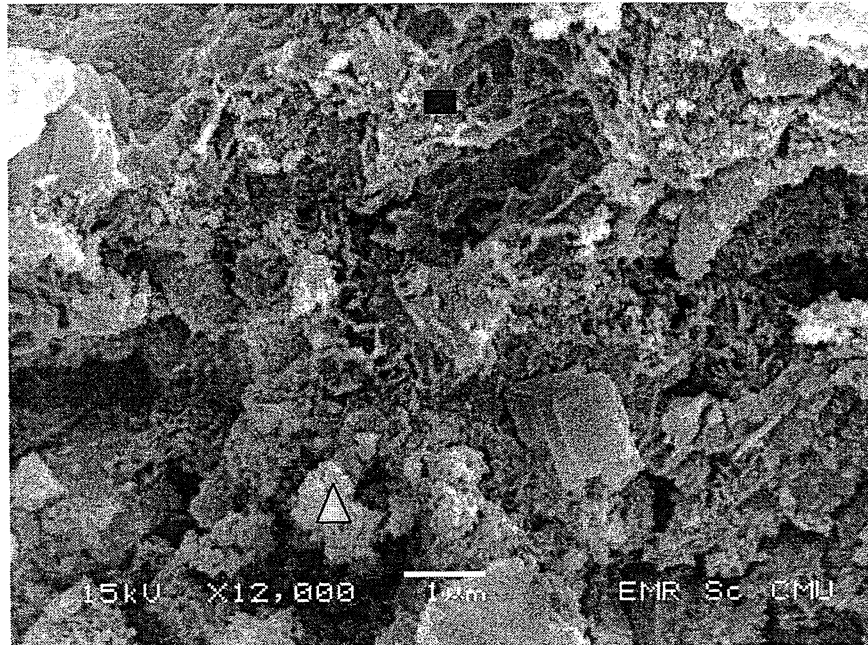
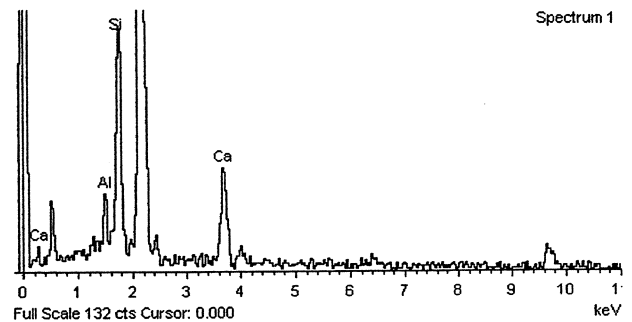


การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค



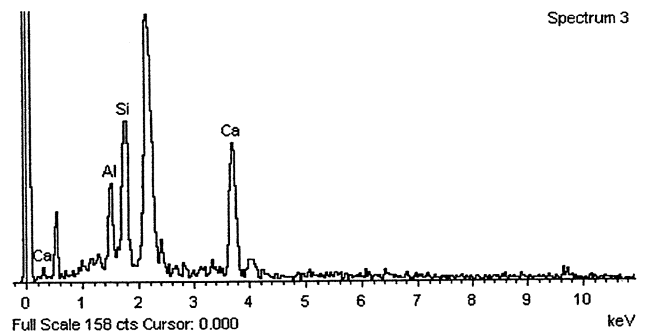
สัญลักษณ์ ■

Element	Weight%	Atomic%
Al	9.30	11.11
Si	46.39	53.25
Ca	44.31	35.64
Totals	100.00	



สัญลักษณ์ ▲

Element	Weight%	Atomic%
Al	13.65	17.11
Si	27.81	33.49
Ca	58.54	49.40
Totals	100.00	



