



วิทยานิพนธ์

จีโอโพลีเมอร์จากกากตะกอน

SLUDGE BASED GEOPOLYMER

นายบุญฤทธิ์ คงแก้ว

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง จีโอโพลีเมอร์จากกากตะกอน

Sludge Based Geopolymer

นามผู้วิจัย นายบุญฤทธิ์ คงแก้ว

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, M.Appl.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

จีโอโพลิเมอร์จากกากตะกอน

Sludge Based Geopolymer

โดย

นายบุญฤทธิ์ คงแก้ว

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2550

บุญฤทธิ์ คงแก้ว 2550: จีโอโพลิเมอร์จากกากตะกอน ปริญญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา,
M.Appl.Sc. 85 หน้า

จีโอโพลิเมอร์เป็นสารเชื่อมประสานที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน
(polymerization) ซึ่งใช้หลักการ การทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซิลิเกต กับ
ออกไซด์ของ ซิลิกา อลูมินา และ แคลเซียม สารประกอบกลุ่มนี้มักพบได้ในวัสดุปอซโซลาน
เช่น เถ้าลอย เมตาแคโอไลน์ และตะกอนจากเตาถลุงเหล็ก จีโอโพลิเมอร์ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้แทน
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อเป็นการช่วยลดการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในการวิจัยนี้ได้นำตะกอนจากโรงผลิตน้ำบางเขนมาใช้ทดแทนเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุ
เริ่มต้น ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยกระตุ้นด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมกับ
โซเดียมซิลิเกต ตัวแปรในการศึกษาได้แก่ สัดส่วนของกระตุ้น อุณหภูมิการเผาตะกอนประปา
และสัดส่วนการแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปา

ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนของสารกระตุ้นที่ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังอัดสูงสุดคือ
 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก (มีกำลังรับแรงอัด 672 ksc) และพบว่าการแทนที่เถ้า
ลอยด้วยตะกอนประปาเผาได้สูงสุดที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักโดย ได้กำลังรับแรงอัดที่ไม่มีความ
แตกต่างทางสถิติกับจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย และเมื่อการแทนที่เพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 50 กำลัง
รับแรงอัดจะลดลงแต่ยังอยู่ในช่วงที่ดี (300-500 ksc) และการเผาที่อุณหภูมิ 650 และ 800°C จะให้
ค่ากำลังอัดที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งสูงกว่า 500°C เพื่อเป็นการใช้พลังงานที่น้อยลงจึงควรเลือกการเผา
ที่ 650°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม

Bunyarit Kongkeaw 2007: Sludge Based Geopolymer. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Patcharaporn Suwanvitaya, M.Appl.Sc. 85 pages.

Geopolymer has been developed as an alternative material to Portland cement, with the aim to reduce the carbon dioxide. It is the material resulting from polymerization of silica and alumina. Its production is based on the reaction of sodium hydroxide, sodium silicate, and oxides of silica, alumina and calcium. These oxides can be found in many pozzolanic materials such as fly ash, metakaolin and blast furnace granulated slag.

In this study, sludge from Bang Khen water treatment plant was used to partially replace fly ash, the base material. Sodium hydroxide and sodium silicate were used as alkaline activator. The effects of the solution ratio, calcination temperature and the proportion of the calcined sludge were investigated.

It was found that the weight ratio of $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$: NaOH of 1 yielded maximum compressive strength (524 ksc). In real conditions, 100% fly ash can achieve the compressive strength of 524 ksc. It was found that 20% replacement of fly ash by calcined sludge can also achieve the above strength with the burning temperatures of 650 and 800 °C. Even 30%-50% replacement of fly ash can be used in real conditions with a low compressive strength of about 300-500ksc. Of the three temperatures studied (500, 650 and 800 °C) 650 °C was found to be optimum.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา ประธาน
กรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการให้
คำปรึกษา แนะนำ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์
ประเสริฐ สุวรรณวิทยา กรรมการที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ข้อมูลต่างๆ ที่เป็น
ประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิมา ชมสุรินทร์ ประธาน
กรรมการภาควิชา และรองศาสตราจารย์กฤติยา เลิศโกยะสมบัติ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไป
ได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และ
เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เอกสารข้อมูล อุปกรณ์เครื่องมือ และอำนวยความสะดวก
ต่างๆ ในการทำงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณครูบาอาจารย์ และพี่ๆ น้องๆ รวมถึง
เพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้คำสั่งสอน แนะนำ ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนใน
การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

บุญฤทธิ์ คงแก้ว

ตุลาคม 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	18
อุปกรณ์	18
วิธีการ	20
ผลการทดลอง	27
สรุปและข้อเสนอแนะ	50
สรุป	50
ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	52
ภาคผนวก	56
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากถั่วลอ	57
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากถั่วลอ	
ที่แทนที่ด้วยตะกอนประปาเผา	63
ภาคผนวก ค การนำจีโอโพลีเมอร์จากตะกอนเผามาขึ้นรูป	79
ภาคผนวก ง การศึกษาค่าความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	80
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	85

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618	4
2	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ	6
3	แสดงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเถ้าตะกอนประปา	10
4	แสดงสัดส่วนในการผสมจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอย	21
5	แสดงสัดส่วนในการผสมจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมตะกอนประปา เผา	23
6	แสดงคุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของตะกอนประปาเผาที่ 500, 650 และ 800 °C	29
7	แสดงคุณสมบัติของตะกอนประปาเผา เปรียบเทียบกับมาตรฐานสาร ปอซโซลาน	30
8	แสดงความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอย	32
9	แสดงระยะจมน้ำของเข็มไวแก๊สของส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสม ตะกอนประปาเผา	35
10	แสดงระยะเวลาก่อตัวจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 650 °C	37
 ตารางผนวกที่		
ก1	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยที่เกิดจากการ แปรผัน Na_2SiO_3 : NaOH	58
ข1	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอน ประปาเผาที่ 500 °C	64
ข2	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอน ประปาเผาที่ 650 °C	69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข3	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอน ประปาเผาที่ 800 °C	74
ข3	ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดที่เกิดจากการแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอน เผาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ร้อยละ 30	74
ง1	ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่เกิดจากการแปร ผันสัดส่วน Na_2SiO_3 : NaOH	82
ง2	ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดที่เกิดจากการแทนที่เถ้าลอยด้วย ตะกอนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ร้อยละ 10	82
ง3	ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดที่เกิดจากการแทนที่เถ้าลอยด้วย ตะกอนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ร้อยละ 20	83
ง4	ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดที่เกิดจากการแทนที่เถ้าลอยด้วย ตะกอนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ร้อยละ 30	83
ง5	ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดที่เกิดจากการแทนที่เถ้าลอยด้วย ตะกอนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ร้อยละ 40	84
ง6	ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดที่เกิดจากการแทนที่เถ้าลอยด้วย ตะกอนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ร้อยละ 50	84

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	อนุภาคของเถ้าลอยส่องด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope กำลังขยาย 2000 เท่า	7
2	โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์แบบต่างๆ	13
3	ลักษณะและสีของตะกอนประปาเผาที่ 500, 650 และ 800 °C	19
4	ลักษณะและสีของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ	19
5	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์	25
6	ภาพขยายอนุภาคตะกอนประปาเผาด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า	31
7	ภาพขยายอนุภาคเถ้าลอยด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า	31
8	สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ที่มีต่อความต้องการสารกระตุ้นเพื่อให้ได้ ส่วนผสมมีระดับความชื้นเหลวปกติ	33
9	ผลของสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ที่มีต่อระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิ เมอร์จากเถ้าลอย	34
10	สัดส่วนสารกระตุ้น: วัสดุผง ที่มีต่อระยะเข็มไวแคตจัมในเนื้อส่วนผสม ที่ระดับการแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาที่ระดับต่างๆ	36
11	ผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาที่มีต่อระยะเวลาการก่อ ตัวของจีโอโพลิเมอร์	37
12	ผลของสัดส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ต่อ NaOH ที่มีต่อกำลังรับ แรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอย	38
13	สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จาก เถ้าลอยที่อายุ 90 วัน	38
14	การแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาร้อยละ 10 ต่อกำลังรับแรงอัดจี โอโพลิเมอร์	40
15	การแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาร้อยละ 20 ต่อกำลังรับแรงอัดจี โอโพลิเมอร์	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	การแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาร้อยละ 30 ต่อกำลังรับแรงอัด จีโอโพลีเมอร์	42
17	การแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาร้อยละ 40 ต่อกำลังรับแรงอัด จีโอโพลีเมอร์	42
18	การแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาร้อยละ 50 ต่อกำลังรับแรงอัด จีโอโพลีเมอร์	43
19	อุณหภูมิการเผาตะกอนประปาที่มีต่อกำลังรับแรงอัดจีโอโพลีเมอร์เพสต์	44
20	ลักษณะจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย	45
21	ลักษณะจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากตะกอนประปาเผาแทนที่เถ้าลอย ร้อยละ 50	46
22	โครงสร้างจุลภาคจีโอโพลีเมอร์เพสต์	47
23	สารละลายจากผงอลูมิเนียมผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต และผสม กับสารกระตุ้น	48
24	สารละลายจากซิลิกาฟุ่ม, ปูนขาว และเถ้าลอยผสมกับสารกระตุ้น	49
ภาพผนวกที่		
ก -1	การนำจีโอโพลีเมอร์จากตะกอนประปาเผามาขึ้นรูป	80

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ksc	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
M	=	โมลาริตี
cm ² / g	=	ตารางเซนติเมตรต่อกรัม
SiO ₄	=	ซิลิกา
AlO ₄	=	อลูมินา
FA	=	fly ash (เถ้าลอย)
SL	=	ตะกอนประปาเผา
CaOH	=	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
CSH	=	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
SEM	=	Scanning Electro Microscope
wt	=	น้ำหนัก
°C	=	องศาเซลเซียส
mm	=	มิลลิเมตร
cm ² /g	=	ตารางเซนติเมตรต่อกรัม
Ksp	=	ความสามารถในการละลาย
NTU	=	ความขุ่น
XRF	=	X-Ray Fluorescent
cm /s	=	เซนติเมตรต่อวินาที
LOI	=	ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้
GF/C	=	กระดาษกรองใยแก้ว
ASTM	=	American for Testing and Materials
(Na ₂ SiO ₃ : NaOH):S:(Sol:FA)	=	สัดส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์และสัดส่วนสารกระตุ้นต่อเถ้าลอย
(%Replacement):S:(Sol:Solid)	=	ร้อยละการแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาที่แปรผัน สัดส่วนสารกระตุ้นต่อวัสดุผง

จีโอโพลิเมอร์จากกากตะกอน

Sludge Based Geopolymer

คำนำ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ เกิดจากการพัฒนาสารเชื่อมประสานโดยที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์เลย เป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ ในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5-6 เท่า (การผลิตจีโอโพลิเมอร์ 1 ตันก่อให้เกิด CO_2 เท่ากับ 0.184 ตัน ขณะที่การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตันก่อให้เกิด CO_2 เท่ากับ 1.2 ตัน (Davidovits, 2002) เมื่อคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง ที่จะนำมาพัฒนามาเป็นสารเชื่อมประสานแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จีโอโพลิเมอร์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้จากกากอุตสาหกรรม หรือจากแหล่งธรรมชาติ เช่น เถ้าลอย (fly ash) ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก (slag) และดินขาวเผา (kaolin) เป็นต้น วัสดุตั้งต้นดังกล่าวส่วนใหญ่จะนำมาใช้ในรูปผง โดยการเตรียมจีโอโพลิเมอร์สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิปกติได้ โดยใช้ สารละลายด่างสูง ประกอบด้วยสารละลายไฮดรอกไซด์และสารละลายซิลิเกต กระตุ้นอลูมิเนียมและซิลิกอนในวัสดุตั้งต้น Davidovits (2002) กล่าวว่า จีโอโพลิเมอร์ที่เป็นผลของปฏิกิริยาจะประกอบเป็นโครงข่ายโพลิเมอร์ ของ Si - O - Al โดยมีซิลิเกต (SiO_4) และอลูมินา (AlO_4) จับกันเป็นโครงสร้างแบบพีระมิดทรงสามเหลี่ยมสี่ด้าน (tetrahedral) และมีอะตอมของออกซิเจน (O) เป็นตัวเชื่อม โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ที่ได้เป็นสายตรงที่มีความแข็งแรงสูง และมีโครงสร้างที่เป็นโครงข่าย (matrix) ที่ซับซ้อน

การศึกษาเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์นิยมนำเถ้าลอย และหรือดินขาวเผาเป็นวัสดุหลัก นอกจากวัสดุทั้งสองยังมีการนำเถ้าแกลบ เถ้าขานอ้อย และตะกรันจากเตาถลุงเหล็กมาทำการศึกษา เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีองค์ประกอบของซิลิกา อลูมินา และแคลเซียม ในปริมาณสูง (มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน) จากการศึกษาของจิตกร (2543) และ ธเนศ (2546) พบว่าตะกอนประปาเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานได้ เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำประปามี

การเติมสารอลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) หรือสารส้มลงในน้ำดิบเพื่อให้เกิดการสร้างตะกอนทำให้สารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำเกิดการรวมตัวกันและตกตะกอนในที่สุด ตะกอนที่ได้จะมีอลูมิเนียมอออน (Al^{3+}) ในสารส้มจะตกค้างอยู่ และสามารถเปลี่ยนรูปเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ได้ โดยการเผาที่อุณหภูมิสูงและตะกอนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของทรายแป้งซึ่งมีธาตุซิลิกอนออกไซด์อยู่เป็นจำนวนมาก จากการศึกษาพบว่า สามารถนำมาแทนที่การใช้ปูนซีเมนต์ได้

ในงานวิจัยนี้ได้นำตะกอนประปาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขนมาเผา แล้วนำมาเป็นส่วนผสมกับเถ้าลอยในการทำเป็นจีโอโพลิเมอร์เฟสค์(สารเชื่อมประสานที่มีคุณสมบัติเดียวกันกับซีเมนต์เฟสค์) ด้วยการแทนที่เถ้าลอย(วัสดุที่มีการศึกษากันแพร่หลาย) โดยนำมาขึ้นรูปเพื่อทดสอบคุณสมบัติในการรับแรงอัด และความสามารถในการเทได้ (workability) โดยวัดจากระดับความข้นเหลว(consistency) และระยะเวลาการก่อตัว (setting time) ในการทดลองนี้ใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยเป็นตัวเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดกับ จีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปา

วัตถุประสงค์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. หาผลของสัดส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ต่อ NaOH ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอโพลิเมอร์ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงอัด ความชื้นเหลว และระยะเวลาก่อตัว
2. หาผลการแทนที่ที่ละลายด้วยตะกอนประปาเพื่อเป็นแนวทางในการนำตะกอนประปามาใช้ในงานจีโอโพลิเมอร์ และ
3. หาอุณหภูมิเผาตะกอนประปาที่เหมาะสม ในการนำมาแทนที่ที่ละลายเพื่อทำเป็นจีโอโพลิเมอร์

ขอบเขตของการวิจัย

1. ของเสียที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ถังลอยจากเตาเผาของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำบางเขน กรุงเทพมหานคร
2. สารละลายที่ใช้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 10 M และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$) โดยมี Na_2O 15.32%, SiO_2 32.87% และน้ำ 51.81% โดยมวล
3. การทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้แก่ การทดสอบความชื้นเหลวโดยทำการควบคุมให้ทุกๆ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่นำมาทดลองมีความชื้นเหลวปกติ, ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์, ทดสอบกำลังอัด และการดูลักษณะพื้นผิวของจีโอโพลิเมอร์ด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) ในการศึกษาตัวแปรหลัก คือ การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของสารกระตุ้นต่อผงของแข็ง, สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ต่อ NaOH ที่ใช้เป็นสารกระตุ้น และสัดส่วนการแทนที่ที่ละลายด้วยตะกอนประปา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นทางเลือกในการนำของเสียคือ ถังลอยและตะกอนประปามาใช้ประโยชน์ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุใหม่ในการก่อสร้าง
2. ลดปัญหาด้านการดำเนินการกำจัดของเสียถังลอยและตะกอนประปา

การตรวจเอกสาร

ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรม คือตะกอนประปา และเถ้าลอยมาทำเป็นสารเชื่อมประสานที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ ในส่วนการตรวจเอกสารจะกล่าวถึงเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับ วัสดุปอซโซลาน เถ้าลอย ตะกอนประปา และวัสดุจีโอโพลิเมอร์

1. วัสดุปอซโซลาน (pozzolan)

ความหมายของปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 คือ วัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งในตัวเองไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH) ที่อุณหภูมิปกติ จะได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุปอซโซลานแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618

คุณสมบัติทางเคมี	ชนิดตาม ASTM C 618		
	N	F	C
ปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ น้อยที่สุด, %	70	70	50
SO_3 มากที่สุด, %	4	5	5
MgO , %	5	5	5
Na_2O มากที่สุด, %	1.5	1.5	1.5
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้(มากที่สุด) , %	10	12	6
ปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ น้อยที่สุด, %	3	3	3

ค่ามาตรฐานของสารที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานกำหนดโดย American Society for Testing and Materials (ASTM) ตามข้อกำหนด ASTM C 618 ความหมายของ Class N คือ วัสดุปอซโซลานตามธรรมชาติ เช่น จีเถ้าจากภูเขาไฟ เป็นต้น Class F คือ เถ้าลอยที่ได้มาจากการเผาถ่านหินชนิดแอนทาไรต์ (anthracite) หรือบิทูมินัส (bituminous) ซึ่ง class นี้พบได้ในแถบยุโรป

อเมริกา เป็นถ่านหินชั้นดีให้พลังงานความร้อนสูง เพราะมีปริมาณคาร์บอนสูง มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่ำ และ Class C คือ ถ่านที่ได้มาจากการเผาถ่านหินชั้นต่ำกว่า คือชนิด lignite, sub bituminous ถ่านที่ได้จะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่มี $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 และมี CaO สูง วัสดุอื่นๆ ที่น่าสนใจนอกเหนือจากถ่าน คือ ดินขาวเผาหรือเมทาควอลิน (metakaolin) ซึ่งได้มาจากการเผาดินขาวที่อุณหภูมิประมาณ 700- 800 องศาเซลเซียส, ดินเหนียวเผา, ถ่านจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเช่น ถ่านปาล์ม น้ำมัน ถ่านกลบ-เปลือกไม้ซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม และเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800- 900 องศาเซลเซียส ถ่านตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ถ่านตะกอนถลุงเหล็ก และถ่านตะกอนประปาเป็นต้น วัสดุดังกล่าวเหล่านี้ล้วนมี $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ และ CaO เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเป็นคุณสมบัติหนึ่งของวัสดุปอซโซลาน

2. ถ่านลอย (Fly ash)

ถ่านลอยหรือถ่านถ่านหิน (fly ash หรือ pulverized fuel ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า มีขนาดเม็ดละเอียด ขนาดตั้งแต่ 0.001 – 0.1 mm ถ่านลอยจะถูกพัดออกมาตามลมร้อน เพื่อออกไปสู่ปล่องควันจากนั้นตัวดักจับ (electrostatic precipitator) จะรวบรวมถ่านลอยเพื่อเก็บไว้ในไซโลต่อไป ในกรณีที่ถ่านถ่านหินหลอมเหลวและบางส่วนจับกันเป็นก้อน หรือเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น ทำให้มีน้ำหนักรวมมากและตกลงสู่ก้นเตาจึงเรียกว่า ถ่านก้นเตาหรือถ่านหนัก (bottom ash) การผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัด ลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง กากที่เหลือจากการเผาถ่านหินประกอบด้วยถ่านลอยประมาณร้อยละ 80 และถ่านก้นเตาอีกประมาณร้อยละ 20 ถ่านลอยจะเป็นมลภาวะต่อพื้นที่โดยรอบบริเวณโรงไฟฟ้าและแหล่งที่นำไปกำจัด จึงมีความพยายามที่จะนำถ่านลอยเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ต่างๆ ซึ่งโดยมากนำไปใช้ในงานก่อสร้าง เนื่องจากถ่านลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์

2.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านลอย

องค์ประกอบหลักทางเคมีของถ่านลอย คือมี SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน, อุณหภูมิ, และสภาพแวดล้อมขณะเผา ด้วยเหตุนี้ ASTM C618 จึงแบ่งถ่านถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C โดยถ่านถ่านหิน Class

F มีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ขณะที่ Class C มีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่แล้วถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ (anthracite) และบิทูมินัส (bituminous) เมื่อเผาแล้วจะให้ถ่านหิน Class F ส่วนถ่านหินซับบิทูมินัส (sub-bituminous) และถ่านหินลิกไนต์ (lignite) เมื่อเผาแล้วจะให้ถ่านหิน Class C เป็นส่วนใหญ่ สำหรับโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นวัตถุดิบในการให้ความร้อนถ่านหินที่ได้ในช่วงปี พ.ศ. 2548 ถึง 2549 เป็นถ่านหินทั้ง Class F และ Class C การที่ถ่านหินจากแหล่งเดียวกันเป็นทั้ง Class C และ Class F เป็นเรื่องปกติ เพราะถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติและมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีย่อมเปลี่ยนไปได้ แต่อย่างไรก็ตามถ่านหินทั้ง Class C และ Class F ต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต

ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) ในประเทศไทยให้ความร้อนต่ำ ดังนั้นจึงทำให้ส่วนประกอบทางเคมีของถ่านหินที่ได้แตกต่างกันไปด้วย ถ่านหินทั่วไปมีค่าผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ประมาณร้อยละ 66 – 92 สำหรับถ่านหินในประเทศไทยจากแหล่งแม่เมาะ แสดงดังตารางที่ 2 มีปริมาณสารประกอบดังกล่าวอยู่ในช่วงร้อยละ 72-80 และมี CaO ประมาณ 12% (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

