	อัตราส่วนเถ้าลอยและตะกอนดินผสมทรายต่อสารละลายต่าง 1	79
7	จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 10 ของเถ้าลอย	79
8	จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 20 ของเถ้าลอย	80
9	จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 30 ของเถ้าลอย	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
10	จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 40 ของเกล้าอย	80
11	จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทรายร้อยละ 10 ของทราย	81
12	จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทรายร้อยละ 20 ของทราย	81
13	จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทรายร้อยละ 30 ของทราย	81



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การผลิตพื้นฐานในระบบการผลิตน้ำประปา	9
2	ขั้นตอนการกำจัดตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน	10
3	โครงสร้างการเชื่อมพันธะของจีโอโพลิเมอร์	15
4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Si^{4+} กับระยะเวลาการชะละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์	17
5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Al^{3+} กับระยะเวลาการชะละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์	18
6	บล็อกตรงทรงสี่เหลี่ยมสำหรับก่อสร้างอาคาร	22
7	บล็อกโค้งใช้สำหรับก่อสร้างถังเก็บน้ำ	22
8	เครื่องอัดด้วยแรงคน	23
9	เครื่องอัดไฮดรอลิก	24
10	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเมื่อดิน	25
11	ก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ และตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก	31
12	แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกดซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการอดกด้านข้างของก้อนตัวอย่าง (Confining Stress)	32
13	ก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่ Cap หัวและไม่ Cap หัว	33
14	สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต	35
15	ขั้นตอนการผสมตะกอนดินในจีโอโพลิเมอร์	45
16	ขั้นตอนการเทตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ลงในแบบหล่อ	45
17	ขั้นตอนการห่อด้วยพลาสติกก่อนนำเขาตู้อบ	46
18	ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์สำหรับทดสอบกำลังอัด	46
19	ส่วนผสมบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์	47
20	ขั้นตอนการผสมบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์	48
21	ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	การพรมอัตราส่วนสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 1 ให้ทั่ว บล็อกประสานจีโพลิเมอร์	49
23	ตัวอย่างบล็อกประสานจีโพลิเมอร์หลังจากการบ่มและเก็บไว้ในตู้ควบคุมห้อง	49
24	เจ้าหน้าที่จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง	53
25	ตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำของโรงไฟฟ้าแก่งคอย 2 จังหวัดสระบุรี	54
26	กำลังอัดของจีโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินที่มีอัตราส่วนการผสม สารละลายต่างที่ต่างกัน	58
27	กำลังอัดของจีโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทรายที่มีอัตราส่วนการผสม สารละลายต่างที่ต่างกัน	60
28	ผลของอัตราส่วนการผสมตะกอนดินและระยะเวลาในการบ่มต่อกำลังอัด	62
29	ผลของอัตราส่วนการผสมตะกอนดินร่วมกับทรายและระยะเวลา ในการบ่มต่อกำลังอัด	63
30	ตัวอย่างบล็อกประสานผสมปูนซีเมนต์และบล็อกประสานจีโพลิเมอร์	65
31	กำลังอัดของบล็อกประสานหลังการบ่มเป็นเวลา 14 และ 28 วัน	65

การปรับปรุงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ด้วยตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำ

Improvement of Compressive Strength of Geopolymer with Soil Sediment from Water Supply System

คำนำ

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนในประเทศไทยใช้เชื้อเพลิงในการผลิตหลายชนิด ถ่านหินก็เป็นเชื้อเพลิงหนึ่งในจำนวนนั้น สำหรับโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีการใช้ถ่านหินประเภทลิกไนต์ประมาณวันละ 40,000 ตัน ส่งผลให้มีของเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้เป็นถ่านถึง 10,000 ตัน/วัน โดยในแต่ละปีสามารถแบ่งออกได้เป็น ถ่านลอยประมาณ 2.5 ล้านตัน และถ่านหนักประมาณ 1.5 ล้านตัน การจัดการกับถ่านลอยในปัจจุบันจะใช้เป็นส่วนผสมกับซีเมนต์ แต่ถ่านหนักจะถูกนำไปฝังกลบ การศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์จากถ่านลอย นอกจากการใช้เป็นส่วนผสมกับซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงแล้ว ยังมีงานวิจัยเพื่อพัฒนาเป็นจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งมีสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานโดยนำสารปอซโซลานมาเป็นสารซีเมนต์ในการเชื่อมประสานทดแทนปูนซีเมนต์ จากการทำปฏิกิริยาระหว่างวัตถุดิบที่มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ ร่วมกับสารละลายด่างและบ่มด้วยความร้อนได้สารประกอบอลูมิโนซิลิเกตที่มีสมบัติคล้ายซีเมนต์ รวมทั้งเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Duxson *et al.*, 2007)

ในขณะเดียวกัน กระบวนการผลิตน้ำหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าจะมีการสูบน้ำจากแม่น้ำเพื่อมาใช้เป็นน้ำดิบในกระบวนการผลิตน้ำหล่อเย็น ก่อนที่จะนำน้ำดิบมาใช้นั้นจะต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพน้ำ โดยจะนำน้ำดิบเข้าสู่ขั้นตอนการตกตะกอน ในกระบวนการตกตะกอนสารแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำนั้นจะต้องมีกระบวนการเติมสารเคมีต่างๆ เช่น สารส้ม สารโพลิเมอร์ เป็นต้น เพื่อช่วยให้ตะกอนรวมตัวกันได้ง่ายขึ้น ปริมาณตะกอนดินในแต่ละวันมีปริมาณมาก จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตะกอนดินพบว่า ตะกอนเหล่านี้จัดอยู่ในประเภทของเสียไม่อันตราย (Non-hazardous waste) และมีคุณสมบัติที่คล้ายกับดิน ทางโรงไฟฟ้าจึงสามารถกำจัดตะกอนดินเหล่านี้ได้ ในปัจจุบันได้มีการกำจัดตะกอนดินโดยกองและปรับพื้นที่เป็นลานกว้างบริเวณโรงไฟฟ้า หากสามารถนำเอาตะกอนดินเหล่านี้มาเป็นวัตถุดิบเพื่อใช้ในการผลิตและ

ออกแบบเป็นผลิตภัณฑ์จากตะกอนดิน เนื่องจากตะกอนดินมีปริมาณเพียงพอต่อการนำเอามาเป็นวัตถุดิบในเชิงพาณิชย์ และนับว่าเป็นแนวทางในการจัดการของเสียอย่างยั่งยืนอีกด้วย

การจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยใช้หลักการของการใช้ประโยชน์จากของเสีย (Waste Utilization) จึงน่าจะเหมาะสมกับการใช้ของเสียจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากทั้งสองแห่งมาพัฒนาร่วมกัน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพอย่างเต็มที่โดยประยุกต์เข้ากับเทคโนโลยีการผลิตวัสดุก่อสร้างโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ โดยจะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งใช้พลังงานสูงและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่การระเบิดภูเขา การบด การเผาในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเป็นส่วนหนึ่งทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งหวังในการนำของเสียเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ และพัฒนาปรับปรุงสมบัติบางประการเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์หรือพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำของโรงไฟฟ้ามาเป็นวัตถุดิบในการผสมร่วมกับจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยลิกไนต์ ศึกษาผลของอัตราส่วนในการผสมตะกอนดินในจีโอโพลิเมอร์ที่มีต่อกำลังอัดโดยใช้ตะกอนดินทดแทนทรายในการผสมเพื่อลดการใช้ทรัพยากรทราย จากคุณสมบัติของสารจีโอโพลิเมอร์ที่เป็นสารเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรงได้เหมือนสารซีเมนต์สามารถแทนการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นที่น่าสนใจนำมาใช้ผลิตบล็อกประสานด้วยการนำคุณสมบัติจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถนำมาใช้งานได้จริง เป็นการใช้ประโยชน์จากตะกอนดินที่เป็นของเสียของโรงงานที่ต้องได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำประปามาเป็นส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนในการผสมของตะกอนดินที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการนำเถ้าลอยจากเชื้อเพลิงลิกไนต์และตะกอนดินจากระบวนการผลิตน้ำของโรงไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ประโยชน์ร่วมกันเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์และเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการจัดการของเสียอุตสาหกรรม โดยศึกษาอัตราส่วนของตะกอนดิน อัตราส่วนสารเคมีที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์และผลิตภัณฑ์บล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แนวทางการจัดการของเสียอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าด้วยการใช้ประโยชน์จากของเสียร่วมกันเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ
2. แนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากข้อมูลพื้นฐานของการผลิตจีโอโพลิเมอร์

การตรวจเอกสาร

1. วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic material)

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีสมบัติเชื่อมประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปรกติ จะได้สารที่มีสมบัติเชื่อมประสาน (ปริญญา, 2553) วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีแหล่งที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติและปอซโซลานที่ได้จากอุตสาหกรรม

หลักการทำงานของวัสดุปอซโซลานในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตโดยใช้วัสดุปอซโซลานกระทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1.1 ทางด้านเคมี คือ วัสดุปอซโซลานนั้นเมื่อนำมาผสมในซีเมนต์ ซิลิกาที่มีอยู่จำนวนมากในวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เราเรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ส่งผลให้ซีเมนต์ที่ผสมด้วยวัสดุปอซโซลานมีกำลังเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 1 และ 2



1.2 ทางด้านกายภาพ คือ อนุภาคที่เล็กของวัสดุปอซโซลานทำให้สามารถแทรกตัว (Filler) เข้าไปอยู่ในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่างๆ กันในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นและกำลังสูงขึ้น

2. เถ้าลอย (Fly Ash)

กากที่เหลือจากการเผาไหม้ที่ได้จากการเผ่านหินใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยนำถ่านหินมาบดเป็นผงถ่านก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ในเตาเผา การเผาไหม้นั้นจะได้เถ้าลอยออกมาปริมาณร้อยละ 80 ส่วนถ่านก้นประมาณร้อยละ

20 โดยเถ้าหนัก (Bottom Ash) มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงจะหลอมอนุภาคของเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ เกิดการปะทะกันของอนุภาคเถ้าและบางส่วนจะปะทะกับผนังเตาเป็นก้อนที่ใหญ่ขึ้นเมื่อมีน้ำหนักรวมมากขึ้นก็จะตกลงสู่ก้นเตา และยังมีอนุภาคขนาดเล็กที่หลงเหลืออยู่ลอยขึ้นไปกับไอร้อน ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ทำให้อนุภาคของเถ้าที่ใกล้จุดหลอมเหลวกลับเย็นตัวลงและรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคทรงกลมในขนาดต่างๆ ที่เรียกว่า เถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งเถ้าลอยจะถูกดักจับด้วยระบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อแยกเถ้าลอยไม่ให้ลอยปะปนไปสู่บรรยากาศ

2.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยที่เห็นชัดเจน คือ เป็นฝุ่นสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล มีลักษณะแห้งและเบา พวงเถ้าลอยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ไมครอนจนถึง 150 ไมครอน มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน รูปร่างอนุภาคค่อนข้างกลมและผิวเรียบ มีความละเอียดซึ่งความละเอียดที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของการเผา เถ้าถ่านหินที่บดละเอียดและมีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะได้เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงและมีรูปทรงกลมและจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะได้เถ้าลอยที่มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอย คือ ซิลิกาไดออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ องค์ประกอบทางเคมีที่พบในเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน ที่มาของถ่านหิน ชนิดของเตาเผา อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและกระบวนการเผา ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของเถ้าลอย โดยมีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในมาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิด C และ ชนิด F

ตารางที่ 1 สมบัติทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618

สมบัติทางเคมี (ปริมาณร้อยละ)	มาตรฐานปอซโซลาน		
	N	F	C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ น้อยที่สุด	70	70	50
SO ₃ มากที่สุด	4	5	5
Na ₂ O มากที่สุด	1.5	1.5	1.5
การสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ (LOI) มากที่สุด	10	6	6

ที่มา: ASTM C618 (2001)

2.3 การนำเถ้าลอยไปใช้ประโยชน์

เถ้าลอยส่วนใหญ่ใช้ในงานก่อสร้างเกี่ยวข้องกับคอนกรีต เนื่องจากเถ้าลอยมีสมบัติเป็นสารปอซโซลานซึ่งมีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถนำมาผสมและแทนที่ปูนซีเมนต์โดยปรับปรุงสมบัติบางประการสามารถเพิ่มสมบัติด้านการรับกำลังมีความแข็งแรงและความคงทนในการใช้งานอีกทั้งช่วยลดต้นทุน

เถ้าลอยเป็นที่นิยมในงานคอนกรีตด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ

2.3.1 พบว่าเถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็ก สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเป็นการเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น ซึ่งจะต้องใช้เถ้าลอยที่ได้คุณภาพและปริมาณที่เหมาะสม

2.3.2 เถ้าลอยส่วนใหญ่มีอนุภาคขนาดเล็กและเม็ดกลม เมื่อผสมในคอนกรีตจะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์และมวลรวมอื่น ส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้นและผสมง่ายจากผิวสัมผัสที่ลื่นของเถ้าลอยทำให้การไหลลื่นที่ดี แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง

นอกจากการนำเถ้าลอยมาใช้ในด้านคอนกรีตยังมีการใช้ประโยชน์ของเถ้าลอยในอีกหลายด้านและใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการทำวัสดุอิโพลีเมอร์ (ปริญญา, 2549)

3. ตะกอนประปา

แหล่งน้ำธรรมชาติจะมีอนุภาคและสารแขวนลอยปะปนกันอยู่ดังนั้นต้องมีการปรับปรุงความสะอาดของน้ำ กระบวนการหลักที่นำมาใช้ในการทำน้ำให้สะอาดโดยการเติมสารสร้างตะกอน การตกตะกอน การกรองและการฆ่าเชื้อโรค การเติมสารเคมีลงไปทำให้สารแขวนลอยมีการรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดการตกตะกอน โดยสารเคมีที่นิยมใช้คือ สารส้ม (Alum) เนื่องจากสารส้มมีประจุบวกมากสามารถจับกับประจุลบกับตะกอนแขวนลอยเกิดการรวมตัวเป็นตะกอนจนมีน้ำหนักมากขึ้น น้ำที่ได้จึงมีความใส ทำให้มีสมบัติเหมาะสมก่อนที่จะนำมาใช้ประโยชน์ ทั้งนี้ส่วนของขั้นตอนการผลิตน้ำประปา จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบและคุณภาพของน้ำประปาที่ต้องการ

3.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา

ระบบผลิตน้ำประปาเป็นระบบที่มีหน้าที่ปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน ทั้งทางด้านกายภาพ เคมีและชีวภาพ เพื่อให้ น้ำดิบที่เข้าระบบได้คุณภาพตาม โดยกระบวนการผลิตน้ำประปานั้นจะแตกต่างกันตามคุณภาพของน้ำดิบ น้ำประปาที่ผลิตได้จะต้องได้คุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด ด้วยการผลิตน้ำประปาจากกระบวนการพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไปนั้นจะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

3.1.1 การบำบัดขั้นต้น (Pre-Treatment of water)

การกรองโดยใช้ตะแกรงเพื่อกำจัดเศษวัสดุที่ลอยมากับน้ำดิบ การเติมอากาศเพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำและยังช่วยกำจัดเหล็ก แมงกานีสที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งขั้นตอนที่กล่าวมาเหล่านี้จะมีหรือไม่มีก็ได้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบ

3.1.2 การรวมตะกอนทางเคมี (chemical coagulation and flocculation)

แยกตะกอนออกจากน้ำดิบโดยการเติมสารสร้างตะกอนชนิดต่างๆ ได้แก่ สารส้ม (Aluminium Sulfate or Alum, $Al_2(SO_4)_3$) สาร Ferric Chloride สาร Polyaluminum

Chloride (PAC) และสาร Polymer โดยสิ่งๆที่เติมเข้าไปในกระบวนการผลิตเหล่านี้อาจตกค้างอยู่กับตะกอนและมีผลต่อการพัฒนาไปใช้ประโยชน์

กระบวนการเกิดตะกอน มีดังนี้

ในการกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ในรูปของความขุ่น สี กลิ่นและเชื้อโรคออกจากน้ำ โดยมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่สำคัญคือ โคลแอกกูเลชันหรือการสร้างแกนตะกอน (Coagulation) ฟล็อกกูเลชันหรือการรวมตะกอน (Flocculation) (ทวีศักดิ์, 2554)

ก. โคลแอกกูเลชัน (Coagulation)

การสร้างแกนตะกอนเป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคความขุ่นที่อยู่ในน้ำสูญเสียเสถียรภาพและจับตัวกับสารสร้างแกนตะกอน เกิดเป็นเม็ดตะกอนขนาดเล็กซึ่งจะรวมกันจนเป็นตะกอนที่โตพอที่จะถูกกำจัดออกจากน้ำได้ง่ายขึ้น การสร้างแกนตะกอนทำได้ด้วยการกวนเร็วเพื่อให้สารสร้างตะกอนสัมผัสกับน้ำและสารแขวนลอยในน้ำอย่างทั่วถึง สารสร้างตะกอนมาจากการเติมสารเคมี จะเกิดปฏิกิริยาเคมีในน้ำและจับอนุภาคความขุ่นเกิดเป็นแกนตะกอนขึ้น

ข. ฟล็อกกูเลชัน (Flocculation)

การรวมตะกอนเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากการสร้างแกนตะกอนหรือโคลแอกกูเลชัน โดยมีหลักการคือการให้กลุ่มของสารแขวนลอยที่สัมผัสกับสารตกตะกอนเรียบร้อยแล้วฟล็อก (floc) ที่เกิดขึ้นได้สัมผัสกันอย่างทั่วถึงด้วยการกวนน้ำอย่างช้าๆ และนานเพียงพอ ทำให้เม็ดตะกอนและสารปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำเกาะยึดและรวมตัวกันจนมีอนุภาคใหญ่ขึ้น กระทั่งเม็ดตะกอนมีน้ำหนักและขนาดโตพอที่จะตกตะกอนออกจากน้ำได้

3.1.3 การตกตะกอน

สารแขวนลอยที่สัมผัสกับสารเกิดการตกตะกอนแล้วตะกอนถูกแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนใส่ถังตกตะกอน ซึ่งทำได้โดยการควบคุมความเร็วในการไหลของน้ำในถัง เม็ดตะกอนที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำจะค่อยๆ ตกลงสู่ก้นถังตามแรงโน้มถ่วงของโลก เม็ดตะกอนขนาด

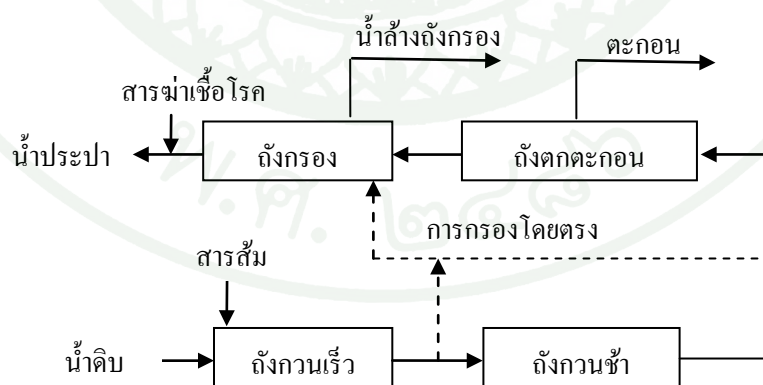
ใหญ่เกือบทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากน้ำในขั้นตอนนี้ สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าน้ำที่ไหลผ่านออกจากถังตกตะกอนจะมีความใสแต่ยังอาจมีตะกอนขนาดเล็กที่หลุดลอยออกไปได้บ้าง

3.1.4 การกรอง

น้ำที่ไหลออกจากถังตกตะกอนยังคงมีตะกอนแขวนลอยขนาดเล็กอยู่บ้าง การกรองจึงเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่จะดักจับตะกอนแขวนลอยที่ปะปนอยู่ในน้ำเพื่อแยกเอาของแข็งที่มีขนาดเล็กจนไม่สามารถตกตะกอนได้ออกจากน้ำเพื่อให้น้ำมีความใสหรือความขุ่นต่ำก่อนที่จะถูกส่งไปสู่กระบวนการฆ่าเชื้อโรค

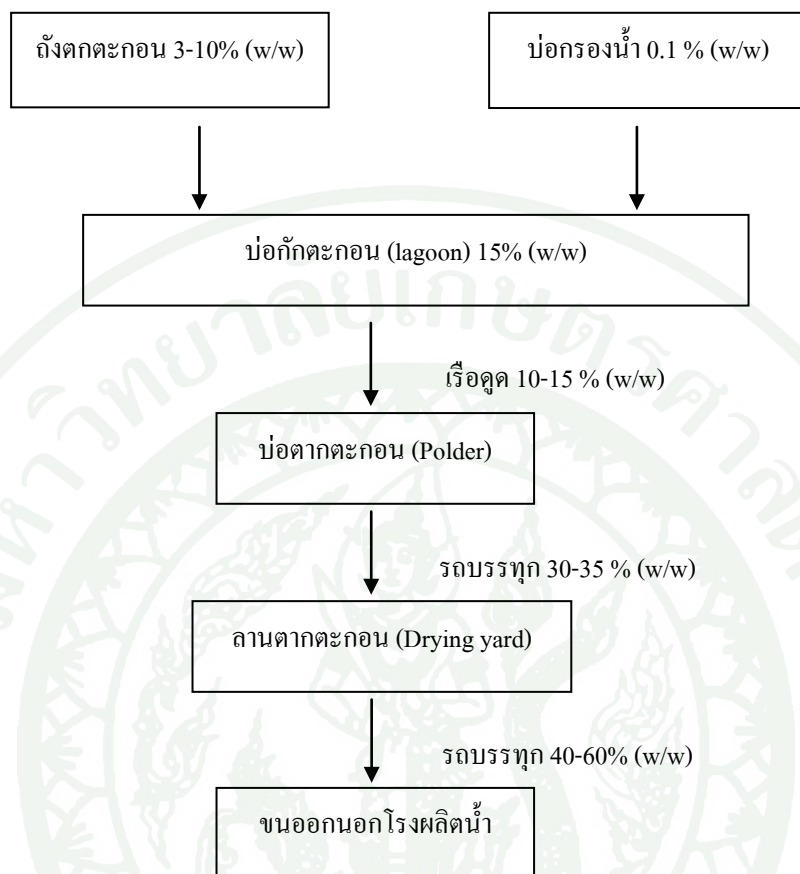
3.1.5 การฆ่าเชื้อโรค

น้ำที่ผ่านการกรองจะต้องผ่านกระบวนการใส่ก๊าซคลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรต์ เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ แบคทีเรียและ โปรโตซัว โดยคลอรีนจะฆ่าเชื้อต่างๆ โดยปริมาณคลอรีนที่ใส่ต้องไม่น้อยจนไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ และไม่มากจนส่งผลกระทบต่อผู้บริโภค น้ำประปาที่ได้จะมีค่าคลอรีนคงเหลือในน้ำประปาไม่ต่ำกว่า 0.2 mg/l ไม่พบแบคทีเรียและเชื้อโรคระบาดทางน้ำ



ภาพที่ 1 การผลิตพื้นฐานในระบบการผลิตน้ำประปา

ที่มา: ทวีศักดิ์ (2554)



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการกำจัดตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

ที่มา: ดวงกมลและคณะ (2547)

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกอนของระบบผลิตน้ำประปา (มณฑล ,2546) สรุปได้ดังนี้

ก. เนื้อตะกอนมีความสม่ำเสมอค่อนข้างสูงเป็นตะกอนดินเหนียวผสมทรายแป้ง (Silty clay sediments)

ข. ตะกอนสามารถยึดตัวได้แน่นมากเมื่อชื้นและเหนียวปานกลางถึงเหนียวมากเมื่อเปียก และมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างได้มาก แสดงถึงการมีแรงยึดภายในระดับดีทำให้มี

ศักยภาพในการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม โดยเฉพาะเครื่องปั้นดินเผา ซึ่งต้องการการเกาะตัวหรือตัวกันเพื่อการขึ้นรูปของงานปั้น

ค. ตะกอนมีธาตุอาหารพืชโดยทั่วไปอยู่ในระดับปานกลางถึงดี ไม่เป็นอุปสรรคต่อการใช้งานทางการเกษตรและการมีอินทรีย์วัตถุในปริมาณสูง ทำให้มีศักยภาพในการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมด้วย

ง. ตะกอนมีความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูงและมีธาตุอาหารรองซึ่งเป็นไอออนบวกอยู่ในระดับปานกลางถึงสูงเป็นส่วนใหญ่ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้

จ. ตะกอนจะมีไอออนส่วนเกินหลงเหลืออยู่โดยเฉพาะอะลูมิเนียม ไอออนและอนุมูลคาร์บอนเนตซึ่งเป็นผลมาจากสารที่เติมลงในน้ำดิบเพื่อการตกตะกอนรวดเร็วขึ้น

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของตะกอนดิน

ตัวอย่าง	ผลการทดสอบคิดเป็นร้อยละ									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO
A1	47.77	28.94	0.74	6.11	0.52	1.23	0.19	0.14	0.12	0.06
A2	41.78	37.45	0.76	7.38	1.16	4.06	0.14	1.34	-	-
A3	52.62	24.40	0.81	5.90	0.79	0.44	0.24	1.61	-	0.10

หมายเหตุ A1 = ตะกอนดิน โรงผลิตน้ำประปาชนบุรี
A2 = ตะกอนดิน โรงผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์
A3 = ตะกอนดิน โรงผลิตน้ำประปาบางเขน

ที่มา: คววมลและคณะ (2547)

จากตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปา เห็นได้ว่าส่วนประกอบทางเคมีของตะกอนดินของโรงผลิตน้ำประปาในแต่ละแหล่งจะมี

ส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันเล็กน้อยตามกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน โดยพบว่า SiO_2 มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 40 - 50 , Fe_2O_3 ร้อยละ 5 - 7 เป็นต้น

3.2 การใช้ประโยชน์จากตะกอน

การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับตะกอนประปาซึ่งเป็นของเสียนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมบางประเภท ภาณุ (2550) ศึกษาตะกอนประปาที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำประปาในจังหวัดปทุมธานี โดยมีลักษณะคล้ายกันจากการผลิตน้ำประปา รวมทั้งจากการศึกษาของเพิ่มพล (2546) องค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนด้วยเครื่อง X-ray Diffraction พบว่า องค์ประกอบของธาตุหลักมี 8 ธาตุ ที่พบมากตามลำดับ ดังนี้ ซิลิคอน (Si) อลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) โซเดียม (Na) ไททานเนียม (Ti) แมงกานีส (Mn) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของชนเสถ (2546) ว่าองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของตะกอนเป็นปริมาณของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) รวมกับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ตามมาตรฐานวัสดุพอลิซิลาน สอดคล้องกับการศึกษาของ Husillos *at al.* (2010) วิเคราะห์ตะกอนประปาของกระบวนการผลิตน้ำ พบว่า องค์ประกอบของตะกอนดินที่เกิดจากการผลิตน้ำประปาพบแร่ที่เป็นองค์ประกอบหลักในตะกอนดิน ซึ่งคล้ายคลึงกับดิน เช่น ควอทซ์ แคลไซต์ และไมก้า รวมทั้งมีซิลิกา อลูมินาอยู่สูง ซึ่งจะสามารถนำไปใช้กับงานทางด้านอุตสาหกรรมพื้นฐานอื่นได้

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติของตะกอนประปาเผาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C618

สมบัติทางเคมี (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
SO_3 มากที่สุด	0.26	0.28	0.06	4	5	5
MgO	0.81	0.82	1.10	5	5	5
Na_2O มากที่สุด	0.36	0.37	0.37	1.5	1.5	1.5
การสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ (LOI) มากที่สุด	8.64	3.04	2.97	10	6	6

ที่มา: บุญฤทธิ (2550)

ปัญหาตะกอนดินที่เกิดจากการผลิตน้ำป่ล่อยที่ออกมาทุกวัน การกำจัดตะกอนดินที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่จะนำไปถมที่หรือสามารถนำตะกอนดินมาเป็นวัตถุดิบโดยใช้ประโยชน์ในการทำปุ๋ยหมัก กระจายสำหรับปลูกพืช เซรามิก การผลิตเครื่องปั้นดินเผา อิฐ เป็นต้น

Yan and Sagoe-Crentsil (2012) จากกระบวนการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่โดยนำตะกอนที่เป็นของเสียจากกระบวนการมาใช้พบว่าสามารถนำมาทำจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้

สุพิณ (2553) ศึกษาการนำชิ้นงานดินเผาทั่วไปผสมกับดินตะกอนจากการผลิตน้ำประปาที่ผ่านการ spray dry เพื่อให้ได้เม็ดดินที่ละเอียด และนำเผาไปในเตาเผาเซรามิก โดยใช้ดินตะกอนร้อยละ 30 และเผาที่อุณหภูมิ 900-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยให้ชิ้นงานที่พูนตัวสูง น้ำหนักเบากว่า ดูดซึมน้ำสูงทั้งยังสามารถเก็บกักความชื้นไว้ได้ดีและแข็งแรงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีดินตะกอนน้ำประปาเป็นองค์ประกอบ (ผลิตภัณฑ์ดินเผานาโน)

ณิชาดาและคณะ (2550) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนเคมีจากกระบวนการผลิตน้ำประปาบางเขน โดยเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในซีเมนต์มอร์ตาร์ และอิฐบล็อกประสาน โดยกากตะกอนเคมีที่ศึกษานั้นมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งคล้ายกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ทดสอบกำลังอัดสามารถสรุปได้ว่าตะกอนเคมีจากน้ำประปาสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมในการทำบล็อกประสานปูพื้นและทดแทนปูนซีเมนต์ สามารถใช้งานก่อนและฉาบมีความเป็นไปได้อย่างมากในการนำไปใช้งานได้จริง

4. จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) หรือเรียกอีกอย่างว่า โพลีไซอะเลต (Polysialate) มีสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับสารซีเมนต์ โดยไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงสามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุที่มีส่วนประกอบของสารจำพวกซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ที่เป็นองค์ประกอบหลัก โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง (alkali activator) ที่เป็นสารพวกอัลคาไลซิลิเกต (alkali silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide) เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ทำให้มีการก่อตัวเกิดขึ้น โดยสามารถเกิดที่อุณหภูมิห้องและอาจใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการก่อตัว

จะเกิดโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ (polymer) จากหลักการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) เกิดเป็นโครงสร้างโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์ แสดงไว้ดังสมการที่ 3



โดย M คือ ธาตุอัลคาไล (Alkali)
 - คือ การยึดเกาะ (Bond)
 z คือ จำนวนโมเลกุลของ Si-O₂ เท่ากับ 1,2 หรือ 3
 n คือ จำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่ (degree of polymerization)
 w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

จีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วย การเชื่อมขวางของโมเลกุลทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO₄ และ SiO₄ โดยมีประจุของโลหะอัลคาไลน้อย่างเช่น Li⁺ Na⁺ และ K⁺ ในการทำให้ประจุสมดุล ณ ตำแหน่งของ AlO₄ สารจีโอพอลิเมอร์เมื่อเกิดปฏิกิริยาจะเกิดการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่รุนแรงซึ่งปฏิกิริยาเกิดการอัดตัว ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เกิดเป็นตัวประสานที่แข็งแรงมีสมบัติในการรับแรงอัดได้

4.1 ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์เป็นสารจำพวกอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) โครงสร้างส่วนประกอบแบบลักษณะอสัณฐาน (amorphous) และสารกึ่งผลึก (semicrystalline) ในการทำจีโอพอลิเมอร์ต้องมีอลูมินาและซิลิกาซึ่งไวต่อการทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบหลัก เมื่อผสมสารละลายอัลคาไลน์จะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในที่อุณหภูมิปรกติหรืออุณหภูมิสูงกว่า

ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ (Davidovits, 1999)

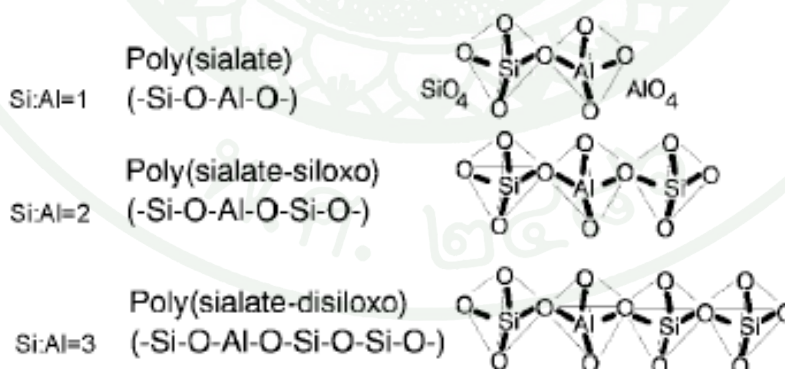
4.1.1 การชะละลาย (Dissolution)

วัสดุปอซโซลานเมื่อผสมกับสารละลายต่างสูง ทำให้เกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆออกมาโดยมีอลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะละลายออกมามาก

เนื่องจากเป็นสารหลัก เมื่อสารละลายต่างเกิดการชะละลายวัสดุมากขึ้นผิววัสดุบางส่วนจะถูกทำลาย ส่งผลให้เกิดช่องที่ผิวและสารละลายก็จะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

4.1.2 การทำปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ (Condensation-polymerization)

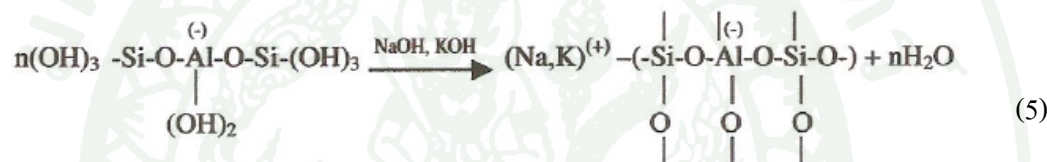
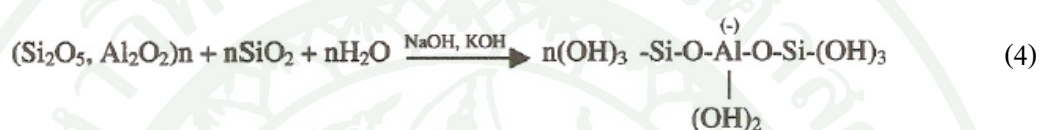
ในปฏิกิริยาการควบแน่นจะเกิดการรวมตัวกันของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเบื้องต้น เป็นหน่วยปริมาตรสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si^{4+} และ Al^{3+} ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบ 4 แขนกับออกซิเจน โดยหน่วยเหล่านี้จะเกิดการกระจายตัวอยู่ในลักษณะของโพลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (meta-stable) ซึ่งจะมีปริมาณของ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นทำให้หน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้นโครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยพริมาตรสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สาม และสี่หน่วย ได้แก่ โพลีไซอะเลต (polysialate, PS) โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (polysialate siloxo, PSS) โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับ ดังภาพที่ 3 โดยการทำให้โมเลกุลมีการเชื่อมขวางกันมากขึ้น ปริมาณของ SiO_4 เพิ่มขึ้นจากหนึ่งเป็นสามหน่วย เมื่อปฏิกิริยาเกิดมากขึ้นการเชื่อมโยงของโพลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกันจะเกิดมากและหนาแน่นขึ้น ทำให้เกิดโครงสร้างที่แน่นและสามารถรับแรงได้



