

ผลของอัตราส่วน Ca:Si และ Na:Al ต่อกำลังอัดและลักษณะโครงสร้างผลึก
ของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูง

Effect of Ca:Si and Na:Al Ratio on Compressive Strength and
Microstructure of High Calcium Fly Ash Geopolymer

เกียรติสุดา สมนา¹ และปริญญา จินดาประเสริฐ²

Received: June, 2014; Accepted: April, 2015

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของอัตราส่วน Ca:Si และ Na:Al ของส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ต่อกำลังอัดและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูง มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่เหมาะสมและมีคุณสมบัติทางกลที่ดี วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ เถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมออกไซด์สูงและไม่โครซิลิกา ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 15 และ 18 โมลาร์ แทนที่เถ้าถ่านหินด้วยไม่โครซิลิการ้อยละ 0 5 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เพื่อให้มีการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วน Ca:Si และ Na:Al ศึกษากำลังอัดที่อายุ 28 วัน และลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค XRD พบว่าอัตราส่วน Na:Al ควรควบคุมให้มีค่าอยู่ในช่วง 1.41 ถึง 1.78 เพื่อให้สามารถรับค่ากำลังอัดได้ดี การใช้อัตราส่วน Ca:Si ที่ให้ค่ากำลังอัดที่ดีขึ้นอยู่กับร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยไม่โครซิลิกาและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ ดังนั้น ปัจจัยร่วมที่ทำให้จีโอโพลิเมอร์รับกำลังได้ดี ได้แก่ ชนิดของวัสดุตั้งต้น ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละการแทนที่ของไม่โครซิลิกาและอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสาน (W/B ratio)

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์; ไม่โครซิลิกา; แคลเซียมต่อซิลิกอน; โซเดียมต่อลูมิเนียม

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น

E-mail: kiatsuda.so@rmu.ac.th

Abstract

This research studied effects of Ca:Si and Na:Al ratio on compressive strength and microstructure of high calcium geopolymer. The objective is to guide the mix proportion of geopolymer to provide good mechanical properties. Fly ash with high calcium content and microsilica were selected to be starting materials. Concentration of sodium hydroxide solutions at 10, 15 and 18 molar were used. Microsilica was partially replaced fly ash at 0, 5, 10, 20 and 30% by weight of binder. The compressive strength of geopolymer pastes were investigated at the age of 28 days while microstructure of pastes was characterized by XRD technique. It was found that the ratio of Na:Al between 1.41 and 1.78 gave a good compressive strength results. Using Ca:Si ratio in geopolymer which provided high compressive strength was depended on percent replacement of silica and NaOH concentration. Thus, the factors effect of geopolymer to obtain high compressive strength were starting material, NaOH concentration, percent replacement of silica source and water to binder ratio.

Keywords: Geopolymer; Microsilica; Ca:Si; Na:Al

บทนำ

ในปัจจุบันแนวคิดของการจัดการสิ่งแวดล้อมโดยการนำเอาผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมหรือของเสียที่เกิดขึ้นมาใช้ประโยชน์เริ่มมีเพิ่มมากขึ้น ผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมและของเหลือทิ้ง เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าขานอ้อย เป็นของเสียที่เหลือทิ้งในประเทศไทยเป็นจำนวนมากและจำเป็นต้องนำไปกำจัด ดังนั้น การนำเอาวัสดุผลพลอยได้หรือวัสดุเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์ จึงนับได้ว่าเป็นแนวทางที่ดีในการจัดการสิ่งแวดล้อม สำหรับในงานด้านการก่อสร้าง มีการนำเอาวัสดุที่เป็นผลพลอยได้หรือวัสดุเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์เนื่องจากในการผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ ทำให้เกิดปัญหาสภาวะโลกร้อนและมีหลายงานวิจัยเริ่มมีการนำเอาของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์และยังคงคุณสมบัติทางกลที่ดี เช่น กำลังรับแรงอัด รวมถึงคุณสมบัติด้านความทนทาน เช่น ทนทานต่อการกร่อน ทนทานต่อการเกิดคาร์บอนขึ้น ได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ วัสดุชนิดนี้เรียกว่า “จีโอโพลิเมอร์”