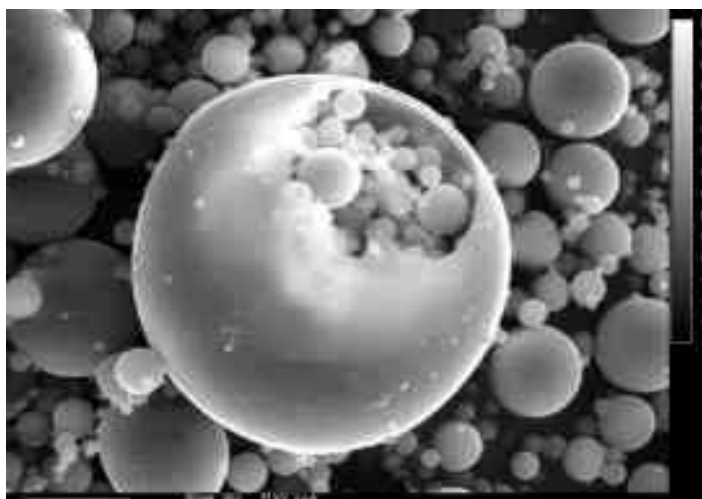
องค์ประกอบทางเคมี	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MgO	SO_3
ปริมาณ (ร้อยละ)	47.65	18.51	10.29	11.94	4.08	3.14	1.70	2.69

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2544)

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านหิน

ถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้จะสันดาปและหลอมละลายเมื่อเผาอุณหภูมิสูง ถ่านหินขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าจึงมีทรงกลมและผิวเรียบ ลักษณะเป็นฝุ่นผงสีเทา

เทาดำ หรือน้ำตาล เป็นเถ้าป่นมีความละเอียดเมื่อสัมผัสจะพบว่ามีความเบาและนุ่ม มีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอนแสดงดังรูปที่ 1 ความละเอียดของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าที่แม่เมาะซึ่งทดสอบโดยวิธีของเบลนมีความละเอียดอยู่ในช่วง 2,500 ถึง 3,500 cm^2/g



ภาพที่ 1 อนุภาคของเถ้าลอยส่องด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope กำลังขยาย 2000 เท่า ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2544)

2.3 การนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์

การใช้เถ้าลอยในงานก่อสร้างไม่ใช่เรื่องใหม่ มีรายงานเกี่ยวกับการนำเถ้าถ่านหินมาใช้แทนปูนซีเมนต์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1937 โดย Davis และคณะ (ปริญญา, 2547) ซึ่งถือได้ว่าเป็นก้าวแรกของการนำ เถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีต หลังจากนั้นมาจึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์อีกเป็นจำนวนมากด้วยเช่นกัน

เถ้าลอย นิยมนำไปใช้ในงานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ

1. เถ้าลอยมีออกไซด์ของซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็ก ซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดี และ ในปริมาณที่เหมาะสม

2. เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีต เถ้าลอยจะเข้าไปอุดในช่องว่างเล็กๆระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทราย ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และลักษณะทรงกลมของเถ้าลอยช่วยทำให้คอนกรีตมีการลื่นไหลได้ทำให้การสูบล้างคอนกรีตหรือเทคอนกรีตลงในแบบทำได้สะดวกและง่ายขึ้น

นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยยังสามารถผสมได้ง่ายและลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องผสมได้ เนื่องจากรูปร่างที่กลมและผิวสัมผัสที่ลื่นทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ เพื่อความสามารถในการเทได้เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าลอยจะมีข้อเสียด้วย คือการให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกัน และทำให้ต้องใช้สาร เพื่อเพิ่มฟองอากาศขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีต ที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอยผสมอยู่

เนื่องจากเถ้าลอยมีปริมาณมาก โดยเถ้าลอยที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีปริมาณสูงถึง 6,000 ตัน/วันหรือรวมกันเดือนละ ประมาณ 180,000 ตัน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544) ถ้านำมากรวบรวมกันจะได้กองฝุ่นขนาดมหึมา ก่อให้เกิดปัญหาในการหาสถานที่ในการกำจัดที่เหมาะสม และกระบวนการการนำไปลงหลุมเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายให้แก่โรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นจำนวนไม่น้อย และบริเวณที่นำเถ้าไปทิ้งก็ทำประโยชน์ไม่ได้ ต่อมาทางโรงไฟฟ้าได้มีการค้นคว้าทดลองพบว่าเถ้าลอยมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้

3. ตะกอนประปา (Water Sludge)

ตะกอนประปาเป็นตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำประปา จัดเป็นตะกอนอนินทรีย์ชนิดชอบน้ำ(Inorganic hydrophilic sludge) สามารถละลายน้ำได้ เกิดจากกระบวนการทำให้น้ำดิบกลายเป็นน้ำใสโดยมีการเติมสารเพื่อทำให้สารแขวนลอยตกตะกอน โดยทั่วไปสารที่นิยมใช้คือสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) เนื่องจากมีประจุบวกมากสามารถจับกับประจุลบของตะกอนแขวนลอยแล้วรวมเป็นตะกอนที่มีน้ำหนักมากขึ้นทำให้เกิดการตกตะกอนได้ดี และมีราคาถูกกว่า

สารชนิดอื่น สารส้มมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties) ดังนี้ มีลักษณะเป็นเม็ดหรือผงของแข็ง มีสีขาว ไม่มีกลิ่น น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 342.14 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.7 ความสามารถในการละลายน้ำ (K_{sp}) (กรัม/100 มล.) เท่ากับ 28 ที่อุณหภูมิสูงกว่า 650°C สารนี้จะสลายตัวให้สารอลูมิเนียมออกไซด์และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ได้

3.1 กระบวนการเกิดตะกอนของโรงผลิตน้ำประปาบางเขน

โรงผลิตน้ำประปาบางเขนมีกำลังการผลิตสูงสุดที่ 3.2 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวันโดยรับน้ำดิบมาจากแม่น้ำเจ้าพระยา ความขุ่นของน้ำดิบอยู่ในช่วง 15-160 NTU ซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาลและกิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นก่อนมาถึงโรงผลิตน้ำ

กรรมวิธีการแยกตะกอนออกจากน้ำดิบโดยต้องเติมสารเคมีบางชนิด เช่น ปูนขาว(CaO) สารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) และโพลิเมอร์ เป็นต้น เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารแขวนลอยในน้ำดิบกับสารเคมีเติมเข้าสู่ระบบการผลิต โดยสารแขวนลอยอาจจะอยู่ในรูปของดินเหนียวหรือทรายแป้ง ทำให้เกิดการตกตะกอนน้ำขึ้นเป็นปริมาณมาก เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำดิบสารส้มจะทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) จะมีลักษณะเป็นเม็ดตะกอนคล้ายวุ้น ซึ่งจะจับอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ ในน้ำจนสามารถตกตะกอนทำน้ำใส โดยการประปานครหลวงใช้สารเคมีหลักในการสร้างตะกอนและการปรับสภาพน้ำด้วยกัน 5 ชนิด คือ

1. สารส้ม($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) ใช้เติมในถังตกตะกอน เพื่อให้ น้ำขุ่นตกตะกอนและแยกตะกอนออก เป็นสารที่นิยมใช้เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสม ราคาถูก และสามารถหาซื้อได้ง่าย แต่มีข้อเสียอยู่บ้าง คือ จะลดค่า pH ในน้ำส่วนที่ใสแล้วให้ต่ำลง และเพิ่มปริมาณซัลเฟตทำให้ความกระด้างถาวรเพิ่มขึ้น

2. ปูนขาวใช้ปรับค่า pH ของน้ำให้สูงขึ้น ให้อยู่ในสถานะเป็นกลางที่ค่า pH ประมาณ 7 ซึ่งต้องใช้ร่วมกับสารส้มเป็นส่วนใหญ่ ทั้งยับยั้งและเป็นตัวเร่งให้เกิดการตกตะกอนด้วย

3. คลอรีน เป็นสารที่เติมในน้ำดิบและน้ำบริสุทธิ์ที่ผ่านการกรองเพื่อฆ่าเชื้อโรค และสิ่งเจือปนในน้ำ ทำให้น้ำบริสุทธิ์สะอาด ปลอดภัยในการบริโภค และคลอรีนที่หลงเหลือมากับน้ำจะสามารถระเหยสลายไปได้เอง เมื่อทิ้งไว้ในบรรยากาศปกติ

4. สารช่วยตกตะกอน(โพลิเมอร์) โรงผลิตน้ำประปาบางเขนมีการใช้โพลิเมอร์ ชนิดประจุลบซึ่งเป็นสารสังเคราะห์ที่ได้มาจากสารอินทรีย์ Acrylic Acid ใช้เติมในน้ำดิบร่วมกับสารส้มเพื่อช่วยในการตกตะกอนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5. โพลีอะลูมินัมคลอไรด์(PAC) เป็นโพลิเมอร์ที่เป็นประจุบวกสูง ซึ่งจะมีความสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ดีกว่าสารส้ม อัตราเร็วในการตกตะกอนสูง ไม่เพิ่มปริมาณซัลเฟตในน้ำ และไม่ลดค่า pH ในน้ำใสลงมากนัก แต่มีราคาแพง หาซื้อยาก

3.2 คุณสมบัติทางเคมีของตะกอนประปา

สมบัติทางเคมีของตะกอนประปาเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งหมายถึงร้อยละสารประกอบที่เจือปนในเนื้อตะกอน จากการวิเคราะห์โดยวิธี X- Ray Fluorescence (XRF) ของจิตรกร (2543) พบว่าเนื้อตะกอนมีออกไซด์ของซิลิกอน อลูมิเนียมและเหล็กเป็นสารประกอบหลัก ดังตารางที่ 3 เนื่องจากซิลิกอนเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของแร่ปฐมภูมิ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอนุภาคทราย และทรายแป้งที่อยู่ในตะกอน ส่วนออกไซด์ของอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบสำคัญในแร่โอลูมิโนซิลิเกต และจากการตกค้างของสารเคมีที่ใช้สร้างตะกอน และเหล็กออกไซด์จะรวมมากับแร่ดินเหนียวที่มีในตะกอน

ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของถ้ำตะกอนประปา

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ	ปริมาณ(ร้อยละ)
ปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ น้อยที่สุด	90.36
SO_3 มากที่สุด	0.19
MgO	1.27
Na_2O มากที่สุด	0.69
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้(มากที่สุด)	3.04
ปริมาณความชื้น(มากที่สุด)	0.78

ที่มา: จิตรกร (2543)

3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของตะกอนประปา

ตะกอนประปาที่เกิดขึ้นเกิดจากสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำดิบ และมีเนื้อละเอียดเป็นปุ๋ยค่อนข้างสม่ำเสมอ เนื้อตะกอนเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง ซึ่งจำแนกได้อยู่ในกลุ่มดินละเอียด (ปรีสนา, 2545) และเกิดจากการเคลื่อนย้ายวัสดุต้นกำเนิดดินโดยอิทธิพลของน้ำไหล ตะกอนนี้เมื่อเปลี่ยนสภาพเป็นดินจะเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ และเมื่อนำตะกอนประปามาทำการบดละเอียดและทำการเผาที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 550-1000 องศาเซลเซียส จะได้อนุภาคของตะกอนที่มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และมีพื้นผิวแบบขรุขระ (ชนเศ, 2546) ซึ่งแตกต่างกับเถ้าลอยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่สูงซึ่งได้รูปร่างกลมขนาดของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับขั้นตอนการคัดขนาดของตะกอน

จากสถิติการผลิตน้ำและการเกิดตะกอนสลัดจ์ของโรงผลิตน้ำประปาบางเขนช่วงปี พ.ศ. 2543-2545 ปริมาณสูบน้ำเฉลี่ยวันละ 3.06 ล้านลูกบาศก์เมตร ความขุ่นน้ำดิบเฉลี่ย 109.89 NTU ปริมาณสารแขวนลอยเฉลี่ย 93.76 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณการใช้สารส้มเฉลี่ย 38.72 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นคิดเป็นน้ำหนักตะกอนแห้งเฉลี่ย 314 ตันต่อวันหรือ 114,537 ตันต่อปี เมื่อคำนวณเป็นปริมาณตะกอนเหลว(ความเข้มข้นร้อยละ 15) ได้ 2,093 ลูกบาศก์เมตรต่อวันหรือ 763,945 ลูกบาศก์เมตรต่อปี และเกิดเป็นตะกอนดินความเข้มข้นร้อยละ 50 ได้ 628 ลูกบาศก์เมตรต่อวันหรือ 229,220 ลูกบาศก์เมตรต่อปี

4. จีโอโพลีเมอร์

จีโอโพลีเมอร์เป็นสารอนินทรีย์ ที่มีลักษณะคล้ายกับเซรามิก และมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย (fly ash) ดินขาวเผา (kaolin) เป็นต้น วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปผงของแข็ง โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายด่างสูงที่ประกอบด้วยสารละลายไฮดรอกไซด์ (NaOH หรือ KOH) และสารละลายซิลิเกต

4.1 ปฏิกริยาจีโอโพลีเมอร์

จากรายงานของ Davidovits (2002) กล่าวว่า จีโอโพลีเมอร์เป็นสารจำพวกอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) มีรูปโครงสร้างที่ไม่แน่นอนซึ่งเกิดจากส่วนประกอบของสารลักษณะ

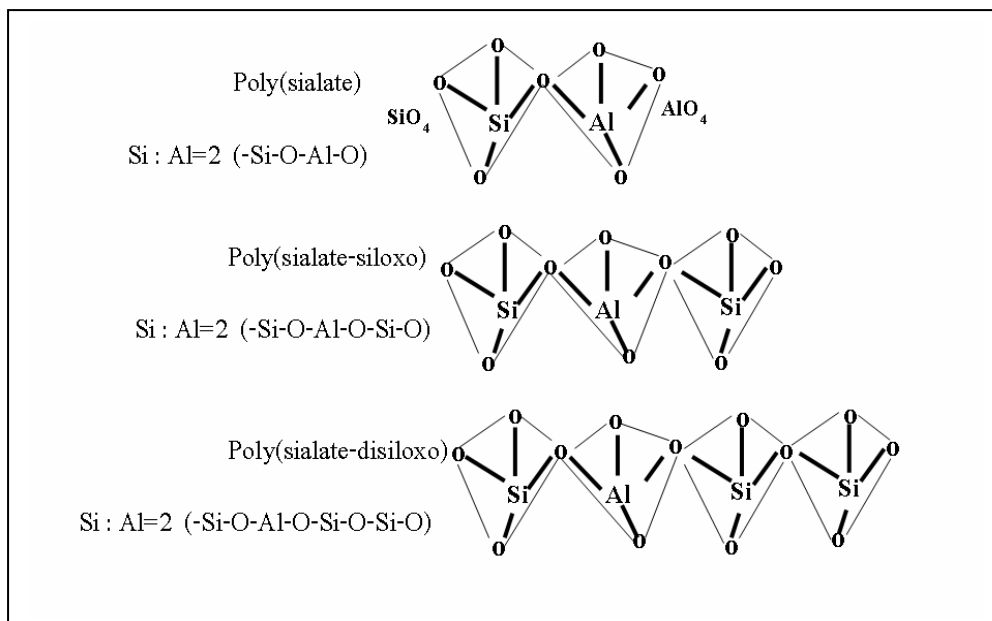
อสัณฐาน (amorphous) และสารกึ่งผลึก (semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำอิโพลิเมอร์เป็นสารประกอบที่มีซิลิกา และอลูมินา และเมื่อทำการผสมกับสารละลายต่าง สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิปกติหรือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการก่อตัว และสามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ดี ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกิริยาของซีเมนต์เพสต์ เป็นการทำให้ปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (polymerization) แบบกลั่นตัว (condensation) โดยการเกิดปฏิกิริยาจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ (Davidovits, 1999)

1. การชะละลาย (dissolution)

วัสดุตั้งต้น (วัสดุปอซโซลาน) เมื่อผสมกับสารละลายต่างสูง จะเกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆ โดย อลูมิเนียม (aluminium; Al) และซิลิกอน (silicon; Si) จะถูกชะออกมามาก เนื่องจากเป็นสารประกอบหลักที่อยู่ในวัสดุตั้งต้น เมื่อเกิดการชะละลายมากขึ้น ส่วนหนึ่งของวัสดุจะถูกทำลายที่ผิว ทำให้เกิดเป็นช่องที่ผิว และสารละลายสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

2. การทำปฏิกิริยาลูกโซ่

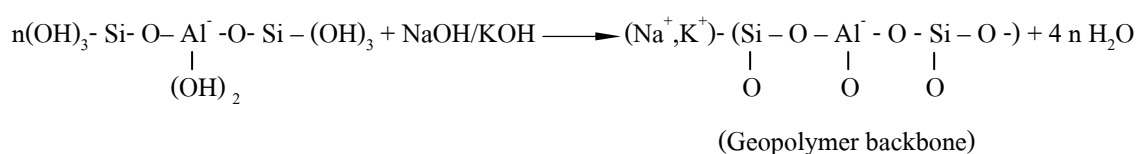
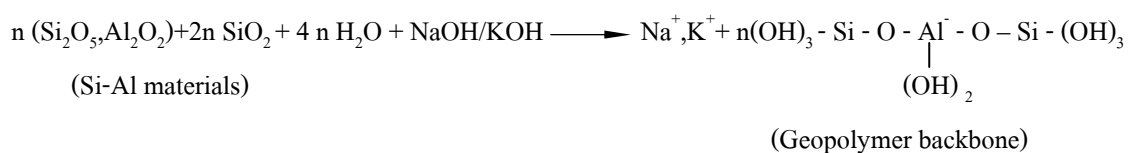
ผลผลิตของปฏิกิริยาจากการชะละลายเป็นหน่วยพริสมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si^{4+} และ Al^{3+} ที่เกิดโคออดิเนตแบบ 4 แขนกับออกซิเจน หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของโพลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (meta-stable) ซึ่งจะมีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้น หน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นมี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยพริสมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สาม และสี่หน่วย ได้แก่ โพลีไซอะเลต (polysialate, PS) โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (polysialate siloxo, PSS) โพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับ แสดงดังในภาพที่ 2 ปริมาณของ SiO_4 เพิ่มขึ้นจากหนึ่งเป็นสามหน่วย เมื่อปฏิกิริยาเกิดมากขึ้น การเชื่อมโยงของโพลิเมอร์ที่เชื่อมโยงขวางกันก็จะเกิดมากขึ้น และหนาแน่นขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างที่แน่นสามารถรับแรงได้



ภาพที่ 2 โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์แบบต่างๆ

ปฏิกิริยาลูกโซ่ของจีโอโพลิเมอร์มีความซับซ้อนมาก และยังไม่สามารถอธิบายได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม Hua และคณะ (2000) เสนอการเกิดปฏิกิริยาหลักได้ว่า สารประกอบซิลิกาและอลูมินาเมื่อผสมกับสารละลายด่างไฮดรอกไซด์และซิลิเกต และน้ำจะทำปฏิกิริยาได้เป็นหน่วยโพลิไซอะเลตที่มีประจุบวกของสารละลายด่างทำให้เกิดสมดุลดังสมการที่ 1 และหน่วยโพลิไซอะเลตจะทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างไฮดรอกไซด์ต่อเกิดเป็นลูกโซ่โพลิเมอร์ที่เชื่อมโยงดังสมการที่ 2

สมการที่ 1



4.2 คุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์

- มีความคงทนแข็งแรง ทนต่อสภาวะอากาศ และสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ได้จากสิ่งปลูกสร้างในสมัยโรมหรือพีรามิดที่มีอายุตั้งแต่ 2,500- 5,000 ปี ซึ่งสันนิษฐานของ Davidovits ว่าเกิดจากการก่อสร้างด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ/หรือส่วนผสมของซิลิเกต (silicate binder) หรือส่วนผสมของไลม์ (lime binder) ที่มีโครงสร้างและการก่อตัวเช่นเดียวกับจีโอโพลิเมอร์
- สามารถขึ้นรูปได้ และคงตัวได้เร็วกว่าคอนกรีตและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เหมาะสำหรับงานที่ต้องการทำในระยะเวลาสั้นๆ เช่น งานซ่อมถนน ทางวิ่งในสนามบิน ในงานศิลปะหรืองานหล่อแบบต่างๆ เป็นต้น (Davidovits *et al.*, 2002)
- มีความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านได้ต่ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10^{-9} cm/s (Davidovits *et al.*, 2002)
- ความคงทนต่อการกัดกร่อนของกรด จากการทดสอบสามารถทนต่อการกัดกร่อนของกรดอะซิติก 5% โดยนำจีโอโพลิเมอร์ไปแช่ในกรดเป็นระยะเวลา 200 วันปรากฏว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จะลดลงในอัตราส่วนที่น้อยกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพสต์ (Davidovits *et al.*, 2002)
- ความทนทานต่อการทำลายของสารซัลเฟต เมื่อนำจีโอโพลิเมอร์ไปแช่ในสารซัลเฟตจีโอโพลิเมอร์จะเกิดการสูญเสียไอออนของอัลคาไลน์ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดความสมดุลด้านประจุไฟฟ้าในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาภูเขา การสูญเสียไอออนอัลคาไลน์ดังกล่าวทำให้เกิดความเค้นและรอยแตก แต่การทำลายนี้มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพสต์ (Hardjito *et al.*, 2005)

