อิทธิพลของการบดอัดต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

นายทิวากร ศรีจำปา

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

อิทธิพลของการบดอัดต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงงาน

_____

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)
ประธานกรรมการ

_____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
กรรมการ(อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน)

_____

(ผศ. ดร.ปรียาพร โกษา)
กรรมการ

_____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ทิวากร ศรีจำปา : อิทธิพลของการบดอัดต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ (EFFECT OF COMPACTION ON COMPRESSIVE STRENGTH OF SLUDGE-FLY ASH GEOPOLYMER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร. สุขสันติ์ หอพิบูลสุข

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการบดอัดต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการศึกษาครั้งนี้คืออัตราส่วนการแทนที่ตะกอนดินประปาด้วยเถ้าลอย ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3: NaOH พลังงานการบดอัด และอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วน L/FA ที่เหมาะสมมีค่าลดลงเมื่อพลังงานการบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า L/FA ที่เหมาะสมของพลังงานบดอัดที่ 592.5, 1346.6, 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ 1.5, 1.4 และ1.3 ตามลำดับ อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80:20 ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดสำหรับทุกพลังงานการบดอัดกำลังอัดของตะกอนดินประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่บ่มในตู้อบที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งระยะเวลาที่บ่มในตู้อบเท่ากับ 72 ชั่วโมง เมื่อระยะเวลาที่บ่มในตู้อบนานกว่า 72 ชั่วโมง กำลังอัดมีค่าเกือบจะคงที่สำหรับทุกพลังงานการบดอัดกำลังอัดสูงสุดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์มีค่าเท่ากับ 20, 18 และ16 MPaที่ระยะเวลาบ่มในตู้อบ 72 ชั่วโมง และอุณหภูมิเท่ากับ 75, 85 และ95 องศาเซลเซียส สำหรับพลังงานบดอัด 2693.3, 1346.6 และ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2556 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

TIWAKORN SRIJUMPA:EFFECT OF COMPACTION ON COMPRESSIVE STRENGTH OF SLUDGE-FLY ASH GEOPOLYMER. ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

This research investigates the effect of compaction on compressive strength of sludge-fly ash geopolymer. The influential factors in this study are the fly ash replacement, liquid alkaline activator content, Na_2SiO_3:NaOH ratio, compaction energy, heat temperatureand heat duration. Test results show that the optimal L/FA ratios decrease when the compaction energies increase. The optimal L/FA ratios for compaction energies of 592.5, 1346.6 and 2693.3 kJ/m^3 are 1.5, 1.4 and 1.3, respectively. The Na_2SiO_3:NaOH ratio of 80:20 gives maximum unit weight value for all the compaction energies. The compressive strength of sludge-fly ash geopolymer increases with an increase of heat duration until heat duration of 72 hours, after which the compressive strength remains almost constant for all compaction energies. The maximum compressive strength of sludge-fly ash geopolymer is equal to 20, 18 and 16 MPa at heat duration of 72 hours and the heat temperature of 75, 85 and 95^oC for compression energy of 2693.3, 1346.6. and 592.5 kJ/m^3, respectively.

School of Civil Engineering Student's Signature_____

Academic Year 2013 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานการศึกษานี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำในการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ แนะนำแนวทางการทำงานเพิ่มเติม และให้ความเอาใจใส่ ความเมตตากรุณาถ่ายทอดความรู้แก่ศิษย์เป็นอย่างดี ทั้งยังปลูกฝังให้ผู้ศึกษามีความอดทนมีวินัยหมั่นค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติม ผู้ศึกษาจึงขอขอบพระคุณท่าน ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข ไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ให้แก่ผู้ศึกษาซึ่งเป็นความรู้และประสบการณ์ที่มีค่าและมีประโยชน์ในการทำงานของผู้ศึกษา ผู้ศึกษาขอระลึกถึงพระคุณบิดาและมารดา ที่ได้อบรมสั่งสอนให้เป็นคนดี รักการศึกษาและหมั่นหาความรู้เพิ่มเติม และไม่ย่อท้อต่อปัญหาและอุปสรรคต่างๆ

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ น้องๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีและให้กำลังในเป็นอย่างดีเสมอจนสำเร็จการศึกษา

ทิวากร ศรีจำปา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฉ
สารบัญรูปภาพ ..... ช
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
2 ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 จีโอโพลิเมอร์ 3
2.2 เถ้าลอย 5
2.3 ดินตะกอนประปา 13
2.4 สารละลาย 14
2.5 การทบทวนวรรณกรรมหรือสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง 17
3 วิธีดำเนินการวิจัย 22
3.1 บทนำ 22
3.2 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการวิจัย 23
3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปา และเถ้าลอย 23
3.4 การเตรียมตัวอย่างดินตะกอนประปาและสารละลาย 24
3.5 การทดสอบกำลังอัดดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ 25
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล 26
4.1 บทนำ 26
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย 26

4.3 ผลการทดสอบการบดอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลลิเมอร์ 28
4.4 ผลกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์ 30
5 บทสรุป 35
5.1 การสรุปงานวิจัย 35
5.2 ข้อเสนอแนะ 35
เอกสารอ้างอิง 36
ประวัติผู้เขียน 39

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 6

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ .ศ.2533 – 2541 7

2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618 9

2.4 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 11

2.5 ปริมาณตะกอนน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนระหว่างปี พ.ศ. 2542-2546 13

2.6 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว 16

3.1 จำนวนตัวอย่างของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ 24

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง 26

4.2 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย 27

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	Polycondensation of Na-poly(sialate-disiloxo) albite framework	4
2.2	Scaning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอย (ขยาย 1,000 เท่า)	10
2.3	แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน(Makino et al.,1999)	12
3.1	ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์	22
3.2	ดินตะกอนประปาที่ได้จากการประปานครหลวง เขตบางเขน	23
3.3	ตัวอย่างดินตะกอนประปาเถ้าลอยก่อนเข้าตู้อบ	25
4.1	การกระจายขนาดของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย	27
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนผสมของ Na2SiO3 และ NaOH ต่อส่วนผสมของดินตะกอนประปาและเถ้าลอยที่กำลังบดอัด 592.5, 1346.6, 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร	29
4.3	ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์พลังงาน 2,693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตรของจีโอพอลิเมอร์อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3	31
4.4	ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่พลังงานการบดอัด 1,346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.4	32
4.5	ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.5	34

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญปัญหา

การผลิตน้ำประปาจะใช้น้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งเจือปนโคลนดินตะกอนกระบวนการผลิตน้ำประปาจะมีวิธีการทำให้ตะกอนจับตัวกันและตกลงสู่ก้นบ่อ (Clarifiers) แล้วจึงทำการระบายตะกอนเหลวออกไปยังลานตากตะกอน (Sludge Lagoons) ในพื้นที่ประมาณ 252 ไร่ เพื่อรอการกำจัดต่อไป การตากตะกอนที่ลานตากตะกอนนั้นจะอาศัยสภาพแวดล้อมจากธรรมชาติ เช่น กระแสลม แสงแดด และอุณหภูมิ เป็นปัจจัยช่วยให้น้ำระเหยออกจากเนื้อดินตะกอน และใช้รถเครื่องจักรกลพลิกและกลับหน้าดินตะกอนเพื่อเร่งการระเหยของน้ำในมวลดินที่อยู่ชั้นล่าง เมื่อดินตะกอนมีสภาพที่แห้งแล้วจะมีลักษณะที่ร่วนซุยสะดวกต่อการขนย้ายออกจากพื้นที่โรงงานไปใช้ประโยชน์ในการถมที่ดินในรัศมีโดยรอบโรงงานผลิตน้ำบางเขนและเขตปริมณฑล ตะกอนแห้งเหลือทิ้งเฉลี่ยมีจำนวน 247 ตันต่อวัน และในบางช่วงมีมากถึงวันละ 300 ตันในฤดูแล้ง และ 700 ตันในฤดูฝน (คมกริช และคณะ, 2553) เนื่องจากปริมาณการผลิตน้ำประปายังคงมีอย่างสม่ำเสมอต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ปริมาณดินตะกอนประปาจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระบวนการผลิต ปัจจุบันลานตากตะกอนด้วยวิธีธรรมชาติของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีพื้นที่จำกัดสามารถรองรับและตากตะกอนเพื่อรอการลำเลียงขนย้ายได้ประมาณ 2 เดือน ทำให้โรงงาน ผลิตน้ำบางเขนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต้องตระหนักถึงปัญหาปริมาณของตะกอนและแนวทางการกำจัดตะกอนที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

จากปัญหาที่กล่าวมา ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาผลิตวัสดุก่อสร้าง (Construction material) ชนิดจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) โดยการผสมดินตะกอนกับสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) และเถ้าลอย และให้ความร้อนในปริมาณที่เหมาะสม วัสดุจีโอโพลิเมอร์นี้จัดเป็น Green material ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (ขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปลดปล่อยกาซคาร์บอนไดออกไซด์และก่อให้เกิด Greenhouse effect) จีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงในการเตรียมตัวอย่าง ปลดปล่อย CO_2 ต่ำ และมีกำลังอัดสูง

เนื่องจากวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยคือบล็อกและอิฐก่อสร้าง งานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของการบดอัดต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ โดยแปรผันตัวแปรควบคุม ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนการแทนที่ตะกอนดินประปาเถ้าลอย ปริมาณสารกระตุ้นอัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน

และพลังงานการบดอัด ผลการศึกษาทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างความเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่อกำลังอัด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

หาอัตราส่วนผสม ดินตะกอนประปา เถ้าถ่านหิน และสารกระตุ้น พลังงานความร้อน อุณหภูมิ ระยะเวลาในการบ่ม และพลังงานบดอัด (592.5, 1346.6, 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) ที่เหมาะสมเพื่อผลิตบล็อกจีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังอัดไม่ น้อยกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ดินตะกอนที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินตะกอนประปาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน

1.3.2 เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

1.3.3 พลังงานการบดอัดมีค่าเท่ากับ 592.5, 1346.6, 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

1.3.4 สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของ Na_2SiO_3 และ NaOH มีค่าเท่ากับ 50:50, 70:30, 80:20, 90:10, และ 100:0 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10 โมล

1.3.5 อัตราส่วนระหว่างส่วนผสมดินตะกอนประปาต่อเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 70:30

1.3.6 อุณหภูมิในการเตรียมตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 65, 75, 85 และ95 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง

1.3.7 ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง (ก่อนทดสอบกำลังอัด) ทดสอบที่ 7 วัน

1.3.8 ตัวอย่างดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร

1.3.9 การทดสอบกำลังอัด ทำตามมาตรฐาน ASTM

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (Na_2SiO_3 NaOH เถ้าลอย และพลังงานการบดอัด) ต่อการพัฒนากำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมาของจีโอโพลิเมอร์ และเถ้าลอยปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลลิเมอร์

2.1 จีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบ-อสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอริกอนินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1970 Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) เป็นส่วนใหญ่ และถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย Na_2SiO_3 หรือ KOH เมื่อให้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัด

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุองค์ของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก ส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) เป็นส่วนใหญ่โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย Na_2SiO_3 หรือ KOH แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ โดยโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นี้จะแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดการไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง

การเปรียบเทียบปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชั่นของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Portland cement Hydration VS Geopolymerization)