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่ได้จากการนำเอาผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ผสมกับสารละลายด่างเข้มข้น ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเร่งปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เกิดการเรียงตัวเป็นโมเลกุลลูกโซ่ของซิลิกาและอลูมินาที่มีคุณสมบัติแข็งตัวและสามารถรับกำลังได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ (Davidovits, J., 1999; Lee, W. K. W. and Van Deventer, J. S. J.,

2002) โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ โดยทั่วไปของจีโอโพลิเมอร์ มี 3 โครงสร้าง ได้แก่ โพลีไฮดรอกซีเลต (Polysialate, PS) โพลีไฮดรอกซีเลตซิลอกโซ (Polysialate Siloxo, PSS) และโพลีไฮดรอกซีเลตไดซิลอกโซ (Polysialate Disiloxo, PSDS) ที่มีอัตราส่วนของค่า Si:Al เท่ากับ 1:1 2:1 และ 3:1 ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มขึ้นของซิลิกอน ทำให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์แข็งแรงขึ้น (Phair, J. W. and Van Deventer, J. S. J., 2002; Davidovits, J., 2008)

วัสดุตั้งต้นของจีโอโพลิเมอร์ที่ควรมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) แต่ในบางครั้งวัสดุตั้งต้นอาจมีองค์ประกอบอื่น ๆ ปะปนมาด้วย เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เช่น ในเถ้าถ่านหิน Class F หรือตะกรันเตาถลุงเหล็ก จากโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่าแคลเซียมไม่ใช่สารประกอบหลักสำหรับจีโอโพลิเมอร์ หากวัสดุตั้งต้นมีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบแล้วแคลเซียมอาจส่งผลต่อปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันหรืออาจเกิดผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ (Yip, C. K. et al., 2005)

นอกจากนี้ การเติมซิลิกาเพื่อเพิ่มอัตราส่วน Si:Al ยังสามารถช่วยปรับปรุงให้จีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้นอีกด้วย โดยสารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่าวิธีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นที่นิยมเป็นอย่างมากและพบเห็นได้จากงานวิจัยทั่วไป เพราะโซเดียมซิลิเกตอยู่ในรูปสารละลายที่พร้อมจะทำปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ซิลิกาเพิ่มและยังได้ความเป็นด่างจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย (Chindaprasirt. P. et al., 2007; Sata. V. et al., 2013) นอกจากการเพิ่มซิลิกาจากการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตแล้ว จีโอโพลิเมอร์ยังสามารถเพิ่มอัตราส่วน Si:Al ได้ด้วยการใช้ไมโครซิลิกาและเถ้าชีวมวลต่าง ๆ ที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักได้อีกด้วย

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการศึกษาผลของอัตราส่วน Ca:Si จากการใช้เถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูง เนื่องจากเถ้าถ่านหินในประเทศไทยส่วนใหญ่มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง พบว่าองค์ประกอบทางเคมีจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F และมีแคลเซียมออกไซด์ปริมาณสูง (Chindaprasirt. P. et al., 2007) และศึกษาผลของอัตราส่วน Na:Al จากการใช้เถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้น เนื่องจากโครงสร้างของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันที่แนะนำโดย Davidovits (Davidovits, J., 2008) ควรมีค่า Na:Al ใกล้เคียง 1 และการเพิ่มอัตราส่วน Si:Al โดยการใช้ไมโครซิลิกา โดยศึกษาที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 ค่า ได้แก่ 10 15 และ 18 โมลาร์ ศึกษาถึงค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ที่อัตราส่วนของ Ca:Si และ Na:Al ที่แตกต่างกันและศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่เหมาะสมและมีคุณสมบัติทางกลที่ดี ตลอดจนเป็นการนำเอาวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ในการก่อสร้างให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกด้วย

วิธีการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า จากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ไมโครซิลิกาเพื่อใช้ในการเพิ่มอัตราส่วนของซิลิกาในส่วนผสมได้จากบริษัท Elkem Company จังหวัดชลบุรี

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุด้วยเทคนิค XRF ศึกษาขนาดการกระจายตัวของอนุภาค และศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุด้วยเทคนิค XRD

การผสมจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ได้จากการใช้เถ้าถ่านหินผสมกับไมโครซิลิกา ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่แปรเปลี่ยนความเข้มข้น 3 ค่า ได้แก่ 10 15 และ 18 โมลาร์ เพื่อให้เกิดการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วน Na:Al และแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยไมโครซิลิกา เพื่อให้เกิดการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วน Ca:Si ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 ในกรณีที่ใช้ความเข้มข้น 10 โมลาร์ จะแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยไมโครซิลิการ้อยละ 0 5 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และกรณีใช้ความเข้มข้น 15 และ 18 โมลาร์ จะแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยไมโครซิลิการ้อยละ 0 5 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ในการศึกษาครั้งนี้ใช้อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเท่ากับ 0.55 ทุกสัดส่วนผสม และทำการกวนผสมจีโอโพลิเมอร์เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเทสารละลายผสมลงในแบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร เมื่อครบหนึ่งวันทำการถอดแบบ และหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกเก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งอายุตัวอย่างครบกำหนดเวลา

การทดสอบจีโอโพลิเมอร์และการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค

1. การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบกำลังอัดในแต่ละอายุมีจำนวน 5 ก้อน ศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 28 วัน และศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน

2. การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างผลึกของวัสดุตั้งต้น และจีโอโพลิเมอร์ด้วยเทคนิค XRD มีการเปรียบเทียบผลของการเพิ่มไมโครซิลิกาในจีโอโพลิเมอร์ โดยทำการศึกษาที่มุม 2θ ในช่วง 10 - 80 องศา ด้วยเครื่องมือยี่ห้อ D8000 with CuK α ($k = 1.54056 \text{ \AA}$)

ผลการทดลอง

คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุตั้งต้น

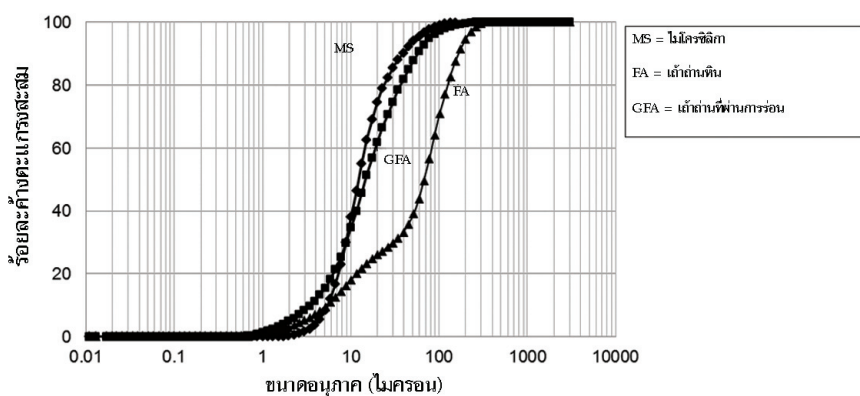
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินและไมโครซิลิกาแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าเถ้าถ่านหินมีผลรวมของ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 78.78 จัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 (American Society for Testing and Materials, 2008) และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเท่ากับร้อยละ 1.8 นอกจากนี้เถ้าถ่านหินยังมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 13.82 ในส่วนของไมโครซิลิกามีองค์ประกอบทางเคมีหลัก ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ ร้อยละ 98.51

เมื่อศึกษาถึงขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินและไมโครซิลิกา ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 พบว่าเถ้าถ่านหิน (FA) มีค่ากลางของขนาดอนุภาคเท่ากับ 75 ไมครอน ซึ่งมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับไมโครซิลิกาที่มีค่ากลางของขนาดอนุภาคเท่ากับ 10 ไมครอน จึงทำการลดขนาดของเถ้าถ่านหินด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (75 ไมครอน) ให้เถ้าถ่านหินมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับไมโครซิลิกา เมื่อปรับปรุงคุณภาพสมบัติแล้ว