4.3 การใช้ประโยชน์วัสดุจีโอโพลิเมอร์

จากคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่คล้ายกับคอนกรีตและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงมีการนำวัสดุจีโอโพลิเมอร์มาใช้งานต่างๆ เช่น การปิดผิวหน้าของหลุมฝังกลบขยะมูลฝอยหรือใช้เป็นวัสดุรองพื้นหลุมฝังกลบเนื่องจากมีค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำ ใช้ทำฝายกั้นน้ำ

คลองส่งน้ำคาคด้วยจีโอโพลิเมอร์ ทำโครงสร้างเขื่อนกั้นน้ำหรือใช้เป็นโครงสร้างในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ทำพื้นทางเดิน พื้นอาคาร โรงเก็บของ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นด่างสูงจีโอโพลิเมอร์จึงสามารถใช้ในการเก็บกักโลหะหนัก เช่น สารหนู ตะกั่ว คอปเปอร์แมงกานีส พรอทและโลหะอื่นๆ ในของเสียที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบซึ่งสามารถป้องกันการชะละลายได้เกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ (van Jaarsveld *et al.*, 1997) หรือใช้ในการเก็บกักของเสียจากแร่ใยหิน ของเสียจากสารกัมมันตภาพรังสี เป็นต้น (Davidovits *et al.*, 2002) จากการที่มีส่วนประกอบเป็นเส้นใยที่ทนความร้อนและไฟได้สามารถนำมาทำเป็นผนังกันความร้อน นำมาทำเซรามิก (ceramic) และสามารถขึ้นรูปเป็นงานศิลปะได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นและสารกระตุ้น จากคำแนะนำของ Davidovits ว่าอัตราส่วนความเข้มข้น (molar ratio) ของ Si ต่อ Al ประมาณ 2 เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับทำสารซีเมนต์และคอนกรีต

4.4 การกักก๊าซเรือนกระจก(CO₂) ของจีโอโพลิเมอร์

จากการนำเสนอของ Davidovits ปี 2002 โดยทำการเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO₂) ของการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับการผลิตจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ พบว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะต้องมีการเตรียมวัสดุตั้งต้น (แคลเซียมคาร์บอเนต) ด้วยการเผาให้มีคุณสมบัติเป็นปูนขาว(Calcinations) การเผาวัสดุดังกล่าวเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะก่อให้เกิด CO₂ เท่ากับ 0.55 ตัน และต้องมีการเผาไหม้ที่ต้องใช้เชื้อเพลิงซึ่งเป็นเชื้อเพลิงคาร์บอน ที่ก่อให้เกิดก๊าซ CO₂ เท่ากับ 0.4 ตัน เมื่อเปรียบเทียบอย่างง่าย ๆ คือ การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตันจะก่อให้เกิด CO₂ 1 ตัน ส่วนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ซึ่งของเสียที่เป็นตะก้นจากเตาเผาเป็นผลพลอยได้จากการผลิต (By - product) โดยมาทำการเผา(Calcinations) ที่ 800 °C ผลผลิตที่ได้ 1 ตัน ก่อให้เกิด CO₂ เท่ากับ 0.184 ตันจากการเผาไหม้ที่ต้องใช้เชื้อเพลิงคาร์บอน เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิต 1 ตันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับการผลิตจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ ก่อให้เกิด CO₂ น้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5-6 เท่า

ปัจจุบันการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นแหล่งที่ปล่อย CO₂ ออกสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมาก และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นเทคโนโลยีจีโอโพลิเมอร์ไม่ใช่มิใช่ประโยชน์แค่ในงานก่อสร้างเท่านั้น แต่ยังเป็นวัสดุที่รักษาสังแวดล้อม โดยสามารถลดคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ถึง 80% และยังเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ ลดค่าการจัดการ และสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุตั้งต้นได้อีกด้วย

5. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำวัสดุอื่นมาผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางประการ และช่วยลดการใช้ หรือการผลิติดีมาหลายสิบปีแล้วซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้เถ้าลอยเนื่องจากมีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เช่น การนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตสด(fresh concrete) โดยพบว่าจะทำให้เพสต์มีปริมาตรมากขึ้น และเถ้าลอยจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างมวลรวม จากรูปร่างที่เป็นทรงกลมของเถ้าลอยจะลดแรงเสียดทานระหว่างมวลรวมกับเพสต์ (Ravina, 1980) สนับสนุนกับงานวิจัยของสันติสุข (2537) ที่พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะใช้น้ำในส่วนผสมลดลงที่ความสามารถในการทำงานเท่ากัน จากการศึกษาของบุรฉัตรและพิชัย, 2537 พบว่าเถ้าลอยที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตได้ และสามารถช่วยให้ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา, เถ้าลอยที่มีความละเอียดมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวเร็วขึ้นและในทางกลับกันเถ้าลอยที่หยาบมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวช้าลง(Kriwood *et al.*, 2001) ปริมาณ SO_3 ในเถ้าลอยที่สูงขึ้นจะมีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มมากขึ้นได้ (ปริญญญา, 2547) นอกจากนี้เถ้าลอยยังมีวัสดุอย่างอื่นที่ได้รับความสนใจในการนำมาเป็นวัสดุปอซโซลานเช่น เถ้าแกลบ (จักรพันธ์และคณะ, 2548) ตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน โดยการนำมากระตุ้นให้มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 650- 1,000 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่าดัชนีปอซโซลานสูง (จิตรกร, 2543) และเมื่อนำมาผสมกับมอร์ตาร์สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้ดี (ชนเศ และคณะ, 2546)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานมาใช้เป็นวัสดุประสานโดยไม่มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เลย เริ่มต้นเมื่อมีการค้นพบวัสดุชนิดหนึ่งในประเทศยูเครนซึ่งเดิมเรียกกันว่า ดิน- ซีเมนต์(soil-cement) และได้มีการศึกษาวิจัยอย่างจริงจังในปีค.ศ.1976 โดย Davidovits โดยได้ทำการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดังกล่าวพบว่าประกอบด้วย ซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก และได้ตั้งชื่อสารนี้ว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) วัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้รับความสนใจในการศึกษาค้นคว้าอย่างจริงจัง ต่อมาในปีค.ศ. 1999 Davidovits และคณะได้อธิบายถึงส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ว่ามีลักษณะคล้ายกับ zeolite แต่จะมีโครงสร้างเล็กๆมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และเมื่อนำเอาสารละลายต่างสูงมากระตุ้น เมื่อถูกกระตุ้นซิลิกาและอะลูมินาในวัสดุจะมีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสานกลายเป็นจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (Geopolymer paste) ซึ่งวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์นี้มีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้ดี สามารถนำไปใช้งานได้ ในปีเดียวกันนี้ Palamo และคณะ ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยมาเป็นวัสดุ

โอโพลิเมอร์พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถรับแรงอัด ได้แก่ อุณหภูมิของการบ่ม และชนิดของสารกระตุ้นที่ใช้ซึ่งเป็นค่าสูง นอกจากนี้มีการนำวัสดุต่างๆ มาทำการศึกษาพร้อมกับเถ้าลอย เช่น การนำดินขาวเผา โดยนำดินขาวเผาที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 500- 600 °C มาผสมกับเถ้าลอย อัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินขาวเผาเท่า 86:14 โดยมวลพบว่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี(van Jaardveld และคณะ,2002) และมีการศึกษาเกี่ยวกับสารกระตุ้นโดย Hardjito และคณะ(2002) ได้ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินมากระตุ้นด้วยสารกระตุ้นอัลคาไลซิลิเกต(alkali silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์(alkali hydroxide) พบว่ายิ่งสารละลายมีความเข้มข้นสูงกำลังรับแรงอัดก็ดีขึ้น อัตราส่วนของสารกระตุ้น $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ต่อ NaOH ก็มีผลต่อกำลังเช่นกัน Criado และ คณะ(2007) พบว่าความเข้มข้นของซิลิกาในสารละลายกระตุ้น และอุณหภูมิที่ทำการเก็บรักษา มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในจีโอโพลิเมอร์ที่แสดงออกจากการพัฒนากำลังรับแรงอัด ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง Lee และ van Dervanter (2003) คือพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายซิลิเกต (SiO_2) ที่เพิ่มขึ้นจีโอโพลิเมอร์จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับในประเทศไทยการวิจัยทางด้านจีโอโพลิเมอร์ได้เริ่มขึ้นเมื่อปลายปี พ.ศ. 2547 โดยถนัดกิจและปริญญญา (2548) ทดลองการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะโดยได้ทำการศึกษาเบื้องต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะคัดขนาด พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นและขนาดเถ้าลอยที่ละเอียดอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้มีการตีพิมพ์ผลงานในวารสาร และเสนอผลงานที่การประชุมวิชาการคอนกรีต และจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติครั้งที่ 1 ในปีพ.ศ.2548 และงานการประชุมวิชาการคอนกรีต และจีโอโพลิเมอร์นานาชาติครั้งที่ 1 เช่นผลงานวิจัยของอนุชาติ(2548) ในการผสมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมดินขาวเผาโดยทำการเผาดินขาวที่ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจะใช้สัดส่วนระหว่างสารละลาย($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ต่อ NaOH) อยู่ที่ 0.67- 1.0 โดยน้ำหนัก และสามารถแทนที่เถ้าลอยด้วยดินขาวเผาได้สูงสุดที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ถ้าทำการแทนที่เพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดจะลดลง, Songpiriyakij (2548) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการผสม และการเก็บรักษาที่มีต่อกำลังรับแรงอัดพบว่าการผสมและเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำในช่วงแรกกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงระยะเวลา 28 วัน ซึ่งให้ค่าที่สูงกว่าตัวอย่างที่มีการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง Kamhangrittirong (2006) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้ระยะเวลาก่อตัวลดลง แต่กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

- เครื่องบดคัดแปลงจากเครื่อง Los Angeles Abrasive Machine
- เตาเผาใช้เตาเผาฮีท Carbolite Eurotherm 1,000 องศาเซลเซียส
- เครื่องคัดขนาด Sieve เบอร์ 100
- เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo AG 204
- เครื่องผสม Hobart mixer ขนาด 4 ลิตร
- แบบหล่อ ลูกบาศก์ขนาด 37.5 x 37.5 x 37.5 มม.
- เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength test)
- กล้องจุลทรรศน์ Sterio microscope กำลังขยาย 400 เท่า

สารเคมีและวัสดุ

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์

- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(ความบริสุทธิ์ 98%) ความเข้มข้น 10 M
- สารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งมีองค์ประกอบของ Na_2O 15.32%, SiO_2 32.87% และน้ำ 51.81% โดยมวล ผสมสารเคมีทั้งสองทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนทำการทดลอง

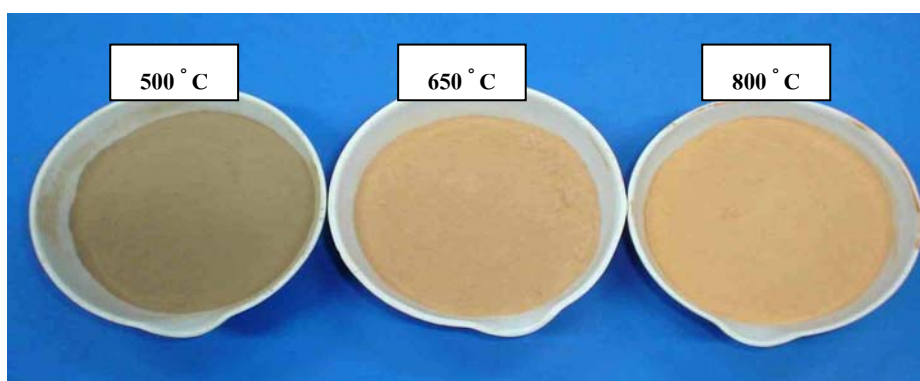
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน โดยทำการเก็บตัวอย่างที่บ่อตากตะกอน ทำการเก็บ 1 ครั้งให้ได้ปริมาณที่เพียงพอโดยใช้วิธีสุ่มเก็บตัวอย่างรอบลานตากตะกอน

1.1 เตรียมตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน โดยนำตะกอนที่ได้ไปตากแดดให้แห้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^\circ \text{C}$ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างแห้งสนิท จากนั้น

ลดขนาดของตะกอนให้ตะกอนมีขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องบดใช้การหมุน 2,000 รอบ เมื่อได้ตะกอนละเอียดแล้วนำมาคัดขนาดโดยผ่านตะแกรงเบอร์ 100 โดยนำส่วนที่ผ่านตะแกรงมาทำการทดลอง

1.2 การเผาตะกอนประปาที่มีขนาดตามต้องการด้วยเตาเผา โดยตั้งอุณหภูมิที่ 500°C และจะเริ่มจับเวลาเมื่อเตาเผามีอุณหภูมิที่ต้องการ เป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงปิดเตาเผา ปล่องให้ตะกอนเย็นลงเล็กน้อยแล้วค่อยนำออกมา จากนั้นนำตะกอนชุดใหม่เข้าเตา แล้วทำตามขั้นตอนเดิม โดยเปลี่ยนเป็น 650°C และ 800°C จนกว่าจะได้ปริมาณตะกอนเผาเพียงพอ การเก็บรักษาตะกอนเผา จะเก็บไว้ในถุงซิปปะเพื่อป้องกันความชื้น ภาพที่ 4 แสดงลักษณะและสีของเถ้าตะกอนที่เผา



ภาพที่ 3 ลักษณะและสีของตะกอนประปาเผาที่ 500°C , 650°C และ 800°C

2. เถ้าลอย (Fly ash) จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นเถ้าลอยที่มีความละเอียดเหมือนผงฝุ่นแป้ง มีสีน้ำตาลอ่อนๆ เมื่อสัมผัสจะรู้สึกนุ่ม และลื่น



ภาพที่ 4 ลักษณะและสีของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

วิธีการ

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือการทดสอบคุณสมบัติของตะกอนเผา การทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ และการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของจีโอโพลิเมอร์จากสารที่มีซิลิกา อลูมินาและแคลเซียม

1. การทดสอบคุณสมบัติของตะกอนเผา

1.1 การทดสอบหาค่าความชื้นของตะกอน

นำเต้าตะกอนเผาที่ 500, 650 และ 800 °C เป็นเวลา 15 นาที มาทดสอบด้วยวิธีการอบที่ 110 ±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักน้ำที่หายไป ตามมาตรฐาน ASTM C 311

1.2 การทดลองหาค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI)

นำตะกอนมาทำการเผาที่อุณหภูมิ 950±5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 แล้วหาน้ำหนักที่หายไป ตามมาตรฐาน ASTM C 114

1.3 การทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง XRF (X-Ray Fluorescence) ทำการตรวจวัดโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ถ่ายภาพขยายลักษณะรูปร่างของอนุภาคตะกอนเผา

โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Sterio Microscope) กำลังขยาย 400 เท่า

2. การทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

2.1 การทดสอบความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ตามมาตรฐาน ASTM C

187 และการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Setting time) ตามมาตรฐาน ASTM C 191ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การผสมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย และการผสมจีโอโพลิเมอร์จากการแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาที่อุณหภูมิ 500, 650 และ 800 °C

2.1.1 การผสมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. แปรผันสัดส่วนระหว่างสารละลาย $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ต่อ NaOH ซึ่งใช้เป็นสารกระตุ้น สัดส่วนเท่ากับ 0.67, 1, 1.5, 2 และ 2.5 และ
2. แปรผันสัดส่วนระหว่างสารกระตุ้น ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 + \text{NaOH}$) ต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.54, 0.67 และ 0.82 เพื่อให้ส่วนผสมมีความชื้นเหมาะสม การผสมจีโอโพลิเมอร์มีรายละเอียดดังตารางที่ 4
3. ทดสอบความสามารถในการเทได้ (workability) ของส่วนผสม โดยเลือกส่วนผสมที่มีความชื้นเหมาะสม (ทดสอบด้วยเครื่องไวกัด เข็มไวกัดจมในจีโอโพลิเมอร์ที่ระยะ 10 mm ในเวลา 30 วินาที) และนำส่วนผสมที่มีความชื้นเหมาะสมดังกล่าวมาทดสอบระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (ทดสอบด้วยเครื่องไวกัด เข็มไวกัดจมในจีโอโพลิเมอร์ที่ระยะ 25 mm ในเวลา 30 วินาที) และระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (เข็มไวกัดไม่จมลงในส่วนผสมในระยะเวลา 30 วินาที)

ตารางที่ 4 แสดงสัดส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

$(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}) : \text{S} : (\text{Sol/FA})$	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$	เถ้าลอย (g)	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 + \text{NaOH} (\text{g})$
0.67 S 0.54	0.67	2000	1080
0.67 S 0.67			1340
0.67 S 0.82			1640
1 S 0.54	1	2000	1080
1 S 0.67			1340
1 S 0.82			1640
1.5 S 0.54	1.5	2000	1080
1.5 S 0.67			1340
1.5 S 0.82			1640
2 S 0.54	2	2000	1080
2 S 0.67			1340
2 S 0.82			1640
2.5 S 0.54	2.5	2000	1080
2.5 S 0.67			1340
2.5 S 0.82			1640

2.1.2 การผสมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผา

1. ใช้สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ต่อ NaOH ที่จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยให้กำลังรับ

แรงอัดสูงสุด

2. แปรผันร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาที่สัดส่วน 0, 10, 20, 30, 40, .100 ทุกๆ อุณหภูมิเผา และ

3. แปรผันสัดส่วนของสารกระตุ้นต่อวัสดุผง(เถ้าลอย+ตะกอนประปา) เท่ากับ 0.67, 0.82, 1 และ 1.2 แสดงสัดส่วนการผสมจีโอโพลิเมอร์ดังตารางที่ 5

4. ทดสอบความสามารถในการเทได้(workability) ของส่วนผสมโดยเลือกส่วนผสมที่มีความข้นเหลวปกติ นำส่วนผสมที่มีความข้นเหลวปกติมาทดสอบระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น และระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย

ตารางที่ 5 แสดงสัดส่วนในการผสมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผา

(%Replacement) : S : (Sol/Solid)	วัสดุผง(Solid) (g)		Na ₂ O•SiO ₃ + NaOH (g)
	เถ้าลอย(FA)	ตะกอนประปาเผา	
0(FA) S 0.82	2000	0	1640
10 S 0.67	1800	200	1340
10 S 0.82			1640
10 S 1			2000
10 S 1.2			2400
20 S 0.67	1600	400	1340
20 S 0.82			1640
20 S 1			2000
20 S 1.2			2400
30 S 0.67	1400	600	1340
30 S 0.82			1640
30 S 1			2000
30 S 1.2			2400
40 S 0.67	1200	800	1340
40 S 0.82			1640
40 S 1			2000
40 S 1.2			2400
50 S 0.67	1000	1000	1340
50 S 0.82			1640
50 S 1			2000
50 S 1.2			2400

2.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

นำส่วนผสมที่มีความชื้นเหลือปกติ ทั้งจีโอโพลีเมอร์จากถ้ำลอย และการผสมจีโอโพลีเมอร์จากการแทนที่ถ้ำลอยด้วยตะกอนประปาเผา มาผสมและขึ้นรูป แล้วนำมาทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 618 ที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน

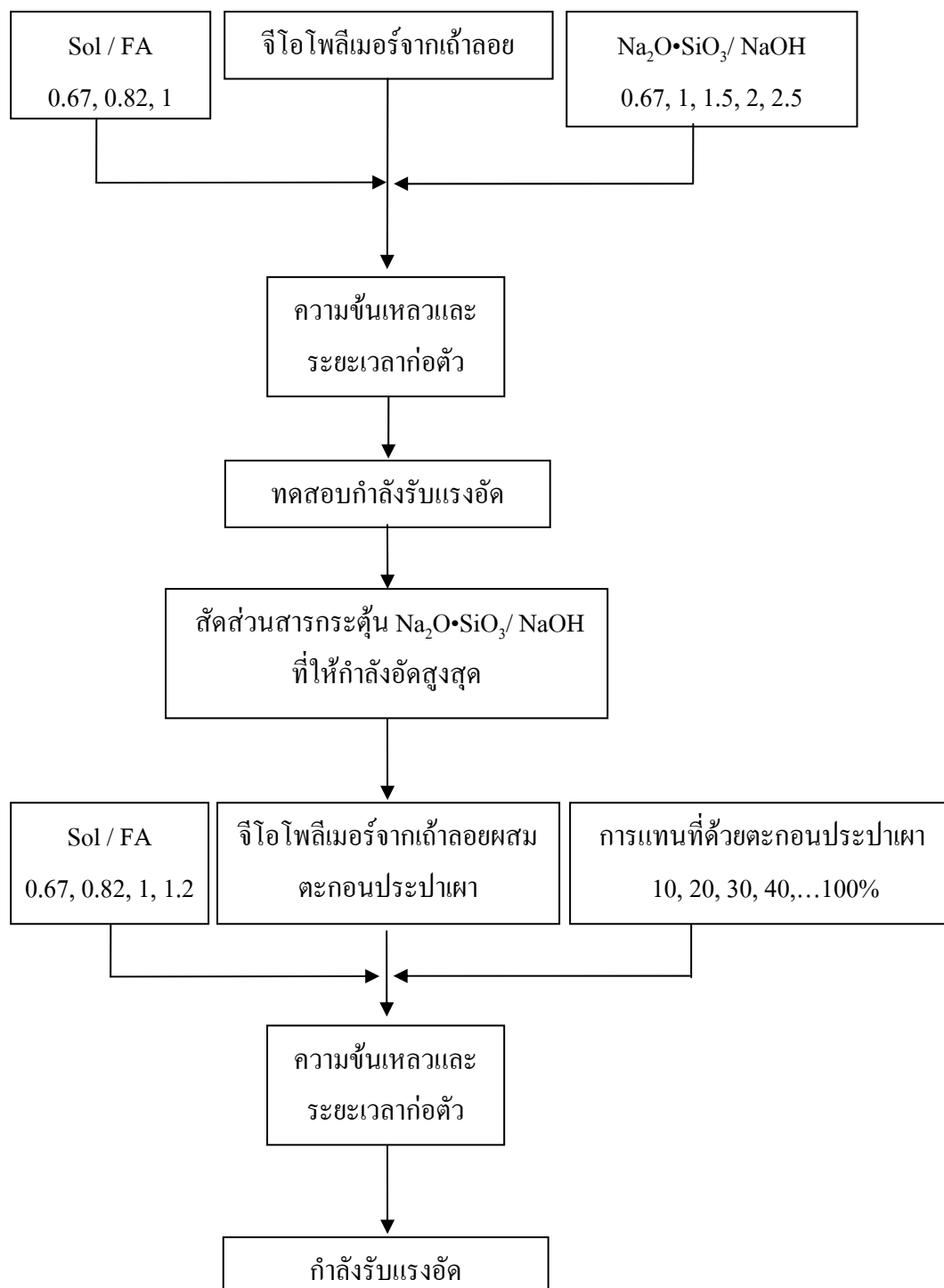
2.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลีเมอร์เฟสค์