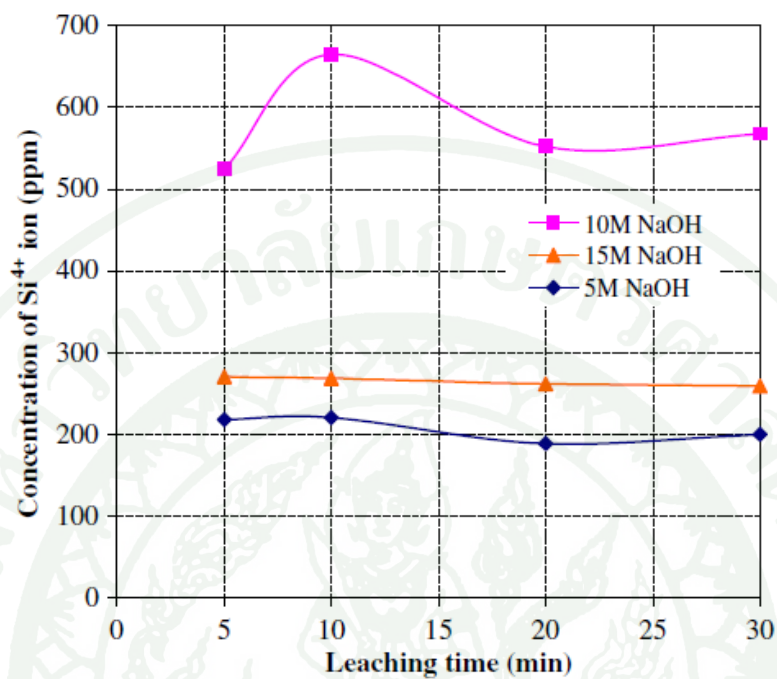
ภาพที่ 3 โครงสร้างการเชื่อมพันธะของจีโอโพลิเมอร์

ที่มา: Davidovits (1999)

ปฏิกิริยาลูกโซ่ของจีโอ โพลีเมอร์มีความซับซ้อนมากและยังไม่สามารถที่จะอธิบายได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามสามารถเขียนปฏิกิริยาหลักได้ ซึ่งสารประกอบซิลิกาและอลูมินาเมื่อผสมกับสารอัลคาไลไฮดรอกไซด์และซิลิเกต และน้ำจะทำปฏิกิริยาได้เป็นหน่วยโพลิไซอะเลตที่มีประจุของอัลคาไลทำให้เกิดความสมดุล ดังสมการที่ 4 หน่วยโพลิไซอะเลตจะทำปฏิกิริยากับอัลคาไลไฮดรอกไซด์ต่อการเกิดเป็นลูกโซ่โพลีเมอร์ที่เชื่อมโยงกัน ดังสมการที่ 5

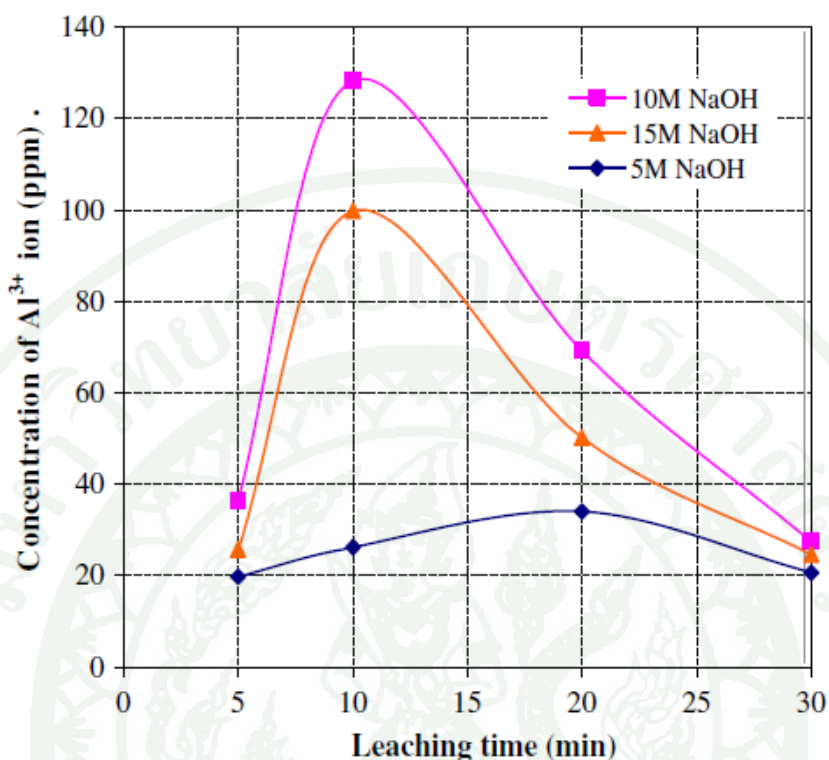


วัสดุหลายชนิดที่มีศักยภาพเหมาะสมที่สามารถนำมาผลิตจีโอโพลีเมอร์และค่ากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์จะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมและการบ่มรวมทั้งปัจจัยด้านอื่นด้วย จากการศึกษาของ Ubolluk (2009) ศึกษาการชะของถ้ำลอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 5 โมลาร์ 10 โมลาร์ และ 15 โมลาร์ ด้วยวิธีการผสมแตกต่างกัน พบว่า โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ จะมี Al^{3+} และ Si^{4+} ออกมาในปริมาณที่สูง โดยการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Si⁴⁺ กับระยะเวลาการชะละลายของ โขเดียมไฮดรอกไซด์

ที่มา: Rattanasak and Chindapasirt (2009)



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Al^{3+} กับระยะเวลาการชะละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ที่มา: Rattanasak and Chindapasirt (2009)

4.2 ปฏิกิริยาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากการเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน กล่าวคือ สารปอซโซลานเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ ซิลิกาจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้เป็นสารเชื่อมประสานของสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แต่การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จะเกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน (polycondensation) ซึ่งใช้หลักการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) กับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์และเกิดการพัฒนาโครงสร้าง ในการทำจีโอโพลิเมอร์

สามารถใช้แก้วที่ได้จากการเผาถ่านหินโดยสามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Swanepoel and Strydom, 2002) และปฏิกิริยาจะเกิดความร้อนขึ้นเหมือนกับที่พบในปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำที่เป็นซีเมนต์เพสต์

4.3 สมบัติของจีโอโพลิเมอร์

สมบัติที่คงทนแข็งแรง ทนต่อสภาวะอากาศ สิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงและค่ากำลังอัดดีและคงตัวได้เร็วกว่าคอนกรีตและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการทำในระยะเวลาสั้นๆ เช่น งานซ่อมถนน ทางวิ่งในสนามบิน หรืองานหล่อแบบต่างๆ มีความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านได้ต่ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10-9 cm/s (Davidovits *et al.*, 2002) นอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์มีสมบัติด้านอื่นได้แก่

4.3.1 ความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด

คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสภาพเป็นด่างและไม่ค่อยมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด จีโอโพลิเมอร์มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าคอนกรีตจึงมีความทนทานต่อกรดได้ดีกว่า การกัดกร่อนของกรดเกี่ยวกับการทำลายลูกโซ่โพลิเมอร์ (depolymerization) และการเกิดผลึกของซีโอไลต์ (zeolites)

4.3.2 ความทนทานต่อการทำลายของสารซัลเฟต

เกิดการเสียหายเนื่องจากผลกระทบของซัลเฟตต่อจีโอโพลิเมอร์โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องก่อสร้างอาคารในสภาพแวดล้อมทะเล เนื่องจากซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำทะเล จีโอโพลิเมอร์จะถูกทำลายเมื่อแช่ในสารซัลเฟต แต่การทำลายจะต่ำกว่าซีเมนต์ธรรมดาการทำลายเกิดขึ้นเนื่องมาจากจีโอโพลิเมอร์สูญเสียไอออนของอัลคาไลน์ในสารซัลเฟต ไอออนของอัลคาไลน์เป็นตัวทำให้เกิดความสมดุลด้านประจุไฟฟ้าในช่วงการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ การสูญเสียไอออนของอัลคาไลน์จะทำให้เกิดความเค็มและรอยแตกส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

4.3.3 สมบัติด้านการคืบและการหดตัว

การหดตัวมีค่าต่ำมากเนื่องมาจากโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ที่มีลักษณะต่างจากโครงสร้างของซีเมนต์ ซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นแผ่นประกอบกันเป็นเจลแต่โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างในลักษณะอสัณฐานและกิ่งผลึก ดังนั้น การคืบคลานของจีโอโพลิเมอร์จะมีค่าต่ำ

4.3.4 จีโอโพลิเมอร์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

การผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์มีต้นทุนที่ต่ำ สามารถผลิตได้ง่ายและบ่มที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุดิบสามารถหาได้ทั่วไปโดยเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นการใช้ของเสียได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและยังมีสมบัติในด้านกำลังอัดที่ดีจะได้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงเทียบเท่ากับการผลิตคอนกรีตจากปูนซีเมนต์

4.3.5 จีโอโพลิเมอร์ทางด้านสิ่งแวดล้อม

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ทุกๆ 1 ตัน จะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่บรรยากาศ 1 ตันเช่นกัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน (Global Warming) โดยมีการผลิตปูนซีเมนต์เกือบทุกประเทศทั่วโลก แต่สำหรับวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีสมบัติคล้ายซีเมนต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหาโลกร้อนเนื่องจากการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการความร้อนที่สูงในการปรับสภาพหินปูนเหมือนการผลิตซีเมนต์และสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นการประหยัดพลังงาน ซึ่งนำไปสู่การลดการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่อากาศได้เป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในการผลิตระหว่างมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์กับจีโอโพลิเมอร์ (ปริญญญา, 2549) พบว่าจีโอโพลิเมอร์สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้อยกว่าครึ่งของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เป็นการลดการทำลายพื้นที่ของภูเขาหินปูนซึ่งเป็นการทำลายพื้นที่ป่าไม้และระบบนิเวศน์

4.4 การใช้ประโยชน์ของวัสดุอีโพลีเมอร์

วัสดุอีโพลีเมอร์นำมาประยุกต์ใช้ได้หลายอย่าง เนื่องจากสมบัติของอีโพลีเมอร์ที่มีความสามารถในการเป็นตัวเชื่อมประสาน ทั้งยังสามารถให้กำลังอัดที่สูง ใช้เวลาไม่นานในการแข็งตัวและคงตัวได้เร็ว คงทนแข็งแรง อีโพลีเมอร์นำมาใช้ได้ในงานซ่อมแซม วัสดุอีโพลีเมอร์ในอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ในงานต่างๆ ได้ดี และให้สมบัติที่ดี โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูงจะสามารถให้กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวได้ดี (พร้อมพงศ์, 2551) วัสดุทนไฟ, คอนกรีต และเก็บกักโลหะหนัก (บุษราภรณ์, 2550) อีกทั้งการเลือกใช้วัสดุอีโพลีเมอร์แทนปูนซีเมนต์ทำให้การผลิตปูนซีเมนต์ลดลง รวมถึงช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้น

5. อิฐบล็อกประสาน

5.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอิฐบล็อกประสาน

อิฐบล็อกประสาน ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.58-2530) หมายถึง อิฐบล็อกที่ได้จากการนำดินลูกรังผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม อาจผสมวัสดุอื่นๆ เช่น หินฝุ่น ทราย กวนให้เข้ากัน เทลงในแบบพิมพ์ที่มีการออกแบบให้มีรูร่องและเดือยอัดเป็นก้อนแล้วบ่มให้แข็งตัว แบ่งออกเป็น

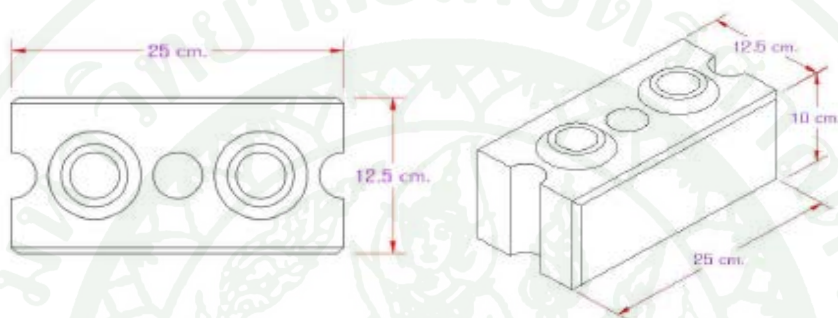
อิฐบล็อกประสาน ชนิดรับน้ำหนัก ที่ใช้ก่อเพื่อรับน้ำหนักโครงสร้างอาคารได้แก่ ก่อเสา ก่อผนัง

อิฐบล็อกประสาน ชนิดไม่รับน้ำหนัก ที่ใช้ก่อผนัง กั้นห้องหรือก่อส่วนอื่นภายในอาคารที่ไม่ใช่ส่วนที่ต้องรับน้ำหนักโครงสร้างอาคาร

บล็อกประสานมีการพัฒนารูปแบบให้มีรูและเดือยบนตัวบล็อก โดยใช้วัสดุดิบในพื้นที่จำพวกดินลูกรัง หินฝุ่น ทรายหรือวัสดุเหลือทิ้งต่างๆที่มีความเหมาะสม คอนกรีตบล็อกมีความแข็งแรง มีรูปลักษณะพิเศษที่สามารถใช้ในการก่อสร้างอาคารต่าง ๆ มีความสวยงามและประหยัดกว่างานก่อสร้างทั่วไป

บล็อกประสานแบ่งการใช้งานเป็น 2 ประเภท เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน คือ

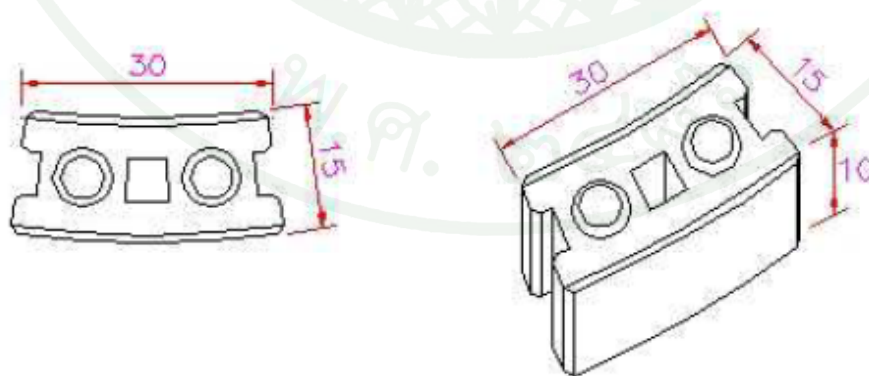
5.1.1 บล็อกตรงหรือทรงสี่เหลี่ยมใช้สำหรับก่อสร้างอาคาร



ภาพที่ 6 บล็อกตรงทรงสี่เหลี่ยมใช้สำหรับก่อสร้างอาคาร

ที่มา: เทคโนโลยีบล็อกประสานดอทคอม (2552)

5.1.2 บล็อกโค้งใช้สำหรับก่อสร้างดาดเก็บน้ำ



ภาพที่ 7 บล็อกโค้งใช้สำหรับก่อสร้างดาดเก็บน้ำ

ที่มา: เทคโนโลยีบล็อกประสานดอทคอม (2552)

5.2 วัสดุคืบที่เหมาะสมสำหรับทำบล็อกประสาน

วัสดุคืบที่ใช้เป็นส่วนผสมหรือมวลรวมละเอียดของบล็อกประสานควรมีขนาดเล็กกว่า 4 มิลลิเมตร ได้แก่ ดินลูกรัง หินฝุ่น ทรายและเถ้าลอยจากโรงงานผลิตไฟฟ้า โดยมวลรวมละเอียดที่ใช้ควรมีลักษณะตามมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพดินและมวลรวม สำหรับงานก่อสร้างทางหลวง คือ มีฝุ่นดินไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักหรือทดสอบเบื้องต้น โดยนำดินใส่ขวดครึ่งหนึ่ง เติมน้ำแล้วเขย่าให้เข้ากันเมื่อหยุดเขย่า สังเกตส่วนที่ตกตะกอนทันทีแล้วขีดเส้นไว้ รอจนตกตะกอนทั้งหมดจนน้ำใส แล้ววัดตะกอนฝุ่นไม่ควรเกินร้อยละ 15 โดยปริมาตร ถ้าวัสดุคืบมีมวลหยาบผสมอยู่มากสามารถใช้เครื่องบดร่อนจะทำให้ผิวบล็อกเรียบขึ้น

5.3 เครื่องอัดบล็อกประสาน

5.3.1 เครื่องอัดด้วยแรงคน

เป็นเครื่องอัดด้วยแรงคนแบบมือโยกใช้การทดแรงแบบคานงัดคานคืด สามารถผลิตได้วันละประมาณ 400-800 ก้อน ขึ้นอยู่กับจำนวนแรงงานและความชำนาญ



ภาพที่ 8 เครื่องอัดด้วยแรงคน

ที่มา: เทคโนโลยีบล็อกประสานดอกทอม (2552)

5.3.2 เครื่องอัดไฮดรอลิก

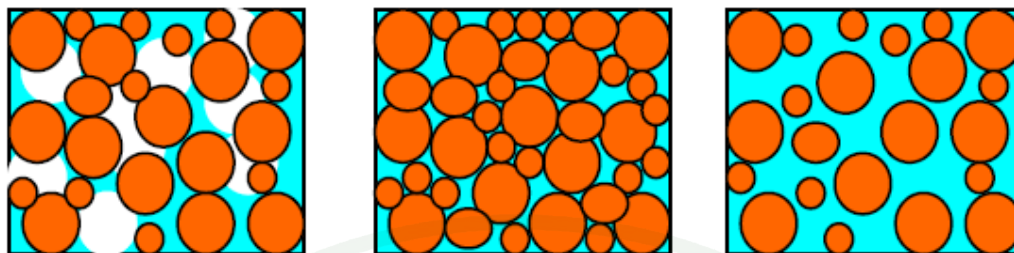
เป็นเครื่องอัดแบบอุตสาหกรรมขนาดย่อมใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนน้ำมันสร้างแรงดันในท่อไฮดรอลิก สามารถผลิตได้วันละประมาณ 1,000 – 1,300 ก้อน อัดได้ครั้งละ 2-4 ก้อน



ภาพที่ 9 เครื่องอัดไฮดรอลิก

ที่มา: เทคโนโลยีบล็อกประสานดอกคอม (2552)

การผสมควรผสมดินแห้งหรือมวลรวมกับซีเมนต์ให้เข้ากันก่อน แล้วค่อยๆ เติมน้ำโดยใช้ฝักบัวหรือหัวฉีดพ่นให้เป็นละอองกว้าง น้ำที่ใช้ควรเป็นน้ำสะอาดใช้ผสมหลังจากผสมดินและซีเมนต์เข้ากันแล้วในปริมาณที่เหมาะสม หลังจากนั้นจึงนำดินที่ผสมแล้วเข้าเครื่องอัด โดยตวงวัดหน่วยเป็นน้ำหนัก เติมน้ำผสมลงในแบบอัดควรใช้ส่วนผสมให้หมดภายใน 30 นาที หลังจากผสมน้ำ เพื่อป้องกันปูนก่อตัวก่อนอัดขึ้นรูป อัดเป็นก้อนแล้วควรผึ่งในที่ร่มอย่างน้อย 1 วัน จึงเริ่มบ่มจนอายุครบ 7 วัน



ภาพที่ 10 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเม็ดดิน

ที่มา: วุฒินัยและพิชิต (ม.ป.ป.)