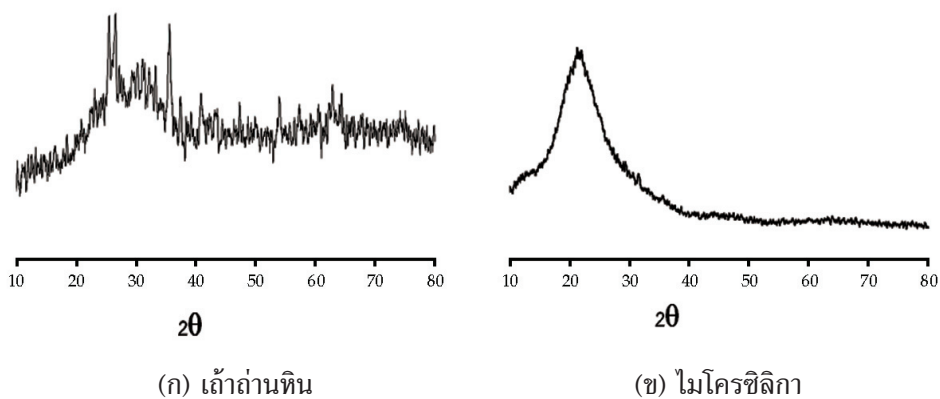
พบว่าเถ้าถ่านหินมีค่ากลางของขนาดอนุภาคเท่ากับ 14 ไมครอน พบว่าการลดขนาดช่วยให้เถ้าถ่านหินมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารละลายต่างเข้มข้นมากขึ้น ทำให้มีการเกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นส่งผลถึงคุณสมบัติทางกลที่ดีของวัสดุ (Chindaprasirt, P., 2011) นอกจากนี้การศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค XRD ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2 พบว่าเถ้าถ่านหินมีองค์ประกอบของส่วนที่เป็นผลึก ได้แก่ Quartz (SiO_2), Mullite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) และ Hematite (Fe_2O_3) (Somna. K., 2011) และส่วนที่เป็นอสัณฐานในขณะที่ไมโครซิลิกามีความเป็นอสัณฐานที่สูงมาก

ตารางที่ 1 อัตราส่วน Ca:Si และ Na:Al ของส่วนผสมซีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)	เถ้าถ่านหิน (ร้อยละ)	ไมโครซิลิกา (ร้อยละ)	Si:Al	Ca:Si	Na:Al
10	100	0	1.54	0.53	0.99
	95	5	1.76	0.46	1.04
	90	10	2.00	0.41	1.10
	80	20	2.56	0.32	1.23
	70	30	3.29	0.25	1.41
15	100	0	1.54	0.53	1.48
	95	5	1.76	0.46	1.56
	90	10	2.00	0.41	1.65
	80	20	2.56	0.32	1.85
	70	30	3.29	0.25	2.12
18	100	0	1.54	0.53	1.78
	95	5	1.76	0.46	1.87
	90	10	2.00	0.41	1.97
	80	20	2.56	0.32	2.22
	70	30	3.29	0.25	2.54



รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาพของวัสดุตั้งต้น ได้แก่ เถ้าถ่านหินและไมโครซิลิกา



รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างผลึกของวัสดุตั้งต้นเมื่อศึกษาด้วยเทคนิค XRD (ก) เถ้าถ่านหิน (ข) ไมโครซิลิกา

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินและไมโครซิลิกา

% by wt.	GFA	microsilica
SiO ₂	39.47	98.51
Al ₂ O ₃	29.46	-
CaO	13.82	0.54
Fe ₂ O ₃	9.85	0.06
SO ₃	3.66	-
K ₂ O	1.95	0.79
Na ₂ O	-	-
LOI	1.8	-

ผลของอัตราส่วน Ca:Si และ Na:Al ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

การศึกษาผลของอัตราส่วน Ca:Si ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังอัดเมื่อมีแคลเซียมในส่วนผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ในขณะที่อัตราส่วนของ Na:Al เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการเกิดโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์สำหรับวัสดุที่มีแคลเซียมในปริมาณสูง โดยตามคำแนะนำของโครงสร้างการเกิดจีโอโพลิเมอร์แล้ว พบว่าโครงสร้างที่เหมาะสมกับการเกิดเป็นจีโอโพลิเมอร์ควรมีค่า Na:Al เท่ากับ 1 หรือใกล้เคียง เนื่องจากโซเดียม (Na) จะถูกใช้เป็นตัวสมดุลประจุ (Balance Charge) ของอลูมินาเพื่อให้เกิดเป็นทรงสี่หน้า (Tetrahedral) และเกิดเป็นโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถรับกำลังอัดได้สูง (Phair, J. W. and Van Deventer, J. S. J., 2002; Van Jaarsveld, J. G. S. and Van Deventer, J. S. J., 1999b)

1. ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์

รูปที่ 3(ก) และรูปที่ 3(ข) แสดงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ ที่อายุ 28 วัน ที่มีอัตราส่วนความสัมพันธ์ของ Si:Al Ca:Si และ Na:Al ต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 3