ถ่ายภาพขยายลักษณะรูปร่างของจีโอโพลีเมอร์เฟสค์ด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) กำลังขยาย 2,000 เท่า ส่งตรวจตัวอย่างที่สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

3. การทดสอบการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันของจีโอโพลีเมอร์จากสารที่มีออกไซด์ของซิลิกอน อลูมิเนียม และแคลเซียม

1. นำวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกอน อลูมิเนียม และแคลเซียม ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในวัสดุปอซโซลานในการทดลองนี้ใช้ผงซิลิกาฟูม, ผงอลูมินา, ปูนขาว และถ้ำลอย
2. ทำการชะละลายวัสดุดังกล่าว ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 30 นาที แล้วกรองเอาสารละลายด้วยกระดาษ GF/C
3. นำสารละลายที่กรองแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกผสมกับสารกระตุ้นผสม ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 + \text{NaOH}$) และส่วนที่สองผสมกับสารละลาย $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ทำการกวนผสม แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลง

แผนผังการทดลอง



ภาพที่ 5 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การผสมจีโอโพลีเมอร์

1. เทสารกระตุ้น($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 + \text{NaOH}$) ที่ผสมกันไว้แล้วลงในเครื่องผสม(Horbart mixer)
2. เทวัสดุผง(เถ้าลอย และ/หรือตะกอนประปาเผา)ลงในอ่างผสม และปล่อยให้ดูดซึ่มสารกระตุ้นเป็นระยะเวลา 30 วินาที
3. ทำการกวนผสมที่ความเร็ว 140 ± 5 รอบ/นาที(กวนช้า) เป็นเวลา 30 วินาที และทำการกวนผสมที่ความเร็ว 285 ± 10 รอบ/นาที(กวนเร็ว) เป็นเวลา 1 นาที ตาม ASTM C305-65
4. เทส่วนผสมจีโอโพลีเมอร์ที่ได้ลงในแบบหล่อ แล้วใช้ผ้าชุบน้ำหมาดๆ คลุมไว้เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำอย่างน้อย 24 ชั่วโมง
5. แกะแบบออกแล้วนำจีโอโพลีเมอร์มาบ่มในถุงพลาสติก โดยมีกระดาษหนังสือพิมพ์ชุบน้ำหมาดๆ ห่อไว้ แล้วใส่ไว้ในถุงอีกชั้นหนึ่ง แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

ผลและวิจารณ์

ผล

จากผลการทดลองเบื้องต้นโดยนำตะกอนประปาที่คัดขนาดโดยผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (แต่ยังไม่ผ่านการเผา) มาผสมกับเถ้าลอย และสารกระตุ้น พบว่าส่วนผสม ไม่สามารถผสมกันได้เมื่อเทใส่แบบตัวอย่างเกิดการแตก ไม่เป็นก้อน หลังจากนั้นจึงนำตะกอนประปาไปกระตุ้นให้มีองค์ประกอบของออกไซด์ โดยผ่านการเผา และนำมาผสมในลักษณะเดียวกัน พบว่าสามารถนำมาขึ้นรูปได้โดยไม่แตกร้าว นำไปสู่การทดลองที่ให้ผลการทดลองในส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนเผาที่ 500, 650 และ 800 °C เป็นเวลา 15 นาที เปรียบเทียบกับเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

2. ผลการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย และจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผา

3. ผลของ ซิลิกา อลูมินา และแคลเซียม ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันของจีโอโพลีเมอร์

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนและเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าตะกอนประปาและเถ้าลอย

1.1.1 ผลการทดสอบพบว่าตะกอนประปาเผาและเถ้าลอยมีค่าความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 1.2-1.54 ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 3

1.1.2 ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) แสดงถึงปริมาณคาร์บอนในตัวอย่าง ซึ่งหมายถึงสารอินทรีย์ในตัวอย่าง ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ของตะกอนที่

เผา 500 °C มีค่ามากที่สุด คือ 3.98 ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิของตัวอย่างตะกอน (500 °C) ยังไม่สามารถเผาไหม้สลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในวัสดุได้หมดปกติสารอินทรีย์จะถูกทำลายด้วยการเผาที่ 550 °C นาน 15 นาที ขึ้นไป ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ของตะกอนเผา 650 และ 800 °C มีค่าใกล้เคียงกันคือที่ 3.04 และ 2.97 และถ้ำลอยมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้เท่ากับ 1.24 ค่าความชื้นและค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้แสดงในตารางที่ 6

1.2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนเผาจากโรงผลิตประป่าน้ำบางเขน

ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของตะกอนประปาเผาที่อุณหภูมิ 500 650 และ 800 °C ด้วยวิธี XRF ผลการทดสอบ พบว่าตะกอนเผาที่ 500 650 และ 800 °C มีองค์ประกอบของ ซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์เป็นสารประกอบหลัก คือมี ซิลิกา ร้อยละ 68-79, อลูมินา ร้อยละ 12-15 และเหล็กออกไซด์ ร้อยละ 4 -6 จากการที่พบซิลิกาในปริมาณมากเนื่องจากซิลิกอนเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของแร่ปฐมภูมิ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอนุภาคทราย และทรายแป้งที่อยู่ในตะกอน โดยตะกอนประปาที่นำมาทดลองจะประกอบด้วยทรายแป้งเป็นส่วนใหญ่ ส่วนออกไซด์ของอลูมิเนียมมาจากแหล่งแร่อลูมิโนซิลิเกต และจากการตกค้างของสารเคมีที่ใช้สร้างตะกอน ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) โดยผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบของธนศ (2544) และจิตกร(2543) ที่พบว่าตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปบบางเขนเผา มีองค์ประกอบของซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 60, 25 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของตะกอนประปาเผาที่ 500, 650 และ 800 °C

คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพ (ร้อยละ)	ตะกอนเผา 500 °C	ตะกอนเผา 650 °C	ตะกอนเผา 800 °C
SiO ₂	68.58	72.96	78.41
Al ₂ O ₃	14.38	14.86	11.94
Fe ₂ O ₃	5.77	5.94	4.27
CaO	0.72	0.78	0.58
K ₂ O	2.24	2.13	1.72
MgO	0.81	0.82	1.10
SO ₃	0.26	0.28	0.06
Na ₂ O	0.36	0.37	0.37
ความชื้น	1.23	1.20	1.19
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI)	8.64	3.04	2.97

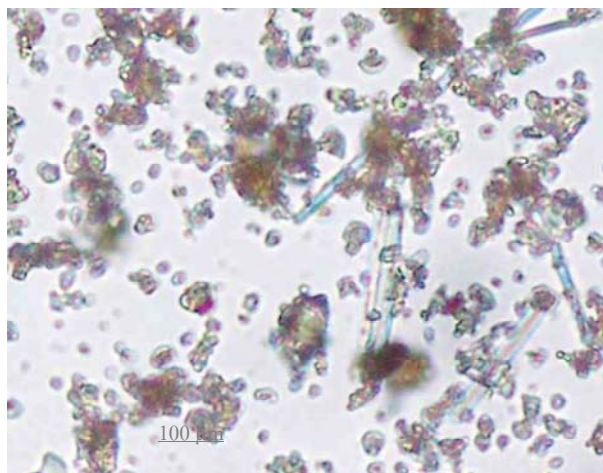
เมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติบางประการของตะกอนประปาเผาทั้งสามอุณหภูมิกับมาตรฐานสารปอชโซลานในตารางที่ 7 พบว่าตะกอนเผาที่ 500 °C มีปริมาณร้อยละ ซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์รวมกัน 83.73 มากกว่ามาตรฐานที่มีร้อยละ 70 มีร้อยละของซัลเฟอร์ออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และโซเดียมออกไซด์เท่ากับ 0.26, 0.81 และ 0.36 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 4, 5 และ 1.5 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้เท่ากับ 8.64 ซึ่งอยู่ในช่วงของสารปอชโซลานชนิด N ส่วนตะกอนเผาที่ 650 และ 800 °C มีปริมาณร้อยละ ซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์รวมกัน 93.79 และ 94.62 มากกว่ามาตรฐานที่มีร้อยละ 70 มีร้อยละของซัลเฟอร์ออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และโซเดียมออกไซด์อยู่ในมาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 4, 5 และ 1.5 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้เท่ากับ 3.04 และ 2.97 ซึ่งอยู่ในช่วงของสารปอชโซลานชนิด C และ F ดังนั้นตะกอนประปาเผาน่าจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอชโซลานได้

ตารางที่ 7 แสดงคุณสมบัติของตะกอนประปาเผา เปรียบเทียบกับมาตรฐานสารปอชโซลาน

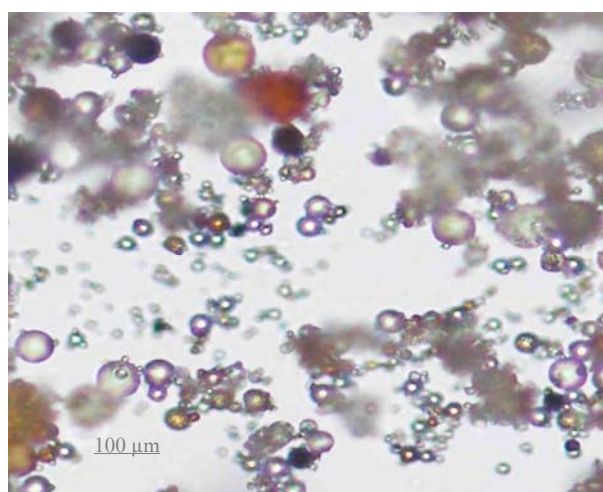
คุณสมบัติทางเคมี (ร้อยละ)	สารปอชโซลาน			ตะกอนประปาเผา		
	N	F	C	500 °C	650 °C	800 °C
ปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ น้อยที่สุด	70	70	50	88.73	93.79	94.62
SO_3 มากที่สุด	4	5	5	0.26	0.28	0.06
MgO	5	5	5	0.81	0.82	1.10
Na_2O มากที่สุด	1.5	1.5	1.5	0.36	0.37	0.37
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) (มากที่สุด)	10	6	6	8.64	3.04	2.97

1.3 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง และลักษณะผิวของตะกอนประปาเผาและเถ้าลอย

เมื่อนำตะกอนประปาเผาและเถ้าลอยมาทำการวิเคราะห์รูปร่างและพื้นผิวรวมทั้งสีของวัสดุทั้งสองชนิดโดยกล้องจุลทรรศน์ Sterio microscope ที่กำลังขยาย 400 เท่า พบว่าลักษณะรูปร่างของตะกอนประปาเผามีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ลักษณะพื้นผิวขรุขระ และมีสีน้ำตาลแดง เหมือนกับสีของอิฐ ซึ่งเป็นสีของอูมิเนียมเผา แสดงดังภาพที่ 6 ในขณะที่รูปร่างลักษณะเถ้าลอย ภาพที่ 7 เป็นทรงกลม ผิวเรียบสม่ำเสมอ มีความมันวาวเหมือนแก้ว เนื่องจากการที่เถ้าลอยเกิดจากการสันดาปของถ่านหินและมีหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง ผลจากการหลอมละลายทำให้เถ้าลอยที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม และอยู่ในสถานะที่เหมือนกับแก้ว (glassy phase)



ภาพที่ 6 ภาพขยายอนุภาคตะกอนประปาเผาด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า



ภาพที่ 7 ภาพขยายอนุภาคเถ้าลอยด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า

2. คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย และจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากตะกอนประปาเผาแทนที่เถ้าลอย

2.1 ความสามารถในการเทได้ และระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

การศึกษาในขั้นนี้เป็นการศึกษาผลของการแปรผันสัดส่วนสารกระตุ้นต่อเถ้าลอย และผลของการแปรผันสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ต่อ NaOH ที่ใช้เป็นสารกระตุ้นที่มีต่อความสามารถในการเท

ได้ของเพสต์โดยพิจารณาจากระดับความข้นเหลว ในการทดลองนี้ต้องการให้ทุกตัวอย่างมีค่าความข้นเหลวเท่ากัน คือที่ระดับความข้นเหลวปกติ (normal consistency) เมื่อได้สัดส่วนที่มีความข้นเหลวปกติแล้วจึงนำสัดส่วนตัวอย่างดังกล่าวมาทดสอบระยะเวลาก่อตัว ผลการทดสอบ แสดงดังตาราง ที่ 8

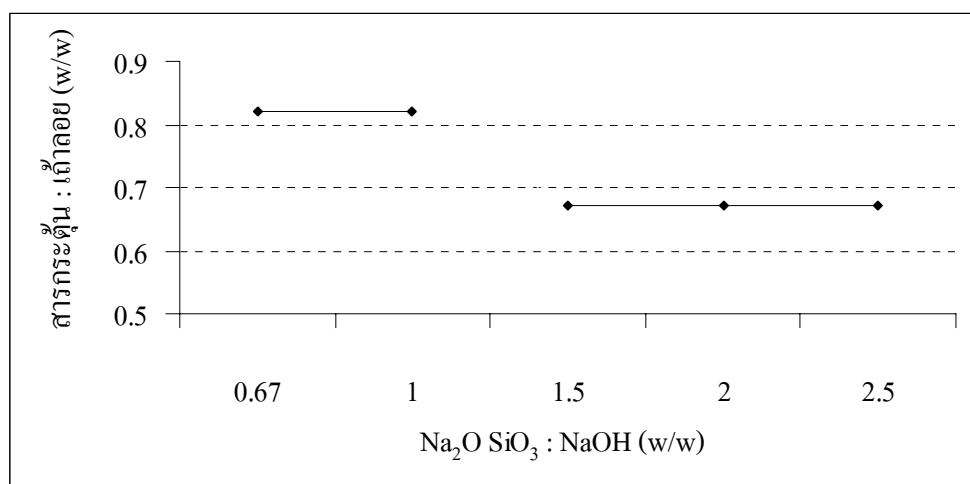
ตารางที่ 8 แสดงความข้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

(Na ₂ O•SiO ₃ / NaOH) : S : (Sol/FA)	ความข้นเหลว	ระยะเวลาการก่อตัว(นาที)	
	ระยะเข็มจม(มิลลิเมตร)	ระยะต้น	ระยะปลาย
0.67 S 0.54	5	N	N
0.67 S 0.67	8	N	N
0.67 S 0.82	10	18	35
1 S 0.54	4	N	N
1 S 0.67	8	N	N
1 S 0.82	10	21	38
1.5 S 0.54	6	N	N
1.5 S 0.67	10	21	39
1.5 S 0.82	13	N	N
2 S 0.54	4	N	N
2 S 0.67	10	24	43
2 S 0.82	15	N	N
2.5 S 0.54	7	N	N
2.5 S 0.67	10	25	41
2.5 S 0.82	15	N	N

N = ไม่ได้นำมาทำการทดสอบเนื่องจากเป็นสัดส่วนผสมที่ไม่ได้ความข้นเหลวปกติ

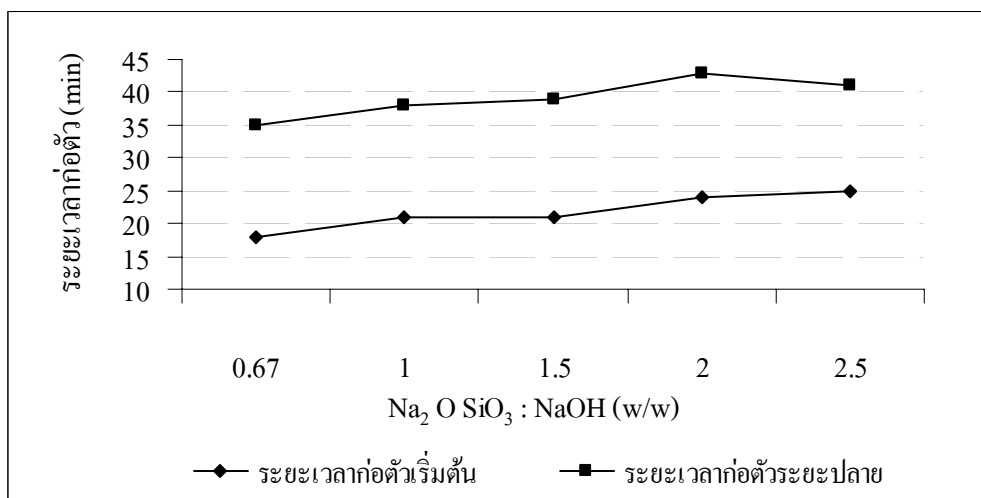
จากผลการวัดความข้นเหลวโดยวัดการจมตัวของเข็มไวแคต พบว่าที่สัดส่วนสารกระตุ้นเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลาย (คือเพิ่มสัดส่วนสารกระตุ้น: เถ้าลอย) เข็มจะจมตัวในส่วนผสมได้มากขึ้น เช่นที่ Na₂O•SiO₃ : NaOH เท่ากับ 0.67 ต้องใช้สารกระตุ้น: เถ้าลอย เท่ากับ 0.82 ซึ่งจะได้

ส่วนผสมมีความข้นเหลวปกติ (ระยะเข็มจม 10 mm) นั่นคือปริมาณสารกระตุ้นมากพอซึ่งจะทำให้ จีโอโพลิเมอร์สามารถเทได้ หากใช้สารกระตุ้นในสัดส่วนที่น้อยกว่านี้จะให้ระยะการจมตัวของเข็ม ใว้แค่น้อยกว่า 10 มม. หมายถึง ส่วนผสมนั้นมีความหนืด หรือแข็งเกินไปส่งผลให้มี ความสามารถในการเทได้ต่ำ



ภาพที่ 8 สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ที่มีต่อความต้องการสารกระตุ้นเพื่อให้ได้ส่วนผสมมีระดับ ความข้นเหลวปกติ

เมื่อนำผลจากการแปรผันสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ มาพิจารณาร่วม ด้วย(ภาพที่ 8) พบว่า ในการผสมเพื่อให้ได้ความข้นเหลวปกติสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ในช่วง 0.67- 1 ต้องการ สัดส่วนสารกระตุ้น: เถ้าลอยเท่ากับ 0.82 แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เป็น 1.5- 2.5 พบว่าสัดส่วนสารกระตุ้น: เถ้าลอยลดลงเป็น 0.67 แสดงว่า $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3$ เป็นปัจจัยสำคัญต่อ ความสามารถในการเทได้ของจีโอโพลิเมอร์



ภาพที่ 9 ผลของสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3$: NaOH ที่มีต่อระยะเวลาก่อตัวของอีพอกซีโพลีเมอร์จากถั่วลย

เมื่อเลือกเฉพาะสัดส่วนผสมที่มีความขึ้นเหลวปกติมาพิจารณาผลของ $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3$: NaOH ที่มีต่อระยะเวลาก่อตัวของอีพอกซีโพลีเมอร์ภาพที่ 9 พบว่า เมื่อ สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3$: NaOH มีปริมาณ $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3$ เพิ่มขึ้นมีผลให้ระยะเวลาก่อตัวของอีพอกซีโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาก่อตัวของอีพอกซีโพลีเมอร์จากถั่วลยกับปูนซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นที่ประมาณ 45 นาที พบว่าระยะเวลาก่อตัวของอีพอกซีโพลีเมอร์ (18-25 นาที) เกิดขึ้นเร็วกว่า 2-3 เท่า อีพอกซีโพลีเมอร์จึงมีความจำกัดในการทำงาน อีพอกซีโพลีเมอร์เหมาะสำหรับนำไปใช้ในงานที่มีความเร่งด่วน เช่นในงานซ่อมทาง ถนน หรือทางวิ่งเครื่องบิน (run way) งานหล่อแบบที่ต้องการระยะเวลาก่อตัวที่รวดเร็ว เป็นต้น

2.2 ความสามารถในการเทได้และระยะเวลาก่อตัวของอีพอกซีโพลีเมอร์จากถั่วลยผสมตะกอนประปาเผา