รูปด้านบนรูปซ้ายมือสุดคือ ปริมาณน้ำที่น้อยเกินไปก่อนที่จะถึงจุดที่เป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสมการเรียงตัวของเม็ดดินในกรณีนี้จะไม่แน่นมาก เพราะแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินมาก ทำให้การบดอัดดินทำได้ยาก ทำให้มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินมากเมื่อบดอัดลงในเครื่องอัดทำให้บล็อกที่ผลิตได้มีช่องว่างมากเป็นผลทำให้กำลังต่ำลง

รูปที่สองเป็นกรณีที่มีปริมาณน้ำพอดีคือมีปริมาณน้ำคลุกเคล้าในวัตถุดิบอย่างทั่วถึงทำให้การบดอัดดินทำได้ง่ายเพราะมีแรงเสียดทานต่ำในกรณีนี้ช่องว่างทั้งหมดจะถูกแทนที่ด้วยน้ำซึ่งถือว่าเป็นกรณีที่มีการบดอัดทำได้แน่นมากที่สุดทำให้บล็อกที่ผลิตได้มีช่องว่างน้อยที่สุดจึงมีความแข็งแรงมาก

รูปที่สามเป็นกรณีที่มีปริมาณน้ำมากเกินไปคือเมื่อน้ำมีมากเกินไปทำให้น้ำเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างเม็ดดินทำให้เม็ดดินแยกตัวออกจากกันเมื่อบดอัดดินลงในเครื่องอัด ทำให้น้ำที่แทรกตัวอยู่ระหว่างเม็ดดินถูกบีบออกมา เมื่ออัดก้อนบล็อกทำให้น้ำส่วนเกินถูกบีบออกมาจึงมีน้ำเยิ้มออกมาเมื่ออัดก้อนบล็อก และบล็อกจะมีความแข็งแรงต่ำ จึงมองเห็นก้อนบล็อกอ่อนตัวเมื่อยกออกมาจากเครื่องอัด

5.4 วิธีการบ่ม

หลังจากนำบล็อกออกจากเครื่องอัดแล้วนำมาจัดเรียงในที่ร่ม เริ่มบ่มโดยการรดน้ำด้วยฝักบัวหรือฉีดพ่นเป็นละอองให้ชุ่ม แล้วคลุมด้วยผ้าไม่ให้ไอน้ำระเหยออกทิ้งไว้อีก 9 วัน จนมีความแข็งแรงพร้อมที่จะออกจำหน่ายหรือใช้งานได้ ไม่ควรเคลื่อนย้ายก่อนกำหนดเพราะจะทำให้ก้อน

บิ่นหรือเกิดการแตกร้าวได้ การบ่มไม่ควรใช้น้ำมากเกินไปเพราะอาจเกิดปัญหาการบวมได้ เนื่องจากน้ำอาจละลายเกลือหรือต่างๆในปูนที่ใช้ผสมกับดินให้ไหลออกมาจนเกิดคราบสีขาว แข็งติดผิวบดลือกไม่สวย จึงควรบ่มด้วยปริมาณน้ำน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้คือ เพียงแค่ให้ความชื้นก็เพียงพอ

6. กำลังอัด (Compressive Strength)

กำลังอัดของคอนกรีต (Strength) เป็นคุณสมบัติสำคัญของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ซึ่งจะแสดงถึงความสามารถในการรับแรงของคอนกรีต โดยการทดสอบกำลังของคอนกรีต ซึ่งสมบัติของคอนกรีตในขณะที่ยังอยู่ในสภาพเหลวจะมีความสำคัญเพียงขณะก่อสร้างเท่านั้น ในขณะที่สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ กำลัง ความทนทาน และการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยกำลังอัดของคอนกรีตเป็นเพียงส่วนหนึ่งของคุณสมบัติในด้านกำลัง และจะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตนั้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติคุณสมบัติของคอนกรีตทั้ง 2 ลักษณะจะมีผลต่อกันและกัน การที่จะได้คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วดี จะต้องมาจากการเลือกอัตราส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลวมีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน

6.1 ธรรมชาติของกำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

6.1.1 กำลังของมอร์ตาร์

กำลังของมอร์ตาร์มีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยกำลังของมอร์ตาร์นี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ตาร์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความพรุนจะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กำลังอัดของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

การเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดและปริมาณ กำลัง ลักษณะผิว ขนาดใหญ่สุด การดูดซึม และแร่ธาตุต่างๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังดึงน้อยกว่ากำลังอัด โดยอัตราส่วนของกำลังดึงต่อกำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น

6.1.2 กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม

สำหรับกำลังของมอร์ตาร์ที่กำหนดให้ความสามารถต้านแรงของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังของหินและแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ตาร์ แต่โดยทั่วไปกำลังของมวลรวมจะสูงเป็นหลายเท่าของกำลังของมอร์ตาร์ ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจะเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดให้ กำลังของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้หินขนาดใหญ่ขึ้น เพราะหินขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดน้ำได้หินมากขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ตาร์ลดลง

มวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำหรือปานกลางมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง การเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลังอัด รวมทั้งถ้าใช้หินที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตดีขึ้น

6.1.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์

แรงยึดเหนี่ยวนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่าง ลักษณะผิวของมวลรวม และลักษณะทางเคมี คือ ปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่างๆ ในเนื้อมวลรวม นอกจากนี้ทิศทางการหล่อและทิศทางการให้น้ำหนักจะมีผลต่อกำลังอัดเช่นกัน โดยจะมีผลต่อกำลังดึงมากกว่ากำลังอัดด้วยเหตุผลที่ว่า จะเกิดช่องว่างทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ตาร์ต่ำลง

6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัด

6.2.1 คุณสมบัติของวัสดุผสม

ก. ปูนซีเมนต์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมากทั้งนี้ เพราะปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้แม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกัน แต่มีความละเอียดแตกต่างกันแล้ว อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตก็จะแตกต่างกันไปด้วยคือ ถ้าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน

ข. มวลรวม มวลรวมมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไปก็มีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ตามมวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อยซึ่งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบจะให้กำลังอัดของคอนกรีตดีกว่าพวกกรวดที่มีผิวเกลี้ยง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน เพราะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก สำหรับคอนกรีตที่มีความสามารถเท่าได้เท่ากัน ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ จึงมักให้กำลังดีกว่า ส่วนขนาดละเอียดของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตในแง่ที่ว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีส่วนขนาดละเอียดไม่เหมาะสม คือ มีส่วนละเอียดมากเกินไปนั้นจะต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีส่วนละเอียดดี เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถเท่าได้เท่ากัน อีกทั้งยังก่อให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงได้ นอกจากนี้ความสะอาดของมวลรวมก็จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน

ค. น้ำ น้ำมีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใสและปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ น้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมอยู่จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะต้นสูง น้ำขุ่นหรือน้ำที่มีสารแขวนลอยปนอยู่จะทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

6.2.2 การทำคอนกรีต

ก. การชั่งตวงส่วนผสม

การชั่งตวงส่วนผสม หากใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากอัตราส่วนผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้

อัตราส่วนผสม จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง โดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

ข. การผสมคอนกรีต การผสมคอนกรีตจะต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อให้มีน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์กระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมได้อย่างเต็มที่ ดังนั้น การผสมคอนกรีตหากกระทำอย่างไม่ทั่วถึงจะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่คงที่ได้

ค. การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเพราะหากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะที่ลำเลียงหรือเทจะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตแน่นตัวหากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะเกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อคอนกรีตมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงได้ หรือหากใช้วิธีทำให้คอนกรีตแน่นตัวที่ไม่เหมาะสมก็สามารถทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นในเนื้อคอนกรีตได้ ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ

6.2.3 การบ่มคอนกรีต

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

ข. อุณหภูมิ ถ้าหากอุณหภูมิสูงในขณะที่บ่มก็จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตถูกเร่งได้เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิต่ำกว่า

ค. เวลาที่ใช้ในการบ่ม ถ้าหากสามารถบ่มคอนกรีตให้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาได้ยาวนานเท่าใดก็จะยิ่งได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

6.2.4 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compression Test)

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

รูปทรงลูกบาศก์ เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษ ขนาดที่ใช้ คือ 15 x 15 x 15 ซม.

รูปทรงกระบอก เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอเมริกา ขนาดที่ใช้ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.

หลังจากคอนกรีตแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชม. จึงถอดแบบออก ต่อจากนั้นจึงนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในน้ำ เพื่อรอการทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด



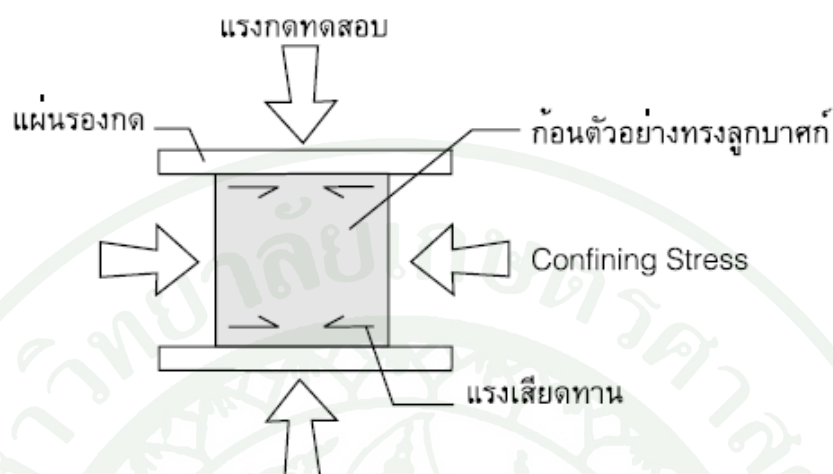
รูปที่ 11 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ และตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก

ที่มา : ชัชวาล (2539)

กำลังอัดของทั้ง 2 รูปทรงที่ได้จากเครื่องทดสอบ จะให้ค่ากำลังอัดที่แตกต่างกัน ถึงแม้จะใช้ส่วนผสมของคอนกรีตเดียวกัน โดยกำลังอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ทั้งนี้เนื่องจาก

ก. องค์ประกอบเรื่องความชะลูด กล่าวคือ รูปทรงกระบอกมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (Slenderness Ratio) มากกว่ารูปทรงลูกบาศก์ ซึ่งอัตราส่วนความชะลูดดังกล่าวส่งผลให้กำลังอัดรูปทรงกระบอกต่ำกว่ารูปทรงลูกบาศก์

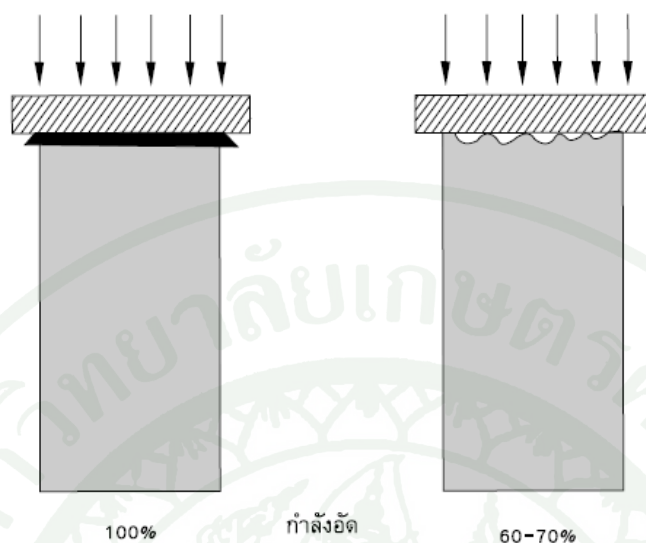
ข. ขณะที่กดก้อนตัวอย่างนั้น ก้อนตัวอย่างจะแตกออกด้านข้าง ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกด แรงเสียดทานดังกล่าวจะก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการแตกด้านข้างของก้อนตัวอย่างที่เรียกว่า Confining Stress ดังรูปที่ 11 โดยค่า Confining Stress นี้จะมีค่ามากถ้าผิวสัมผัสของก้อนตัวอย่างกับเครื่องกดมีค่ามาก ดังนั้นผลทดสอบกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์จึงให้ค่าสูงกว่ารูปทรงกระบอก



รูปที่ 12 แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกดซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการออกตัวด้านข้างของก้อนตัวอย่าง (Confining Stress)

ที่มา : ชัชวาล (2539)

ในทางปฏิบัตินั้นผิวด้านบนของก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกมักจะไม่เรียบ ทำให้ผลการทดสอบผิดพลาดได้ ดังนั้นก่อนการทดสอบจะต้องทำการ Cap ก้อนตัวอย่างทั้ง 2 ด้านด้วยก้ำมะกัณเสียดก่อน เพื่อให้ผิวทั้ง 2 ด้านของตัวอย่างเรียบ และเพื่อให้แนวแกนของแท่นตัวอย่างได้ฉากกับแนวราบก้ำจาก Cap เสร็จเรียบร้อยแล้วและก้ำมะกัณแห้งดีแล้วก็สามารถนำก้อนตัวอย่างเข้าทดสอบได้ ส่วนก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์นั้นไม่ต้อง Cap ก้อนตัวอย่างเพราะมีผิวด้านข้างอีก 4 ด้านเรียบที่สามารถนำมาทดสอบได้



รูปที่ 13 ก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่ CAP หัวและไม่ CAP หัว

ที่มา : ชัชวาล (2539)

ปัจจัยอื่นในการทดสอบที่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต ได้แก่

ก. วิธีการทำก้อนตัวอย่าง การทำให้คอนกรีตแน่น โดยการกระทุ้งด้วยเหล็กจะทำให้ค่ากำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ได้รับการทำให้แน่นด้วยเครื่องเขย่า

ข. ขนาดและลักษณะของก้อนตัวอย่าง การใช้ก้อนตัวอย่างที่ต่างขนาดและต่างลักษณะกันจะมีผลทำให้ค่ากำลังของคอนกรีตเกิดความต่างกัน รวมทั้งความสูงของก้อนตัวอย่างจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีต

ค. อัตราการกด ในการทดสอบกำลังอัด ถ้าใช้อัตราการกดสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตสูงตามไปด้วย จึงควรใช้อัตราการกดตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ คือ 1.43 – 3.47 กก./ตร.ซม./วินาที สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก และ 1.12 - 2.72 กก./ตร.ซม./วินาที สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

ง. ความชื้นของก้อนตัวอย่าง ในขณะที่ทำการทดสอบถ้าหากก้อนตัวอย่างมีความชื้นก็จะให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่าก้อนตัวอย่างที่แห้งกว่า เพราะการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์เนื่องมาจากการดูดซึมน้ำจะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมลดลง

6.3 เครื่องทดสอบ

น้ำหนักที่กดอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างจึงจะให้กำลังอัดที่ถูกต้อง ซึ่งจะเกิดได้ดังนี้