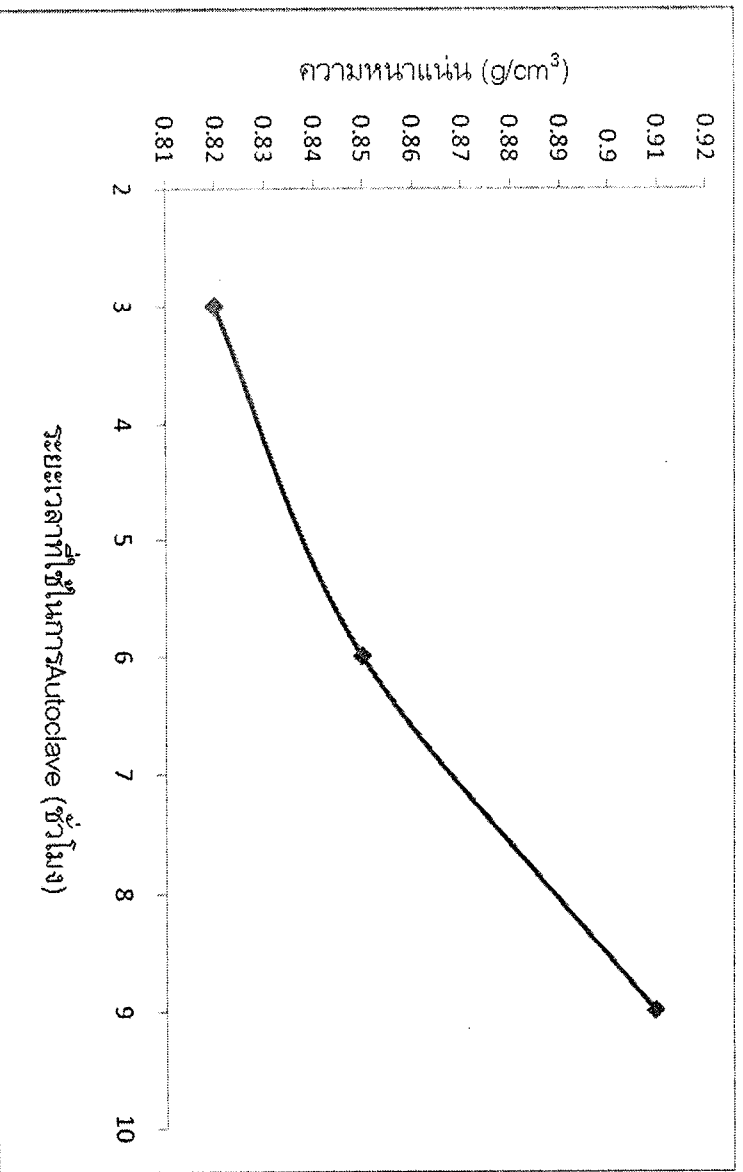
รูป 4.55 แสดงโครงสร้างทางจุลภาค และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอิฐที่ทำจากดินเบาขนาดหยาบ (อนุภาคค้ำตะแกรง 80 เมช (หรือ 180 μm))

จากผล EDS ของอิฐเมื่อใช้ดินเบาขนาดอนุภาคต่างตะแกรง 80 mesh (หรือ 180 μm) ที่บริเวณสัญลักษณ์ ■ พบว่า มีปริมาณของธาตุ Ca และ Si ค่อนข้างสูง จึงคาดว่าน่าจะเป็นโครงสร้างของ CSH และบริเวณสัญลักษณ์ ▲ พบว่ามีปริมาณของธาตุ Ca ค่อนข้างสูง แต่พบปริมาณของธาตุ Si และ Al ที่ต่ำกว่ามาก ดังนั้นโครงสร้างที่พบนี้น่าจะเป็นโครงสร้างของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา หรือการเกิดปฏิกิริยายังไม่สมบูรณ์