จากรูปสังเกตเห็นว่าการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ ให้ค่าอัตราส่วน Na:Al ใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นค่าที่แนะนำสำหรับการเกิดโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ พบว่าเมื่ออัตราส่วน Si:Al เพิ่มขึ้น กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและผกผันกับค่าอัตราส่วน Ca:Si ที่ลดลง แต่แปรผกผันตรงกับค่า Na:Al ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ สามารถเพิ่มอัตราส่วนของซิลิกาในระบบได้จนถึงที่อัตราส่วน Si:Al เท่ากับ 3.29 (การแทนที่ไม่โครซิลิกาในส่วนผสมร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก) โดยให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 10 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน และสอดคล้องกับงานวิจัยของ De Silva et al. (De Silva P. et al., 2007) ที่แนะนำว่าช่วงของอัตราส่วน Si:Al ระหว่าง 2.80 ถึง 3.54 ให้ค่ากำลังอัดที่สูง เมื่อกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน Ca:Si ที่ลดลง และ Na:Al ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน โดยตัวอย่างที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด มีค่า 10 เมกะปาสคาล ที่อัตราส่วน Si:Al เท่ากับ 3.29 และอัตราส่วน Na:Al เท่ากับ 1.41

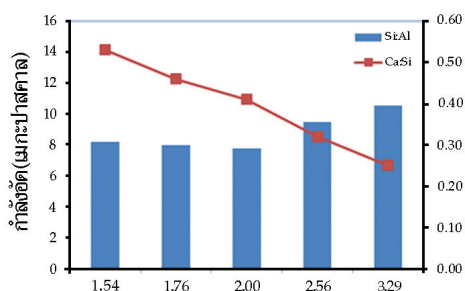
2. ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์

รูปที่ 4(ก) และรูปที่ 4(ข) แสดงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ ที่อายุ 28 วัน ที่มีอัตราส่วนความสัมพันธ์ของ Si:Al Ca:Si และ Na:Al ต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 4

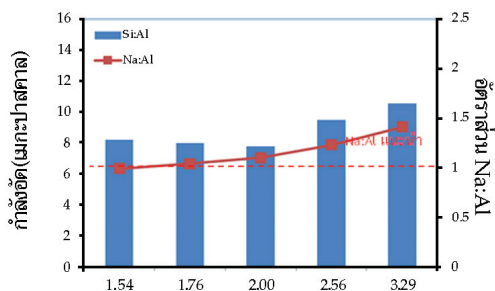
พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ Si:Al เพิ่มขึ้น การรับกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน และแปรผกผันตรงกับอัตราส่วน Ca:Si ที่ลดลง นอกจากนี้ยังมีค่าอัตราส่วน Na:Al ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงถึง 15 โมลาร์ และมีค่าอัตราส่วน Na:Al ที่สูงกว่า 1.54 รวมถึงเพิ่มไม่โครซิลิกาในระบบไม่ช่วยพัฒนาค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ ความเป็นไปได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายต่างเพิ่มขึ้น สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น การเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ เป็นไปได้ยาก มีแนวโน้มของการเกิดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันลดลง ส่งผลให้กำลังอัดของเพสต์ต่ำลงด้วย

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วน Si:Al Ca:Si และ Na:Al ต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

Si:Al	1.54	1.76	2.00	2.56	3.29
Ca:Si	0.53	0.46	0.41	0.32	0.25
Na:Al	0.99	1.04	1.10	1.23	1.41
Compressive strength at 28 days (MPa)	8	8	8	9	10



(ก) อัตราส่วน Si:Al



(ข) อัตราส่วน Si:Al

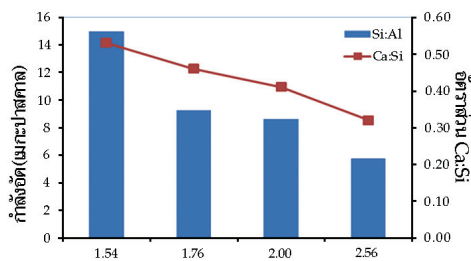
รูปที่ 3 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ ที่อายุ 28 วัน

(ก) ที่อัตราส่วน Si:Al ที่แตกต่างกันและสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วน Ca:Si