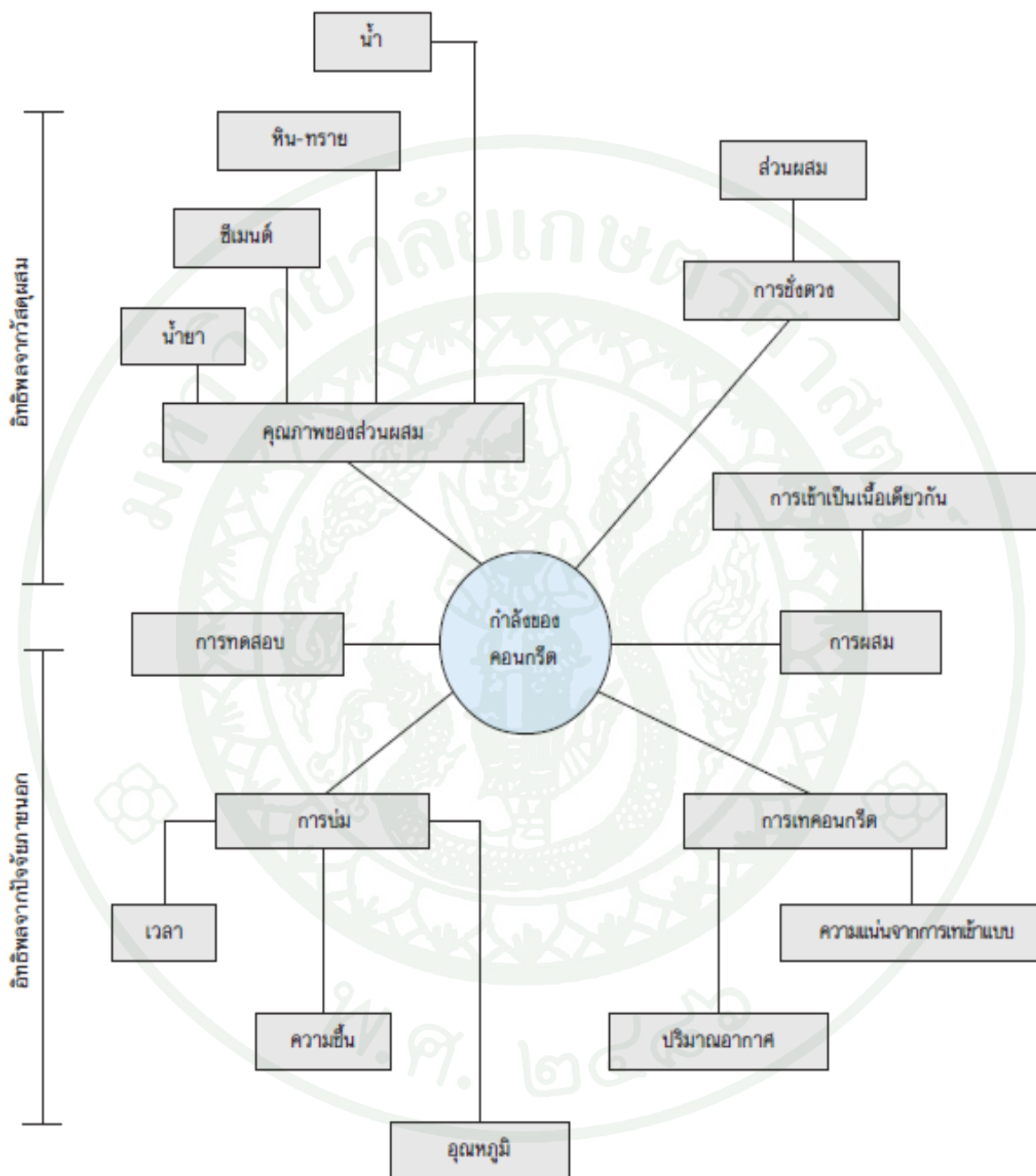
6.3.1 ก้อนตัวอย่างต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลาง และแกนของก้อนตัวอย่างต้องอยู่ในแนวตั้ง

6.3.2 แผ่นรองกดต้องอยู่ในแนวตั้งฉากกับแกนของก้อนตัวอย่าง

6.3.3 แผ่นรองกดต้องเคลื่อนตัวได้เล็กน้อย

6.3.4 แผ่นรองกดจะต้องเรียงเป็นระนาบ

6.3.5 ถ้าต้องใช้วัสดุ Cap ก้อนตัวอย่าง ควรจะเลือกวัสดุที่มีกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกับของคอนกรีต



รูปที่ 14 สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต

ที่มา : ชัยवाल (2539)

6.4 การประเมินผลการทดสอบ

ความผันแปรของกำลังอัดตัวอย่างคอนกรีต กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับการควบคุมทั้งวัตถุดิบ ขบวนการผลิต และขบวนการทดสอบ ซึ่งเมื่อสรุปจะได้ว่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าผันแปรอันเนื่องมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการ คือ

6.4.1 การผันแปรเนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีต (ผันแปรในขบวนการผลิต)

6.4.2 การผันแปรเนื่องจากการทดสอบ (ผันแปรในขบวนการควบคุมคุณภาพ) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 4 สรุปความผันแปรของกำลังอัด

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

ที่มา : รัชवाल (2539)

6.5 สาเหตุที่กำลั้งอัดไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

การที่กำลั้งอัดของคอนกรีต ได้ค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดนี้ อาจมีสาเหตุมาจากหลายๆ ประการอันได้แก่

- 6.5.1 ใช้อัตราส่วนผสมไม่เหมาะสม
- 6.5.2 ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ
- 6.5.3 ควบคุมปริมาณฟองอากาศไม่ดี
- 6.5.4 การผสมไม่ดีพอ
- 6.5.5 มีสารอินทรีย์ต่างๆ มากเกินข้อกำหนด
- 6.5.6 ใช้หินทรายที่สกปรก
- 6.5.7 ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่ไม่มีประสิทธิภาพ
- 6.5.8 การลำเลียงและการทดสอบไม่ถูกต้อง
- 6.5.9 การอัดแน่นไม่ถูกต้อง
- 6.5.10 การบ่มไม่เพียงพอ

6.6 คุณสมบัติด้านกำลังอื่น

นอกจากกำลังอัดแล้ว คุณสมบัติด้านอื่นอื่นๆ ของคอนกรีตที่น่าสนใจ ควรศึกษาได้แก่ กำลังดึง กำลังดัด กำลังเนียน กำลังยึดเหนี่ยว กำลังกระแทก เป็นต้น

กำลังดึง (Tensile Strength) ความต้านทานในด้านรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าต่ำมากคือประมาณ 10% ของกำลังอัดประลัย ถึงแม้ว่าในการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคอนกรีตจะไม่ได้รับแรงดึงโดยตรงก็ตาม แต่การทรากำลังดึงนี้จะช่วยในการควบคุมการแตกร้าวของคอนกรีตจากผลกระทบต่างๆ เช่น อุณหภูมิ การหดตัว และมีประโยชน์ในงานคอนกรีตอัดแรงงานสิ่งก่อสร้างเกือบของเหลว เป็นต้น

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงและกำลังอัด ซึ่งอัตราส่วนของกำลังดึงต่อกำลังอัด จะขึ้นอยู่กับระดับของกำลังของคอนกรีต และเมื่อกำลังอัดสูงขึ้น อัตราส่วนระหว่างกำลังดึงต่อกำลังอัดจะต่ำลง

กำลังเฉือน (Shear Strength) การเฉือนเป็นการกระทำของแรงสองแรง ซึ่งมีขนาดเท่ากันและขนานกัน โดยกระทำตรงกันข้ามบนระนาบซึ่งมีระยะห่างกันเล็กน้อย แรงเฉือนมักเกิดขึ้นพร้อมกับแรงดึงและแรงคดเสมอ การทดสอบหาความต้านทานต่อแรงเฉือนในคอนกรีตโดยตรงไม่สะดวก เช่นเดียวกับการทดสอบหาความต้านทานแรงดึง ทั้งนี้ เพราะค่าของแรงคด แรงกด และแรงดึงในแนวทแยงจะเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ผลการทดสอบไม่ถูกต้อง ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของคอนกรีต เช่นเดียวกับค่ากำลังอัด โดยคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์มากและมีส่วนคละของวัสดุผสมดีเยี่ยมให้ค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนสูงกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมหยาบ

แรงยึดเหนี่ยวต่อเหล็กเสริม (Bond Strength) ความต้านทานต่อการลื่นไถลของเหล็กเสริมที่หล่ออยู่ภายในเนื้อคอนกรีต แรงต้านทานนี้เกิดจากการยึดติดกันกับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว จากความเสียดทานระหว่างผิวเหล็กกับคอนกรีต และจากแรงกดที่ข้อมในเหล็กข้ออ้อย

กำลังกระแทก (Impact Strength) คอนกรีตต้องสามารถรับแรงกระแทกได้ดี เช่น คอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มตอก ซึ่งต้องมีความสามารถที่จะทนต่อการกระแทกและดูดซับพลังงานได้เป็นอย่างดี โดยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกระแทกกับกำลังอัดขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวมหยาบ ความชื้นของคอนกรีต ลักษณะของมวลรวม และปริมาณปูนซีเมนต์

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต้องมีการศึกษาในด้านสมบัติเพื่อที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ดังผลงานวิจัยต่อไปนี้

ภากร (2550) ได้ศึกษาสมบัติพื้นฐานของส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนัก โดยทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน เป็นตัวชี้วัดและมีตัวแปรในการศึกษาคือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิในการบ่มร้อน วิธีการให้อุณหภูมิในการบ่มร้อน ความละเอียดของเถ้าหนัก จากการศึกษาพบว่าเถ้าหนักมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เช่นเดียวกับเถ้าลอย และสามารถพัฒนาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนักเพื่อใช้ในการงานคอนกรีตแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอนาคตได้

สายสุนีย์และบุรฉัตร (2553) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมและมอร์ตาร์ของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดยการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการบ่ม อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 0.5 - 2 และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง เท่ากับ 2-3 จากการศึกษาพบว่าเถ้าลอยสามารถใช้เป็นวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ และพบว่าระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเวลาการก่อตัวลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เพิ่มขึ้น สำหรับการทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริก พบว่าส่วนผสมที่เป็นน้ำและวัสดุที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ (Na_2SiO_3 ต่อ NaOH) มีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงกว่าวัสดุของแข็ง (เถ้าลอยและทราย) เมื่อพิจารณาสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุส่วนผสมและมอร์ตาร์ของจีโอโพลิเมอร์สามารถนำไปบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟได้

นลินี (2554) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุทดแทนทรัพยากรดินในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาพบว่าตะกอนดินมาเป็นวัสดุทดแทนในการผลิตบล็อกประสานด้วยอัตราส่วนผสมตะกอนดินต่อปูนซีเมนต์เป็น 3 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก พบว่าอิฐบล็อกประสานจากตะกอนดินสามารถรับกำลังอัดได้ค่า 2.66 MPa และการผลิตกระถางตะกอนดินอัดสำหรับปลูกต้นไม้ด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยระบบไฮดรอลิก ซึ่งช่วยลด

การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตกระดาษดินเผาได้ถึง 5,900 kg CO₂/Ton product ลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงและเพิ่มสมบัติพิเศษให้เป็นกระดาษตะกอนดินอัดสองชั้น เพื่อให้มีปุ๋ยละลายออกมอย่างช้าๆ

ธนกรและธีรวัฒน์ (2554) ศึกษาถึงสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ โดยการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา ใช้อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง ทำการแปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 0.40 0.50 0.60 และ 0.70 พบว่า อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 - 2.0 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดที่สูงสุด ซึ่งมีค่ากำลังอัดระหว่าง 240 – 940 กก/ซม². และการแทนที่ซีโอไลต์ในเถ้าลอยร้อยละ 60 มีความเหมาะสมเหมาะแก่การนำไปใช้งาน

สรารุณี (2551) ศึกษาการเกิดสนิมเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยศึกษาอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.7 - 1.6 โดยน้ำหนัก การกัดกร่อนของเหล็กเสริม กำลังการยึดเหนี่ยวและพฤติกรรมการรับแรงคด

Chindaprasirt *et al.* (2007) จากการศึกษาสมบัติพื้นฐานการทำงานได้และกำลังของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย พบว่าการทำงานได้อยู่ในช่วง $110 \pm 5\%$ - $135 \pm 5\%$ และกำลังอัดอยู่ที่ 10-65 MPa จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยมวลของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กำลังอัดที่สูงของจีโอโพลิเมอร์ โดยมีอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.67 - 1.0 กำลังอัดที่ดีที่สุดจะต้องมีการบ่มที่ระยะเวลาก่อนการบ่ม 1 ชั่วโมง อุณหภูมิบ่มต่ำสุด 75 °C ใช้ระยะเวลาไม่น้อยกว่า 2 วัน

Swanepoel *et al.* (2002) ศึกษาการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมดินขาวเผา โดยผสมและกระตุ้นด้วยสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูง ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำเป็นส่วนประกอบแล้วนำตัวอย่างที่ได้เข้าบ่มร้อนในตู้อบเพื่อเร่งปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ในช่วง

เวลาที่แตกต่างกัน คือ 6 24 48 และ 72 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะให้กำลังอัดได้สูงสุด คือ ใช้อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

Ahmari and Zhang (2012) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากแร่ทองแดงกลับมาใช้ใหม่ เพื่อผลิตเป็นอิฐที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้กระบวนการจีโอโพลิเมอร์ ศึกษาในส่วนปัจจัยหลัก คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 และ 15 โมลาร์ ปริมาณน้ำ (8-18%) กำลังอัด (0-35 MPa) และอุณหภูมิที่ใช้บ่ม (60-120 องศาเซลเซียส) พบว่าสามารถนำแร่ทองแดงมาผลิตเป็นอิฐที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้

Temuujin *et al.* (2010) พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะเปลี่ยนแปลงตามความละเอียดมวลรวม กำลังอัด และค่า Young's Modulus ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยอยู่ที่ 60 MPa และ 2.27 GPa เมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวมไปถึงร้อยละ 50 กำลังอัดยังคงเท่าเดิม

Nisa (2008) ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมจากตะกอนในการผลิตน้ำประปา เถ้าลอยจากถ่านหินและเบนโทไนท์ สำหรับใช้เป็นวัสดุกันซึมทางเลือกในหลุมฝังกลบขยะ โดยศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนดินในการผลิตน้ำประปา เถ้าลอยจากถ่านหิน และดินเหนียว อัตราส่วนผสมของตะกอนในการผลิตน้ำประปา เถ้าลอยจากถ่านหิน และเบนโทไนท์ 3 อัตราส่วน คือ 60:30:10 70:20:10 และ 80:10:10 จากการศึกษาพบว่าตะกอนในการผลิตน้ำประปามีคุณสมบัติใกล้เคียงกับดินเหนียวสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุกันซึมทางเลือกในหลุมฝังกลบขยะ สำหรับเถ้าลอยจากถ่านหินสามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติการรับแรงและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของส่วนผสมวัสดุกันซึมทางเลือก อีกทั้งพบว่าค่าความสามารถในการรับแรงของอัตราส่วน 60:30:10 (2.94 ksc) สูงกว่าค่ามาตรฐาน (2.04 ksc) และสูงกว่าความสามารถในการรับแรงของอัตราส่วน 70:20:10 (1.26 ksc) และ 80:10:10 (0.79 ksc) ตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วนที่ใช้เป็นวัสดุกันซึมในหลุมฝังกลบขยะที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราส่วน 60:30:10

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบและสารเคมี

1. วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

- 1.1 ถั่วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยมีผลวิเคราะห์ตามตารางที่ 5
- 1.2 ตะกอนดินจากโรงไฟฟ้าแก่งคอย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี โดยมีผลการวิเคราะห์ตามตารางผนวกที่ 1
- 1.3 ทราย มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ทรายที่มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ 0.15 และน้อยกว่า 0.15 มิลลิเมตร
- 1.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, Commercial grade, AGC Chemicals, Thailand)
- 1.5 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, Carlo Erba, Italy)
- 1.6 โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งมีองค์ประกอบของ Na_2O 15.32% , SiO_2 32.87% และ H_2O 51.81% โดยน้ำหนัก
- 1.7 ปูนซีเมนต์ประเภท 1
- 1.8 น้ำมันสำหรับทาแบบ
- 1.9 น้ำปราศจากไอออน

อุปกรณ์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

- 1.1 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ขนาด 3,000 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม
- 1.2 เครื่องทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัด (Compressive testing machine)
- 1.3 เครื่องอัดบล็อกประสานไฮดรอลิกชนิดไฟฟ้า
- 1.4 แบบหล่อตัวอย่างทองเหลืองรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร
- 1.5 เครื่องผสม ขนาด 2.5 ลิตร ยี่ห้อ OTTO รุ่น HM-009

- 1.6 Hot air oven ยี่ห้อ JSR รุ่น JSOF-100
- 1.7 เครื่องแก้ว
- 1.8 ขวดปริมาตร (Volumetric Flash) ขนาด 1,000 มล.
- 1.9 ตะแกรงร่อนเบอร์ 4
- 1.10 พลาสติกสำหรับไว้ห่อ

วิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตจีโอโพลิเมอร์คือ ถ้ำลอยจากการเผาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ประเภทถ่านหินลิกไนต์ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีตามตารางที่ 5 และตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปาจากโรงไฟฟ้าแก่งคอย นำตะกอนดินมาทำให้แห้งและลดขนาดตะกอนดินจากนั้น นำมาร่อนจะได้ตะกอนดินที่ละเอียด ส่วนทรายใช้ทรายแม่น้ำละเอียดสำหรับก่อสร้าง นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ผสมทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนนำมาใช้

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
Na ₂ O	0.87
MgO	2.37
Al ₂ O ₃	18.46
SiO ₂	35.35
P ₂ O ₅	0.21
SO ₃	4.01
K ₂ O	2.77
CaO	19.81
TiO ₂	0.44
MnO ₂	0.19

ตารางที่ 5 (ต่อ)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
Fe ₂ O ₃	15.51
LOI	0

ที่มา : ผลการวิเคราะห์ธาตุลอย (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง, 2555)