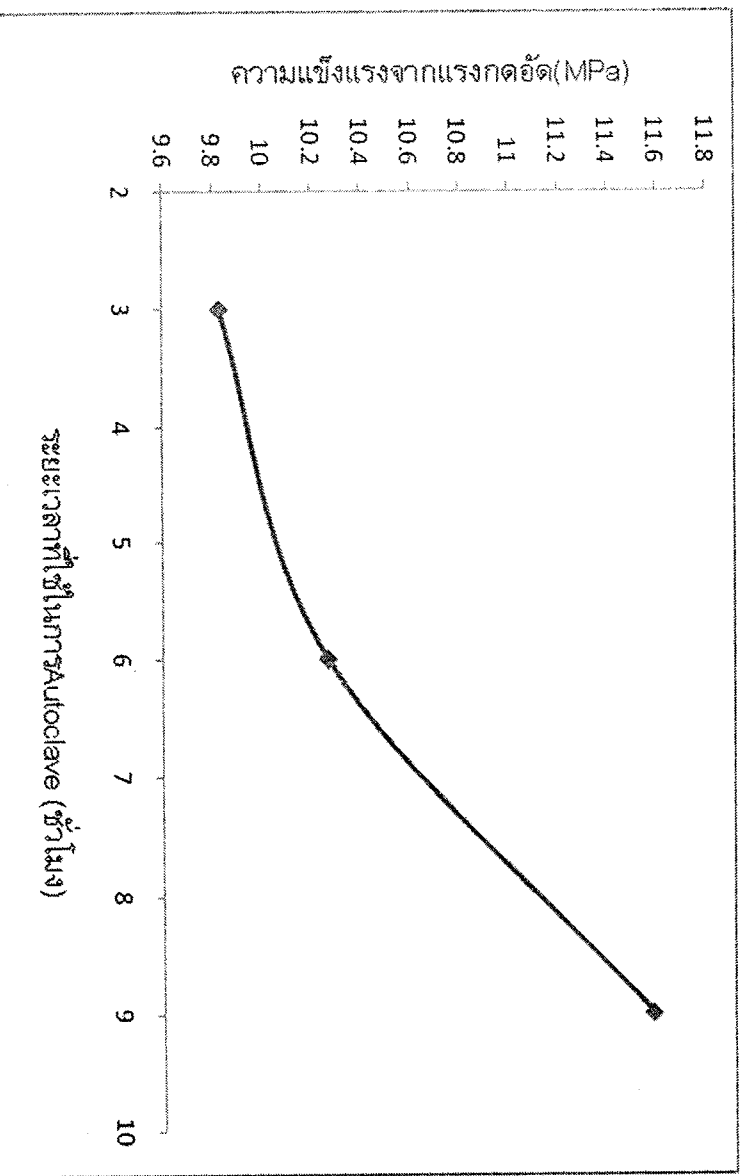
4.12 ผลการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการ Autoclave ที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.18 ระยะเวลาที่ใช้ในการ Autoclave อิฐในการทดลอง และสมบัติเชิงกลของอิฐ

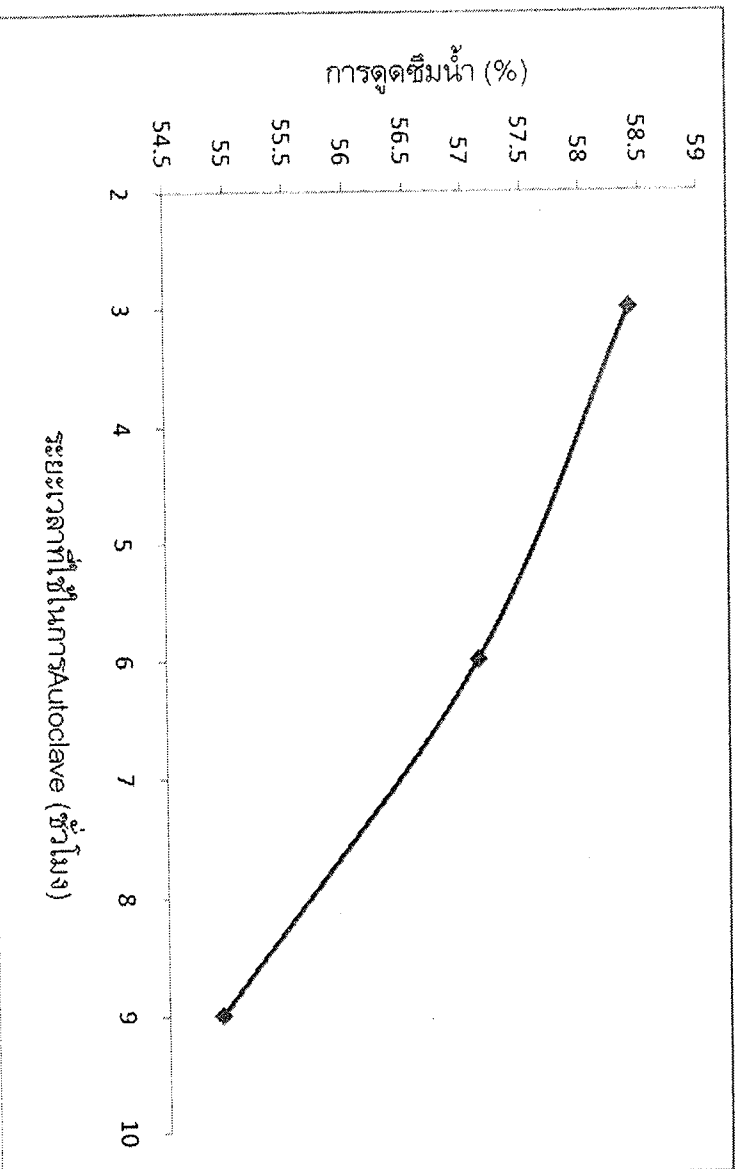
ระยะเวลาที่ใช้ในการ Autoclave (ชั่วโมง)	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล		
	ดินเบา (%)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)	ยิปซัม (%)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความแข็งแรงจากแรงกดอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
3	70	10	20	0.82	9.83	54.95
6	70	10	20	0.85	10.27	57.13
9	70	10	20	0.91	11.59	58.42