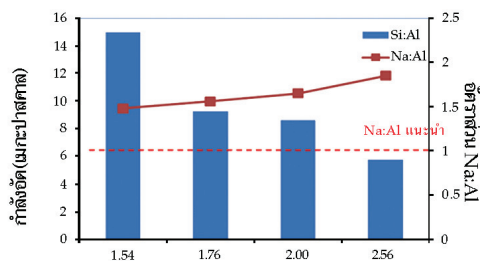
(ข) ที่อัตราส่วน Si:Al ที่แตกต่างกันและสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วน Na:Al

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วน Si:Al Ca:Si และ Na:Al ต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

Si:Al	1.54	1.76	2.00	2.56
Ca:Si	0.53	0.46	0.41	0.32
Na:Al	1.48	1.56	1.65	1.85
Compressive strength at 28 days (MPa)	15	9	8	6



(ก) อัตราส่วน Si:Al



(ข) อัตราส่วน Si:Al

รูปที่ 4 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ ที่อายุ 28 วัน

(ก) ที่อัตราส่วน Si:Al ที่แตกต่างกันและสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วน Ca:Si

(ข) ที่อัตราส่วน Si:Al ที่แตกต่างกันและสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วน Na:Al

3. ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 โมลาร์

รูปที่ 5(ก) และรูปที่ 5(ข) แสดงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 โมลาร์ ที่อายุ 28 วัน ที่มีอัตราส่วนความสัมพันธ์ของ Si:Al Ca:Si และ Na:Al ต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 5

เมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงมากขึ้นถึง 18 โมลาร์ ทำให้อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$ สูงขึ้น ซึ่งอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$ ที่สูงจะทำให้มีน้ำในส่วนผสมลดลง ความสามารถในการทำงานของจีโอโพลิเมอร์จะลดลงด้วย ดังนั้นปริมาณน้ำที่น้อยและความหนืดของสารละลายทำให้ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ลดลง พบว่าความเข้มข้นที่สูงขึ้นอาจส่งผลต่อการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาหรือต้องใช้เวลาในการให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดสมบูรณ์ จะทำให้ความสามารถในการทำงานของเพสต์ลดลงได้ (Somma, K., 2011; Zuhua, Z., 2009) ส่งผลถึงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าต่ำที่อายุ 28 วัน พบว่าเมื่อเพิ่มโมโครซิลิกาที่ทำให้อัตราส่วน Ca:Si ในระบบลดลง ไม่ส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น ผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suresh Thokchom et al. (Suresh et al., 2011) กล่าวว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีการเติมซิลิกาในระบบจะทำให้มีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นทำให้ส่งผลต่อกำลังอัด แต่จะให้ผลดีในกรณีที่เป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้า

ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ ด้วยเทคนิค XRD

รูปที่ 6(ก) 6(ข) และ 6(ค) แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 15 และ 18 ตามลำดับ โดยการเลือกศึกษาตัวอย่างที่ค่ากำลังอัดต่ำที่สุดและกำลังอัดสูงที่สุดของแต่ละชุดตัวอย่าง

พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าถ่านหินและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 15 และ 18 โมลาร์ มีส่วนประกอบทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่ไม่เป็นผลึก ซึ่งเกิดขึ้นในช่วง 20 - 40 องศา ที่มุม 2θ อย่างชัดเจน ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์ที่มีการแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยไมโครซิลิกา

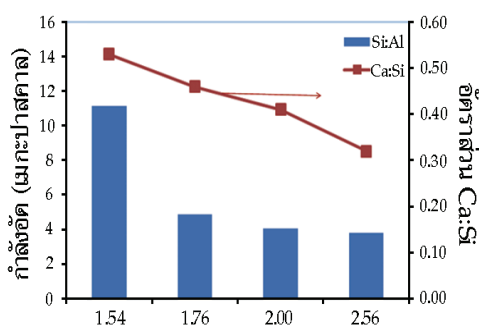
(30Si10, 20Si15 และ 20Si18) พบความไม่เป็นผลึกที่เกิดจากไมโครซิลิกาเด่นชัด ซึ่งแสดงด้วยการเกิดการยกตัวของพีก (Hump) ในช่วง 20 - 40 องศา ที่มุม 2θ และพบความเป็นผลึกน้อยกว่า