ลักษณะโครงสร้างของไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอโพลิเมอร์นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Portland cement hydration) ดังสมการที่ 1 ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีต ซีเมนต์เพสต์ หรือมอร์ต้าร์ที่แข็งตัวแล้ว เมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองขึ้น ซึ่ง

เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ดังสมการที่ 2 ปฏิกิริยานี้เองจะเพิ่มผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (C-S-H) ส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น

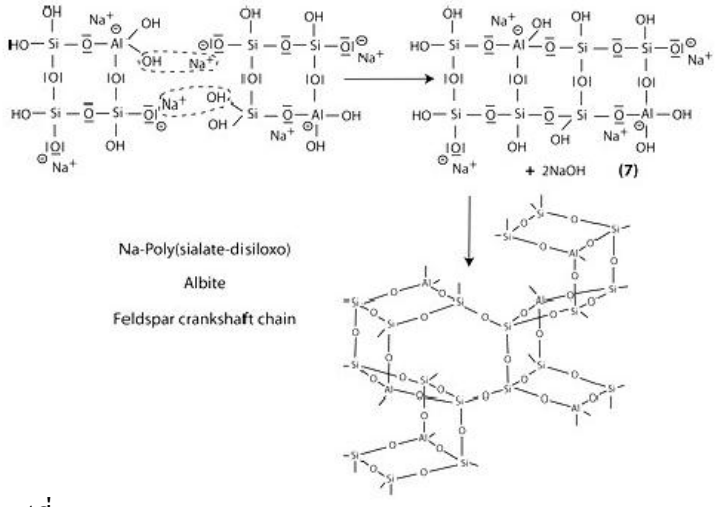
$$C_2S,\ C_3S + H_2O \text{ ------> } C\text{-}S\text{-}H + Ca(OH)_2 \qquad (1)$$

$$SiO_2 \text{ (Pozzolanic material)} + Ca(OH)_2 \text{ ------> } C\text{-}S\text{-}H \qquad (2)$$

จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน จีโอโพลิเมอร์เกิดจากวัตถุดิบที่มีซิลิเกต (Si) อลูมิเนียม (Al) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงจะทำให้องค์ประกอบหลักเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีและเกิดเป็น Polymer chain ปฏิกิริยาจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา สมการที่ 3 แสดงสมการทางเคมีของปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)

$$n(Si_2O_5,Al_2O_2)+2nSiO_2+4nH_2O+NaOH \text{ or } KOH\text{----->}$$

$$Na+\ K+\ +n(OH)_3\text{-}Si\ \text{-}O\ \text{-}Al\ \text{-}O\text{-}Si\text{-}(OH)_3 \qquad (3)$$



รูปที่ 2.1 polycondensation of Na-poly(sialate-disiloxo) albite framework

จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเถ้าถ่านหินมีส่วนประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักหากนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์จะสามารถทาให้เกิดสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เหมือนคอนกรีตสารจีโอโพลิเมอร์ เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่

รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินารวมตัวกันและเมื่อรวมกับสารประกอบอื่นที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาก็จะก่อตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกันกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในกระบวนการและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ปกติสารจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สารประกอบที่ใช้ทาจีโอโพลิเมอร์ ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากดังกรณี ของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จึงทาให้ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายมากกว่า

2.2 เถ้าลอย

เถ้าลอย หรือเถ้าถ่านหิน (fly ash หรือ pulverized fuel ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงาน โรงไฟฟ้าถ่านหิน เถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล มีสีเทาเทาดำหรือน้ำตาล เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (pozzolan) สังเคราะห์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกา และ อลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้ง และป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร Ca(OH) 2 และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (cementitious substance) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และช่วงเวลาของการเผา ดังนั้นคุณภาพ และความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน ก่อนที่จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมี และทางกายภาพของเถ้าลอย ควรทราบกฎเกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต มีหน่วยงานวิจัยหลายหน่วยงานได้กล่าวถึงคุณสมบัติ และข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐาน ที่อ้างอิงถึงจะมี 2 แห่งด้วยกันคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมี และทางกายภาพของ เถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพ และคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้ในงาน

American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO 2) อลูมินาออกไซด์ (Al 2 O 3) เหล็กออกไซด์ (Fe 2 O 3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO 3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินขบวนการเผา และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา มาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และ เหล็ก ในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ต้องมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าเถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO 3) กำหนดไม่ให้เกิน 5 เพราะซัลเฟอร์มีผลเสียต่อกาพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด ระยะเวลาก่อตัวได้ และยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

Chemical composition	**Class of Fly Ash**	
	F	**C**
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ($SiO_2 + Al_2O_3$ และ Fe_2O_3), min %	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากาการเผา (Loss on lgnition (LOI), max %	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับเถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มาก การควบคุมในด้าน air entrainment ของคอนกรีตสดจะทำได้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่มในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 ปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na 2 O Equivalent) มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูง จะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ alkali-aggregate ขึ้นได้ ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต้อปฏิกิริยา จะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ พ .ศ.2433 - 2541 คุณสมบัติโดยทั่วไปมีปริมาณออกไซด์ของ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณ CaO จะสูงกว่าร้อยละ 10 ปริมาณ LOI ต่ำมากคือน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ ข้อที่น่าสังเกตคือปริมาณ Fe_2O_3 จะสูงกว่าเถ้าลอยแหล่งอื่นที่มีอยู่ในประเทศไทย ส่วนมากจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10 ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533 – 2541

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ .ศ.2533 – 2541

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2534	42.8	23.3	14.0	10.5	2.4	0.8	2.3	3.9	0.7
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2536	43.1	20.0	13.2	13.0	2.7	1.3	2.4	2.6	0.6
2537	52.8	18.0	8.5	13.3	1.4	0.9	2.0	2.8	0.3
2538	40.6	22.8	12.8	14.4	2.5	0.7	2.0	2.8	0.9
2539	40.6	23.6	23.0	13.0	2.5	1.2	3.0	2.4	0.7
2540	41.5	28.1	10.0	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2541	37.3	22.1	11.4	11.4	2.7	1.1	2.7	2.5	0.1

ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย และปฏิกิริยาทางเคมี

ชัย จาตุรพิพักษ์กุล และคณะ (2542) เมื่อถ่านหินถูกเผา และมีการเย็นตัวลงของเถ้าลอยการผาจะทำให้องค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอยด้านการเกิดผลึก (crystalline) แตกต่างกัน สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์จะมีความไม่เป็นผลึก (glass) มากกว่าร้อยละ 90 อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ก็ยังคงมีองค์ประกอบของ crystalline จำพวก quartz anhydrite calcite hematite และ mullite ซึ่งเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X - ray diffraction จะพบว่า 9 เถ้าลอยจากถ่านลิกไนต์จะมีองค์ประกอบของ crystalline น้อยกว่าเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัสและแอนทราไซท์

คอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมเริ่มต้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (hydration) ระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ ได้สารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และ Hydrated Lime หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH) 2) สารประกอบสองตัวแรกมีคุณสมบัติ

เป็นสารเชื่อมประสานที่ได่จากปฏิกิริยาหลักของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ Ca(OH) 2 ที่ดีจะแตกตัวเป็น Ca 2+ หลังจากนั้น Ca(OH) 2 จะเข้าทำปฏิกิริยา pozzolanic กับสารปอซโซลานในเถ้าลอยได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (2.SiO 2) และ อลูมินาออกไซด์ (2.Al 2 O 3) ได้สารประกอบ CSH และ CAH ซึ่งเป็นผลิตผลเช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ในงานที่เป็นคอนกรีตหลาเมื่อใส่เถ้าลอยลงไปปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ก็จะทำให้คอนกรีตสามารถระบายความร้อนได้ทัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในสมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ (Hydration of Portland cement)

$$\text{Cement} + H_2O \longrightarrow CSH + CAH + Ca(OH)_2 \qquad (2.1)$$

$$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2(OH) \qquad (2.2)$$

ปฏิกิริยาระหว่าง Ca(OH)2 กับเถ้าลอยลิกไนต์ (Pozzolanic reaction))

$$Ca^{2+} + 2(OH)^- + 2.SiO_2 \longrightarrow CSH$$

$$Ca^{2+} + 2(OH)^- + 2.Al_2O_3 \longrightarrow CAH \qquad (2.3)$$

อย่างไรก็ตาม กลไกในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะซับซ้อนกว่าการนำสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยตรง Lane and Best (1982) พบว่าเถ้าลอยจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมอลูมิเนตซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดในช่วงแรก แต่จะหน่วงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต อัลคาไลน์ และ แคลเซียม ในเถ้าลอย

คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย

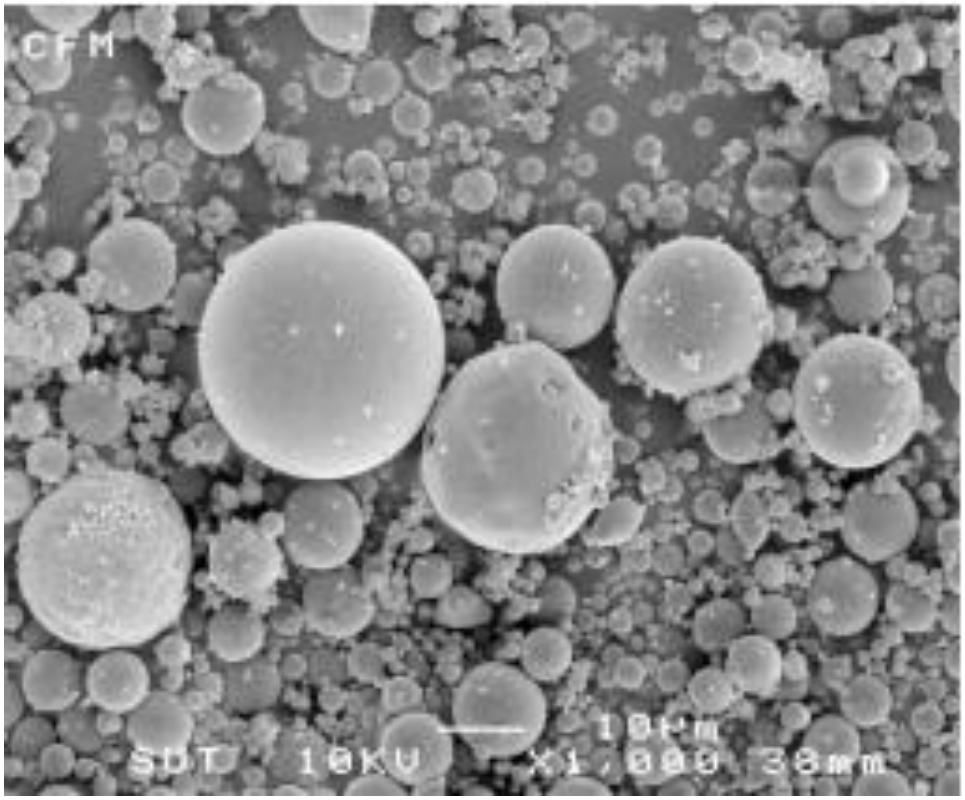
คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของเถ้าลอย สามารถเห็นได้จากพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (fly ash concrete) แต่คุณสมบัติของเถ้าลอยอาจเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ เช่นมีการเผาน้ำมันเตาร่วมกับการเผาถ่านหิน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และลดการกัดกร่อน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของ เถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งาน อาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C-61