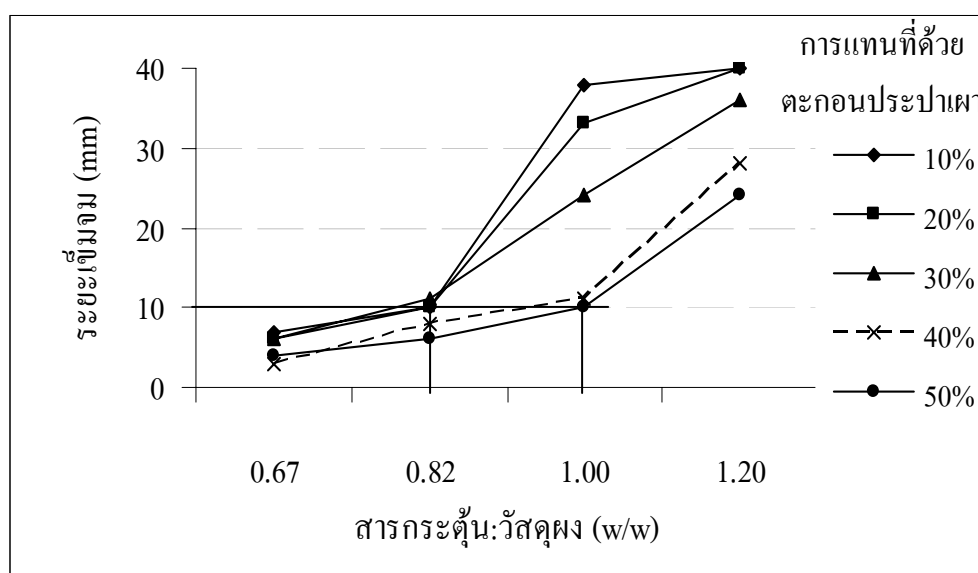
จากผลการทดลองข้อที่ 2.1 เมื่อนำสัดส่วนผสมที่ได้ตามความต้องการมาขึ้นรูปและวัดกำลังรับแรงอัดครบที่อายุ 90 วันแล้ว พบว่าผลของการแปรผันสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3$: NaOH โดยมวลที่ให้กำลังรับแรงอัดของอีพอกซีโพลีเมอร์สูงที่สุดอยู่ที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3$: NaOH เท่ากับ 1 (กล่าวถึงในข้อ 2.3) การทดลองในขั้นนี้จึงใช้สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_3$: NaOH เท่ากับ 1 มาใช้เป็นสารกระตุ้น พร้อมทั้งทำการแปรผันสัดส่วนสารกระตุ้น:วัสดุผง(ถั่วลยผสมตะกอนประปาเผา) และแปรผันการแทนที่ถั่วลยด้วยตะกอนประปาเผา(500, 650 และ 800°C) ตั้งแต่ร้อยละ 10-100 โดยมวล

การพิจารณาเป็นลักษณะเดียวกับการทดลองในข้อ 2.1 คือทดสอบความสามารถในการเทได้ และเลือกส่วนผสมที่มีความสามารถในการเทได้ที่ระดับความข้นเหลวปกติมาทดสอบระยะเวลาก่อตัว และทดสอบกำลังรับแรงอัดต่อไป ผลการทดสอบความสามารถในการเทได้ แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงระยะการจมน้ำของเข็มวัดแรงกดของส่วนผสมซีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่แทนที่ด้วยตะกอนประปาเผา

(%replacement)	อุณหภูมิเผาตะกอน (° C)	(Sol :Solid)	ระยะเข็มจม(mm)
10	500 , 650 , 800	0.67	7
		0.82	10
		1	38
		1.2	40
20	500 , 650 , 800	0.67	6
		0.82	10
		1	33
		1.2	40
30	500 , 650 , 800	0.67	6
		0.82	11
		1	24
		1.2	36
40	500 , 650 , 800	0.67	3
		0.82	8
		1	11
		1.2	28
50	500 , 650 , 800	0.67	4
		0.82	6
		1	10
		1.2	24

ผลการทดลองพบว่า ที่สัดส่วนการแทนที่ที่เท่ากันของตะกอนประปาเผาในแต่ละอุณหภูมิที่สัดส่วนเท่ากัน มีความต้องการสารกระตุ้นเพื่อให้ผสมกับวัสดุผงแล้วได้ระดับความชื้นเหลวปกติ มีปริมาณเท่ากัน ตัวอย่างเช่นที่การแทนที่ที่ 10 % ด้วยตะกอนเผาทุกๆ อุณหภูมิ (500, 650 และ 800°C) มีความต้องการสารกระตุ้นเพื่อให้ส่วนผสมที่ได้มีระดับความชื้นเหลวปกติที่สัดส่วนสารกระตุ้น: วัสดุผง เท่ากับ 0.82 เท่ากัน เมื่อสัดส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้นความต้องการสารกระตุ้นเพื่อให้ส่วนผสมได้ความชื้นเหลวปกติ มีปริมาณเพิ่มขึ้น คือ ที่สัดส่วนการแทนที่ด้วยตะกอนประปาที่ 10-30% ความต้องการสารกระตุ้นต่อวัสดุผง เท่ากับ 0.82 และเมื่อสัดส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้นเป็น 40 และ 50% ความต้องการสารกระตุ้นต่อวัสดุผงเพิ่มขึ้นเป็น เท่ากับ 1 แสดงดังภาพที่ 10 เนื่องจากตะกอนประปาเผาที่มีพื้นผิวที่ขรุขระ ทำให้การผสมมีแรงเสียดทานมาก จึงมีความต้องการสารละลายปริมาณมากขึ้นเพื่อใช้ลดแรงเสียดทาน แสดงดังรูปที่ 10 และพบว่าเมื่อทำการแทนที่มากกว่าร้อยละ 60 ความต้องการสารกระตุ้นของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นมากกว่า 1 เท่าตัว ถือว่าต้องใช้สารละลายในปริมาณที่มากเกินไป การทดลองนี้จึงทำการแทนที่ที่เฝ้าด้วยตะกอนประปาเผาที่ร้อยละ 50 เท่านั้น จากที่กล่าวมาแล้วว่าการที่ตะกอนประปาเผาที่มีรูปทรงที่ไม่แน่นอนและมีผิวที่ขรุขระเมื่อทำการผสมจะเกิดแรงเสียดทานหรือความหนืดสูง จึงความต้องการน้ำหรือสารละลายมากกว่าเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่เป็นเฝ้าที่มีลักษณะเป็นทรงกลม



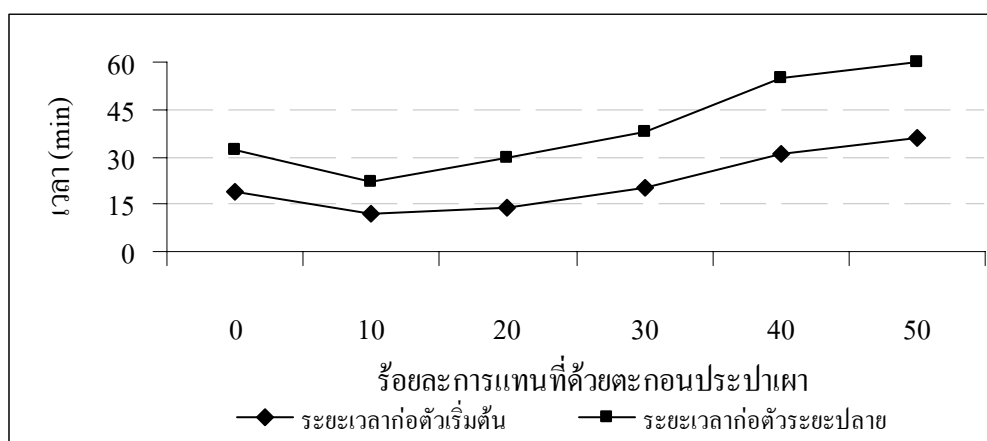
ภาพที่ 10 สัดส่วนสารกระตุ้น:วัสดุผง ที่มีต่อระยะเข็มไวน้ำแฉดจมนในเนื้อส่วนผสม ที่ระดับการแทนที่เฝ้าด้วยตะกอนประปาที่ระดับต่างๆ

เมื่อพิจารณาระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ที่ละลายแทนที่ด้วยตะกอนประปาโดยนำส่วนผสมที่มีระดับความข้นเหลวปกติมาทำการทดสอบโดยใช้ตะกอนประปาเผาที่ 650 °C เป็นตัวแทนของตะกอนประปาเผาทั้งสามอุณหภูมิ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ที่ละลายผสมตะกอนประปาเผาที่ 650 °C

(%replacement): Temp : S : (Sol/Solid)	ระยะเวลาการก่อตัว(นาที)	
	ระยะต้น	ระยะปลาย
10 650 S 0.82	12	22
20 650 S 0.82	14	30
30 650 S 0.82	20	38
40 650 S 1	31	55
50 650 S 1	36	60

เพื่อความชัดเจนมากขึ้นได้นำระยะเวลาก่อตัวมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับสัดส่วนการแทนที่ด้วยตะกอนประปาเพื่อเปรียบเทียบ ดังภาพที่ 11

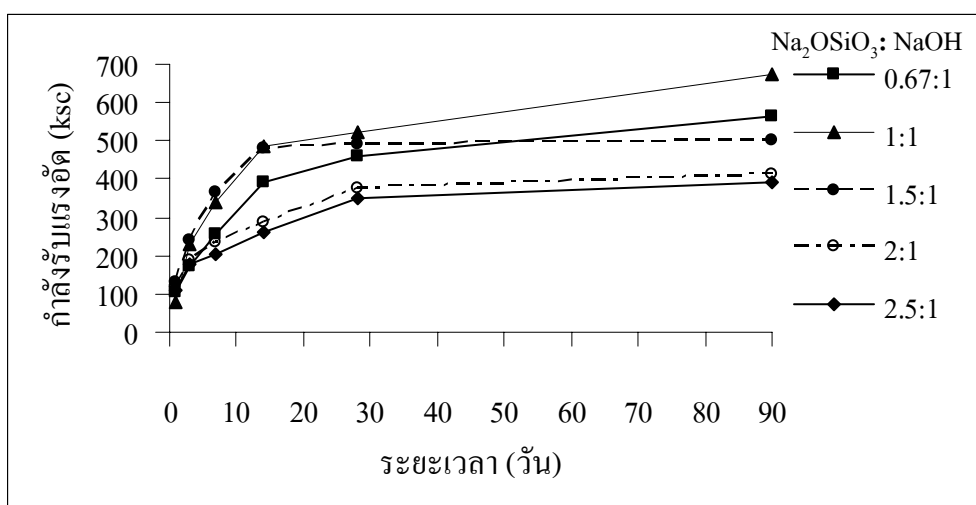


ภาพที่ 11 ผลของการแทนที่ที่ละลายด้วยตะกอนประปาเผาที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ที่ละลายผสมตะกอนประปาเผา

จากภาพที่ 11 จะเห็นได้ว่าการแทนที่ด้วยตะกอนประปาเผาจะทำการะยะเวลาก่อตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการแทนที่ตั้งแต่ร้อยละ 40 - 50 เนื่องจากตะกอนประปาเผาเป็นสารที่เหนียวในการทำปฏิกิริยาซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสัดส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และส่วนผสมที่เป็นเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว

2.3 ผลของสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ต่อ NaOH ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอย

การทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์เมื่อแปรผันสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ต่อ NaOH ที่ใช้เป็นสารกระตุ้น ที่สัดส่วน 0.67, 1, 1.5, 2 และ 2.5 โดยมวล โดยวัดกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ที่ระยะเวลา 1, 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ผลกำลังรับแรงอัดแสดงใน ภาคผนวก ตาราง ก-1 เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาอายุจีโอโพลิเมอร์เพื่อดูแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด แสดงดังภาพที่ 12

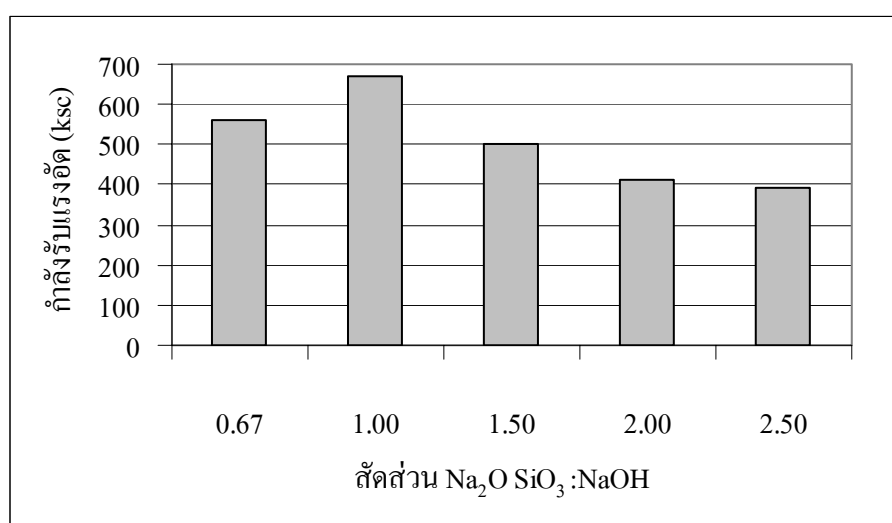


ภาพที่ 12 ผลของสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ต่อ NaOH ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอย

ภาพที่ 12 พบว่าทุกสัดส่วนการแปรผัน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ต่อ NaOH ที่ใช้เป็นสารกระตุ้นในการผสมกับเถ้าลอย จะส่งผลให้ได้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดที่แตกต่างกัน ลักษณะการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นสูงในช่วง 28 วันแรก และค่อนข้างสม่ำเสมอที่อายุ 90 วัน หมายความว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในจีโอโพลิเมอร์ใกล้ที่จะสมบูรณ์ตั้งแต่วันที่อายุ 28 วัน

เมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วัน มาหาค่าความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 พบว่าที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ต่อ NaOH เท่ากับ 1:1 มีผลให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด และมีความแตกต่างทางสถิติกับที่สัดส่วน 0.67, 1.5, 2 และ 2.5 อย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นจึงได้เลือกสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ต่อ NaOH เท่ากับ 1 ไปเป็นสัดส่วนของสารกระตุ้น ในการทดลองขั้นต่อไป

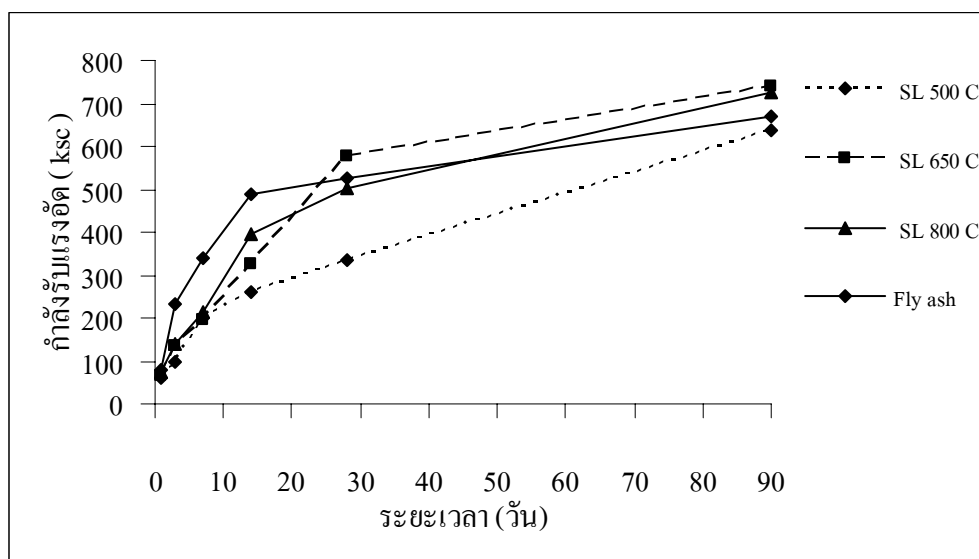


ภาพที่ 13 สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่อายุ 90 วัน

จากภาพที่ 13 จะเห็นได้ว่าสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ที่มีค่าใกล้เคียงกัน (0.67, 1, 1.5) จะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของอนุชาติ (2548) ที่พบว่า สัดส่วนสารกระตุ้น $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดดีที่สุดคือตั้งแต่ 0.67 -1 และจากการเสนอ Davidovits(1999) ว่าอัตราส่วนความเข้มข้น(molar ratio) ของ Si ต่อ Al ประมาณ 2 เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับทำสารซีเมนต์และคอนกรีตเนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่ดี

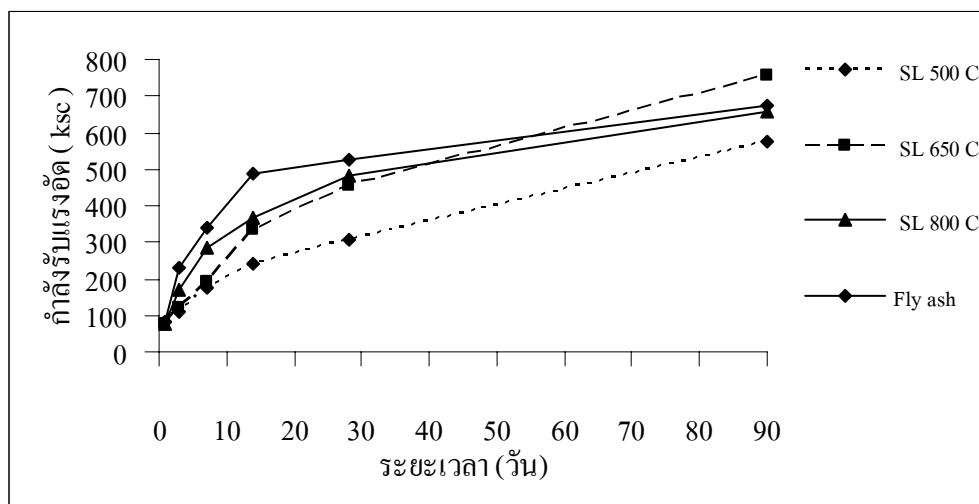
2.4 ผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาที่มีต่อกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 500, 650 และ 800 °C ในสัดส่วนการแทนที่ของตะกอนประปาเผาเท่ากับร้อยละ 10- 50 โดยผลกำลังรับแรงอัดแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข (1-5)



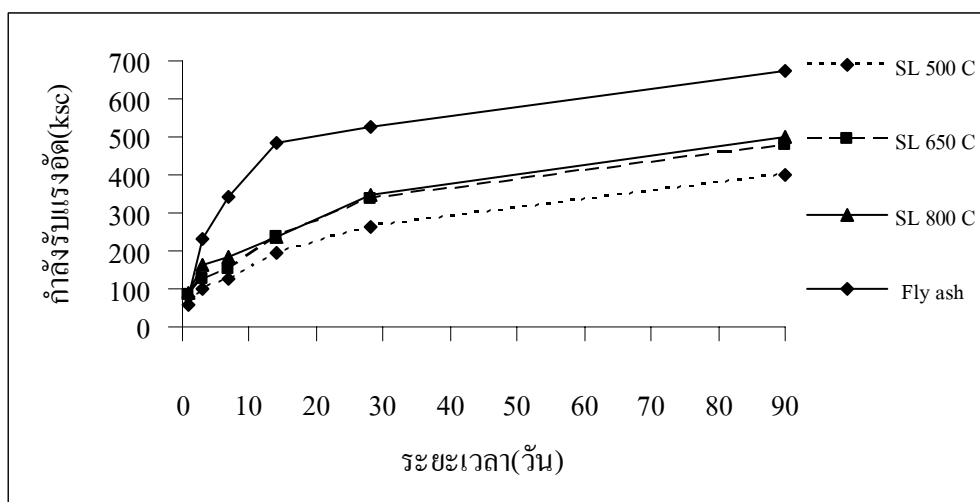
ภาพที่ 14 การแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาร้อยละ 10 ต่อกำลังรับแรงอัดจีโอโพลีเมอร์

ภาพที่ 14 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาสัดส่วนร้อยละ 10 โดยกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 650 และ 800 °C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากในช่วง 28 วัน และค่อนข้างสม่ำเสมอที่อายุ 90 วัน ส่วนจีโอโพลีเมอร์ผสมตะกอนเผาที่ 500 °C ในช่วง 28 วัน กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นน้อย แต่ยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงที่อายุ 90 วัน เมื่อทำการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของกำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วัน ของจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กับตัวควบคุม (จีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยเพียงอย่างเดียว) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 พบว่า จีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาทุกๆ อุณหภูมิ มีกำลังรับแรงอัดที่ไม่แตกต่างกัน และไม่มีความแตกต่างกับตัวควบคุม

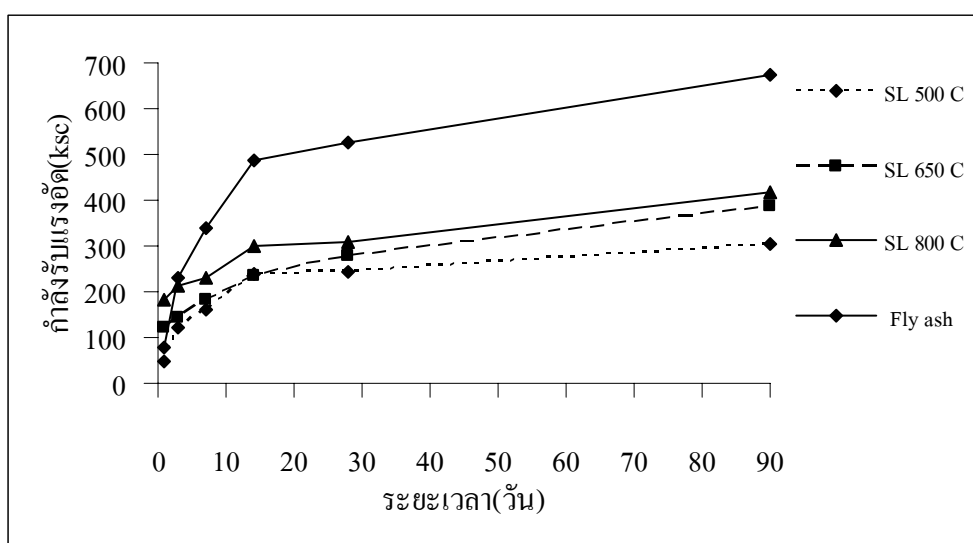


ภาพที่ 15 การแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาร้อยละ 20 ต่อกำลังรับแรงอัดจีโอโพลีเมอร์