เมื่อศึกษาตัวอย่างที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด (0Si15: Ca:Si = 0.53: Na:Al = 1.48) เป็นเฟสที่ไม่มี การแทนที่ด้วยไมโครซิลิกาและใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ พบว่าความเป็นผลึกที่เกิดจากสารประกอบอย่างชัดเจนและมีส่วนของพีกที่มีความไม่เป็นผลึก (Hump Peak) อยู่ในช่วงระหว่าง 20 ถึง 40 องศา ที่มุม 2θ เมื่อนำพิก XRD ที่ได้มาเปรียบเทียบกับพิก XRD ของเถ้าถ่านหินด่าง เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพิก XRD เป็นไปได้ว่ามีการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งส่งผลต่อกำลังอัดของวัสดุ

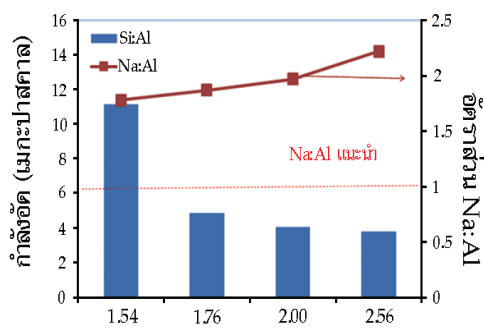
เมื่อศึกษาตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ให้ค่ากำลังต่ำที่สุด (20Si18: Ca:Si = 0.32: Na:Al = 2.22) ซึ่งมีการแทนที่ด้วยไมโครซิลิการ้อยละ 20 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 โมลาร์ พบลักษณะของความไม่เป็นผลึกเกิดขึ้นในช่วงระหว่าง 20 ถึง 40 องศา ที่มุม 2θ นอกจากนี้พิกของตัวอย่าง 20Si18 ที่พบในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบพิกของความไม่เป็นผลึก ซึ่งมีแนวโน้มที่มีลักษณะใกล้เคียงกับ XRD ของไมโครซิลิกา มีความเป็นไปได้ว่าการแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยไมโครซิลิกาที่ความเข้มข้นสูง ไมโครซิลิกาจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นคือเถ้าถ่านหิน เพื่อเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด ส่งผลให้มีไมโครซิลิกาเหลืออยู่ในระบบซึ่งแสดงด้วยผลของ XRD และทำให้มีค่ากำลังอัดต่ำที่สุด

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วน Si:Al Ca:Si และ Na:Al ต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

Si:Al	1.54	1.76	2.00	2.56
Ca:Si	0.53	0.46	0.41	0.32
Na:Al	1.78	1.87	1.97	2.22
Compressive strength at 28 days (MPa)	11	5	4	4



(ก)

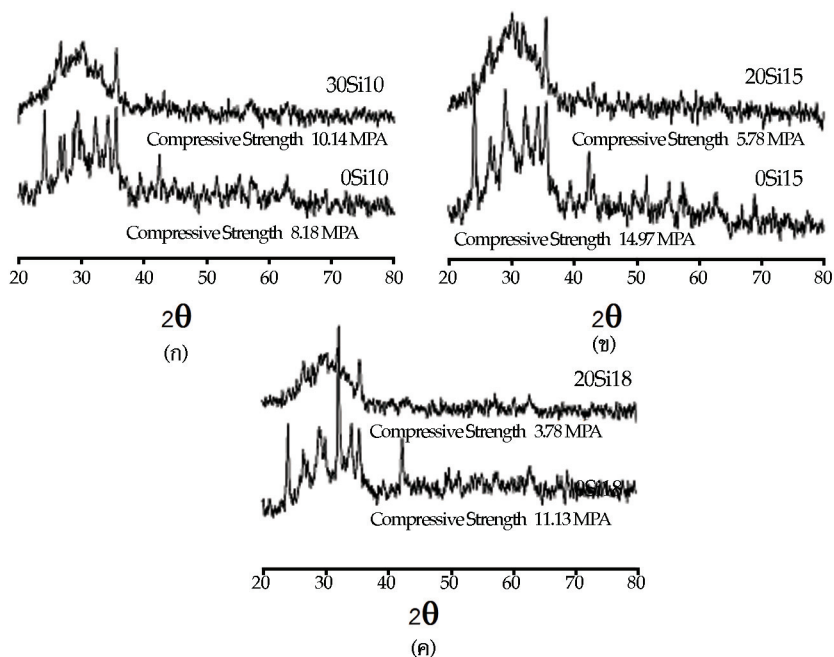


(ข)

รูปที่ 5 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 โมลาร์ ที่อายุ 28 วัน