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618

ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
ความละเอียด : ส่วนค้างตะแกรงเบอร์ 325 หลังการ่อนแบบเปียก,MAX %	34	34
หาดัชนีกำลัง : โดยผสมกับปอร์ตแลนต์ซีเมนต์		
7 วัน Min % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
28 วัน Min % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
ความต้องการน้ำ : Max % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธี Autoclave , Max %	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement)		
2 ความหนาแน่น Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
3 ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
Mutiple Factor (ผลคูณระหว่าง % LOI กับ % ของปริมาณที่ค้างตะแกรงเบอร์325)	255	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ต้าที่ 28 วัน Max % ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03

รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน มีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผา ถ่านหินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม เมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจาก ถ่านหินลิกไนต์อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม ดังรูปที่ 2.2 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบ และทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเท คอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้



รูปที่ 2.2 Scaning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอย (ขยาย 1,000 เท่า)

ความละเอียด (Fineness)

ขนาด หรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา pozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 ไมโครเมตร) โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieving) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาด์ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่านอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (Blaine specific surface-area technique) ตามมาตรฐาน ASTM C-204 หรือวิธี particle size-analysis หรือวิธีBrunauer-Emmett-Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม การทดสอบเทอร์บิดิมิเตอร์ (turbidimeter test) ตาม ASTM C-115 และการใช้ไฮโดรมิเตอร์ โดยการทดสอบทั้งสี่วิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่แตกต่างกันได้มาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทดสอบ โดยผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความพรุนของเถ้าลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมาก แต่จากการทดสอบเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าว

ตารางที่ 2.4 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

Sample Type	Specific Gravity	Retained on Sieve 325 (%)	Air Pemeability (cm^2/g)	Mean Particle Size (micron)
ซีเมนต์	3.14	4.7	3120	13.0
เถ้าลอย	2.02	37.4	2370	28.5

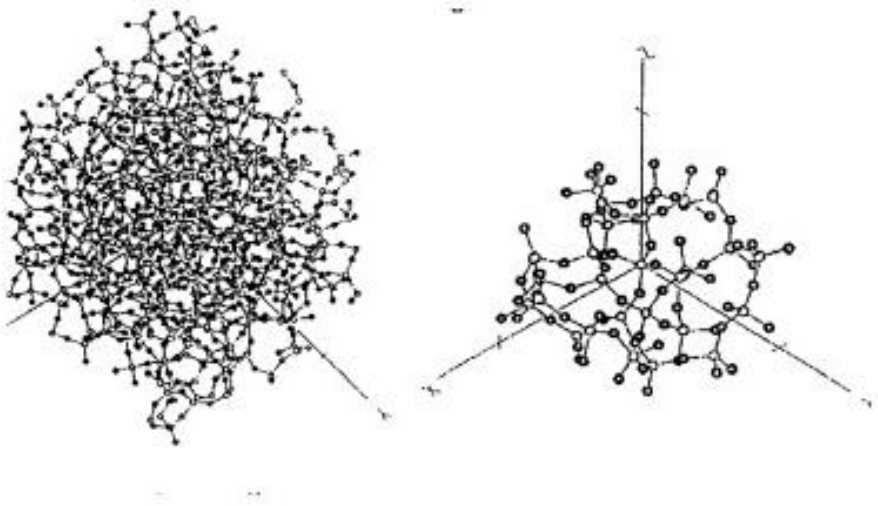
จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค่างบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์

การหาดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

ค่าดัชนีกำลังจะปีนอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ต้ามาตรฐานที่ไม่ผสมปอซโซลานโดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้ามาตรฐาน ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน เพื่อแสดงถึงอัตราการเกิดหรือความไวในการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอย

โครงสร้างผลึกอสัณฐาน

โครงสร้างผลึกซิลิกาอสัณฐานจะมีการเรียงตัวกันของอะตอมหรืออนุภาคยังไม่เป็นระเบียบดังแสดงในภาพที่ 3.3 และเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ซิลิกาอสัณฐานจะเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมใหม่อย่างเป็นระเบียบและเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกซิลิกาซึ่งผลึกซิลิกาดังกล่าวมีโครงสร้างผลึกต่างๆ คือ ควอร์ชไทรดิไมท์ และ คริสโทรบอไลท์ โดยที่แต่ละโครงสร้างจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.3 แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน(Makino et al.,1999)
(ก) แบบจำลองกลุ่มอะตอมขนาดใหญ่ของซิลิกาอสัณฐาน ($Si_{400}O_{800}$ cluster)
(ข) แบบจำลองกลุ่มอะตอมขนาดเล็กของซิลิกาอสัณฐาน ($Si_{27}O_{72}$ cluster)
(o คือ อะตอมของออกซิเจน , oคือ อะตอมของซิลิกอน)

โครงสร้างผลึก

โครงสร้างผลึกซิลิกามีอยู่ 3 โครงสร้าง คือ ควอร์ชไทรดิไมท์ และคริสโทรบอไลท์ โดยแต่ละโครงสร้างผลึกจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจะเป็นไปอย่างช้าๆ จากโครงสร้างผลึกรูปหนึ่งไปยังอีกรูปหนึ่ง ดังนั้นโครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิสูงจะยังคงมีอยู่ ณ ที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างและแต่ละโครงสร้างผลึกจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 2 โครงสร้าง คือ α- จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำและ β- จะเกิดที่อุณหภูมิสูง (Deer et al.,1971)

โครงสร้างผลึกซิลิกาแต่ละโครงสร้างประกอบด้วยโมเลกุล SiO_4 ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนเกาะอยู่ที่มุมและอะตอมของซิลิกอนอยู่ตรงกลางประกอบกันอยู่เป็นหน่วยรูปทรงสี่หน้าของ SiO_4 (SiO_4 tetrahedral) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ในแต่ละโครงสร้างผลึกซิลิกา อะตอมออกซิเจนจะเกาะกับอะตอมซิลิกอน 2 อะตอม ที่อยู่ใกล้เคียงในการเปลี่ยนโครงสร้างระหว่าง α – กับ β– เช่น α– ควอร์ชไปเป็น β– ควอร์ช การเปลี่ยนโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของอะตอมเพียงเล็กน้อยใน ทางตรงกันข้ามถ้าเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกระหว่างโครงสร้างที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกับที่อุณหภูมิสูง เช่น โครงสร้างผลึกแบบควอร์ชเปลี่ยนไปเป็นไทรดิเมอร์หรือคริสโทบอไลท์ การเปลี่ยนโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดเนื่องจากการสลายของพันธะและการเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอม (Deer et al., 1971)

2.3 ดินตะกอนประปา

การผลิตน้ำประปาจะใช้น้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งเจือปนโคลนดินตะกอน กระบวนการผลิตน้ำประปาจะมีวิธีการทำให้ตะกอนจับตัวกันและตกลงสู่ก้นบ่อ (Clarifiers) แล้วจึงทำการระบายตะกอนเหลวออกไปยังลานตากตะกอน (Sludge Lagoons) ในพื้นที่ประมาณ 252 ไร่ เพื่อรอการกำจัดต่อไป การตากตะกอนที่ลานตากตะกอนนั้นจะอาศัยสภาพแวดล้อมจากธรรมชาติ เช่น กระแสลม แสงแดด และอุณหภูมิ เป็นปัจจัยช่วยให้น้ำระเหยออกจากเนื้อดินตะกอน และใช้รถเครื่องจักรกลพลิกและกลับหน้าดินตะกอนเพื่อเร่งการระเหยของน้ำในมวลดินที่อยู่ชั้นล่าง เมื่อดินตะกอนมีสภาพที่แห้งแล้วจะมีลักษณะที่ร่วนซุยสะดวกต่อการขนย้ายออกจากพื้นที่โรงงานไปใช้ประโยชน์ในการถมที่ดินในรัศมีโดยรอบโรงงานผลิตน้ำบางเขนและเขตปริมณฑล ตะกอนแห้งเหลือทิ้งเฉลี่ยมีจำนวน 247 ตันต่อวัน และในบางช่วงมีมากถึงวันละ 300 ตันในฤดูแล้ง และ 700 ตันในฤดูฝน (คมกริช และคณะ, 2553) เนื่องจากปริมาณการผลิตน้ำประปายังคงมีอย่างสม่ำเสมอต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ปริมาณดินตะกอนประปาจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระบวนการผลิต ปัจจุบันลานตากตะกอนด้วยวิธีธรรมชาติของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีพื้นที่จำกัดสามารถรองรับและตากตะกอนเพื่อรอการลำเลียงขนย้ายได้ประมาณ 2 เดือน ทำให้โรงงานผลิตน้ำบางเขนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต้องตระหนักถึงปัญหาปริมาณของตะกอนและแนวทางการกำจัดตะกอนที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

ตารางที่ 2.5 ปริมาณตะกอนน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนระหว่างปี พ.ศ. 2542-2546

ปี พ.ศ.	ปริมาณน้ำประปา (ลบ.ม.)	ปริมาณตะกอนดิน (ตัน)	เฉลี่ย/วัน (ตัน)
2546 (ม.ค.-ต.ค.)	908,692,127	82,004	273
2545	1,088,751,325	95,824	263
2544	1,070,075,066	118,892	325
2543	1,055,192,193	110,968	304
2542	1,088,955,612	113,324	310

ที่มา : โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน ฝ่ายกำจัดตะกอน 2546

คุณสมบัติทั่วไปของตะกอนดินจากการผลิตน้ำประ จะอุดมด้วยสารอนินทรีย์ แต่ขาดสารอินทรีย์ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ขาดสารกลุ่มไฟเบอร์ และยังมีปริมาณอลูมิเนียมสูงกว่าดินทั่วไป เนื่องจากสารอลูมิเนียมดังกล่าวดังกล่าวได้มาจากการใช้สารส้มเป็นตัวเร่งการ

ตกตะกอนในขั้นตอนการผลิต ลักษณะและปริมาณมวลสารมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน เนื้อดินเบา อุ้มน้ำ จะพองตัวได้เมื่อซุ่มน้ำ ดังนั้นตะกอนดินจากการผลิตน้ำประปา ไม่เหมาะสำหรับการใช้ถมที่โดยทั่วๆไปแต่สามารถทำประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาสามารถแบ่งการใช้ประโยชน์ของตะกอนดินออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

- ปรุงแต่งด้วยอินทรีย์สาร หรือปุ๋ยในกลุ่มปุ๋ยหมัก เพื่อเพิ่มปริมาณไฟเบอร์ และแร่งธาตุที่จำเป็นสำหรับพืช ในประเทศญี่ปุ่นมีโครงการในลักษณะนี้กลายเป็นดินวิทยาศาสตร์ที่มีความต้องการของตลาด โดยเฉพาะตลาดปลูกไม้ดอก ไม้ประดับ
- นำมาเป็นสารปรับปรุงของเสียจากชุมชน หรือโรงงานน้ำตาล ให้เป็นดินที่มีคุณภาพ ทั้งนี้เพราะ กากของเสียที่ผ่านการบำบัดของน้ำเสียชุมชน หรือโรงงานน้ำตาล จะมีปริมาณสารอินทรีย์สูงเกินไป และบางครั้งส่งกลิ่นเหม็น เนื่องจากผ่านขบวนการหมักที่ไม่สมบูรณ์ การนำกากตะกอนจากการผลิตน้ำประปา มารวมกับกากของเสียจากชุมชนหรือโรงงานน้ำตาล จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง
- นำมาทำเครื่องปั้นดินเผา เนื่องจากคุณสมบัติของตะกอนดินที่ขาดสารกลุ่มไฟเบอร์ กากใยและขาดสารอินทรีย์ มีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นเครื่องปั้นดินเผา โดยที่ตะกอนดิน ดังกล่าวนี้ มีปริมาณของมวลสารอลูมิเนียมผลมอยู่ ได้ทำให้เครื่องปั้นดินเผาที่มีลักษณะเฉพาะตัว ซึ่งไม่เหมือนการทำเครื่องปั้นดินเผาจากที่อื่นๆ