จากภาพที่ 15 แสดงกำลังรับแรงอัดจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผา ที่สัดส่วนการแทนที่ของตะกอนประปาเผาร้อยละ 20 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนเผาที่ 800 °C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากในช่วง 28 วัน และค่อนข้างสม่ำเสมอที่อายุ 90 วัน ต่างจากจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนเผาที่ 650 °C ที่มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างสม่ำเสมอจนถึงที่อายุ 90 วัน ส่วนจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนเผาที่ 500 °C ในช่วง 28 วันกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นน้อยมาก แต่มีการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงที่อายุ 90 วัน และเมื่อทำการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของกำลังรับแรงอัดจีโอโพลีเมอร์ผสมตะกอนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กับตัวควบคุม ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 พบว่า จีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 650 °C มีกำลังรับแรงอัดที่ไม่แตกต่างกับตัวควบคุม และตะกอนประปาเผาที่ 800 °C แต่มีความแตกต่างกับจีโอโพลีเมอร์ผสมตะกอนประปาเผาที่ 500 °C



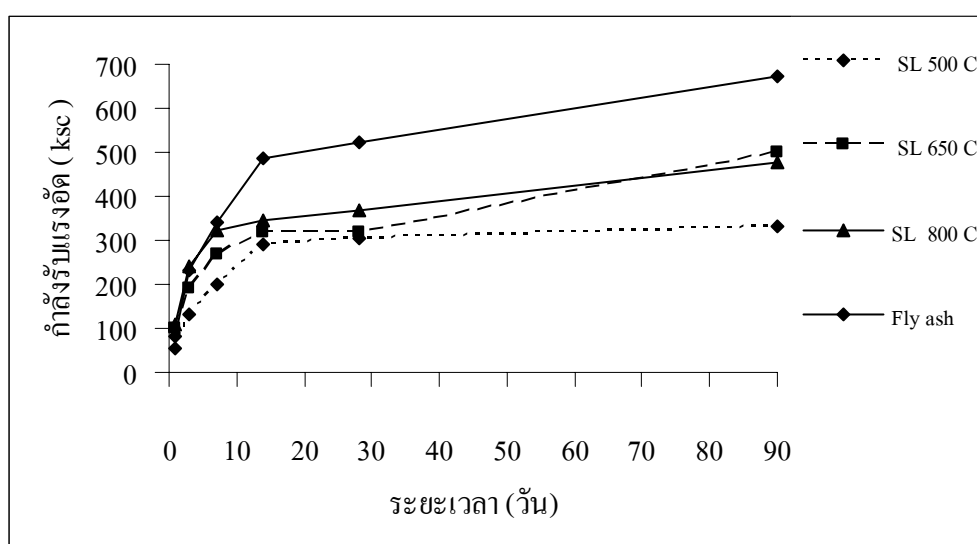
ภาพที่ 16 การแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาร้อยละ 30 ต่อกำลังรับแรงอัดจีโอโพลีเมอร์



ภาพที่ 17 การแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาร้อยละ 40 ต่อกำลังรับแรงอัดจีโอโพลีเมอร์

จากภาพที่ 16 และ 17 แสดงกำลังรับแรงอัดจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผา ที่สัดส่วนการแทนที่ของตะกอนประปาเผาร้อยละ 30 และ 40 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ได้ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการแทนที่ด้วยตะกอนเผาที่ร้อยละ 10 และ 20 ซึ่งเป็นเหมือนกันทุกๆ อุณหภูมิเผาตะกอน

เมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่สัดส่วนของการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 (242-349 ksc) มาคิดเป็นดัชนีเปรียบเทียบกับตัวควบคุม (672 ksc) มีค่าดัชนีกำลังเท่ากับ 39-51% ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เมื่อพิจารณาความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนประปาเผาที่การแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 พบว่า จีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนเผาที่อุณหภูมิ 650 และ 850 °C มีค่ากำลังรับแรงอัดที่แตกต่างกับจีโอโพลิเมอร์ผสมตะกอนประปาเผาที่ 500 °C ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยที่สุด

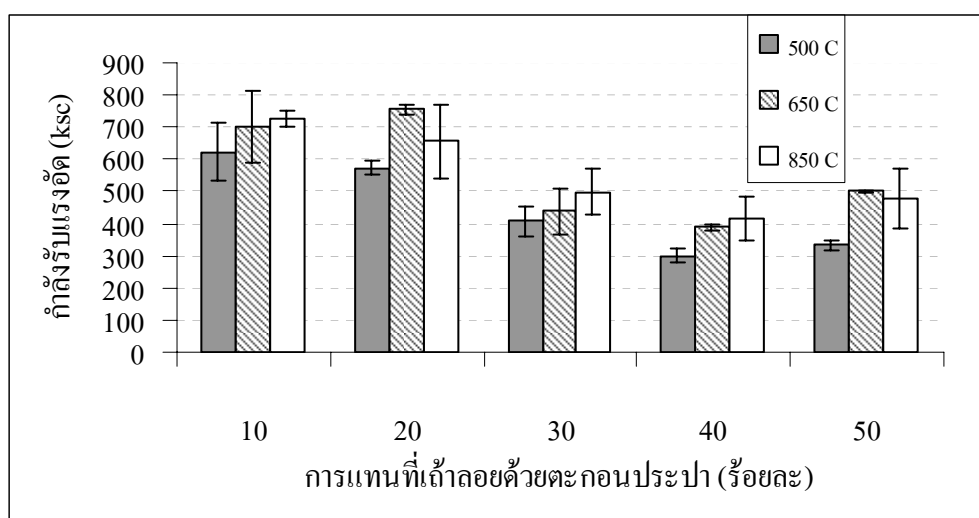


ภาพที่ 18 การแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาร้อยละ 50 ต่อกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์

ภาพที่ 18 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาร้อยละ 50 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนเผาที่ 650 และ 800 °C มีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 เมื่อทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติของกำลังรับแรงอัดที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ปรากฏว่าตะกอนประปาเผาที่อุณหภูมิ 650 และ 800 °C มีกำลังรับแรงอัดที่ไม่มีความแตกต่างกัน แต่จะแตกต่างจากตัวควบคุมและที่อุณหภูมิเผาที่ 500 °C

2.5 อุณหภูมิในการเผาตะกอนประปาที่เหมาะสม

การหาอุณหภูมิในการเผาตะกอนประปาที่เหมาะสมเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาตะกอนประปามาแทนที่เถ้าลอยเพื่อทำเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยพิจารณาจากการนำค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 90 วันของแต่ละสัดส่วนการแทนที่มาเขียนกราฟความสัมพันธ์



ภาพที่ 19 อุณหภูมิการเผาตะกอนประปาที่มีต่อกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์เพสต์

จากภาพที่ 19 พบว่า สัดส่วนการแทนที่ด้วยตะกอนเผาที่ 650 และ 800 °C มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าตะกอนเผาที่ 500 °C ทุกๆ ตัวอย่าง และพบว่าการแทนที่ด้วยตะกอนเผาที่ 650 °C บางสัดส่วนมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าที่ 800 °C และโดยภาพรวมแล้วตะกอนที่เผาที่ 650 และ 800 °C ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิในการเผาตะกอนประปา ที่ 650 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในตะกอนได้ เนื่องจากสารอินทรีย์จะปลดปล่อยกำลังรับแรงอัด (ปริญญา, 2547) และยังเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ลูมิเนียมเปลี่ยนเป็นลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารปอซโซลาน และเป็นการประหยัดพลังงานได้มากกว่าเมื่อเทียบกับการเผาที่ 800 °C

จากการทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ พบว่า ความสามารถในการเทได้ที่ระดับความขึ้นเหลวปกติขึ้นอยู่กับสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ และจะต้องมีสารกระตุ้น: วัสดุผงในปริมาณที่

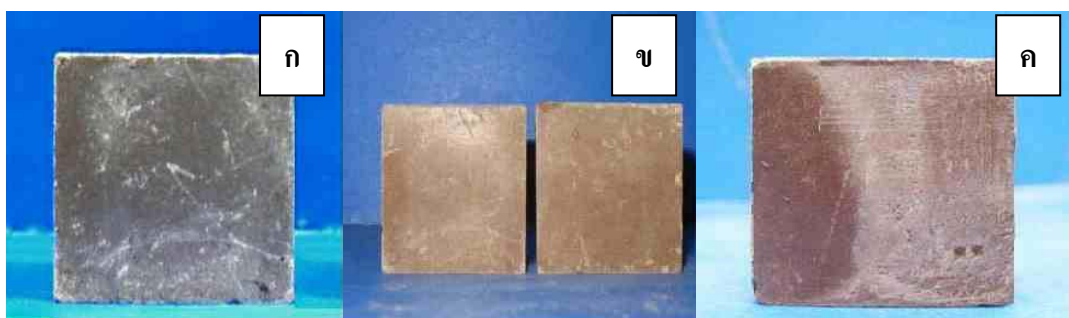
มากพอ ระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์จะนานขึ้นเมื่อมีปริมาณ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ในสัดส่วนที่มากขึ้น และมีการแทนที่แก้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาตั้งแต่ร้อยละ 40 - 50

สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ต่อ NaOH เท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดที่ 672 ksc และการแทนที่แก้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาได้สูงสุดที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยได้กำลังรับแรงอัดที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับ ตัวควบคุม และเมื่อการแทนที่เพิ่มมากขึ้นที่ร้อยละ 30-50 กำลังรับแรงอัดจะลดลง แต่ยังอยู่ในช่วงที่ดี ที่ 300-500 ksc และการเผาที่อุณหภูมิ 650 และ 800°C จะให้ค่ากำลังอัดที่ไม่แตกต่างกัน

การทดลองได้ผสมจีโอโพลิเมอร์จากวัสดุหลัก 2 ชนิด คือ แก้าลอย และแก้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่อุณหภูมิ 500, 650 และ 800°C ลักษณะจีโอโพลิเมอร์จะปรากฏตามสีของวัสดุหลักนั้นๆ ภาพที่ 20 เป็นจีโอโพลิเมอร์จากแก้าลอยเพียงอย่างเดียว มีลักษณะมีสีน้ำตาลอ่อนเหมือนกับสีของแก้าลอยมีลักษณะผิวที่เรียบค่อนข้างมันตามแบบหล่อ (แบบที่ใช้ทำมาจากอะคลิลิก)



ภาพที่ 20 ลักษณะจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากแก้าลอย

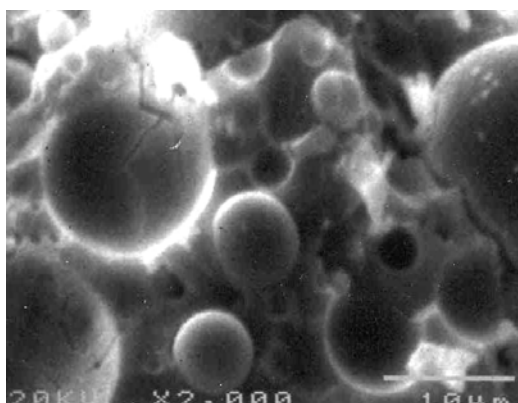


ภาพที่ 21 ลักษณะอีโพอซีเรซินที่ได้จากตะกอนประปาเผาแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 50

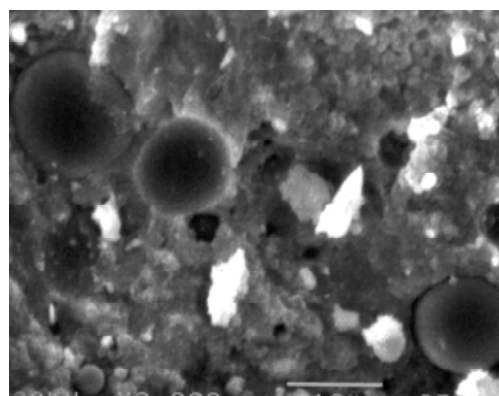
จากภาพที่ 21 เป็นอีโพอซีเรซินจากเถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 500, 650 และ 800 °C ที่สัดส่วนแทนที่ร้อยละ 50 ลักษณะตัวอย่างเหมือนกับอีโพอซีเรซินจากเถ้าลอย แต่มีสีที่แตกต่างกัน ซึ่งจะปรากฏตามสีของวัสดุ โดยตะกอนที่เผาที่ 500 °C (จากภาพที่ 21 ก) สีค่อนข้างคล้ำคล้ายกับสีของเถ้าลอย และของตะกอนที่เผาที่ 650 และ 800 °C (จากภาพที่ 21 ข และ ค) สีจะเป็นสีน้ำตาลแดงเหมือนกับอิฐ โดยตะกอนที่เผาที่ 800 °C มีสีเข้มกว่าตะกอนที่เผาที่ 650 °C

2.6 โครงสร้างจุลภาคของอีโพอซีเรซิน

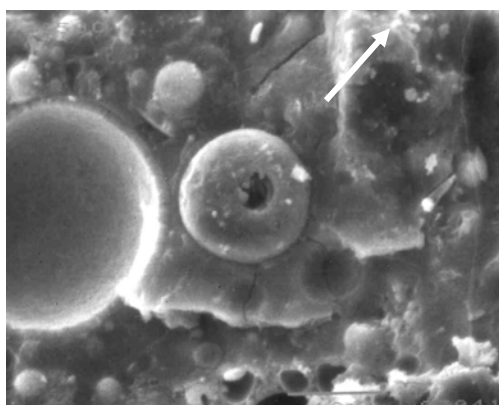
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคอีโพอซีเรซินที่อายุ 90 วันด้วย SEM (Scanning Electron Microscope) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



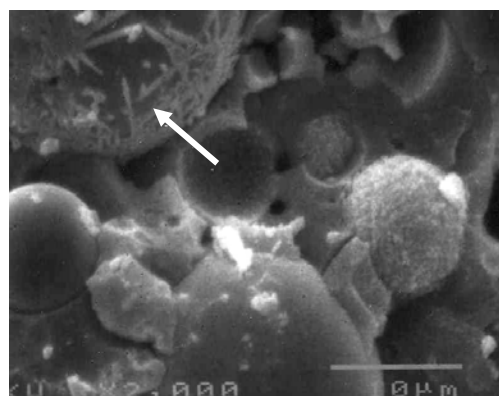
ก. จีโอโพลีเมอร์เพสต์จากถ้ำลอย



ข. จีโอโพลีเมอร์เพสต์จากการแทนที่
ที่ถ้ำลอยด้วยตะกอนเผา 500 °C 50%



ค. จีโอโพลีเมอร์เพสต์จากการแทนที่
ถ้ำลอยด้วยตะกอนเผา 650 °C 50%



ง. จีโอโพลีเมอร์เพสต์จากการแทนที่
ถ้ำลอยด้วยตะกอนเผา 800 °C 50%

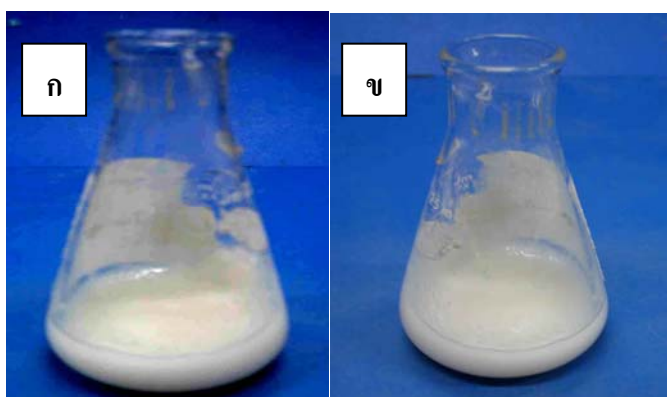
ภาพที่ 22 โครงสร้างจุลภาคจีโอโพลีเมอร์เพสต์

ภาพที่ 22 ก. แสดงโครงสร้างเพสต์ของจีโอโพลีเมอร์จากถ้ำลอย จะเห็นว่าเนื้อเพสต์มีความแน่น เกิดจากการทำปฏิกิริยาได้เกือบสมบูรณ์ เป็นเนื้อเดียวกัน แต่ก็ยังมีบางส่วนที่เป็นโพรง และมีรอยแตก เกิดจากถ้ำลอยบางส่วนที่ยังทำปฏิกิริยาไม่หมด ภาพที่ 22 ข. แสดงภาพเพสต์ที่เกิดจากการแทนที่ร้อยละ 50 ของตะกอนเผาที่ 500 °C จะเห็นความแตกต่างจากเพสต์ถ้ำลอยอย่างมาก เนื่องจากเพสต์นี้การเกิดปฏิกิริยาที่เป็นเนื้อเดียวกันมีน้อย อนุภาคของวัสดุยังแยกกันเป็นส่วนๆ อาจมีวัสดุบางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาได้ไม่หมด สาเหตุหลักมาจากปริมาณของสารกระตุ้นไม่เพียงพอหรือไม่ทั่วถึง ภาพที่ 22 ค และ ง. เป็นเพสต์ที่เกิดจากการแทนที่ร้อยละ 50 ของตะกอนเผาที่ 650 และ 800 °C เนื้อของเพสต์มีความเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างสูง และมี

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากผลของปฏิกิริยาซึ่งเป็นรูปผลึกเป็นแท่งๆ เกาะที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิสูง (800 °C) จะมีผลึกเกิดขึ้นมากกว่าที่ 650 °C

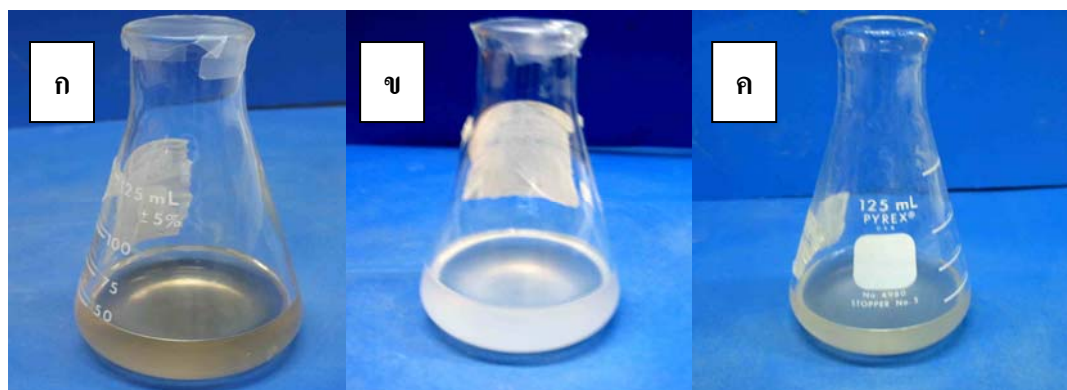
3. การทดสอบการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของจีโอโพลิเมอร์จากสารที่มี ซิลิกอน อลูมิเนียม และแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ

ในการทดลองนี้ได้นำเอาวัสดุที่มีของซิลิกอน, อลูมิเนียม และแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก (องค์ประกอบของสารปอซโซลาน) ที่สกัดได้จาก ผงซิลิกาฟุ้ง (silica fume), ผงอลูมิเนียม, ปูนขาว และเถ้าลอย โดยการชะละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 M เป็นระยะเวลา 30 นาที แล้วนำสารละลายที่ได้มาผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$) และสารกระตุ้น ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 + \text{NaOH}$)



ภาพที่ 23 สารละลายจากผงอลูมิเนียมผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (ก) และผสมกับสารกระตุ้น (ข)

ผลการทดลองพบว่า เมื่อนำสารที่ชะละลายได้จากผงอลูมิเนียมไปผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต(ภาพที่ 23 ก) และเมื่อผสมในสารกระตุ้น (ภาพที่ 23 ข) เกิดการก่อตัวภายในขึ้นระยะเวลา 10 และ 30 นาที ลักษณะการก่อตัวเป็นเหมือนวุ้น แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป สารที่ผสมกับสารกระตุ้น (ภาพที่ 23 ข) จะเปลี่ยนสภาพเป็นสารกึ่งของแข็ง (semi solid) ส่วนสารที่ผสมกับโซเดียมซิลิเกต (ภาพที่ 23 ก) ยังคงสภาพเดิมทั้งนี้เนื่องจากสารที่สกัดมาได้มีองค์ประกอบของสารละลาย NaOH อยู่แล้วเมื่อมาผสมกับสารกระตุ้นซึ่งมี $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ และ NaOH ผสมอยู่ซึ่งทำให้ NaOH ในปริมาณมากเกินไปจึงเกิดการชะละลายวุ้นให้มีสภาพเป็นสารกึ่งของเหลว



ภาพที่ 24 สารละลายจากซัลฟิดาฟุม, ปูนขาว และเถ้าลอยผสมกับสารกระตุ้น

ส่วนสารชะละลายที่ได้จากซัลฟิดาฟุม เมื่อผสมกับสารทั้งสองชนิดปรากฏว่าไม่เกิดการแข็งตัว แต่อยู่ในสภาพที่เป็นสารกึ่งของเหลว (Slurry) (ภาพที่ 24 ก) โดยสารจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น สำหรับสารที่ชะละลายได้จากปูนขาวและเถ้าลอย (ภาพที่ 24 ข และ ค) เมื่อผสมกับสารละลายทั้ง 2 ชนิดพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใดๆ เกิดขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ตะกอนประปาเผาที่ 500 650 และ 800 °C มีรูปร่างลักษณะที่ไม่แน่นอน มีพื้นผิวขรุขระ และมีสีน้ำตาลแดงเหมือนกับสีของอิฐ โดยที่องค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์ด้วยวิธี XRF มี ซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ เป็นสารประกอบหลัก ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถเป็นวัสดุพอลิเมอร์ได้

2. การทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์

2.1 ความสามารถในการเทได้ที่ระดับความชื้นเหลวปกติ พบว่าปริมาณสารกระตุ้นต้องมีมากพอเพื่อให้ส่วนผสมสามารถเทได้ โดยที่สัดส่วนสารกระตุ้น: วัสดุผงขึ้นอยู่กับสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ คือเมื่อมีปริมาณ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ เพิ่มขึ้นจะทำให้ส่วนผสมมีความสามารถในการเทได้ดีขึ้น และมีระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลีเมอร์จะนานขึ้น ส่วนการแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาจะทำให้ระยะเวลาก่อตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการแทนที่ตั้งแต่ร้อยละ 40 - 50

2.2 สัดส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$ ต่อ NaOH ที่ใช้เป็นสารกระตุ้น ที่ทำให้จีโอโพลีเมอร์มีกำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดคือ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 1 โดยน้ำหนัก (กำลังรับแรงอัด 672 ksc) การแทนที่เถ้าลอยด้วยตะกอนประปาเผาได้สูงสุดที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักโดย ได้กำลังรับแรงอัดที่ไม่มี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอย(ตัวควบคุม) และเมื่อการแทนที่เพิ่มมากขึ้นที่ร้อยละ 30-50 กำลังรับแรงอัดจะลดลง แต่ยังอยู่ในช่วงที่ดี (300-500 ksc) และ

2.3 การเผาที่อุณหภูมิ 650 และ 800°C จะให้ค่ากำลังอัดที่ไม่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการใช้พลังงานที่น้อยลงจึงควรเลือกการเผาที่ 650°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม

3. การเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันของจีโอโพลีเมอร์จากสารที่มี ซิลิกอน อลูมิเนียม และแคลเซียมเป็นองค์ประกอบพบว่า อลูมินาและซิลิกา เป็นสารประกอบหลักที่ทำให้การเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาผลของการทดสอบด้านความทนต่อสภาวะการกัดกร่อนต่อสารเคมีต่างๆ เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต เป็นต้น
2. ควรมีการศึกษาที่จะนำจีโอโพลีเมอร์เพสต์ไปใช้ในงานก่อสร้างประเภทงานหล่อ เช่น ทำเป็นเสาโรมัน งานแบบพิมพ์ที่ไม่ต้องเพิ่มสี ใช้สีที่ได้ในตัวตะกอนประปาเผาเอง เป็นต้น
3. ควรมีการศึกษาสัดส่วนการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นโดยลดความเข้มข้นของสารกระตุ้นลงเพื่อประหยัดการใช้สารเคมี และลดฤทธิ์ความรุนแรงของสาร
4. เนื่องจากตะกอนที่ใช้มีขนาดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เท่านั้น ควรมีการศึกษาโดยผ่านตะแกรงที่มีขนาดเล็กกว่านี้
5. เนื่องจากจีโอโพลีเมอร์ต้องเตรียมจากสารละลายค่าสูง การทำงานจริงจึงต้องมีการระมัดระวังสูง ควรหาแนวทางที่จะใช้สารละลายที่มี pH ที่ไม่อันตรายมากนัก

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

จิตรกร วงศ์กรเชาวลิต. 2543. คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่เกิดจากการผลิตน้ำประปา และการนำไปใช้ในงานคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

จักรพันธุ์ วงษ์พา, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วันชัย สะตะ. 2548. การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นวัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต, น. 43-53. ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ ครั้งที่ 1. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2548. การศึกษาเบื้องต้นของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะคัดขนาด, น. 106-109. ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ ครั้งที่ 1. คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ธนศ มุณีแนม. 2546. คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าตะกอนสลัดจ์ที่ได้จากโรงประปาในการนำมาใช้ในงาน เป็นวัสดุปอชโซลาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิมิตรยาสกุล. 2537. ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ. วารสารข่าวช่าง: 2537: 49-60.

บัณฑิต หิรัญสถิตพร. 2534. การศึกษาคุณสมบัติปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบ ขี้เถ้าลอย และสารลดน้ำพิเศษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2547. เถ้าลอยในงานคอนกรีต ครั้งที่ 2 . (ฉบับปรับปรุง). สมาคมคอนกรีตไทย, โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2547. จีโอโพลิเมอร์เถ้าลอย. เถ้าลอยในงานคอนกรีต: 109-122. อ้างถึง J. Davidovid. 1976. Solid phase synthesis of mineral block composite by low temperature polycondensation. IUPAC Macromolecular Symposium. 1976: 3-15.

ปริศนา เสือแฮมเสริม. 2545. สมบัติบางประการของตะกอนแยกจากน้ำดิบของประปานครหลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ฝ่ายประชาสัมพันธ์การไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทย. 2544. ถ้ำลอยลึกในตำนานคอนกรีตกับการอนุรักษ์พลังงาน. ครั้งที่ 1., การไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพมหานคร.

สันติสุข เชื้อมชัยตระกูล. 2537. การศึกษาคุณสมบัติปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์ลอยไมโครซิลิกา และสารลดน้ำพิเศษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2548. การศึกษาสารจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยและดินขาวเผา. น. 146-154. ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ ครั้งที่ 1. คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

American Society for Testing and Materials, (ASTM C 114-97). 1997. Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia

American Society for Testing and Materials, (ASTM C 191-99). 2001. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia

American Society for Testing and Materials, (ASTM C 311-00). 2001. Standard Test Method for Sampling and Testing Fly ash or Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia

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

- Berry, E.E. and V.M. Malhotra. 1980. Fly ash for use in concrete - A Critical Review. **ACI Journal**. 1980(50): 59-73.
- Criado, M., A. Fernandez-Jimeanez., A.G. delaTorre., M.A.G. Aranda and A. Palomo. 2007. An XRD study of the effect of the $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ratio on the alkali activation of fly ash. **Cement and Concrete Research**. 2007(37): 671-679.
- Davidovits, J. 1999. Chemistry of Geopolymeric Systems, pp. 9-40. *In* Joseph Davidovits, R Davidovits and C James, eds. **Geopolymer '99 Conference 99. ed.** France
- Davidovits, J. 2002. Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications, pp. 1-9. *In* **Geopolymer 2002 Conference 1. ed.** Mellbourne, Australia
- Harjito, D., S.E. Wallah, M.J. Sumajouw and V. Rangan. 2004. On the development of fly-ash based geopolymer concrete. **ACI Materials Journal**. 2004(1): 1-16.
- Hua, X. and J. S. J. van Deventer. 2000. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. **International Journal of Mineral Processing**. 1999(59): 247-266.
- Kamhangrittirong, P. 2006. The effect of fly-ash content and Sodium hydroxide molarity on Geopolymer, pp. 75-83. **International Conference on Pozzolan, Copncrete and Geopolymer**. Khonkaen, Thailand
- Lee, W.K.W. and J.S.J. van Deventer. 2003. The interface between natural siliceous aggregates and geopolymers. **Cement and Concrete Research**. 2004(34): 195-206.
- Malhotra, V.M.. 2002. Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology. **ACI Concrete International**. 2002(24): 22.

- Palamo, A., M.W. Grutzeck and M.T. Blanco-Varela. 1999. Alkali activated fly ashes: cement for the future. **Cement and Concrete Research**. 1999(29): 1323-1329.
- Ravina, D. 1980. Optimized determination of PFA(Fly Ash) finess with reference to pozzolanic activity. **Cement and Concrete Research**. 1980(4): 573-580.
- Songpiriyakij, S. 2548. Effect of Temperature on Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer Mortar, pp. 79-84. *In การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์แห่งชาติ 1. ed.* คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- van Jaarsveld, J.G.S., J.S.J. van Deventer and G.C. Lukey. 2002. The Characterisation of source materials in fly ash- base Geopolymers. **Material letter**. 2002 ; 1272 – 1280

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากถ้ำลอย

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยที่เกิดจากการแปรผันสัดส่วน Na_2OSO_3 / NaOH

Na_2OSO_3 / NaOH ratio	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm^2)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm^2)	
0.67	1	1	110.21	3.88	3.92	4.00	15.21	1550.00	101.91	102.19
		2	111.97	3.85	3.90	3.96	15.02	1600.00	106.56	
		3	114.35	3.96	3.88	3.94	15.36	1475.00	96.00	
	3	1	108.57	3.88	3.84	3.90	14.90	2675.00	179.54	174.84
		2	107.67	3.89	3.88	3.82	15.09	2750.00	182.20	
		3	108.32	3.83	3.88	3.86	14.86	2500.00	168.23	
	7	1	112.52	4.04	3.94	3.82	15.92	3750.00	235.59	257.73
		2	108.73	3.85	3.92	3.86	15.09	4225.00	279.95	
		3	114.56	3.80	3.83	4.05	14.55	3750.00	257.66	
	14	1	112.90	3.95	3.90	3.87	15.41	5875.00	381.37	392.16
		2	106.72	3.86	3.86	3.88	14.90	6250.00	419.47	
		3	109.22	4.00	3.86	3.85	15.44	5800.00	375.65	
	28	1	117.80	3.80	4.20	3.90	15.96	6750.00	422.93	460.59
		2	108.21	3.90	3.80	3.84	14.82	6750.00	455.47	
		3	107.94	3.86	3.86	3.84	14.90	7500.00	503.37	
	90	1	114.17	3.86	3.89	3.90	15.02	7550.00	502.82	502.82
		2	114.45	3.89	3.85	3.95	14.98	10000.00	667.71	
		3	112.29	3.88	3.83	3.94	14.86	7675.00	516.47	

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยที่เกิดจากการแปรผันสัดส่วน Na_2OSO_3 / NaOH (ต่อ)

Na_2OSO_3 / NaOH ratio	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm^2)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm^2)
1	1	1	108.48	3.91	3.84	3.99	15.01	1175.00	78.26
		2	110.38	3.85	3.87	3.83	14.90	1350.00	90.61
		3	105.49	3.88	3.80	3.88	14.74	1225.00	83.08
	3	1	113.90	3.90	3.90	4.00	15.21	3875.00	254.77
		2	111.64	3.84	3.95	3.85	15.17	3000.00	197.78
		3	111.48	3.95	3.84	3.88	15.17	3625.00	238.99
	7	1	113.25	3.90	3.94	3.86	15.37	5625.00	366.07
		2	110.53	3.81	3.93	3.87	14.97	5000.00	333.93
		3	110.88	3.91	3.93	3.81	15.37	5125.00	333.52
	14	1	111.84	3.80	3.90	3.83	14.82	6725.00	453.78
		2	109.25	3.88	3.83	3.80	14.86	5500.00	370.13
		3	109.18	3.83	3.87	3.82	14.82	5625.00	379.56
	28	1	112.97	3.94	3.87	3.93	15.25	7875.00	516.47
		2	110.04	3.87	3.92	3.89	15.17	5250.00	346.07
		3	111.82	3.90	3.98	3.87	15.52	6750.00	434.87
	90	1	116.09	3.80	3.88	3.97	14.74	10000.00	678.24
		2	115.94	3.93	3.90	3.83	15.33	11000.00	717.69
		3	113.51	3.85	3.88	3.83	14.94	9250.00	619.23

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยที่เกิดจากการแปรผันสัดส่วน Na_2OSO_3 / NaOH (ต่อ)

Na_2OSO_3 / NaOH ratio	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm^2)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm^2)
1.5	1	1	108.48	3.91	3.84	3.99	15.01	1850.00	123.22
		2	110.38	3.85	3.87	3.83	14.90	1975.00	132.55
		3	109.16	3.85	3.88	3.85	14.94	2050.00	137.23
	3	1	117.68	4.08	3.80	3.91	15.50	4000.00	258.00
		2	117.10	3.93	4.05	3.86	15.92	3875.00	243.46
		3	118.73	3.86	3.92	4.03	15.13	3375.00	223.05
	7	1	114.90	3.90	3.93	3.86	15.33	5500.00	358.84
		2	116.89	3.97	3.84	3.93	15.24	5750.00	377.18
		3	119.58	3.91	3.86	4.14	15.09	5125.00	339.57
	14	1	115.66	3.80	3.85	3.82	14.63	8000.00	546.82
		2	115.82	3.82	3.85	3.80	14.71	7250.00	492.96
		3	118.39	3.90	3.88	3.80	15.13	6625.00	437.81
	28	1	115.32	3.89	3.97	3.93	15.44	7625.00	493.74
		2	119.26	3.95	4.07	3.96	16.08	8225.00	511.62
		3	117.52	3.90	4.10	3.89	15.99	7575.00	473.73
	90	1	116.09	3.83	3.88	3.90	14.94	7000.00	468.63
		2	115.94	3.80	3.87	3.88	14.74	6625.00	449.34
		3	113.51	3.90	3.86	3.90	15.21	9000.00	591.72

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยที่เกิดจากการแปรผันสัดส่วน Na_2OSO_3 / NaOH (ต่อ)

Na_2OSO_3 / NaOH ratio	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm^2)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm^2)	
2	1	1	109.25	3.85	3.90	3.80	15.02	1900.00	126.54	118.58
		2	118.88	4.16	4.00	3.80	16.64	1900.00	114.18	
		3	121.28	3.83	4.20	3.98	16.09	1850.00	115.01	
	3	1	118.76	4.13	3.83	3.90	15.82	2750.00	173.85	187.07
		2	111.02	3.90	3.90	3.90	15.21	2875.00	189.02	
		3	118.29	3.90	4.04	3.86	15.76	3125.00	198.34	
	7	1	113.00	4.00	3.86	3.83	15.44	4375.00	283.35	233.96
		2	114.88	3.88	3.84	4.04	14.90	2750.00	184.57	
		3	109.70	3.88	3.82	3.86	14.82	2875.00	193.97	
	14	1	112.59	3.88	3.90	3.90	15.13	4375.00	289.12	287.08
		2	112.57	4.00	3.80	3.90	15.20	4125.00	271.38	
		3	113.81	4.05	3.90	3.83	15.80	4750.00	300.73	
	28	1	114.67	3.90	4.00	3.93	15.60	5500.00	352.56	377.46
		2	116.55	3.87	4.10	3.90	15.87	6375.00	401.78	
		3	110.84	3.90	3.90	3.88	15.21	5750.00	378.04	
	90	1	115.41	3.85	3.83	3.88	14.75	6250.00	423.86	410.58
		2	113.63	3.88	3.88	3.97	15.05	7250.00	481.59	
		3	114.23	3.86	3.97	3.84	15.32	5000.00	326.28	

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยที่เกิดจากการแปรผันสัดส่วน $\text{Na}_2\text{O}_2\text{SO}_2 / \text{NaOH}$ (ต่อ)

$\text{Na}_2\text{OSO}_3 / \text{NaOH}$ ratio	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm^2)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm^2)	
2.5	1	1	115.25	4.00	3.84	3.90	15.36	1825.00	118.82	109.22
		2	113.97	3.88	4.00	3.85	15.52	1425.00	91.82	
		3	112.71	4.05	3.97	3.80	16.08	1825.00	113.51	
	3	1	111.49	4.04	3.90	3.86	15.76	2700.00	171.36	175.67
		2	116.67	4.10	4.06	3.92	16.65	2750.00	165.20	
		3	113.38	3.88	4.06	3.88	15.75	3000.00	190.44	
	7	1	110.65	3.94	3.86	3.86	15.21	3125.00	205.48	204.07
		2	113.31	3.83	4.02	3.93	15.40	3125.00	202.97	
		3	114.08	3.82	4.00	3.93	15.28	3000.00	196.34	
	14	1	110.98	3.90	3.83	3.80	14.94	3500.00	234.32	263.24
		2	111.84	3.90	3.95	3.80	15.41	4125.00	267.77	
		3	112.28	3.90	3.90	3.83	15.21	4375.00	287.64	
	28	1	110.27	3.94	3.90	3.83	15.37	5125.00	333.53	350.59
		2	109.97	3.91	4.00	3.80	15.64	5750.00	367.65	
		3	109.77	3.95	3.90	3.80	15.41	5625.00	365.14	
	90	1	117.02	3.86	3.93	4.02	15.17	6225.00	410.35	389.93
		2	113.22	3.95	3.85	3.88	15.21	5675.00	373.17	
		3	113.27	3.88	3.87	3.87	15.02	5800.00	386.26	

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยที่แทนที่ด้วยตะกอนประปาเผา

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 500 °C

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 90 : 10	1	1	111.79	4.00	3.80	3.90	15.20	750.00	49.34	60.05
		2	117.03	3.75	3.79	3.80	14.21	900.00	63.32	
		3	116.94	3.80	3.90	3.80	14.82	1000.00	67.48	
	3	1	108.48	3.88	3.92	4.00	15.21	1275.00	83.83	98.75
		2	110.38	3.85	3.90	3.96	15.02	1675.00	111.56	
		3	109.16	3.96	3.88	3.94	15.36	1550.00	100.88	
	7	1	108.65	3.86	4.00	3.80	15.44	3250.00	210.49	200.23
		2	112.49	3.88	4.07	3.90	15.79	3000.00	189.97	
		3	111.56	3.94	3.80	3.86	14.97	3175.00	206.02	
	14	1	112.04	3.88	3.84	4.15	14.90	3375.00	226.52	262.32
		2	110.10	3.96	3.86	3.90	15.29	4625.00	302.57	
		3	111.01	3.83	4.05	3.90	15.51	4000.00	257.87	
	28	1	112.97	3.83	3.90	4.10	14.94	3750.00	251.05	332.88
		2	114.43	3.87	4.05	3.88	15.67	6500.00	414.71	
		3	111.56	3.94	3.80	3.86	14.97	6775.00	446.02	
	90	1	114.42	3.90	3.90	3.77	15.21	11000.00	723.21	634.61
		2	111.56	3.94	3.80	3.86	14.97	8175.00	546.02	
		3	111.56	3.94	3.80	3.86	14.97	8275.00	598.72	

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 500 °C (ต่อ)

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 80 : 20	1	1	116.94	3.86	4.10	3.90	15.83	1625.00	102.68	84.15
		2	117.21	4.20	3.90	3.84	16.38	1175.00	71.73	
		3	116.38	3.88	4.07	4.07	15.79	1725.00	109.24	
	3	1	113.67	3.95	3.80	3.82	15.01	1575.00	104.93	109.62
		2	121.44	3.90	4.00	4.00	15.60	1625.00	104.17	
		3	116.16	3.80	3.90	4.01	14.82	1775.00	119.77	
	7	1	111.91	3.90	4.16	3.80	16.22	2800.00	172.58	176.50
		2	116.50	3.89	3.89	3.87	15.13	2800.00	185.04	
		3	102.74	4.14	3.90	4.06	16.15	2775.00	171.87	
	14	1	114.32	3.90	4.09	3.88	15.95	4250.00	266.44	241.89
		2	113.10	3.90	3.94	4.00	15.37	3500.00	227.78	
		3	111.31	3.82	4.10	3.90	15.66	3625.00	231.45	
	28	1	116.23	4.08	3.90	3.88	15.91	4000.00	251.38	309.71
		2	110.78	4.05	3.84	3.95	15.55	5125.00	329.54	
		3	114.87	3.90	4.05	3.87	15.80	5500.00	348.21	
	90	1	112.4	3.85	3.80	3.84	14.63	8750.00	598.09	573.39
		2	112.33	3.82	3.80	3.86	14.52	8000.00	551.12	
		3	113.00	3.80	3.86	3.83	14.67	8375.00	570.97	

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 500 °C (ต่อ)

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 70 : 30	1	1	113.94	3.83	4.16	3.94	15.93	985.00	61.82	56.54
		2	113.70	4.10	3.90	3.83	15.99	900.00	281.43	
		3	107.08	3.93	3.90	3.84	15.33	785.00	51.22	
	3	1	113.94	3.83	4.16	3.94	15.93	1385.00	86.82	102.50
		2	107.25	3.90	3.83	3.86	14.94	1800.00	125.34	
		3	107.08	3.93	3.90	3.84	15.33	1585.00	103.33	
	7	1	111.30	3.94	3.90	4.00	15.37	2675.00	174.09	168.12
		2	107.25	3.90	3.83	3.86	14.94	2300.00	153.98	
		3	110.40	3.90	4.00	3.80	15.60	2750.00	176.28	
	14	1	107.35	3.84	3.86	3.96	14.82	3000.00	202.40	195.57
		2	110.42	3.97	3.97	3.95	15.76	2500.00	158.62	
		3	116.32	4.30	3.86	3.94	16.60	3750.00	225.93	
	28	1	113.70	4.10	3.90	3.83	15.99	4500.00	281.43	260.91
		2	107.25	3.90	3.83	3.86	14.94	4300.00	273.98	
		3	111.14	3.90	4.00	3.84	15.60	3750.00	240.38	
	90	1	115.56	3.83	3.88	3.94	14.86	5250.00	353.29	398.65
		2	107.25	3.90	3.83	3.86	14.94	6300.00	423.98	
		3	120.80	3.86	3.88	4.20	14.98	6650.00	444.02	

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 500 °C (ต่อ)