(ก) ที่อัตราส่วน Si:Al ที่แตกต่างกันและสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วน Ca:Si

(ข) ที่อัตราส่วน Si:Al ที่แตกต่างกันและสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วน Na:Al



รูปที่ 6 โครงสร้างผลึกของจีโอโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ก) 10 โมลาร์ (ข) 15 โมลาร์ (ค) 18 โมลาร์

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของอัตราส่วน Ca:Si และ Na:Al ต่อกำลังอัดและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์แล้วพบว่ามีแคลเซียมสูง สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า

1. ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ การแทนที่เถ้านหินด้วยไมโครซิลิกาช่วยให้จีโอโพลิเมอร์สามารถรับกำลังอัดได้สูงขึ้น พบว่าที่ค่า Si:Al = 3.29 ให้ค่ากำลังอัด 10 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน
2. ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ และสูงกว่าการแทนที่เถ้านหินด้วยไมโครซิลิกาทำให้จีโอโพลิเมอร์รับกำลังอัดลดลงอย่างมาก ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดเกิดโดยส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ด้วยไมโครซิลิกา ได้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15 และ 18 โมลาร์ เท่ากับ 15 และ 11 เมกะปาสคาล
3. อัตราส่วน Na:Al ของทุกความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าควรควบคุมให้มีค่าอยู่ในช่วง 1.41 ถึง 1.78 เพื่อให้สามารถรับกำลังอัดได้ดี
4. ค่าอัตราส่วน Ca:Si ที่ส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับร้อยละการแทนที่เถ้านหินด้วยไมโครซิลิกาและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้
5. ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าการเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่เกิดขึ้นในระบบดังเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ XRD จากลักษณะความไม่เป็นผลึกที่ยังคงพบในตัวอย่างที่มีค่า Si:Al สูง

ได้แก่ 20Si15 (Si:Al=2.56) และ 20Si18 (Si:Al=2.56) มีแนวโน้มที่จะเป็นเฟสของไมโครซิลิกาที่พบในพีคของไมโครซิลิกาตั้งต้น แสดงว่าปริมาณไมโครซิลิกาที่แทนที่ในระบบมีแนวโน้มไม่เกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบใหม่ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดทำให้มีค่ากำลังอัดต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

References

- American Society for Testing and Materials. (2008). ASTM C618-08a. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia. 04.02.2008
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivananon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 29. Issue 3. pp. 224-229
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S. and Cao, T. (2011). High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 23. No. 3. pp. 264-270
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymer systems, terminology. In *Proceedings Second International Conference. Geopolymer'99 Institut Geopolymer*. Saint-Quentin. France. pp. 9-39
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry & Application*. France: Institut Geopolymer
- Lee, W. K. W. and Van Deventer, J. S. J. (2002). Structural reorganization of class F fly ash in alkaline silicate solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. Vol. 211. pp. 49-66
- Phair, J. W. and Van Deventer, J. S. J. (2002). Characterisation of fly-ash based geopolymeric binders activated with sodium aluminate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Vol. 41. No. 17. pp. 4242-4251
- Sata, V., Wongsu, A. and Chindaprasirt, P. (2013). Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. Vol. 42. pp. 33-39

- Yip, C. K. Lukey, G. C. and Van Deventer, J. S. J. (2005). The coexistence of geopolymer gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. **Cement and Concrete Research**. Vol. 35. pp. 1688-1697
- Somna. K., Jaturapitakkul. C., Kajitvichyanukul. P. and Chindaprasirt. P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. **Fuel**. Vol. 90. No. 6. pp. 2118-2124
- Van Jaarsveld, J. G. S. and Van Deventer, J. S. J. (1999). Effect of the alkali metal activator on the properties of y-ash-based geopolymers. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. Vol. 38. No. 10. pp. 3932-3941
- De Silva P, Sagoe-Crenstil K and Sirivivatnanon V. (2007). Kinetics of geopolymerization : role of Al_2O_3 and SiO_2 . **Cement and Concrete Research**. Vol. 37. No. 4. pp. 512-518
- Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z. and Yue C. (2009). Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. **Applied Clay Science**. Vol. 43. No. 2. pp. 218-23
- Suresh Thokchom, Debabrata Dutta and Somnath Ghosh. (2011). Effect of Incorporating Silica Fume in Fly Ash Geopolymers. **World Academy of Science. Engineering and Technology**. Vol. 60. pp. 243-247