2.4 สารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซดาไฟ เป็นของแข็งลักษณะผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ระเหย ไม่ติดไฟ น้ำหนักโมเลกุล 40.01 เป็นด่างแก่ จุดหลอมเหลว 318 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 2.13 ละลายน้ำได้ดีและเกิดความร้อนสูง และมีควันหรือละอองสาร เมื่อถูกความชื้นจะเยิ้มได้ง่าย สารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการณ์มักอยู่ในรูปของแข็งเป็นเม็ด (pellets) ทางอุตสาหกรรมอาจอยู่ในรูปของเหลวละลายน้ำชนิดเข้มข้น เป็นแผ่นหรือเป็นแท่ง ทำปฏิกิริยากับกรดได้เกลือของสาร และทำปฏิกิริยากับกรดไขมันได้สบู่ นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศได้ง่ายเกิดโซเดียม คาร์บอเนต

สารนี้ได้จากการผ่านกระแสไฟฟ้าในน้ำเกลือโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งโซเดียมอิออนจะไปที่ขั้วบวก (Cathode) ซึ่งมีแผ่นแอสเบสตอสป้องกันคลอรีน แล้วทำปฏิกิริยากับน้ำปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนได้โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ในอุตสาหกรรมผ้า พลาสติก สีย้อม ฟอกย้อม แร่ โลหะ ทำแม่พิมพ์ เป็นสารเคมีสำคัญ สำหรับผลิตสบู่ กระดาษ ใยสังเคราะห์ และใช้ในห้องปฏิบัติการตลอดจนให้บำบัดน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรดเพื่อให้เป็นกลาง และการล้างพื้นผิวต่างๆให้สะอาดโดยเฉพาะการล้างไขมันออก

อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อรุนแรง โดยทำปฏิกิริยากับโปรตีนและไขมัน ทำให้บริเวณนั้นอ่อนนุ่มกลายเป็นวุ้นหรือเจลาตินและสบู่ เนื้อเยื่อถูกทำลายหรือถูกกัดลึกลงไป ซึ่งการทำลายอาจต่อเนื่องหลายวัน ล้างน้ำออกได้ยาก การหายใจเอาไอหรือละอองสารทำให้ระคายเคืองต่อทางเดินหายใจส่วนบน ทำให้จาม ปวดคอ น้ำมูกไหล ปอดอักเสบรุนแรง หายใจขัด การสัมผัสถูกผิวหนังจะระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลไม้และพุพองได้ การกลืนกินทำให้แสบไหม้บริเวณปาก คอ กระเพาะอาหาร เกิดแผลและเลือดออกในกระเพาะอาหาร อาเจียน ท้องร่วง เสียชีวิตได้ หากสัมผัสถูกตาจะมีฤทธิ์กัดกร่อน ระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลไหม้ อาจทำให้มองไม่เห็นจนถึงขั้นตาบอดได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับโลหะเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ไวไฟ และต้องหลีกเลี่ยงความชื้น ฝุ่น น้ำ กรด ของเหลวไวไฟ ไตรคลอโรเอทิลีน ซึ่งอาจเกิดไฟไหม้หรือระเบิดได้

โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

โซเดียมซิลิเกตที่ใช้กันทั่วไปและโซเดียมซิลิเกตจะแบ่งออกเป็นสองประเภทของโพแทสเซียมซิลิเกตหรือที่รู้จักกันทั่วไปว่าเป็นโซเดียมซิลิเกต สารละลายโซเดียมซิลิเกตของโซเดียมซิลิเกตคือมีสูตรนา$_2$ O · mSiO $_2$ สารละลายโพแทสเซียมซิลิเกตเป็นโพแทสเซียมซิลิเกตมีสูตร K $_2$ O · mSiO $_2$ โซเดียมซิลิเกตที่สำคัญที่ใช้ในงานวิศวกรรมโยธา เมื่อความต้องการทางวิศวกรรมสามารถนำมาใช้เมื่อมีโพแทสเซียมสูงขึ้นซิลิเกต แก้วน้ำที่มีคุณภาพสูงบริสุทธิ์เป็นของเหลวหนืดไม่มีสีโปร่งใสละลายได้ในน้ำ เมื่อสิ่งสกปรกที่มีสีเหลืองอ่อนหรือสีเทา โซเดียมซิลิเกต waterglass ในสูตรเมตรเรียกว่าโมดูลัสแสดงให้เห็นถึงนา$_2$ O และ SiO $_2$อัตราส่วนโดยโมเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก ที่มีขนาดใหญ่ค่าของ m ที่สูงกว่าความหนืดของแก้วน้ำ แต่กำลังการผลิตลดลงสามารถในการละลายในน้ำ เมื่อ m มีค่ามากกว่า 3.0 เท่านั้นที่ละลายในน้ำร้อนเพื่อใช้ปัญหา มีขนาดเล็กกว่าค่าของเมตรที่ต่ำกว่าความหนืดของแก้วน้ำที่ละลายในน้ำ ที่ใช้ในงานวิศวกรรมโยธาโมดูลัสเมตรคือความแข็งแรงสูงขึ้นได้ 2.6-2.8 ทั้งที่ละลายในน้ำการผลิตของจีนของโซเดียมซิลิเกตโมดูลัสโดยทั่วไป ระหว่าง 2.4-3.3 เนื้อหาของโซเดียมซิลิเกตในสารละลาย (หรือความเข้มข้น) ที่ใช้กันทั่วไปในองศาความหนาแน่นหรือ Baume ความหนาแน่นของแก้วน้ำที่ใช้กันทั่วไปในงานวิศวกรรมโยธาโดยทั่วไปเป็น 1.36 ~ ^{3} 1.50g/cm เทียบเท่ากับ 38.4 ~ 48.3 องศา Baume ความหนาแน่นของเนื้อหาที่แก้วน้ำจะสูงกว่าความหนืดมากขึ้น ผลึกปกติ ผงซิลิเกต (SiO $_2$) กับโซดา

แอช (นา$_2$CO$_3$) ที่ 1300 ~ 1400 เผาอุณหภูมิสูง สร้างโซเดียมซิลิเกตเหลวจากเตาพวยน้ำดับบล็อกของระบบหรือแก รนูล ความดันสูงที่อุณหภูมิสูงหรือละลายในน้ำที่จะได้รับการแก้ปัญหาของผลิตภัณฑ์ ที่มีรูปทรงโซเดียมซิลิเกตรักษาตัวซิลิเกต การรวมตัวของ โซเดียมซิลิเกตในอากาศหายบ่มกับการแข็งตัวของมะนาวจะคล้ายกันมากตกผลึกหลัก และรวมการคายน้ำโดย carbonizing สองกระบวนการเพื่อให้บรรลุเป็นปฏิกิริยาคาร์บอเนเนื้อหาซิลิกาเพิ่มขึ้นแล้วระเหยและกลั่นตัวเป็นหยดน้ำซิลิกาฟรีและการคายน้ำของของแข็ง

ปริมาณของฟลูออไรโซเดียมโดยทั่วไปคือ 12% 15% เนื้อหาน้อยกว่าการกลั่นการบ่มช้าและความเข้มต่ำปริมาณที่มากเกินไปแล้วการ ตั้งค่าและแข็งเร็วเกินไปการดำเนินงานการก่อสร้างในความไม่สะดวกและหลังจาก ความแข็งแรงแข็งต้นอยู่ในระดับสูง แต่ต่อมาความรุนแรงลดลง ดังนั้นเนื้อหาตัวแทนบ่มควรจะควบคุมอย่างเคร่งครัดและเป็นไปตามอุณหภูมิ, ความชื้นน้ำแก้วโมดูลัสความหนาแน่นของการปรับเปลี่ยนที่เหมาะสมอยู่ในช่วง ดังกล่าวข้างต้น คือในทางกลับกันอุณหภูมิสูง, โมดูลัสความหนาแน่นของการเลือกขั้นต่ำชั่วโมงและรองโซเดียม ซิลิเกตผงสำเร็จรูปหรือที่เรียกว่าโซเดียมซิลิเกตทันทีโซเดียมซิลิเกตไฮเดรท ลักษณะสีขาวของสินค้าในรูปแบบผงสม่ำเสมอดี การขนส่งการเก็บรักษาและการใช้งานสะดวกมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้เครื่องจักรกลและระบบอัตโนมัติ ใช้กันอย่างแพร่หลายในโลหะ, พลังงานไฟฟ้าปิโตรเคมีและอาคารอุตสาหกรรมวัสดุ จะถูกใช้เป็นสารยึดเกาะในเสาหินวัสดุทนไฟ, น้ำยาทำความสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมสารกันบูดสบู่และกรดในซีเมนต์, อุตสาหกรรมเซรามิกดีและหล่ออุตสาหกรรมความแม่นยำตัว แทนการอบแห้งและเพิ่ม ผลิตภัณฑ์ผงโซเดียมซิลิเกตทันทีนอกจากนี้ยังมีโซเดียมซิลิเกตของเหลวมี คุณสมบัติและการทำงานทั้งหมด โซเดียมซิลิเกตผงสำเร็จรูปนาโมเลกุลสูตร$_2$ O · mSiO $_2$· nH $_2$ O, สูตรลดน้ำหนักโดยทั่วไประหว่าง 280-350 โดยบดกลที่มีโซเดียมปราศจากผงอดีตมีคุณสมบัติที่มีคุณค่าจำนวนมากเช่นความ เร็วในการละลายน้ำได้ระดับของความบริสุทธิ์ โซเดียมซิลิเกตผงสำเร็จรูปเป็นผลิตภัณฑ์เคมีปรับตามวิธีแห้ง (วิธี Glauber, วิธีโซดา) โซเดียมซิลิเกตผ่านวัสดุเคมีการกรองการปั้นการถ่ายโอนสเปรย์กระบวนการอบที่ได้รับ

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

คุณลักษณะ	**เกณฑ์ที่กำหนด**		
	ชนิดที่ 1	**ชนิดที่ 2**	**ชนิดที่ 3**
อัตราส่วนโดยโมลไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($Na_2O:SiO_2$)	1:1.97 ถึง 1:2.17	1:2.34 ถึง 1:2.58	1:3.18 ถึง 1:3.59
เหล็ก ร้อยละ ไม่เกิน	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟต ร้อยละ ไม่เกิน	0.21	0.21	0.21

โดยชนิดที่เลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือชนิดที่ 2 ตาม ม.อ.ก. 433-2539 ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

Property	Percent by weigth
Na_2O	15.36 %
SiO_2	33.28 %
H_2O	51.36 %

อันตรายต่อสุขภาพ

การสูดดมไอหรือ ละอองไอเมื่อการระคายเคืองเยื่อบุทางเดินหายใจและการกัดกร่อนและอาจทำให้ เกิดโรคปอดอักเสบสารเคมี ระคายเคืองตาหรือละอองของเหลวที่แข็งแกร่งสามารถก่อให้เกิดแผลที่กระจกตาและ conjunctival สัมผัสกับของเหลวที่สามารถก่อให้เกิดโรคผิวหนังหรือผิวหนังไหม้ ผลิตภัณฑ์นี้เป็นของเหลวที่มีฤทธิ์กัดกร่อนทางเดินไอดี, คลื่นไส้, อาเจียน, ปวดหัว, อ่อนแอและความเสียหายของไต