รูปที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (Bulk density) กับระยะเวลาที่ใช้ในการ Autoclave



รูปที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากการกดอัด (Compressive strength) กับระยะเวลาที่ใช้ในการ Autoclave



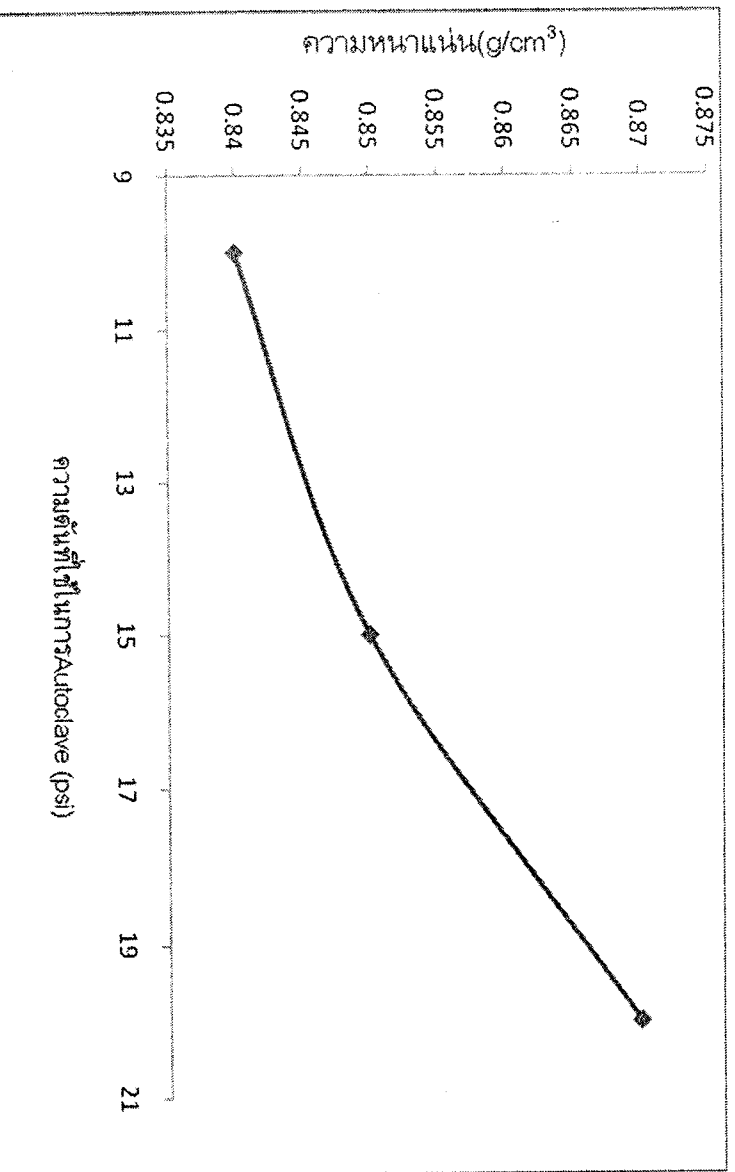
รูปที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) กับระยะเวลาที่ใช้ในการต้มด้วย Autoclave