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 60 : 40	1	1	113.72	3.86	4.08	3.96	15.75	725.00	46.04	48.05
		2	110.41	3.97	3.90	3.92	15.48	775.00	50.05	
		3	118.41	3.97	3.98	3.96	15.98	775.00	51.25	
	3	1	119.06	4.10	3.90	3.90	15.99	2250.00	140.71	156.75
		2	109.25	4.00	3.95	3.80	15.80	2550.00	161.39	
		3	113.81	3.90	3.94	4.10	15.37	2750.00	178.97	
	7	1	119.06	4.10	3.90	3.90	15.99	2250.00	140.71	160.36
		2	109.25	4.00	3.95	3.80	15.80	2550.00	161.39	
		3	113.81	3.90	3.94	4.10	15.37	2750.00	178.97	
	14	1	111.61	3.84	4.10	4.00	15.74	3750.00	238.19	239.46
		2	108.84	3.97	3.90	3.94	15.48	3750.00	242.20	
		3	109.96	4.04	3.90	3.83	15.76	3750.00	238.00	
	28	1	116.57	4.10	3.84	4.05	15.74	4000.00	254.07	241.94
		2	128.33	3.98	4.10	3.98	16.32	3750.00	229.81	
		3	128.33	3.98	4.10	3.98	16.32	3750.00	229.81	
	90	1	111.49	3.8	3.88	4.16	14.74	4250.00	288.25	306.06
		2	110.95	3.81	3.89	4.00	14.82	4800.00	323.87	
		3	111.49	3.8	3.88	4.16	14.74	4250.00	288.25	

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 500 °C (ต่อ)

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 50 : 50	1	1	117.03	4.16	3.85	3.83	16.02	1100.00	68.68	53.07
		2	116.94	3.86	4.10	3.90	15.83	750.00	47.39	
		3	117.21	4.20	3.90	3.84	16.38	850.00	51.89	
	3	1	113.67	3.90	3.95	3.80	15.41	1925.00	124.96	132.77
		2	121.44	4.20	4.00	3.80	16.80	2125.00	126.49	
		3	116.16	4.00	3.83	3.85	15.32	2250.00	146.87	
	7	1	111.69	4.20	4.10	3.90	17.22	4000.00	232.29	251.57
		2	113.63	4.10	4.05	4.10	16.61	4625.00	278.53	
		3	117.30	4.10	4.00	4.00	16.40	4000.00	243.90	
	14	1	106.77	4.00	3.90	3.94	15.60	4200.00	269.23	290.76
		2	103.63	3.94	4.05	4.10	15.12	4625.00	288.53	
		3	98.42	3.90	3.90	3.86	15.21	4750.00	312.29	
	28	1	101.77	4.00	3.9	3.8	15.60	5250.00	336.54	303.59
		2	106.23	3.98	3.84	3.90	15.28	4000.00	261.73	
		3	98.50	3.90	4.00	3.74	15.60	4875.00	312.50	
	90	1	105.01	3.93	3.74	3.97	14.70	5125.00	348.68	331.73
		2	101.77	4.01	3.9	3.8	15.60	5250.00	336.54	
		3	109.61	3.83	3.94	3.94	15.09	4750.00	314.77	

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 650 °C

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 90 : 10	1	1	108.48	3.75	3.79	3.80	14.21	900.00	63.32	65.24
		2	110.38	3.85	3.87	3.83	14.90	1025.00	68.79	
		3	109.16	3.85	3.88	3.85	14.94	950.00	63.60	
	3	1	113.90	3.90	3.90	4.00	15.21	1900.00	124.92	133.94
		2	111.64	3.84	3.95	3.85	15.17	2025.00	133.50	
		3	111.48	3.95	3.84	3.88	15.17	2175.00	143.39	
	7	1	110.60	3.94	4.00	3.88	15.76	2875.00	182.42	194.22
		2	109.53	3.85	3.94	3.90	15.17	3125.00	206.01	
		3	108.48	3.75	3.79	3.80	14.21	3100.00	193.32	
	14	1	118.75	4.20	3.85	3.90	16.17	4625.00	286.02	323.50
		2	114.98	3.94	4.08	3.85	16.08	4125.00	256.61	
		3	110.99	3.96	3.91	3.85	15.48	6625.00	427.87	
	28	1	113.19	3.96	4.05	3.77	16.04	8625.00	537.79	578.98
		2	110.25	3.88	4.00	3.80	15.52	9625.00	620.17	
		3	118.75	4.20	3.85	3.90	16.17	9650.00	600.02	
	90	1	118.72	3.88	3.94	3.83	15.29	10000.00	654.14	740.10
		2	118.30	3.90	3.88	3.84	15.13	12500.00	826.06	
		3	110.25	3.88	4.00	3.80	15.52	9625.00	620.17	

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่650 °C (ต่อ)

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 80 : 20	1	1	116.94	3.86	4.10	3.90	15.83	950.00	60.03	74.82
		2	117.21	4.20	3.90	3.84	16.38	1600.00	97.68	
		3	116.38	3.88	4.07	4.07	15.79	1225.00	77.57	
	3	1	113.67	3.90	3.95	3.80	15.41	1575.00	102.24	119.76
		2	121.44	4.20	4.00	3.80	16.80	2125.00	126.49	
		3	116.16	4.00	3.83	3.85	15.32	2000.00	130.55	
	7	1	109.37	3.80	3.80	4.00	14.44	3325.00	230.26	192.75
		2	115.37	4.15	3.98	3.78	16.52	2750.00	166.50	
		3	116.91	3.85	3.90	4.00	15.02	2725.00	181.49	
	14	1	117.90	3.88	4.20	3.98	16.30	5125.00	314.49	334.80
		2	117.02	4.00	4.24	3.84	16.96	5625.00	331.66	
		3	117.66	4.10	4.00	3.86	16.40	5875.00	358.23	
	28	1	119.41	3.86	3.87	3.90	14.94	7000.00	468.60	453.59
		2	117.91	4.00	3.90	3.90	15.60	7250.00	464.74	
		3	117.20	4.00	3.80	3.90	15.20	6725.00	442.43	
	90	1	111.55	3.83	3.80	3.8	14.55	11250.00	772.98	754.79
		2	115.56	3.83	3.88	3.94	14.86	11000.00	740.22	
		3	120.80	3.86	3.88	4.20	14.98	11250.00	751.16	

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 650 °C (ต่อ)

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 70 : 30	1	1	113.00	3.84	3.90	3.89	14.98	1750.00	116.85	105.74
		2	117.66	3.90	4.20	3.88	16.38	1550.00	94.63	
		3	115.00	3.94	3.90	3.89	15.98	1850.00	120.75	
	3	1	114.70	4.16	4.10	3.94	17.06	2400.00	140.71	127.46
		2	117.08	4.05	4.00	3.86	16.20	1850.00	114.20	
		3	113.00	3.84	3.90	3.89	14.98	1750.00	116.85	
	7	1	119.09	3.90	4.20	4.00	16.38	2575.00	157.20	152.64
		2	116.13	4.10	3.90	3.98	15.99	2625.00	164.17	
		3	118.10	4.20	3.88	3.96	16.30	2225.00	136.54	
	14	1	117.99	4.20	3.93	3.85	16.51	3500.00	212.04	242.45
		2	115.52	4.16	3.90	3.83	16.22	4500.00	277.37	
		3	113.89	3.94	4.00	3.83	15.76	3750.00	237.94	
	28	1	114.47	3.80	3.94	3.90	14.97	4500.00	300.56	339.30
		2	111.89	3.90	3.90	3.86	15.21	5750.00	378.04	
		3	113.00	3.84	3.90	3.89	14.98	5000.00	346.85	
	90	1	114.48	3.85	3.85	4.2	14.82	5500.00	371.06	438.74
		2	118.05	3.85	3.90	4.10	15.02	7725.00	514.49	
		3	115.93	3.87	3.90	4.00	15.09	6500.00	430.66	

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 650 °C (ต่อ)

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 60 : 40	1	1	107.57	4.08	3.82	3.88	15.59	1825.00	117.10	120.59
		2	110.72	4.05	3.88	3.96	15.71	1950.00	124.09	
		3	110.67	4.04	3.88	3.96	15.45	2050.00	126.56	
	3	1	113.28	4.20	3.93	3.84	16.51	2600.00	157.52	142.41
		2	110.97	3.88	4.10	3.94	15.91	2025.00	127.29	
		3	113.28	4.20	3.93	3.84	16.51	2600.00	157.52	
	7	1	111.06	4.07	3.86	3.93	15.71	2725.00	173.45	182.41
		2	112.13	4.10	3.90	3.90	15.99	3000.00	187.62	
		3	112.76	4.08	3.95	3.88	16.12	3000.00	186.15	
	14	1	108.47	3.93	3.80	3.90	14.93	3875.00	259.48	234.76
		2	109.63	4.15	3.85	3.86	15.98	3750.00	234.71	
		3	110.14	4.10	3.86	3.90	15.83	3325.00	210.10	
	28	1	109.56	3.80	4.00	3.90	15.20	4250.00	279.61	279.88
		2	111.37	3.87	3.92	3.84	15.17	4250.00	280.15	
		3	109.56	3.80	4.00	3.90	15.20	4250.00	279.61	
	90	1	111.49	3.8	3.90	4.16	14.82	5625.00	379.55	392.58
		2	109.56	3.80	4.00	3.90	14.95	5950.00	399.61	
		3	110.95	3.90	3.90	4.00	15.21	5800.00	388.60	

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 650 °C (ต่อ)

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 50 : 50	1	1	117.03	4.16	3.85	3.83	16.02	1875.00	117.07	105.90
		2	116.94	3.86	4.10	3.90	15.83	1850.00	116.90	
		3	117.21	4.20	3.90	3.84	16.38	1550.00	94.63	
	3	1	113.67	4.20	3.90	3.80	16.38	3000.00	183.15	188.99
		2	121.44	4.25	3.90	3.80	16.58	2750.00	165.91	
		3	116.16	4.00	3.70	3.85	14.80	3225.00	217.91	
	7	1	112.59	3.86	3.97	4.20	15.32	3990.00	260.37	268.96
		2	114.07	3.86	3.97	4.30	15.32	4125.00	269.18	
		3	114.71	3.86	3.97	4.27	15.32	4250.00	277.34	
	14	1	116.90	3.84	3.83	3.90	14.71	4750.00	322.97	318.45
		2	117.03	4.16	3.85	3.83	16.02	4875.00	317.07	
		3	118.81	3.93	3.85	3.90	15.13	4750.00	313.94	
	28	1	113.48	3.82	3.84	3.95	14.67	4750.00	323.82	320.15
		2	112.40	3.82	3.79	3.87	14.05	4550.00	313.82	
		3	110.95	3.83	3.96	3.88	15.17	4800.00	316.48	
	90	1	104.47	3.9	3.86	4.00	15.05	7500.00	498.21	501.02
		2	103.50	3.83	3.88	3.90	14.86	7500.00	504.70	
		3	112.15	3.84	3.84	4.20	14.75	7375.00	500.15	

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 850 °C

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 90 : 10	1	1	108.48	3.91	3.84	3.99	15.01	1125.00	74.93	76.50
		2	110.20	3.80	3.90	3.80	14.82	1125.00	75.91	
		3	109.16	3.85	3.88	3.85	14.94	1175.00	78.66	
	3	1	118.76	4.13	3.83	3.90	15.82	2175.00	137.50	141.74
		2	111.02	3.90	3.90	3.90	15.21	2175.00	143.00	
		3	118.29	3.90	4.04	3.86	15.76	2280.00	144.71	
	7	1	112.98	3.90	4.14	3.83	16.15	3500.00	216.77	213.35
		2	115.37	3.90	4.00	3.90	15.60	3275.00	209.94	
		3	118.29	3.90	4.04	3.86	15.76	2280.00	144.71	
	14	1	112.97	4.00	3.96	3.80	15.84	6125.00	386.68	395.39
		2	114.88	3.90	4.05	3.88	15.80	6250.00	395.69	
		3	116.73	4.08	3.90	3.86	15.91	6425.00	403.78	
	28	1	115.03	3.88	4.00	3.92	15.52	7375.00	475.19	503.39
		2	115.56	3.90	4.10	3.87	15.99	8500.00	531.58	
		3	112.98	3.90	4.14	3.83	16.15	3500.00	216.77	
	90	1	115.07	3.85	3.92	3.84	15.09	11375.00	753.71	726.95
		2	116.18	3.84	3.85	3.83	14.78	10375.00	701.77	
		3	112.09	3.90	3.80	3.96	14.82	10750.00	725.37	

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 850 °C (ต่อ)

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 80 : 20	1	1	116.94	3.86	4.10	3.90	15.83	1850.00	116.90	112.11
		2	117.21	4.20	3.90	3.84	16.38	1600.00	97.68	
		3	116.38	3.88	4.07	4.07	15.79	1725.00	109.24	
	3	1	113.67	3.88	3.89	3.90	15.09	2150.00	142.45	159.90
		2	121.44	3.88	3.90	3.85	15.13	2875.00	156.08	
		3	116.16	3.90	3.82	3.80	14.90	2550.00	171.16	
	7	1	112.94	4.00	3.90	3.80	15.60	2725.00	174.68	181.73
		2	110.56	3.90	3.90	3.85	15.21	2875.00	189.02	
		3	116.91	3.85	3.90	4.00	15.02	2725.00	181.49	
	14	1	113.39	3.80	4.00	3.90	15.20	3325.00	218.75	225.92
		2	112.20	4.05	3.90	3.80	15.80	3375.00	213.68	
		3	112.50	3.90	4.05	3.80	15.80	3875.00	245.33	
	28	1	115.43	3.90	4.05	3.86	15.80	7375.00	466.92	482.76
		2	114.22	3.86	3.80	3.84	14.67	6875.00	468.71	
		3	110.70	3.85	3.80	4.10	14.63	7500.00	512.65	
	90	1	113.04	3.9	3.83	4.2	14.94	8250.00	552.32	654.99
		2	117.75	3.80	3.86	4.10	14.68	11375.00	774.90	
		3	116.06	3.92	3.80	4.20	14.90	9500.00	637.76	

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 850 °C (ต่อ)

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 70 : 30	1	1	119.28	3.90	4.28	4.00	16.69	2100.00	125.81	121.83
		2	116.27	4.10	3.87	4.00	15.87	1870.00	117.85	
		3	113.00	3.84	3.90	3.89	14.98	1750.00	116.85	
	3	1	117.59	4.16	4.04	3.88	16.81	2525.00	150.24	163.72
		2	118.23	4.00	3.88	4.16	15.52	2750.00	177.19	
		3	113.00	3.84	3.90	3.89	14.98	2650.00	176.85	
	7	1	111.66	3.94	4.17	3.84	16.43	2750.00	167.38	186.72
		2	115.30	4.30	3.88	3.86	16.68	3200.00	191.80	
		3	113.78	3.85	4.20	3.94	16.17	3250.00	200.99	
	14	1	114.38	3.84	4.28	3.94	16.44	3000.00	182.54	239.18
		2	115.81	4.20	3.90	3.96	16.38	4125.00	251.83	
		3	114.19	4.16	3.82	3.93	15.89	4500.00	283.18	
	28	1	114.83	3.97	3.86	3.85	15.32	5375.00	350.75	348.52
		2	116.09	3.90	3.98	3.84	15.52	5375.00	346.28	
		3	113.00	3.84	3.90	3.89	14.98	5750.00	356.85	
	90	1	114.58	3.85	3.83	4.2	14.75	6250.00	423.86	498.91
		2	120.07	3.85	4.00	4.10	15.40	8750.00	568.18	
		3	113.17	3.87	3.84	4.00	14.86	7500.00	504.68	

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 850 °C (ต่อ)

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 60 : 40	1	1	114.09	4.15	3.87	4.00	16.06	2750.00	171.23	184.30
		2	111.89	3.97	4.10	3.84	16.28	2875.00	178.07	
		3	110.36	3.80	4.00	3.90	15.20	3000.00	197.37	
	3	1	114.56	3.98	4.13	3.90	16.44	3875.00	235.74	214.88
		2	111.89	3.97	4.10	3.84	16.28	3875.00	238.07	
		3	115.58	4.23	3.96	3.94	16.75	3250.00	194.02	
	7	1	111.89	3.97	4.10	3.84	16.28	3875.00	238.07	228.75
		2	113.04	4.10	4.00	3.84	16.40	3750.00	228.66	
		3	113.18	3.96	4.00	3.90	15.84	3625.00	228.85	
	14	1	111.37	3.96	3.89	3.83	15.40	4750.00	308.35	299.14
		2	114.08	3.95	3.90	3.80	15.41	4875.00	316.46	
		3	111.76	3.92	3.86	3.97	15.13	4125.00	272.62	
	28	1	118.55	3.80	3.84	3.97	14.59	5000.00	342.65	307.31
		2	111.89	3.97	4.10	3.84	16.28	3875.00	238.07	
		3	109.36	3.96	3.83	3.90	15.17	4125.00	271.98	
	90	1	111.1	3.82	3.87	4.02	14.78	7000.00	473.50	415.76
		2	108.38	3.90	3.83	4.00	14.94	5125.00	343.11	
		3	112.03	3.87	3.90	4.00	15.09	6500.00	430.66	

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมตะกอนประปาเผาที่ 850 °C (ต่อ)

ส่วนผสม	อายุ(วัน)	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก(g)	กว้าง(cm)	ยาว(cm)	สูง(cm)	พื้นที่หน้าตัด(cm ²)	แรงกดที่รับได้(Kg)	กำลังต้านแรงอัด(Kg/cm ²)	
FA : SL 50 : 50	1	1	117.03	4.16	3.85	3.83	16.02	2225.00	138.92	107.30
		2	116.94	3.86	4.10	3.90	15.83	1525.00	96.36	
		3	117.21	4.20	3.90	3.84	16.38	1600.00	97.68	
	3	1	113.67	4.00	3.85	3.80	15.40	3550.00	230.52	238.89
		2	121.44	4.05	3.90	3.80	15.80	3750.00	237.42	
		3	116.16	3.70	3.83	3.85	14.17	3525.00	248.75	
	7	1	108.68	3.90	3.83	4.20	14.94	4625.00	309.63	321.31
		2	111.89	3.97	4.10	3.84	16.28	3875.00	338.07	
		3	104.56	3.88	3.87	3.92	15.02	5000.00	332.99	
	14	1	104.29	3.9	3.82	4.00	14.90	5250.00	352.40	343.86
		2	105.47	3.83	3.87	4.00	14.82	4750.00	320.47	
		3	107.10	3.95	3.97	3.87	15.68	5625.00	358.70	
	28	1	108.57	3.96	4.00	3.88	15.84	5750.00	363.01	366.72
		2	104.88	3.90	3.86	3.90	15.05	5625.00	373.65	
		3	108.68	4.00	3.80	3.86	15.20	5525.00	363.49	
	90	1	108.1	3.83	3.90	4.1	14.94	6250.00	418.42	478.95
		2	111.43	3.86	3.82	4.20	14.75	8625.00	584.94	
		3	110.70	3.80	3.87	4.00	14.71	6375.00	433.50	

ภาคผนวก ค

การนำจีโอโพลีเมอร์จากตะกอนเผลามาขึ้นรูป

การนำอีโอโพลีเมอร์มาผลิตเป็นวัตถุที่เพิ่มมูลค่า

นำอีโอโพลีเมอร์มาขึ้นรูปโดยใช้ตะกอนประปาเผาที่ 650°C 100% โดยสัดส่วนผสมใช้ สารกระตุ้น: ผง เท่ากับ 1.5: 1 มีระยะก่อตัวมากกว่า 1 ชั่วโมง ลักษณะตัวอย่างที่ได้ปรากฏดังภาพที่ ภาพที่ ค-1



ภาพผนวกที่ ค1 ผลจากการหล่อแบบโดยใช้อีโอโพลีเมอร์ตะกอนเผาที่ 650°C องศาเซลเซียส 100%

ภาคผนวก ง

การศึกษาค่าความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางผนวกที่ ๑1 ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่เกิดจากการแปรผันสัดส่วน
 Na_2SiO_3 : NaOH

	Na_2SiO_3 : NaOH	N	Subset for alpha = .05			
			1	2	3	4
Duncan(a)	2.50	3	389.6667			
	2.00	3	410.6667	410.6667		
	1.50	3		503.3333	503.3333	
	0.67	3			527.0000	
	1.00	3				671.6667
	Sig.		.659	.073	.620	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางผนวกที่ ๑2 ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่เกิดจากการแทนที่เถ้าลอย
ด้วยตะกอนเถ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ร้อยละ 10

	Temperature	N	Subset for alpha = .05
			1
Duncan(a)	500.00	3	622.6667
	650.00	3	700.0000
	800.00	3	727.0000
	Sig.		.191

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางผนวกที่ 3 ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่เกิดจากการแทนที่เถ้าลอย
ด้วยตะกอนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ร้อยละ 20

	Temperature	N	Subset for alpha = .05	
			1	2
Duncan(a)	500.00	3	573.3333	
	800.00	3	655.0000	655.0000
	650.00	3		754.6667
Sig.			.186	.119

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางผนวกที่ 4 ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่เกิดจากการแทนที่เถ้าลอย
ด้วยตะกอนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ร้อยละ 30

	Temperature	N	Subset for alpha = .05
			1
Duncan(a)	500.00	3	407.0000
	650.00	3	438.6667
	800.00	3	499.0000
Sig.			.145

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางผนวกที่ 5 ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่เกิดจากการแทนที่เถ้าลอย
ด้วยตะกอนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ร้อยละ 40

	Temperature	N	Subset for alpha = .05	
			1	2
Duncan(a)	500.00	3	300.0000	
	650.00	3		389.6667
	800.00	3		416.0000
Sig.			1.000	.459

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางผนวกที่ 6 ความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่เกิดจากการแทนที่เถ้าลอย
ด้วยตะกอนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ร้อยละ 50

	Temperature	N	Subset for alpha = .05	
			1	2
Duncan(a)	500.00	3	333.6667	
	800.00	3		479.0000
	650.00	3		501.0000
Sig.			1.000	.637

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายบุญฤทธิ์ คงแก้ว
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 9 พฤษภาคม 2525
สถานที่เกิด	นครศรีธรรมราช
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต(เทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	36/482 ม.8 ต.บางเขน อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-