2.5 การทบทวนวรรณกรรมหรือสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์ และพบว่าการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลิเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ประมาณ 0.20 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 3.50-4.50 น้ำ (H_2O) ต่อไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 15-17.5 และไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 0.80-1.20 ในเวลาต่อมาได้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ และพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) มีโครงสร้างแบบซีโอลิทิก (Zeolitic) การพัฒนาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเติมสารผสมเพิ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอโพลิเมอร์ ดังจะเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน และอุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆ จีโอโพลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกกะปาสคาล มีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลท์ จีโอโพลิเมอร์จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบ (มีความแข็งแรง หดตัวน้อย ทนความเย็น และต้านทานการสึกกร่อน) สำหรับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อน เมื่อคำนึงถึงต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีคุณค่าเหนือกว่าการใช้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากการผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูง และเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 ในปริมาณต่ำ

Hardjite et al. (2003) ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Concrete) ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 0.095 และ 0.120 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อโซเดียมออกไซด์และน้ำต่อจีโอโพลิเมอร์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ กำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินชนิดแคลเซียมต่ำมีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้น แต่เถ้าถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

Hardjito et al. (2004) พบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่าอลูมิโนซิลิเกตโพลิเมอร์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถ้าถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว ผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์

สมิตร ส่งพิริยะกิจ (2548) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์จีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินและทรายเป็นวัตถุดิบ สารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) เป็นส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเคต และน้ำ อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 25 และ 45 องศาเซลเซียส หลังจากทำการหล่อตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การทดสอบกำลังอัดทำที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและกำลังอัดยังคงเพิ่มขึ้นต่อไปตามอายุบ่ม ส่วนตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้น แต่กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม และในที่สุดจะมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราส่วนผสมต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งเป็นดินที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างได้ดี และได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายปูนซีเมนต์ เมื่อผสม

ดินขาวเผากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ จะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ผลการศึกษาพบว่าถ้าความเข้มข้นของสารกระตุ้นสูงเกินกว่าค่าเหมาะสม การก่อตัวจะช้าลง การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ก่อตัวได้เร็วขึ้น อัตราส่วนระหว่างดินขาวเผาต่อ $Ca(OH)_2$ ไม่มีผลต่อการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์

Chindaprasirt et al. (2006) ได้ทดลองใช้เถ้าถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเพื่อทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยควบคุมการไหลแผ่ (Flow) ให้เท่ากับร้อยละ 110±5 ถึง 135±5 ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลแผ่แปรผันตามอัตราส่วน Na_2OSiO_2 : NaOH กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 10-65 เมกกะปาสคาล อัตราส่วน Na_2OSiO_2 : NaOH ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.67-1.0 การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 โมล เป็น 20 โมล ไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ อุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน การเติมน้ำประมาณร้อยละ 2-8 และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) จะช่วยให้ความข้นเหลวดีขึ้นได้ และช่วยให้เทแบบได้ดี แต่กำลังอัดก็จะมีค่าลดลง

Bakharev (2004) ศึกษาความคงทนของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer paste) ที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class F เป็นสารตั้งต้น เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น กำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น และกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-linked aluminosilicate polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นสารกระตุ้น ผลการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นสารกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นสารกระตุ้นอย่างเดียว

Ohsawa et al. (1984) ได้นำเสนอวิธีการหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหินในไฮเดรตซีเมนต์โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นกรด เช่น กรดไฮดรอคลอลิค (HCl), กรดพิคลิก (Picric acid) และกรดไซลิคเซลิค (Salicylic acid) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคเถ้าถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าเถ้าถ่านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา ผลการทดสอบพบว่าในการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้น การ

ใช้กรดพิคลิก + เมทานอล + น้ำเป็นตัวทำละลายให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และมีความเบี่ยงเบนของผลการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 การใช้กรดดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และกรดไซลิกเซลิกอย่างมาก

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาโครงสร้างระดับโมเลกุล (Microstructure) ของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ขณะเกิดปฏิกิริยากับด่างของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหิน และพบว่าโดยส่วนมากโมเลกุลของเถ้าถ่านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ที่มีขนาดแตกต่างกัน เมื่อผสมกับด่าง ผิวของเถ้าถ่านหินจะถูกกัดเป็นรูและขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ เถ้าถ่านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ ซึ่งจะมีปริมาณมากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของด่าง ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหิน และระยะเวลาการบ่ม การศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมจีโอโพลิเมอร์และนำเข้าไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง เกิดจีโอโพลิเมอร์ที่มีเนื้อเป็นผนึกคล้ายกระจกและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ

Swedish และศาสตราจารย์ Bengt Broms ได้ใช้เสาเข็มปูนขาวในงานฐานรากและงานโครงสร้าง (Broms and Boman, 1975) ในประเทศญี่ปุ่นได้เริ่มต้นใช้เทคนิคนี้ในปลายปี ค.ศ. 1970 (Okumura and Terashi, 1975; Terashi et al, 1979; Kawasaki et al, 1981 และ Suzuki, 1982) DJM Research Group (1984) Chida (1982) และ Miura et al, (1986) ได้รายงานความสำเร็จของการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในงานวิศวกรรม ในปี ค.ศ. 1980 และ 1982 หลังจากการประยุกต์ใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ไม่นานนัก นักวิจัยและวิศวกรหลายท่านได้สร้างทฤษฎีวิธีการวิเคราะห์และวิธีการออกแบบ

อนิรุทธ์ ธงไชย (2530), สมชัย กกกำแหง (2535) และ Rhee, (1982) นักวิจัยเหล่านี้พบว่ากำลังอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น (ในช่วง 0 – 15%) ระยะเวลา การบ่มและค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่า Liquid Limit, Plasticity Limit และ Plasticity Index มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย

อภิชิต คำภาหล้า ได้ศึกษาอิทธิพลของกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยด้วยวิธีแห้งสลับเปียก พบว่าอายุการใช้งานของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยจะมีค่าต่ำสอดคล้องกับที่ ACI (1990) และ U.S. Army Corps of Engineers (2004) แนะนำว่ากำลังอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบของการแห้งสลับเปียก การเพิ่มเถ้าลอยเพื่อช่วยให้ความหนาแน่นและการเกิดปฏิกิริยา pozzolanic ในดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และปริมาณที่เหมาะสมของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าฝลอยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 7 และร้อยละ 20 ตามลำดับ

ปริมาณเถ้าลอยที่มากเกินจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด

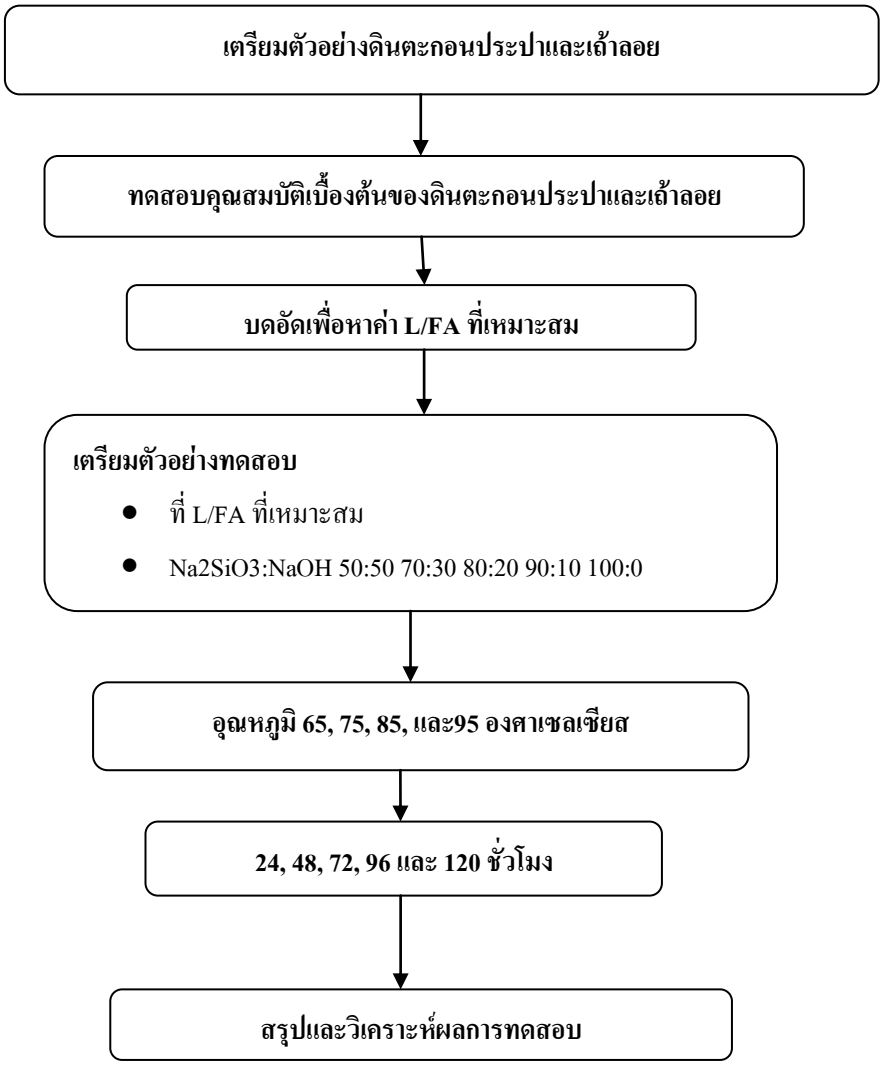
ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้ามีปริมาณมากขึ้น ค.ศ. 1930 - 1939 สหรัฐอเมริกาได้เริ่มศึกษาการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต โดยในปี ค.ศ. 1937 Davis และคณะจากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต ในปี ค.ศ. 1948 ได้มีการใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างเขื่อน Hungry Horse ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 - 1979 ได้เกิดวิกฤติการณ์น้ำมันในปี ค.ศ. 1970 - 1979 ได้มีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงทำให้มีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น และได้มีการศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวางเพื่อทำความเข้าใจปฏิกิริยาเคมีของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้น ปัจจุบันได้มีการนำเถ้าลอยมาใช้กับงานคอนกรีตอย่างแพร่หลายเพื่อเป็นการลดต้นทุนของคอนกรีตและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเถ้าลอยทิ้ง นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาการนำเถ้าลอยลิกไนต์จากอำเภอแม่เมาะมาผสมในดินสำหรับงานถนน เช่น

งานวิจัยล่าสุดในการทำจีโอโพลิเมอร์จากดินตะกอน (Sukmak and Horpibulsuk, 2012) แสดงให้เห็นว่าดินตะกอนในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสรุนารีสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับเถ้าถ่านหินในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังอัดและความคงทนสูง (กำลังอัดมีค่าสูงถึง 12 ถึง 14 MPa) ผลการศึกษาแสดงว่าปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum water content) ในการผลิตบล็อกจีโอโพลิเมอร์ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเถ้าถ่านหิน และปริมาณและความเข้มข้นของสารกระตุ้น ส่วนผสมที่เหมาะสมในการทำดินตะกอนจีโอโพลิเมอร์คือ อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 0.7 และอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.6 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของสภาวะแห้งสลับเปียกต่อกำลังอัดของตะกอนดินเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ (ตะกอนดินประปาผสมกับเถ้าลอยและสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) ตะกอนดินประปาเถ้าลอยจะถูกนำมาผสมเข้ากับสารกระตุ้น ซึ่งเป็นส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ด้วยอัตราส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