จากการทดลองพบว่า การใช้เวลาในการ Autoclave อีซูมากขึ้น จะทำให้อีซูมีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจาก ยิ่งใช้เวลานานในการ Autoclave มากขึ้น จะทำให้อนุภาคมีเวลาในการจัดเรียงตัวชิดกันมากขึ้น ซึ่งจะเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาปอลิไซคลาน และเกิดโครงสร้างของ CSH มากขึ้น รวมทั้งการใช้ระยะเวลาในการ Autoclave มากขึ้น ทำให้ไอน้ำที่อยู่ในรูพรุนของอีซูมีความอึดอัดมากขึ้น ไอน้ำที่อึดอัดจะใช้เวลานานในการระเหย AI และ Si ออกมามากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอลิไซคลานมากขึ้น ดังนั้นโครงสร้างของ CSH จึงมากขึ้นด้วย แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการอีซูที่มีความพรุนตัวสูงๆ และมีค่าความแข็งแรงที่เหมาะสม ดังนั้นจึงพิจารณาที่แรงกดอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปอีซูที่ทำให้ได้ความแข็งแรงที่สามารถใช้ในการก่อสร้างได้จริง และให้ความพรุนตัวสูงด้วย

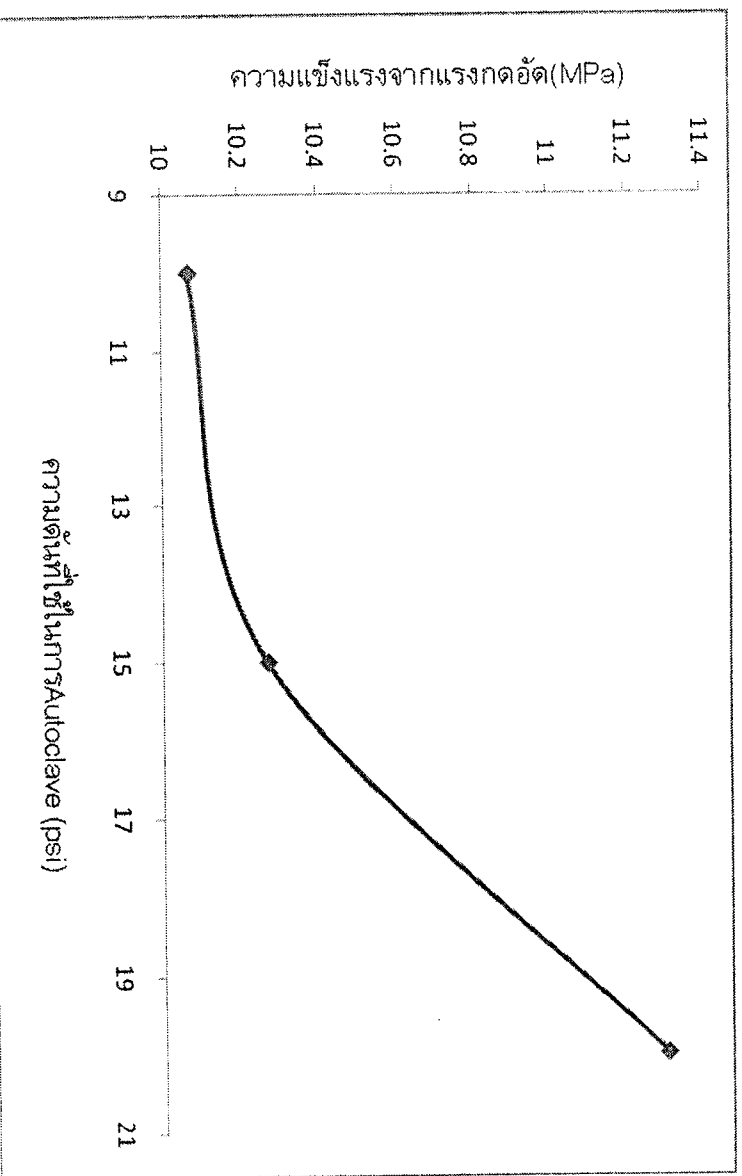
4.13 ผลการศึกษาอิทธิพลของความดันที่ใช้ในการ Autoclave