2. การขึ้นรูปตัวอย่างในแบบหล่อ

2.1 ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์

การผลิตจีโอโพลิเมอร์ใช้แบบหล่อขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร ทาน้ำให้ทั่วแบบหล่อเพื่อให้ง่ายในการแกะออกจากแบบหล่อและเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ผสมทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนนำมาใช้ในส่วนการเตรียมจีโอโพลิเมอร์เริ่มต้นด้วยนำธาตุลอยใส่ในเครื่องผสมทำการผสมธาตุลอยกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนแล้วเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติมทรายหรือตะกอนดินลงไปผสมต่อจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทจีโอโพลิเมอร์เข้าแบบหล่อแล้วหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติก ทิ้งจีโอโพลิเมอร์ไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง ก่อนนำจีโอโพลิเมอร์เข้าสู่อบตามอุณหภูมิที่ต้องการอบด้วย hot air oven ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำจีโอโพลิเมอร์ออกจากตู้อบแกะก้อนจีโอโพลิเมอร์ออกจากแบบหล่อ ดังภาพที่ 15-18



ภาพที่ 15 ขั้นตอนการผสมตะกอนดินในจีโอโพลิเมอร์



ภาพที่ 16 ขั้นตอนการเทตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ลงในแบบหล่อ



ภาพที่ 17 ขั้นตอนการห่อด้วยพลาสติกก่อนนำเข้าตู้อบ



ภาพที่ 18 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์สำหรับทดสอบกำลังอัด

2.2 บล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์

ขึ้นรูปบล็อกประสานด้วยระบบไฮดรอลิก สามารถอัดขึ้นรูปได้ครั้งละ 2 ก้อน ตัวโมล เป็นเหล็กหนาขนาดกว้าง 12.5 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร น้ำส่วนผสมที่เตรียมไว้คือ ทราย ตะกอนดินและน้ำ มาคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันดี เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้วนำไปอัดขึ้นรูปบล็อกประสานด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก นำมาผึ่งให้แห้ง จากนั้นนำสารละลายต่าง คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาฉีดพรมให้เปียกชุ่ม หุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกก่อนนำไปอบด้วย hot air oven ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ดังภาพที่ 19-23



ภาพที่ 19 ส่วนผสมบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์



ภาพที่ 20 ขั้นตอนการผสมบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์



ภาพที่ 21 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์



ภาพที่ 22 การผสมอัตราส่วนสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 1 ให้ทั่วบล็อกประสานอิโพลีเมอร์



ภาพที่ 23 ตัวอย่างบล็อกประสานอิโพลีเมอร์หลังจากการป่มและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

3. อัตราส่วนการผสมของตัวอย่าง

ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์โดยผสมเถ้าลอยกับสารละลายต่างในอัตราส่วนการผสม 1 : 0.45 โดยน้ำหนัก สารละลายต่างที่ใช้คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 1 : 1 โดยน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 65 °C เวลา 48 ชม. (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009)

สูตรการผสมตัวอย่างต่างๆ ตามที่กำหนดคือ

3.1 ตัวอย่างที่ใช้สารละลายต่างที่ต่างกัน

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

เถ้าลอย:ทราย (g)	สารละลายต่าง (alkali activator) (g)	
	Na ₂ SiO ₃ : NaOH	Na ₂ SiO ₃ : KOH
100 : 135	22.5 : 22.5	22.5 : 22.5

จากตารางที่ 6 เป็นการผสมสัดส่วน fly ash : alkali activator (Na₂SiO₃ : NaOH หรือ Na₂SiO₃ : KOH) เป็น 1 : 0.45 โดยน้ำหนัก และผสมทราย 135 กรัม อัตราส่วนในการผสมสารละลายต่าง คือ 1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต อย่างละ 22.5 กรัม บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เวลา 48 ชม.

3.2 ตัวอย่างอุณหภูมิที่อบที่ต่างกัน

ผสม fly ash : alkali activator (NaOH) เป็น 1 : 0.45 โดยน้ำหนัก และส่วนผสมทราย 200 กรัม น้ำ 50 กรัม อัตราส่วนในการผสม Na₂SiO₃ : NaOH เป็น 1 : 1 โดยน้ำหนัก เมื่อผสมเสร็จแล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องซึ่งอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.3 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมทราย

จากตารางที่ 7 ผสม fly ash : alkali activator (NaOH) เป็น 1 : 0.45 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนในการผสม Na_2SiO_3 : NaOH เป็น 1 : 1 โดยน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ตารางที่ 7 สัดส่วนในการผสมทรายและน้ำเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม

ส่วนผสมทราย (g)	น้ำ (g)	fly ash (g)	Na_2SiO_3 (g)	NaOH (g)
0	0	100	22.5	22.5
135	0	100	22.5	22.5
200	50	100	22.5	22.5
275	100	100	22.5	22.5

3.4 ตัวอย่างที่ใช้สัดส่วนเถ้าลอยและสารละลายต่างในอัตราส่วนที่ต่างกัน

จากงานวิจัยของฉิมชานดา (2552) พบว่าสามารถนำตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้เป็นวัตถุดิบแทนที่ปูนซีเมนต์และผลิตภัณฑ์ประสาน ดังนั้นจึงนำตะกอนดินร้อยละ 40 และตะกอนดินทดแทนทรายร้อยละ 30 ผสมในจีโอโพลิเมอร์ นำมาเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนในการผสมสารละลายต่าง คือ ผสม fly ash : alkali activator (NaOH) เป็น 1 : 0.7 โดยน้ำหนัก และ fly ash : alkali activator (NaOH) เป็น 1 : 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนในการผสม Na_2SiO_3 : NaOH เป็น 1 : 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.5 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมตะกอนดิน

ผสม fly ash : alkali activator (NaOH) เป็น 1 : 0.45 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนในการผสม Na_2SiO_3 : NaOH เป็น 1 : 1 โดยน้ำหนัก ผสมตะกอนดินลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 ของเถ้าลอย บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.6 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมตะกอนดินและทราย

ผสม fly ash : alkali activator (NaOH) เป็น 1 : 0.45 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนในการผสม Na_2SiO_3 : NaOH เป็น 1 : 1 โดยน้ำหนัก ผสมตะกอนดินและทรายลงไปอัตราส่วนทดแทนทรายร้อยละ 10 20 และ 30 ของทราย ซึ่งมีอัตราส่วนในการผสมเดิมมีปริมาณทรายที่ 135 กรัม บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

4. บล็อกประสาน

นำตัวอย่างที่สามารถให้กำลังอัดมากสุดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดิน และจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทราย ผสม fly ash : alkali activator (NaOH) เป็น 1 : 0.45 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนในการผสม Na_2SiO_3 : NaOH เป็น 1 : 1 โดยน้ำหนัก ก่อนที่จะนำบล็อกประสานมาทดสอบต้องนำบล็อกประสานมาหล่อปูนปลาสเตอร์บริเวณช่องว่างให้เต็มพื้นที่จากนั้นรอให้แห้ง

5. วิธีการทดสอบ

5.1 นำก้อนตัวอย่างวางกึ่งกลางของแท่นทดสอบ ให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด

5.2 เปิดเครื่องทดสอบโดยในการทดสอบนี้จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอ อัตราที่ใช้ คือ 1.4 - 3.4 กก./ตร.ซม./วินาที

5.3 กดก้อนตัวอย่างจนแตก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้

5.4 นำค่าน้ำหนัก และพื้นที่หน้าตัดที่ได้มาหาค่ากำลังอัดประลัย

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

หน่วยที่ใช้ทั่วไป คือ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) หรือนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2)

ผลและวิจารณ์

1. ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากการเตรียม

ภาพที่ 24 ลักษณะของเถ้าลอยลิกไนต์มีสีเทา มีความละเอียดสม่ำเสมอ จากตารางที่ 5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยมีซิลิกา และอลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีค่า SiO_2 อยู่ร้อยละ 35.35 Al_2O_3 อยู่ร้อยละ 18.46 และ Fe_2O_3 อยู่ร้อยละ 15.51 โดยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีผลรวมของ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 อยู่ในช่วงร้อยละ 50 - 70 และมี CaO มากกว่าร้อยละ 10 จึงจัดเป็นเถ้าลอยชนิด C



ภาพที่ 24 เถ้าลอยจาก โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ตะกอนดินที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงไฟฟ้าแก่งคอย 2 เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างของแข็งแขวนลอยที่อยู่ในน้ำดิบกับสารเคมีที่เติมลงไปในการสร้างตะกอนลักษณะของตะกอนเป็นสีน้ำตาล เนื้อมีความละเอียดคงภาพที่ 25 และจากตารางผนวกที่ 1 ตารางแสดงการวิเคราะห์ตะกอนของโรงไฟฟ้าแก่งคอยเป็นชนิด Non-hazardous waste จากการทดสอบตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม แสดงถึงคุณสมบัติที่ไม่มีความเป็นพิษของตะกอนดิน โดยสามารถนำมาใช้ได้



ภาพที่ 25 ตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำของโรงไฟฟ้าแก่งคอย 2 จังหวัดสระบุรี

2. ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ชนิดต่างๆ

เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำไปทดสอบกำลังอัดโดยเครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive Testing Machine) ตามมาตรฐาน ASTM C109 จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ โดยผลการทดสอบค่ากำลังอัดเป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง

2.1 สารละลายด่างที่เหมาะสม : กรณีสึกษา (1) NaOH (2) KOH

อัตราส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อเลือกสารละลายด่าง ในการทำการทดลอง สารละลายด่าง โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน 1 : 1 โดยน้ำหนัก สารละลายด่าง โซเดียมซิลิเกตต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยการผสมแล้วลอมต่อ

สารละลายต่าง เป็น 1 : 0.45 โดยน้ำหนัก และผสมทราย 135 กรัม อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 8 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้สารละลายต่างต่างกันหลังบ่มตามช่วงเวลา

สารละลายต่าง (alkali activator)	การทดสอบกำลังอัดหลังการบ่ม (ksc)		
	3 วัน	7 วัน	14 วัน
Na ₂ SiO ₃ : NaOH	385	395	442
Na ₂ SiO ₃ : KOH	318	351	410

จากตารางที่ 8 จะเห็นว่าเมื่อทำการทดสอบกำลังอัดที่ผสมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กำลังอัดได้ค่ามากที่สุดที่ 14 วัน รองลงมาคือที่ 7 วัน และ 3 วัน ตามลำดับ กำลังอัดที่ 3 7 14 วัน พบว่าสารละลายต่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้กำลังอัด 385 395 442 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนสารละลายต่างโซเดียมซิลิเกตต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ได้กำลังอัด 318 351 410 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ การใช้สารละลายทั้งโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่ากำลังอัดเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) เกิดการจับกับซิลิกาและอลูมินา ส่งผลให้สามารถรับแรงอัดได้

การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้กำลังอัดที่สูงกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเดียวกัน เนื่องจากโซเดียมไอออนมีขนาดเล็กกว่าโพแทสเซียมไอออน ดังนั้นโซเดียมจึงมีค่าความแข็งแรงจากการเกิดพันธะสูงกว่าโพแทสเซียม และมีการพัฒนากำลังอัดที่เร็วกว่าเมื่อใช้ระยะเวลาที่เท่ากัน เมื่อดูถึงความคุ้มทุนได้เลือกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป เนื่องจากราคาถูกกว่าและในการเตรียมสารละลายต่างที่ความเข้มข้นเดียวกันโซเดียมไฮดรอกไซด์จะให้ใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

2.2 อุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่ม : กรณีศึกษา (1) อุณหภูมิห้อง (2) อุณหภูมิตู้อบ

อัตราส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อเลือกอุณหภูมิ สารละลายต่างที่ใช้เป็นโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน 1 : 1 โดยน้ำหนัก ผสมแล้วลอยกับสารละลายต่าง เป็น 1 : 0.45 โดยน้ำหนัก และใส่ทราย 200 กรัม น้ำ 50 กรัม

ตารางที่ 9 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มในอุณหภูมิและระยะเวลาบ่มต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	การทดสอบกำลังอัดหลังการบ่ม (ksc)		
	3 วัน	7 วัน	14 วัน
35 (อุณหภูมิห้อง)	2	1.8	7.4
65 (อุณหภูมิตู้อบ)	105	103	100

จีโอโพลิเมอร์ที่บ่มในอุณหภูมิห้อง คือ 35 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิตู้อบ คือ 65 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบกำลังอัดหลังการบ่ม 3 7 14 วัน พบว่าอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) กำลังอัด 2 1.8 7.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิตู้อบ) กำลังอัด 105 103 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ผลจากการทดลองในตารางที่ 9 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการบ่มคือ 65 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้องแล้วพบว่ากำลังอัดเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ตามตารางที่ 9 โดยเป็นผลมาจากการใช้สารละลายต่าง NaOH ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ สามารถชะละลาย Si และ Al ได้ออนได้มาก (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009) ปริมาณของการชะละลายซึ่งขึ้นกับความเข้มข้น NaOH และเวลาที่ใช้ในการชะละลาย จะมีผลต่อกำลังอัด รวมทั้งการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการบ่มส่งผลต่อการเพิ่มกำลังอัดเนื่องจากความร้อนช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นได้เร็วและสมบูรณ์กว่า อุณหภูมิห้อง สอดคล้องกับ (Villa *et al.*, 2011) เมื่อใช้ระยะเวลาที่เท่ากัน ความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น

สาเหตุที่กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มในอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดมากกว่าอุณหภูมิห้อง เนื่องจากความร้อนจะช่วยเร่งปฏิกิริยาและการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ทำให้ได้กำลังอัดที่สูงกว่า ส่วนการผสมน้ำลงไป 50 กรัม เพื่อให้สามารถเทเข้าแบบได้ง่าย แต่เมื่อใช้

อุณหภูมิที่สูงทำให้น้ำระเหยออกมากกว่าที่ใช้อุณหภูมิห้องและการที่กำลังอัดได้ค่าที่น้อยทั้งการบ่มด้วยอุณหภูมิ 65 และอุณหภูมิห้องอาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสม 50 กรัมซึ่งเหมือนกับเป็นการปรับความเข้มข้นของ NaOH ให้น้อยลง

2.3 ผลกระทบของการเติมทรายเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์ปกติ

อัตราส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์เพื่อเลือกปริมาณทรายที่เหมาะสม สารละลายต่างๆที่ใช้โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน 1 : 1 โดยน้ำหนัก ผสมแก้าลอยกับสารละลายต่าง เป็น 1 : 0.45 โดยน้ำหนัก ผสมทราย 135 200 และ 275 กรัม น้ำ 50 และ 100 กรัม

ส่วนผสมของทรายที่เหมาะสมคือ 135 กรัม ซึ่งมีการพัฒนากำลังอัดเร็วกว่าและสูงกว่า ตามตารางที่ 10 การเพิ่มทรายช่วยเพิ่มกำลังอัด แต่การเพิ่มทรายมากเกินไปทำให้ต้องเพิ่มน้ำในการขึ้นรูปซึ่งปริมาณน้ำมากขึ้นทำให้กำลังอัดลดลง เช่นเดียวกับการเพิ่มทรายโดยไม่มีการเพิ่มสารละลายต่าง (Temuujin *et al.*, 2010)

ตารางที่ 10 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนการผสมทรายต่างกัน

ส่วนผสมทราย:น้ำ (g/g)	การทดสอบกำลังอัดหลังการบ่ม (ksc)		
	3 วัน	7 วัน	14 วัน
0 : 0	240	290	336
135 : 0	385	395	442
200 : 50	105	103	100
275 : 100	5	8	7.6

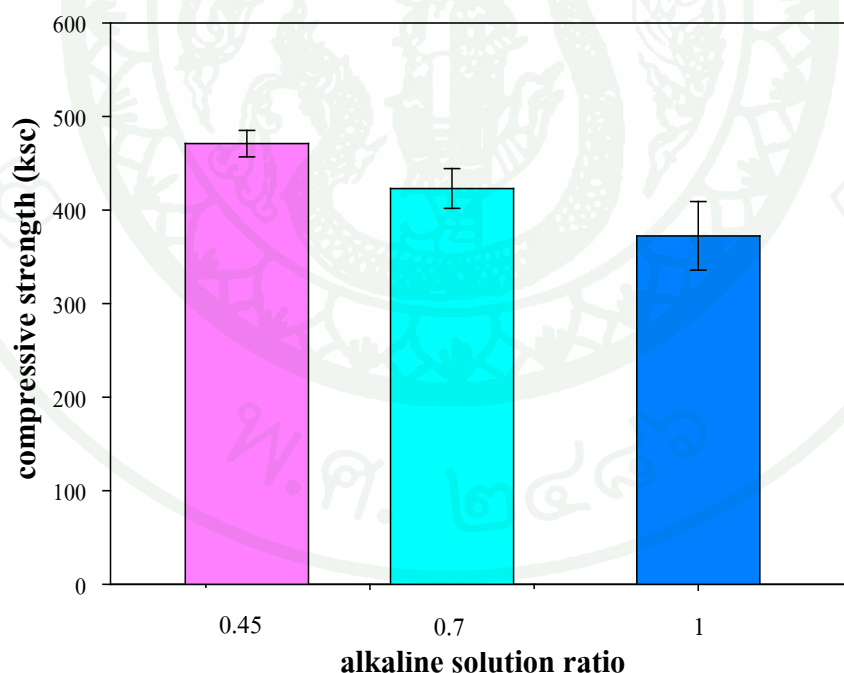
จากตารางที่ 10 จีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมทรายที่แตกต่างกัน ทดสอบกำลังอัดที่ 3 7 และ 14 วัน พบว่า จีโอโพลิเมอร์ที่ผสมทราย 135 กรัม ได้กำลังอัด 385 395 และ 442 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จีโอโพลิเมอร์ผสมทราย 200 กรัมและน้ำ 50 กรัม ได้กำลังอัด 105 103 และ 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จีโอโพลิเมอร์ผสมทราย 275 กรัมและน้ำ 100 กรัม ได้กำลังอัด 5 8 และ 7.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