3.2 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ

1) การเตรียมตัวอย่างดิน ดินตัวอย่างเป็นดินตะกอนประปาที่ได้จากการประปานครหลวง เขตบางเขน
2) เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เพื่อใช้เป็นวัสดุปอสโซลาน (ทำปฏิกิริยากับสารกระตุ้น)
3) สารกระตุ้น ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมของ NaOH และ Na_2SiO_3

รูปที่ 3.2 ดินตะกอนประปาที่ได้จากการประปานครหลวง เขตบางเขน

3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปา และเถ้าลอย

ก่อนที่จะทำตัวอย่างดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ผู้วิจัยจะทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปา ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินดังนี้

3.3.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทดสอบหาความถ่วงจำเพราะของดินเม็ดละเอียด ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854

3.3.2 ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic limit) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3.4 การเตรียมตัวอย่างดินตะกอนประปาและสารละลาย

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างดิน ดินตัวอย่างจะถูกตากให้แห้ง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบ ก่อนนำเข้าเครื่องบดละเอียด จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรง No.40 (ดินที่ผ่านการตากให้แห้งจะมีความชื้นเริ่มต้นที่น้อยมาก ประมาณร้อยละ 0) นำดินที่ผ่านตะแกรงเก็บใส่ภาชนะที่ปิดมิดชิด

3.4.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกท (Na_2SiO_3) การเตรียมสารละลาย NaOH เพื่อให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมล เริ่มต้นจากการชั่งสาร NaOH แบบเกล็ด 400 กรัม เทสารลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตรระหว่างการปรับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อุณหภูมิจะสูงมาก ดังนั้นจะต้องเตรียมสารละลายก่อนการนำไปใช้ผสม 24 ชั่วโมง สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีองค์ประกอบของ Na_2O ร้อยละ 9 และSiO_2 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
พลังงานการบดอัด	3	สูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ครึ่งหนึ่งของสูงกว่ามาตรฐาน (Half-modified Proctor) แบบมาตรฐาน (Standard Proctor)
อุณหภูมิ	3	65, 75, 85 และ 95 องศาเซลเซียส
อายุบ่มต่อ 1 อุณหภูมิ	5	24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง
อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH	5	50:50, 70:30, 80:20, 90:10 และ100:0
อัตราส่วนระหว่างดินตะกอนต่อเถ้าลอย	1	70:30
อัตราส่วนระหว่าง L/FA	3	1.3, 1.4 และ 1.5
จำนวนตัวอย่าง	3	ชุดละ 3 ตัวอย่าง

3.5 การทดสอบกำลังอัดดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

ตะกอนดินประปาจะนำมาผสมเข้ากับเถ้าลอยในอัตราส่วนผสม 70 : 30 และผสมเข้ากับสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) ในอัตราส่วน L/FA สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของ Na_2SiO_3 และ NaOH ในอัตราส่วนผสม Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 50:50 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10 โมล ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ถูกนำมากระตุ้นด้วยความร้อนระหว่าง 65, 75, 85 และ95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง และนำมาบ่มในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ก่อนทดสอบกำลังอัดที่พลังงานบดอัด 592.5, 1346.6, 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างดินตะกอนประปาเถ้าลอยก่อนเข้าตู้อบ

บทที่ 4
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

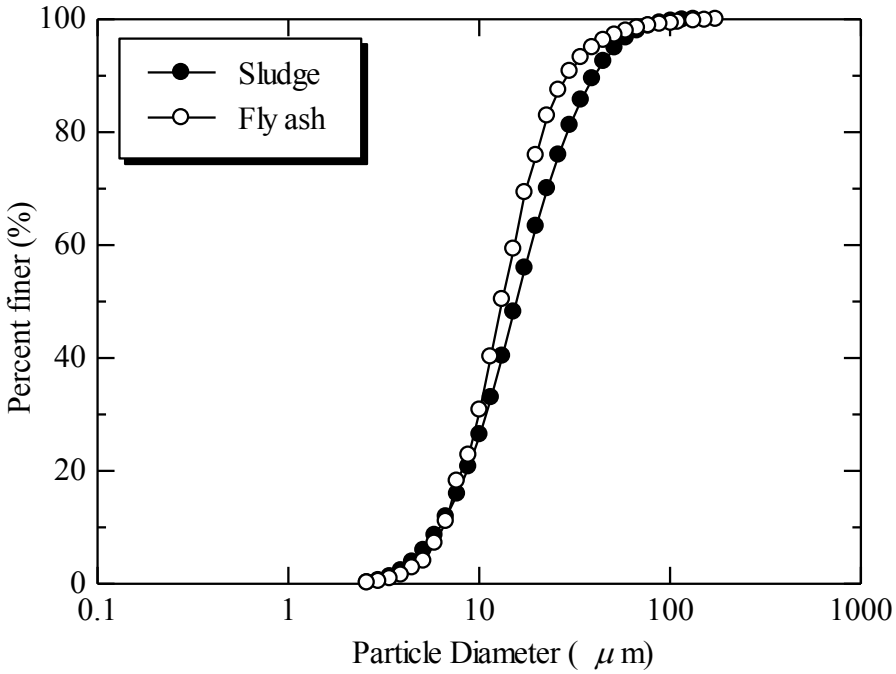
บทนี้นำเสนอผลการศึกษาอิทธิพลของพลังงานการบดอัดต่อกำลังกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ เพื่อสร้างความเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุม ดินตะกอนประปาเถ้าถ่านหิน และสารกระตุ้น พลังงานความร้อน อุณหภูมิระยะเวลาในการบ่ม และพลังงานบดอัด (592.5, 1346.6, 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร)

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย

ดินตะกอนที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินตะกอนประปาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน ขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 64 และ 0 ตามลำดับ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ดินประเภทนี้จัดเป็นดินที่มีค่าพลาสติก เถ้าลอยได้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analysis ดังแสดงในรูป 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

Soil property	Silty clay
Specific gravity	2.61
Liquid limit,%	64
Plastic limit,%	0



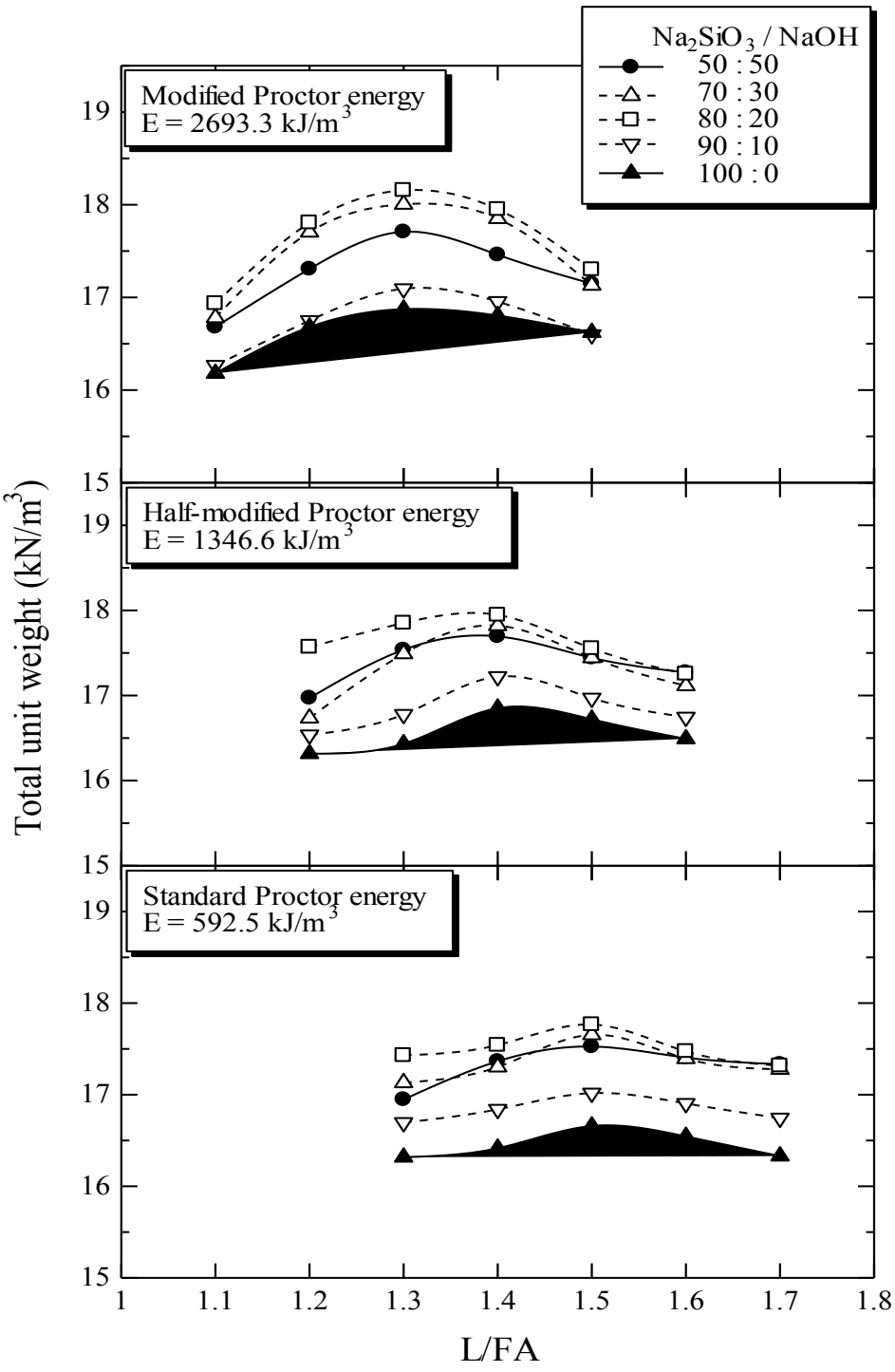
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการวิเคราะห์ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย

Chemical composition (%)	**Sludge**	**Fly ash**
SiO_2	41.03	49.32
Al_2O_3	14.57	12.96
Fe_2O_3	18.60	15.64
CaO	0.39	5.79
MgO	17.13	2.94
SO_3	0.59	7.29
Na_2O	N.D.	2.83
K_2O	6.85	2.83
LOI	0.84	7.29

4.3 ผลการทดสอบการบดอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลลิเมอร์

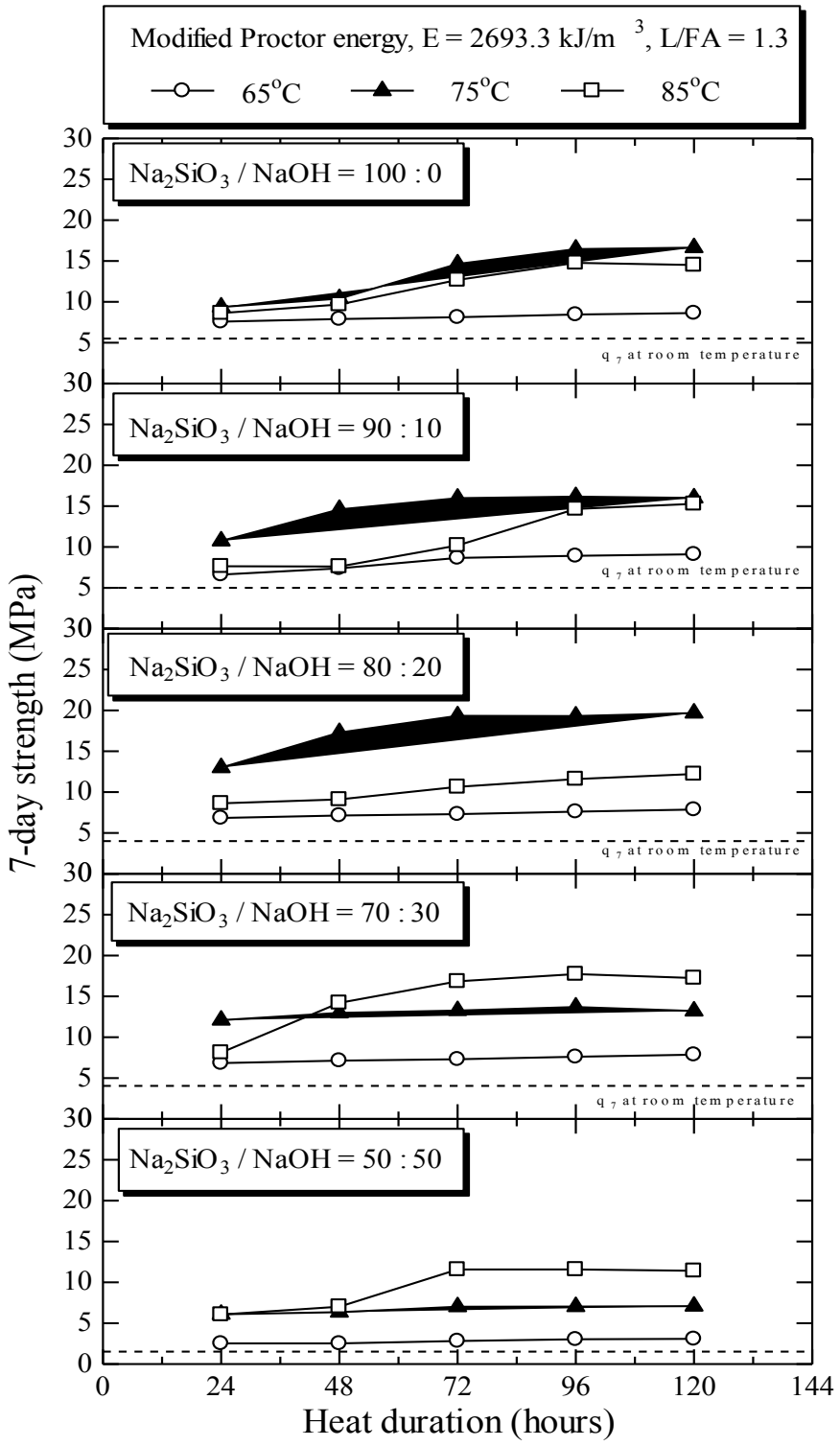
จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนผสมของ Na_2SiO_3 และ NaOH ต่อเถ้าลอย L/FA ของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่พลังงานการบดอัด 592.5, 1346.6, 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าทุกพลังงานการบดอัดและอัตราส่วน Na2SiO3 : NaOH ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อค่า L/FA เพิ่มขึ้น จนถึงค่า L/FA มีค่าความหนาแน่นสูงสุด หลังจากนั้นความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อค่า L/FA มีค่ามากกว่า ค่า L/FA ที่เหมาะสม นอกจากนี้ สำหรับ ทุกอัตราส่วน Na2SiO3 : NaOH ค่า L/FA ที่เหมาะสมแปรผันตามพลังงานการบดอัด อัตราส่วน L/FA ที่เหมาะสมมีค่าลดลงเมื่อพลังงานการบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า L/FA ที่เหมาะสมของพลังงานบดอัดที่ 592.5, 1346.6, 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ 1.5 1.4 และ1.3 ตามลำดับ จากผลทดสอบการบดอัดส่วนผสมระหว่างตะกอนดินประปา เถ้าลอย และสารกระตุ้นมีความสอดคล้องกับผลทดสอบดินบดอัด (Horpibulsuk et al., 2008 และ 2009) เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH ที่อัตราส่วน L/FA ที่เหมาะสม พบว่าให้อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80:20 ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดสำหรับทุกพลังงานการบดอัด



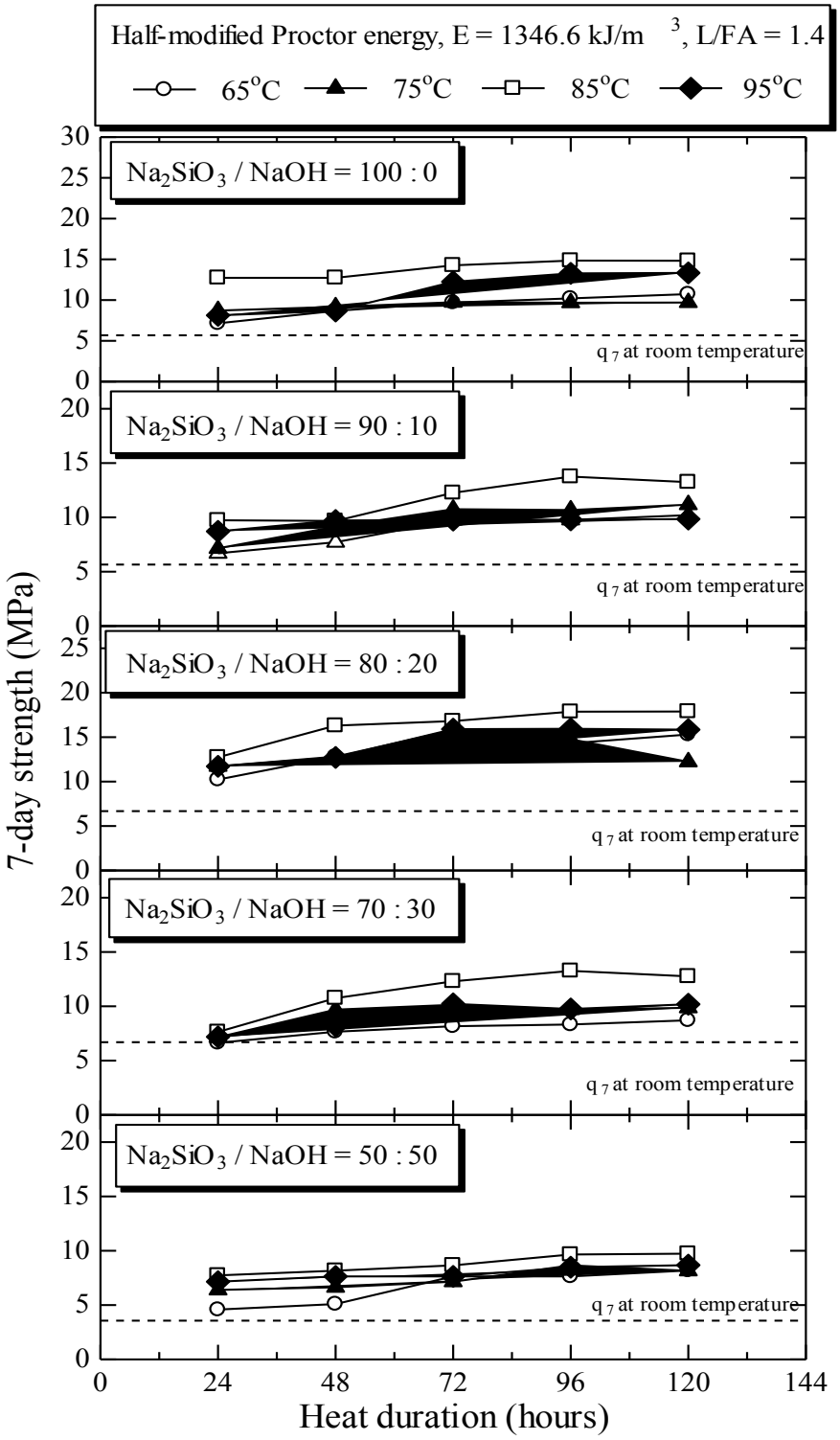
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนผสมของ Na_2SiO_3 และ NaOH ต่อส่วนผสมของดินตะกอนประปาและเถ้าลอยที่กำลังบดอัด 592.5, 1346.6, 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร

4.4 ผลกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.3 แสดงผลกระทบของอุณภูมิในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่แปรผันอัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH ต่างๆและที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3 สำหรับพลังงาน 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร โดยทุกอัตราส่วนผสมและพลังงานการบดอัดโดยเร่งปฏิกิริยาด้วยการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 65, 75, 85 และ95 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง หลังจากนั้นดินตัวอย่างถูกนำมาทดสอบกำลังอัดเมื่อมีอายุบ่ม 7 วัน จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของตะกอนดินประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3 บดอัดด้วยพลังงานการบดอัดเท่ากับ 2,993.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่บ่มในตู้อบที่เพิ่มขึ้นจนระยะเวลาที่บ่มในตู้อบเท่ากับ 72 ชั่วโมง เมื่อระยะเวลาที่บ่มในตู้อบนานกว่า 72 ชั่วโมง กำลังอัดมีค่าเกือบจะคงที่สำหรับทุกอัตราส่วน L/FA ผลการพัฒนากำลังอัดมีความแตกต่างจากงานวิจัยของ Sukmak et al. (2013a และ b) ซึ่งกำลังอัดจะมีค่าลดลง เมื่อบ่มตัวอย่างในตู้อบนานเกินไป ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าตะกอนดินประปาเถ้าลอยจีโอ โพลิเมอร์มีความคงทนต่อความร้อนมากกว่าดินเหนียวปนดินตะกอนเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ศึกษาโดย Sukmak et al. (2013a และ b) อัตราส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดมากที่สุดได้แก่ อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80 : 20 ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่ 75 องศาเซลเซียส ค่ากำลังที่ได้เท่า 20 MPa พิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิการกระตุ้นปฏิกิริยาพบว่าค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยอุณภูมิที่เหมาะสมของอัตราส่วนที่ให้กำลังสูงเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์พลังงาน 2,693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตรของจีโอพอลิเมอร์อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3