จีโอโพลิเมอร์ที่ผสมน้ำและไม่ผสมน้ำแตกต่างกันจะเห็นว่าส่วนผสมของน้ำ 100 กรัม จะให้กำลังอัดที่น้อยสุด เนื่องมาจากตัวอย่างจะมีลักษณะที่ขึ้นอยู่ ส่วนผสมของน้ำ 50 กรัม ค่ากำลังอัดที่ได้ก็จะได้ต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสมน้ำซึ่งมีค่ากำลังอัดที่ดีที่สุด

3. การเปรียบเทียบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนสารละลายต่างที่ต่างกัน

3.1 อัตราส่วนเถ้าลอยและตะกอนดินต่อสารละลายต่าง

จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 40 ของเถ้าลอย นำมาผสมเถ้าลอยกับสารละลายต่าง ซึ่งสารละลายต่างที่ใช้คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนเถ้าลอยและตะกอนดินต่อสารละลายต่าง นำมาเปลี่ยนแปลงเป็น 1 : 0.45 1 : 0.7 และ 1 : 1 โดยน้ำหนัก



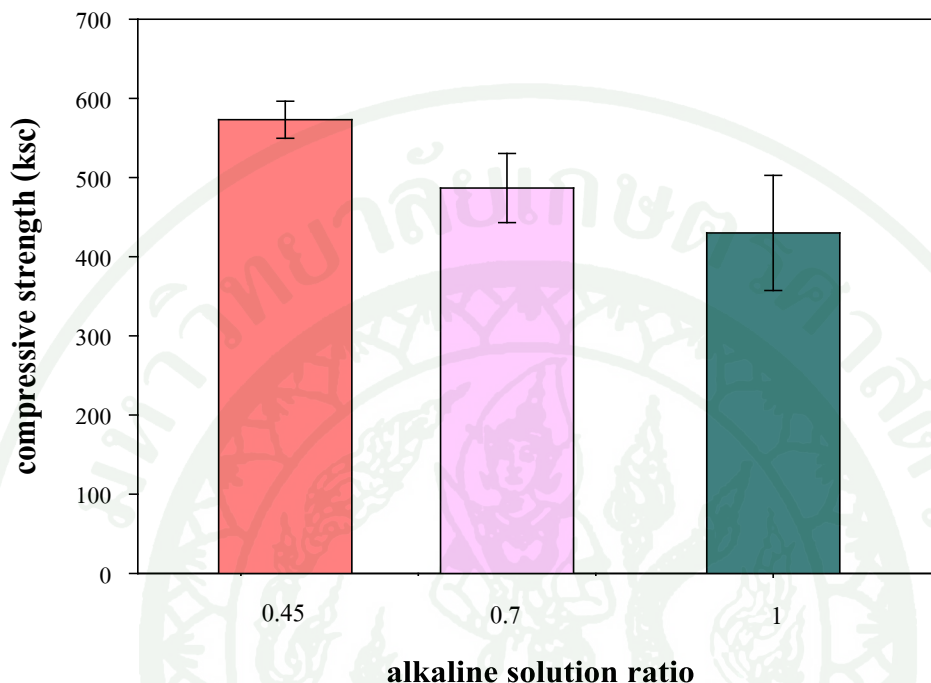
ภาพที่ 26 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินที่มีอัตราส่วนการผสมสารละลายต่างที่ต่างกัน

ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มสารละลายต่างมากขึ้นทำให้กำลังอัดต่ำลง จากภาพที่ 26 อัตราส่วนจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยและตะกอนดินต่อสารละลายต่าง 0.45 0.7 และ 1 โดยน้ำหนัก กำลังอัดได้ 471 423 และ 372 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

สาเหตุที่ค่ากำลังอัดลดลงเมื่อปริมาณของเหลวในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น จีโอโพลิเมอร์มีโพรงอากาศอยู่ในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ สามารถสังเกตเห็นรอยร้าวและฟองอากาศได้จากด้านบนผิวของจีโอโพลิเมอร์ และเมื่อนำไปอบด้วยความร้อนอาจทำให้เกิดการระเหยของน้ำออกมามาก เนื่องจากปริมาณของสารที่เพิ่มมากขึ้นก็เหมือนกับการเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไป อีกทั้งการเพิ่มอัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลายต่างที่ 1 : 0.7 และ 1 : 1 โดยน้ำหนัก จะมีลักษณะความเหลวเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง 1 : 1 โดยน้ำหนัก จะมีความเหลวมากกว่าอัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง 1 : 0.7 โดยน้ำหนัก และการแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์ก่อนเข้าสู่อบจะใช้ระยะเวลานานกว่า ส่งผลให้กำลังอัดลดลง

3.2 อัตราส่วนเถ้าลอยและตะกอนดินร่วมกับทรายต่อสารละลายต่าง

จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทรายด้วยการผสมทรายร้อยละ 70 ตะกอนดินร้อยละ 30 ของทราย นำมาผสมเถ้าลอยกับสารละลายต่าง ซึ่งสารละลายต่างที่ใช้คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนเถ้าลอยและตะกอนดินต่อสารละลายต่าง นำมาเปลี่ยนแปลงเป็น 1 : 0.45 1 : 0.7 และ 1 : 1 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 27 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทรายที่มีอัตราส่วนการผสมสารละลายต่างที่ต่างกัน

ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มสารละลายต่างมากขึ้นทำให้กำลังอัดต่ำลง จากภาพที่ 27 อัตราส่วนจีโอโพลิเมอร์แก่ลอมและตะกอนดินร่วมกับทรายต่อสารละลายต่าง 0.45 0.7 และ 1 โดยน้ำหนัก ได้กำลังอัด 573 469 และ 430 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วันแนวโน้มกำลังอัดลดลงเช่นเดียวกับการผสมแก่ลอมและตะกอนดินต่อสารละลายต่าง ปริมาณของเหลวในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นส่งผลถึงกำลังอัดที่จะได้น้อยลง

ผลวิจัยไปในแนวเดียวกันในทุกอัตราส่วนผสม คือ จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอน และ จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนร่วมกับทราย เนื่องจากใช้อัตราส่วนผสมสารละลายต่างต่อแก่ลอม จาก 0.45 เป็น 0.7 และ 1 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมมีความเหลวขึ้น การทำปฏิกิริยาระหว่างต่างกับแก่ลอม จะไม่สมบูรณ์ซึ่งหลังการแข็งตัวแล้วเหลือเป็นโพรงภายในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ ส่งผลถึงกำลังอัดที่ได้จะลดลงด้วย

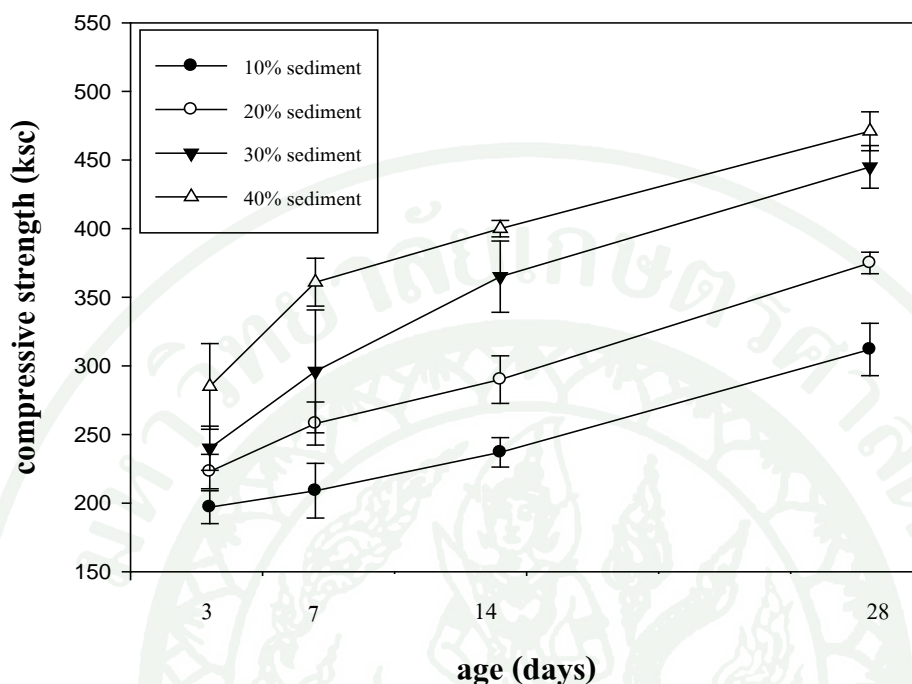
4. ผลของอัตราส่วนของตะกอนดินต่อการทดสอบกำลังอัด

จีโอโพลิเมอร์เติมตะกอนดินในอัตราส่วนต่างๆ โดยการเติมตะกอนดินในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 ของถ้ำลอย

ผลการทดลองจากตารางที่ 11 จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดิน เมื่อทดสอบกำลังอัดที่ 3 7 14 และ 28 วัน พบว่าค่าที่ได้ส่วนผสมตะกอนดินในอัตราส่วนร้อยละ 10 ได้ค่า 197 209 237 และ 312 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนผสมตะกอนดินในอัตราส่วนร้อยละ 20 ได้ค่า 223 258 290 และ 375 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนผสมตะกอนดินในอัตราส่วนร้อยละ 30 ได้ค่า 240 296 365 และ 445 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และเมื่อผสมตะกอนดินในอัตราส่วนร้อยละ 40 ได้ค่า 285 361 400 และ 471 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 11 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนการผสมตะกอนดินที่ต่างกัน

ส่วนผสมตะกอนดิน (ร้อยละของถ้ำลอย)	การทดสอบกำลังอัดหลังการบ่ม (ksc)			
	3วัน	7วัน	14วัน	28วัน
10	197	209	237	312
20	223	258	290	375
30	240	296	365	445
40	285	361	400	471



ภาพที่ 28 ผลของอัตราส่วนการผสมตะกอนดินและระยะเวลาในการบ่มต่อกำลังอัด

จากภาพที่ 28 ผสมตะกอนดินได้สูงสุดที่ร้อยละ 40 จะไม่สามารถเติมตะกอนดินได้มากกว่านี้ เนื่องจากใช้อัตราส่วนผสมแก้ลดยกกับสารละลายต่าง คือ 1 : 0.45 โดยน้ำหนัก เมื่อใส่ตะกอนดินลงไป ตะกอนดินจะดูดน้ำในส่วนผสมทำให้ส่วนผสมชื้นขึ้น

อัตราส่วนผสมการเติมตะกอนดินที่เพิ่มมากขึ้นในจีโอโพลิเมอร์ช่วยเพิ่มกำลังอัดให้มากขึ้นตามไปด้วย กำลังอัดเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม โดยพบว่าเมื่อเติมตะกอนดินร้อยละ 40 ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีความสามารถในการรับแรงอัด 471 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

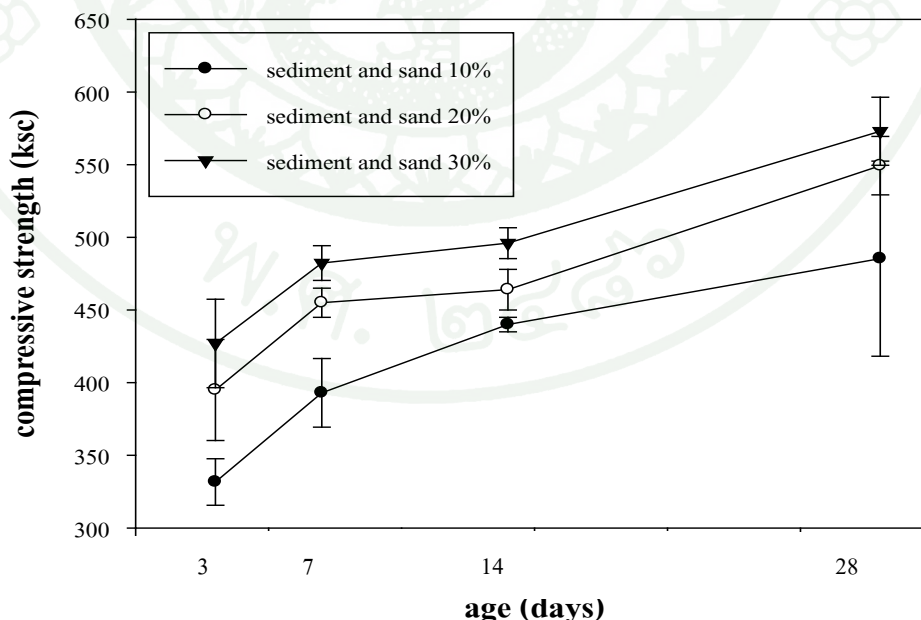
5. ผลของอัตราส่วนของตะกอนดินและทรายต่อการทดสอบกำลังอัด

จีโอโพลิเมอร์ตะกอนดินและทราย ในอัตราส่วนทดแทนทราย ร้อยละ 10 20 และ 30 ของทรายซึ่งมีอัตราส่วนในการผสมเดิมมีปริมาตรที่ 135 กรัม ต่อแก้ลดย 100 กรัม การใช้ตะกอนดินร่วมกับทราย

ผลการทดลองจากตารางที่ 12 จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินกับทราย เมื่อทดสอบกำลังอัด ที่ 3 7 14 และ 28 วัน พบว่าตะกอนดินผสมร่วมกับทรายร้อยละ 10 ของทราย ได้ค่า 325 393 440 และ 485 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนผสมตะกอนดินร่วมกับทรายในอัตราส่วน ร้อยละ 20 ของทราย ได้ค่า 395 445 464 และ 549 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนผสมตะกอนดินร่วมกับทรายในอัตราส่วนร้อยละ 30 ของทราย ได้ค่า 427 482 496 และ 573 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 12 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่มีการผสมตะกอนดินและทราย

ส่วนผสมตะกอนดิน (ร้อยละของทราย)	ตะกอนดิน+ ทราย (%)	การทดสอบกำลังอัดหลังการบ่ม (ksc)			
		3วัน	7วัน	14วัน	28วัน
10	10+90	331	393	440	485
20	20+80	395	455	464	549
30	30+70	427	482	496	573



ภาพที่ 29 ผลของอัตราส่วนการผสมตะกอนดินร่วมกับทรายและระยะเวลาในการบ่มต่อกำลังอัด

จากภาพที่ 29 อัตราส่วนผสมการเติมตะกอนดินร่วมกับทราย โดยการนำตะกอนดินมาแทนที่ทรายเมื่อเพิ่มมากขึ้นทำให้กำลังอัดสูงขึ้นตามไปด้วยคือ กำลังอัดสูงสุดเมื่ออัตราส่วนตะกอนดินร้อยละ 30 และทรายร้อยละ 70 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีกำลังอัด 573 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มมากขึ้นทำให้มีกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นด้วยในทุกอัตราส่วน

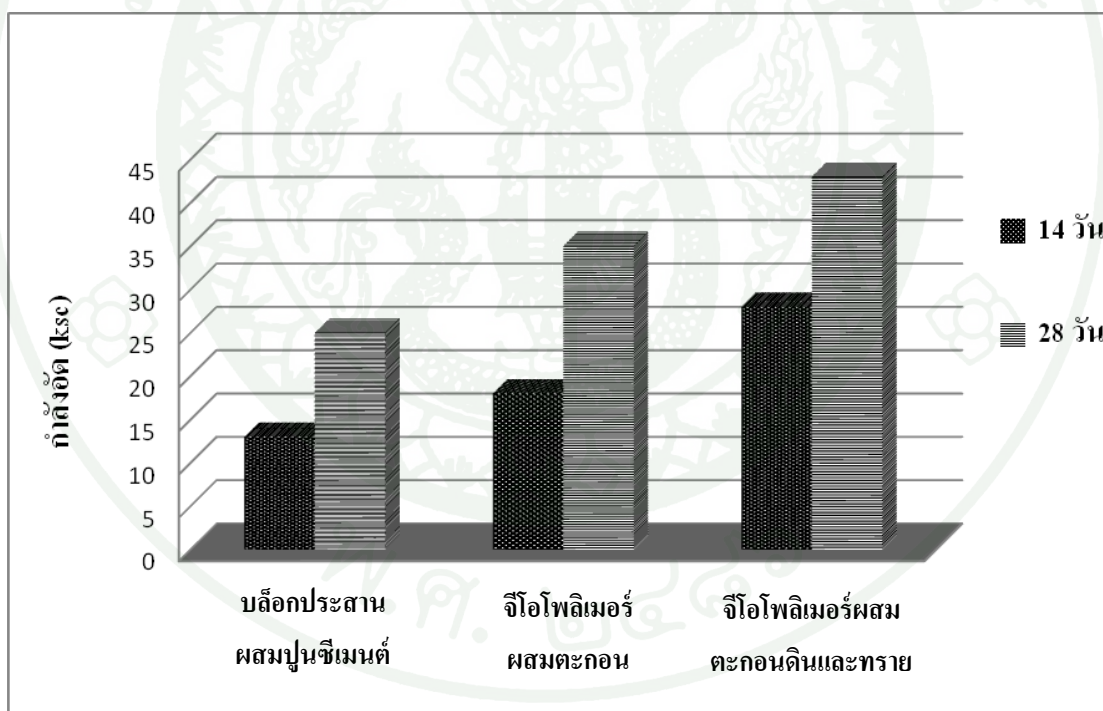
สาเหตุที่จีโอโพลิเมอร์ที่เติมตะกอนดินและการเติมตะกอนดินร่วมกับทรายได้ผลการทดสอบกำลังอัดสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดจีโอโพลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินา ซึ่งตะกอนดินมีซิลิกาซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของแร่ปฐมภูมิ มีความสัมพันธ์อนุภาคทรายแป้งที่อยู่ในตะกอนและอะลูมินัมเป็นองค์ประกอบสำคัญในแร่อะลูมิโนซิลิเกต นอกจากนี้ปริมาณอะลูมินัมในตะกอนอาจเป็นผลมาจากการตกค้างของสารเคมีซึ่งมีอะลูมินัมเป็นองค์ประกอบ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ (บุญฤทธิ์, 2550) ที่พบว่า กำลังอัดที่ได้จากการแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปรายร้อยละ 50 กำลังอัดยังอยู่ในช่วงที่ดี (300 - 500 ksc) นอกจากนี้การเติมตะกอนดินร่วมกับทราย ตะกอนที่มีขนาดเล็กจะไปอุดโพรงที่เป็นช่องว่างของจีโอโพลิเมอร์ทำให้เกิดความแข็งแรงเช่นเดียวกับการผสมบล็อกคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนผงยางสองขนาดผสมกัน (วีรยา, 2554)

6. ผลการทดสอบบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์

ผลการทดสอบเบื้องต้นของตัวอย่างที่สามารถให้กำลังอัดมากที่สุด คือ การเติมตะกอนร้อยละ 40 ของเถ้าลอย และการเติมตะกอนร่วมกับทรายร้อยละ 30 ของทราย ใช้ fly ash : alkali activator (NaOH) เป็น 1 : 0.45 โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปด้วยระบบไฮดรอลิก จะสังเกตได้ว่าบล็อกประสานผสมปูนซีเมนต์จะมีสีที่อ่อนกว่าบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากสีของบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์ที่ได้นั้นมาจากสีของเถ้าลอย ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ตัวอย่างบล็อกประสานผสมปูนซีเมนต์และบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์



ภาพที่ 31 กำลังอัดของบล็อกประสานหลังการบ่มเป็นเวลา 14 และ 28 วัน

จากภาพที่ 31 ผลการทดสอบกำลังอัด ของบล็อกประสานที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ บล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินและบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินและทราย หลังการบ่ม 14 และ 28 วัน พบว่า หลังการบ่ม 28 วัน กำลังอัดของบล็อกประสานมีค่า 25 35 และ 43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ในระยะเวลาการบ่มที่เท่ากันบล็อกประสาน

จีโอโพลิเมอร์เพิ่มกำลังอัดได้เร็วและกำลังอัดบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินและทรายให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นแนวทางหนึ่งเพื่อจัดการของเสียอุตสาหกรรม โดยการใช้ประโยชน์จากของเสีย (Waste Utilization) ได้ศึกษาตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำของโรงไฟฟ้าแก่งคอย 2 ผสมรวมกับการทำจีโอโพลิเมอร์

1. การทดลองเบื้องต้น

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง ได้แก่ ชนิดสารละลายต่าง คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิที่ใช้อบ ปริมาณของการเติมทราย และน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดลองขั้นต่อไป

การทดสอบกำลังอัดแสดงให้เห็นว่า

1.1 จีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้กำลังอัดที่ดีกว่าและมีความเหมาะสมในการนำมาใช้มากกว่าสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

1.2 การบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ให้กำลังอัดได้เร็วกว่าอุณหภูมิห้อง

1.3 ปริมาณการเติมทรายและปริมาณน้ำส่งผลต่อกำลังอัดที่ลดลง

2. การศึกษาอัตราส่วนของตะกอนดินที่เหมาะสม

ส่วนประกอบที่เหมาะสมในการผสมจีโอโพลิเมอร์ คือ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลายซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าลอย บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เติมทราย 135 กรัม เนื่องจากมีค่ากำลังอัดที่ดี นำมาใช้เป็นส่วนผสมพื้นฐานเพื่อศึกษาอัตราส่วนของตะกอนดิน อัตราส่วนของตะกอนดินร่วมกับทราย อัตราส่วนที่แตกต่างกันของสารละลายต่างต่อเถ้าลอย ผลการศึกษาจากการนำตะกอนดินมาผสมร่วมกับจีโอโพลิเมอร์ และปริมาณสารละลายต่างต่อเถ้าลอย

การทดสอบกำลังอัดแสดงให้เห็นว่า

2.1 ในการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาความแข็งแรง โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายต่างที่เหมาะสม พบว่า สารเคมีเกรดวิเคราะห์ (analytical reagent grade ย่อ AR grade) ผสมในจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย ทดสอบกำลังอัด 3 7 14 วัน ได้ค่า 240 290 336 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ เช่นเดียวกับจีโอโพลิเมอร์ผสมทราย ได้ค่า 385 395 442 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ โดยสารเคมีเกรดในห้องปฏิบัติการนี้มีความบริสุทธิ์ของสารสูงกว่า ถึงแม้ว่ากำลังอัดที่ได้จะมากกว่าแต่ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักกับการใช้สารเคมีเกรดอุตสาหกรรม (commercial grade) และเมื่อเปรียบเทียบราคาต้นทุนการผลิต ไม่คุ้มทุน เนื่องจากต้นทุนสารเคมีที่สูง ดังนั้นการใช้สารเคมีเกรดอุตสาหกรรมสามารถให้ค่าใกล้เคียงกัน และจากการเพิ่มตะกอนดิน ตะกอนดินร่วมกับทราย ซึ่งจะส่งผลต่อความชื้นเหลวทำให้เกิดความหนืดขึ้นทำให้การใช้สารเคมีเกรดอุตสาหกรรมจะเห็นได้ถึงคุณภาพของกำลังอัดไม่แตกต่าง อีกทั้งต้นทุนที่ต่ำลงทำให้มีความเป็นไปได้ในการนำมาทำได้จริง

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15, 2547) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ทั่วไปไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 19 เมกะปาสคาล พบว่า จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้งสารเคมีแบบเกรดวิเคราะห์และเกรดอุตสาหกรรมซึ่งมีค่ากำลังอัดที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

2.2 กำลังของจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนสารละลายต่างที่แตกต่างกัน จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนร้อยละ 40 ของเถ้าลอย และจีโอโพลิเมอร์ซึ่งผสมตะกอนร่วมกับทรายร้อยละ 30 ของทรายผลกำลังอัดเป็นไปทางเดียวกันเมื่ออัตราส่วนสารละลายต่างสูงขึ้นจาก 0.45 เป็น 0.7 และ 1 ได้ค่ากำลังอัดลดลง

2.3 ผสมตะกอนดินอย่างเดียวย้อยละ 40 ของปริมาณเถ้าลอย มีกำลังอัด 471 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2.4 ผสมตะกอนดินร้อยละ 30 ของทราย จากทราย 135 กรัม จะสามารถเพิ่มกำลังอัดเป็น 573 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2.5 กำลังอัดมากสุดในเวลาการบ่ม 28 วัน

3. ผลลัพธ์จากข้อมูลพื้นฐานในการผลิตบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์

การนำจีโอโพลิเมอร์มาทำเป็นบล็อกประสาน ผลกำลังอัดในการบ่ม 14 และ 28 วันของบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์ ที่ได้มีค่ากำลังอัดสูงกว่าบล็อกประสานผสมปูนซีเมนต์ บล็อกประสานผสมตะกอนดินและบล็อกประสานผสมตะกอนดินร่วมกับทราย กำลังอัดที่ได้ 35 และ 43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

จะเห็นได้ว่าเติมตะกอนดินและทรายในจีโอโพลิเมอร์ช่วยเพิ่มกำลังอัดได้ และอัตราส่วนที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาตรสารละลายต่างๆที่ใช้ผสมในจีโอโพลิเมอร์ และตะกอนดินมีศักยภาพในการนำมาใช้ร่วมกันในจีโอโพลิเมอร์ จากข้อมูลสามารถทำเป็นผลิตภัณฑ์บล็อกประสานได้ด้วยการทำวิธีการของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งสามารถนำถ้ำลอยและตะกอนมาใช้ร่วมกันทั้งยังนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะ

1. ในการวิจัยครั้งนี้ ผลที่ได้เป็นข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแนวทางนำตะกอนดินมาใช้ร่วมกับจีโอโพลิเมอร์ซึ่งศึกษาถึงสมบัติด้านกำลังอัดเท่านั้น อาจมีความจำเป็นในการทดสอบคุณสมบัติด้านอื่นตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน
2. วิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม เนื่องจากในการผลิตต้องใช้สารเคมีเป็นตัวทำปฏิกิริยา ดังนั้นราคาของจีโอโพลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับราคาของสารเคมีนั้นๆ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชัชวาล เศรษฐบุตร. 2539. **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 4. คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค, กรุงเทพฯ.

ณิชาดา ฉัตรสถาปัตยกรรม และ มณฑล วังเวียง. 2552. **การผลิตวัสดุก่อสร้างจากวัสดุเหลือทิ้ง**. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ดวงกมล สุริยฉัตร, ภาสกร วิชิตอมรพันธ์ และ วรธนะ เรื่องสำเร็จ. 2547. **การประยุกต์ใช้ตะกอนดินจากน้ำประปา**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, กรุงเทพฯ.

เทคโนโลยีบล็อกประสานคอตคอม. 2552. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีบล็อกประสาน**. แหล่งที่มา: www.technologyblockprasan.com, 20 สิงหาคม 2555.

ทวีศักดิ์ วัชไพศาล. 2554. **วิศวกรรมการประปา**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชนากร ภูเงินขำ และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. 2554. การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 34 ฉบับที่ 1 หน้า 31-44.

ธนศ มุณีแนม. 2546. **คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่ได้จากโรงประปาในการนำมาใช้งานเป็นวัสดุปอซโซลาน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

นลินี รังแก้ว. 2554. **การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้วยตะกอนจากระบบผลิตน้ำของโรงไฟฟ้า**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญฤทธิ์ คงแก้ว. 2550. **จีโอโพลีเมอร์จากกากตะกอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุษราภรณ์ ทรัพย์ห้วง. 2550. การเก็บโลหะหนักในจีโอโพลิเมอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2553. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 6. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2549. สารจีโอโพลิเมอร์:วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช้ปูนปูนซีเมนต์. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

พร้อมพงศ์ ผุงเพิ่มตระกูล. 2551. กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมโดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพศ์เป็นตัวยึดประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

เพิ่มพล กาญจนามัย. 2546. การใช้ตะกอนจากโรงงานผลิตประปาบางเขนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ภากร ไตรศิริวาณิชย์. 2550. การศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ภานุ ศิริพงษ์ไพโรจน์. 2550. ผลของการพัฒนาดินตะกอนประปาที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและรูปแบบเครื่องปั้นดินเผา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มณฑยา แซ่ศรี. 2546. ผลของการใช้ปุ๋ยหมักจากตะกอนของระบบผลิตน้ำประปาต่อการเจริญเติบโตของพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วีรยา สิงห์โต. 2554. การพัฒนาบล็อกคอนกรีตผสมผงยางเป็นวัสดุกันความร้อนและกันลื่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วุฒินัย กกกำแหง และ พิเชิต เจนบรรจง. ม.ป.ป. เอกสารประกอบการอบรมการผลิตบล็อกประสาน
 วว. การผลิตบล็อกประสานให้ได้คุณภาพ. ฝ่ายถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชนบทสถาบันวิจัย
 วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว)

สรวาตุติ ยอดมณี. 2551. การศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็ก.
 วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุพิน แสงสุข. 2553. ดินเผานาโน. แหล่งที่มา: www.cca.chula.ac.th/sufficiency10.pdf,
 6 กุมภาพันธ์ 2556.

สายสุนีย์ จำรัสและบุรฉัตร ฉัตรวีระ. 2553. อิทธิพลของอัตราส่วนผสมที่มีต่อคุณสมบัติทาง
 กายภาพและสมบัติไดอิเล็กตริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอย วารสารวิจัยและพัฒนา
 มจร. ปีที่ 33 ฉบับที่ 2 หน้า 145-162.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2531. มาตรฐาน
 ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก. มอก. 58-2530

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2547. มาตรฐาน
 ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. มอก. 15 เล่ม 1-2547

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

Ahmari, S. and L. Zhang. 2012. Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings
 through geopolymerization. **Construction and Building Materials**. 29: 323-331.

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

Davidovits, J. 1999. Chemistry of geopolymer systems. **Terminology in Geopolymer 99 Internationnal Conference**. France.

Davidovits, J. 2002. Environmentally driven geopolymer cement applications, pp. 1-9. *In* **Geopolymer 2002 Conference 1. ed.** Mellbourne, Australia

Duxson, P., J.L. Provis, G.C. Lukey and J.S.J. van Deventer. 2007. The role of inorganic polymer technology in the development of 'Green Concrete'. **Cement and Concrete Research**. 37: 1590-1597.

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.

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

Rattanadilok na phuket, N. 2008. **Engineering properties of the mixture of water treatment sludge, coal fly ash and bentonite for use as alternative landfill liner**. M.S. Thesis, ahidol University.

Swanepoel, J.C. and C.A. Strydom. 2002. Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. **Applied Geochemistry**. 17: 1143-1148.

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

Villa, C., E.T. Pecina, R. Torres and L. Gómez. 2010. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. **Construction and Building Materials**. 24: 2084-2090.

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

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
Barium	mg / Kg as Ba	Direct Aspiration,AAS	142	≤10000
Beryllium	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 ⁶⁺	Colorimetric	<1.00	≤500
Chromium(Trivalent)	mg / Kg as Cr ³⁺	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
Nickel	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
Antimony	mg / Kg as Sb	Hydride Generation,AAS	<10.00	≤500
Zinc	mg / Kg as Zn	Direct Aspiration,AAS	1662	≤5000

ตารางผนวกที่ 2 ผลการทดสอบหาขนาดของทรายละเอียด

ขนาดตะแกรง	ความกว้างขนาด ตะแกรง (mm)	น้ำหนักค้างตะแกรง (g)	เปอร์เซ็นต์ที่ผ่านสะสม
16	1.18	11	2.2
30	0.6	42	8.4
50	0.3	241	48.2
100	0.15	184	36.8
ถาดรอง	<0.15	18	3.9

น้ำหนักตัวอย่าง เท่ากับ 500 กรัม

ตารางผนวกที่ 3 อัตราส่วนเถ้าลอยและตะกอนดินต่อสารละลายต่าง 0.7

Days No.	Compressive strength (ksc)			
	3	7	14	28
1	265	361	375	427
2	255	352	410	442
3	308	360	445	400
Average	276	357.66	410	423

ตารางผนวกที่ 4 อัตราส่วนเถ้าลอยและตะกอนดินต่อสารละลายต่าง 1

Days No.	Compressive strength (ksc)			
	3	7	14	28
1	242	300	349	401
2	263	330.24	394	385
3	274	367	329	331
Average	259.66	332.41	357.33	372.33

ตารางผนวกที่ 5 อัตราส่วนเถ้าลอยและตะกอนดินผสมทรายต่อสารละลายต่าง 0.7

Days No.	Compressive strength (ksc)			
	3	7	14	28
1	370	385	337	475
2	360	444	472	450
3	350	409	454	535
Average	360	412.67	421	486.67

ตารางผนวกที่ 6 อัตราส่วนเถ้าลอยและตะกอนดินผสมทรายต่อสารละลายต่าง 1

Days No.	Compressive strength (ksc)			
	3	7	14	28
1	376	306	500	435
2	361	430	356	500
3	280	375	320	355
Average	339	370.33	392	430

ตารางผนวกที่ 7 จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินร้อยละ 10 ของเถ้าลอย

Days No.	Compressive strength (ksc)			
	3	7	14	28
1	209	186	235	334
2	185	221	228	300
3	197	220	249	302
Average	197	209	237.33	312

ตารางผนวกที่ 8 จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินรื้อยละ 20 ของถ้ำลอย

Days No.	Compressive strength (ksc)			
	3	7	14	28
1	238	269	271	366
2	215	240	294	379
3	218	265	305	380
Average	223	258	290	375

ตารางผนวกที่ 9 จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินรื้อยละ 30 ของถ้ำลอย

Days No.	Compressive strength (ksc)			
	3	7	14	28
1	257	271	365	461
2	225	270	391	430
3	238	348	339	445
Average	240	296.33	365	445

ตารางผนวกที่ 10 จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนดินรื้อยละ 40 ของถ้ำลอย

Days No.	Compressive strength (ksc)			
	3	7	14	28
1	275	353	400	482
2	320	38	406	476
3	260	349	394	455
Average	285	361	400	471

ตารางผนวกที่ 11 จีไอโพลีเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทรายร้อยละ 10 ของทราย

Days No.	Compressive strength (ksc)			
	3	7	14	28
1	331	376	440	408
2	316	420	445	528
3	348	383	435	520
Average	325	393	440	485.3

ตารางผนวกที่ 12 จีไอโพลีเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทรายร้อยละ 20 ของทราย

Days No.	Compressive strength (ksc)			
	3	7	14	28
1	358	445	478	568
2	427	465	450	528
3	400	455	464	552
Average	395	455	464	549.3

ตารางผนวกที่ 13 จีไอโพลีเมอร์ผสมตะกอนดินร่วมกับทรายร้อยละ 30 ของทราย

Days No.	Compressive strength (ksc)			
	3	7	14	28
1	447	469	504	559
2	392	492	500	560
3	442	486	484	600
Average	427	482.3	496	573

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาววิมณฑนา ถนอมกิจนุรักษ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	29 กรกฎาคม 2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์ทางทะเล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	นำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อม นเรศวร ครั้งที่ 8 วันที่ 26 กรกฎาคม 2555 ที่คณะ เกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-