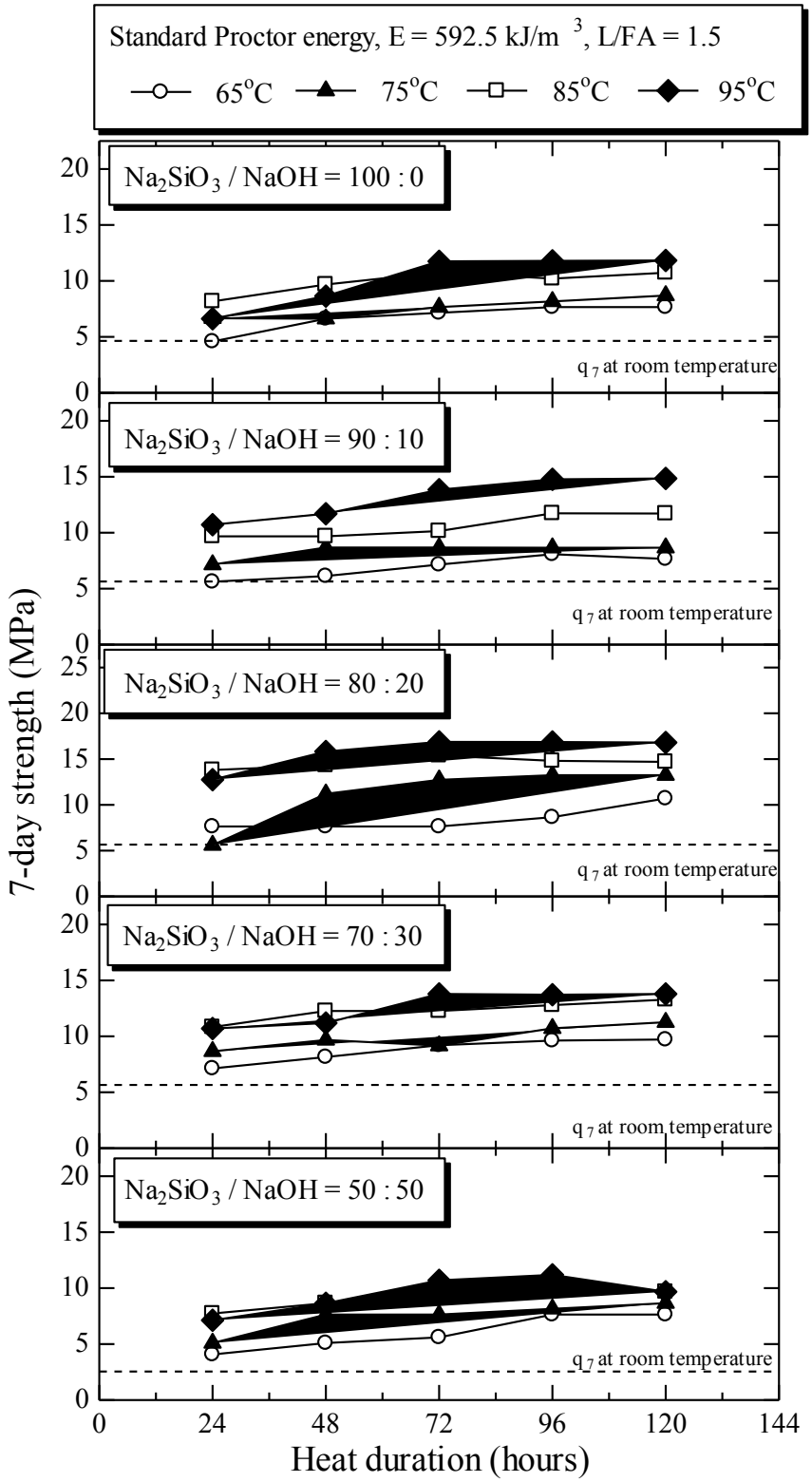


รูปที่ 4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่พลังงานการบดอัด 1,346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.4

รูปที่ 4.4 แสดงผลกระทบของอุณภูมิในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50, 70:30, 80:20, 90:10, และ 100:0 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.4 สำหรับพลังงาน 1,346.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตรที่อุณหภูมิในการเตรียมตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 65, 75, 85 และ 95 ในระยะเวลา 24, 48, 72, 96 และ120 ชั่วโมง ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง (ก่อนทดสอบกำลังอัด) ที่ 7 วัน จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่บ่มในตู้อบที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งระยะเวลาที่บ่มอยู่ในตู้อบเท่ากับ 72 ชั่วโมง เมื่ออยู่ในตู้อบนานเกิน 72 ชั่วโมง กำลังอัดมีค่าเกือบจะคงที่สำหรับทุกอัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80 : 20 ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 18 MPa

รูปที่ 4.5 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50, 70:30, 80:20, 90:10, และ 100:0 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.5 สำหรับพลังงาน 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตรที่อุณหภูมิในการเตรียมตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 65, 75, 85 และ 95 ในระยะเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง (ก่อนทดสอบกำลังอัด) ที่ 7 วัน อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80:20 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 16 MPa

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.3 4.4 และ 4.5 พบว่าค่ากำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของพลังงานบดอัด ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดที่ได้จากการบดอัดดินปกติ (Horpibulsuk et al 2006) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอิทธิพลที่ควบคุมกำลังอัดจะมีอยู่ 2 ส่วนได้แก่ ความหนาแน่นสูงสุดจากการบดอัด และปฏิกิริยาเคมี จากการศึกษาครั้งนี้จะเห็นว่าอิทธิพลของการบดอัดส่งผลต่อกำลังอัดดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์มากกว่าอิทธิพลของปฏิกิริยาเคมี ปริมาณของสารละลายที่เหมาะสมในการบดอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลังงานการบดอัดที่ลดลง ปริมาณสารละลายที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ต้องการอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่ม และปริมาณสารละลายที่เหมาะสม ในการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสารละลายที่มากเกินไปก่อให้เกิดการหดตัวของตัวอย่าง ซึ่งส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวระดับไมโครเมตร



รูปที่ 4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่พลังงานการบดอัด 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.5

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 การสรุปงานวิจัย

การศึกษาการหาอัตราส่วนผสม (ดินตะกอนประปา เถ้าถ่านหิน และสารกระตุ้นพลังงานความร้อนอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่ม) และพลังงานบดอัด (592.5, 1346.6, 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) ที่เหมาะสม เพื่อผลิตบล็อกจีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 อัตราส่วน L/FA ที่เหมาะสมมีค่าลดลงเมื่อพลังงานการบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า L/FA ที่เหมาะสมของพลังงานบดอัดที่ 592.5, 1346.6, 2693.3 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ 1.5 1.4 และ1.3 ตามลำดับ อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 80:20 ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดสำหรับทุกพลังงานการบดอัด

5.1.2 กำลังอัดสูงสุดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 20, 18 และ16 MPa ที่ระยะเวลาบ่มในตู้อบ 72 ชั่วโมง และอุณหภูมิเท่ากับ 75 85 และ 95 องศาเซลเซียส สำหรับพลังงานบดอัด 2693.3, 1346.6 และ 592.5 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการบดอัดต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน ดังนั้นควรมีการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่ 14, 28, 60 และ 90 วัน ต่อกำลังอัดดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

5.2.2 งานวิจัยนี้ศึกษาการทดสอบทางกายภาพ (กำลังอัด) ของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้น ควรมีการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคเพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพ (กำลังอัด) กับโครงสร้างระดับจุลภาคของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

เอกสารอ้างอิง

Alonso S, Palomo A. **Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature activator concentration and solids ratio**. Cement and Concrete Research. 2001;29(1-2):55-62.

Bakharev T. **Durability of geopolymer material in sodium and magnesium sulfate solution**. Cement and Concrete Research 2004;35(6):1233-1246.

Buchwald A, Kaps Ch. **Property controlling influences on the generation of geopolymeric binders based on clay**. Geopolymer. 2002. Melbournd, Australia.

Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C, Chalee W, Rattanasak U. **Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers**. Waste Management 2009;29(2):539-43.

Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. **Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer**. Cement and Concrete Composites 2006;29(3):224-229.

Davidovits J. Geopolymers. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. 1991;37(8):1633-56.

Davidovits J, Buzzi L, Rocher R, Gimeno D, Marini C, Tocco S. **Geopolymeric cement based on low cost geologic material**, Results from the European Research project GEOCIS-TEM. In: Davidovits etal. (ed.). Proceedings of the second international conference geopolymere 99. 1999:83-96.

Guo X, Shi H, Dick WA. **Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer**. Cement and Concrete Composites 2010;32(2):142-7.

Gurtug Y, Sridharan A. Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils. Geotechnique 2002;52(10):761-3.

Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan, BV. **The effect of mixture composition and curing temperature on the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete**. The Ninth East Asia-Pasific Conference on Structural Engineering and Construction, Bali, Indonesia, 2003; CMT 14-CMT 18.

Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV. **Brief Review of Development of Geopolymer Concrete. American Concrete Institute**, USA : Los Vegas, 25 May 2004, pp. 1-10.

Horpibulsuk S, Rachan R, Raksachon Y. **Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay**. Soils and Found 2009;49(1):85-98.

Horpibulsuk S, Rachan R, Chinkulkijniwat A, Raksachon Y, Suddeepong A. **Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations**. Constr and Build Mater 2010;24(10):2011-21.

Horpibulsuk S, Katkan W, A. Apichatvullop. **An approach for assessment of compaction curves of fine-grained soils at various energies using a one point test**. Soils and Found 2008;48(1):115-25.

Horpibulsuk S, Katkan W, Naramitkornburee A. **Modified Ohio's curves: A rapid estimation of compaction curves for coarse- and fine-grained soils**. Geotechnical Testing Journal, ASTM 2009;32(1):64-75.

Jiminez AMF, Lachowski EE, Palomo A, Macphee DE. **Microstructural characterisation of alkali-activated PFA matrices for waste immobilisation**. Cem Concr Compos 2004;26(8):1001-6.

Miura N, Yamadera A, Hino T. **Consideration on compression properties of marine clay based on the pore size distribution measurement**. Journal of Geotechnical Engineering, JSCE 1999;26(6):624III-47.

Mohapatra R, Rao JR. **Some aspects of characterisation, utilisation and environmental effects of fly ash**. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 2001;76(1):9-26.

Nagaraj TS, A.J. Lutenegger, Pandian NS, M. Manoj. **Rapid estimation of compaction parameters for field control**. Geotechnical Testing Journal, ASTM. 2006;29(6):1-10.

Ohsawa S, Asaga K, Goto S, Daimon M. **Quantitative determination of fly Ash in the hydrated fly ash – $CaSO_4$. $2H_2O$ – Ca $(OH)_2$ system**. Cement and Concrete Research 1985;15(2): 357-366.

Prakash K, Sridharan A. **Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soils**. Geotech Test 2004;27(2):220-5.

Rattanasak U, Chindaprasirt P. **Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer**. Miner Eng 2009;22(12):1073-8.

Somna K, Jaturapitakkul C, Kajitvichyanukul P, and Chindaprasirt P. **NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature**. Fuel 2011;90(6):2118-24.

Sukmak P, and Horpibulsuk S. **Strength development in geopolymer brick**. Construction and Building Materials 2012 (Under review).

Van Jaarsveld J, Van Deventer J, Lorenzen L. **Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized fly ash**. Metall Mater Trans B 1998;29(1):283-91.

คมกริช เวชสัสถ์, สุทธิรักษ์ บูชากุล, ปาริฉัตร ปั้นทอง และสุรเดช เหรัมพกุล. **การออกแบบและก่อสร้างระบบกำจัดตะกอนโดยใช้วิธีรีดกรอง โรงงานผลิตน้ำบางเขน**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, อุบลราชธานี, ประเทศไทย.

สมิตร ส่งพิริยะกิจ. **อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของมอร์ต้าจีโอโพลิเมอร์**. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจาปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยอง, หน้า CON30-CON34

ประวัติผู้เขียน

นายทิวากร ศรีจำปา เกิดวันที่ 27 เมษายน 2531 ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลลพบุรี อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ในปีการศึกษา 2542 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงวินิตศึกษา จังหวัดลพบุรี ในปีการศึกษา 2545 สำเร็จการศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพิบูลวิทยาลัยในปีการศึกษา 2548 หลังจากสำเร็จการศึกษามีความตั้งใจอยากเป็นวิศวกรโยธา จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2553 จากนั้นเข้าทำงานที่บริษัท ฤทธา จำกัด ตำแหน่งวิศวกรสนาม และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปี พุทธศักราช 2555