ตาราง 4.19 ความดันที่ใช้ในการ Autoclave อิฐในการทดลอง และสมบัติเชิงกลของอิฐ

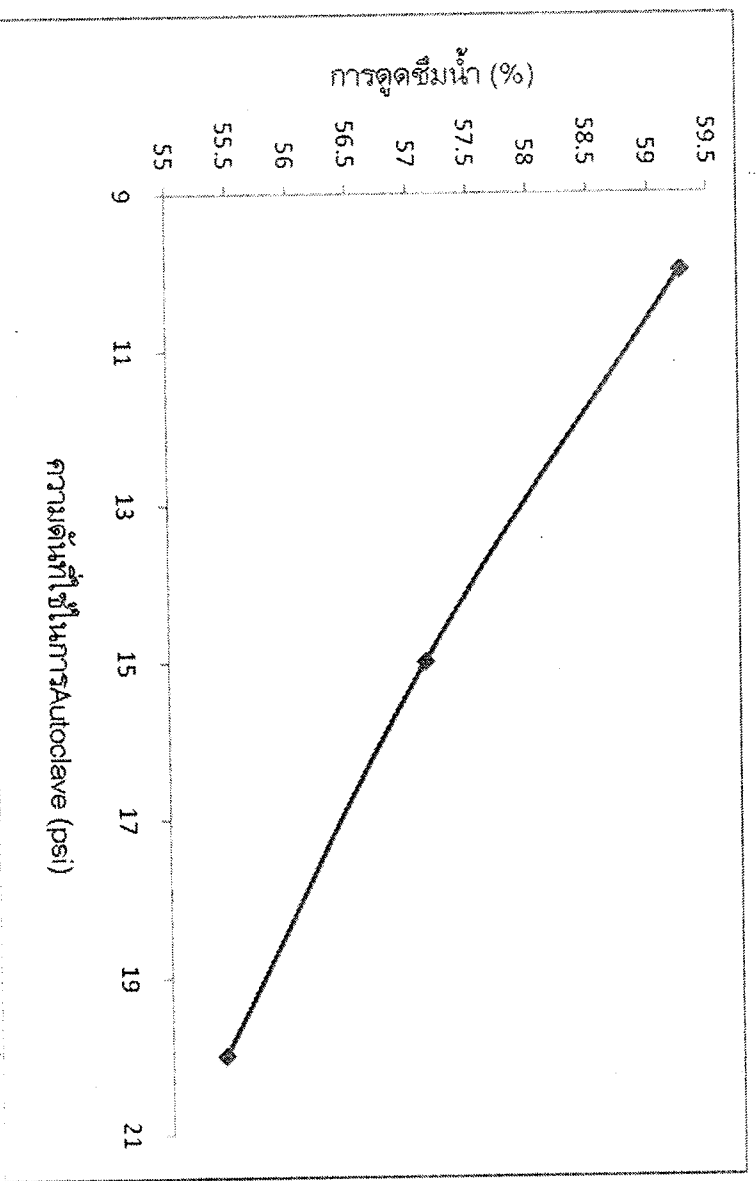
ความดันที่ใช้ในการ Autoclave (psi)	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล		
	ดินเผา (%)	Ca(OH) ₂ (%)	ยิปซั่ม(%)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความแข็งแรงจากแรงกดอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
10	70	10	20	0.83	10.07	59.28
15	70	10	20	0.85	10.27	57.13
20	70	10	20	0.90	11.31	55.44



รูปที่ 4.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (Bulk density) กับความดันที่ใช้ในการ ปั่นด้วย Autoclave



รูปที่ 4.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากการกดอัด (Compressive strength) กับความดันที่ใช้ในการ Autoclave อีฐู



รูปที่ 4.61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) กับความดันที่ใช้ในการAutoclave อีฐู

จากการทดลองพบว่า การใช้ความดันที่ใช้ในการ Autoclave อีฐมากขึ้น จะทำให้อีฐมีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจาก ความดันในหม้อ Autoclave จะทำการบีบอัดให้อุณหภูมิเข้าเรียงติดกันมากขึ้น ยิ่งใช้ความดันสูงจะทำให้อุณหภูมิบีบอัดกันมากขึ้น ซึ่งจะเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และเกิดโครงสร้างของ CSH มากขึ้น รวมทั้งการใช้ความดันในการ Autoclave มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นด้วย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เอน้ำที่อยู่ในรูพรุนของอีฐมีความอิ่มตัวมากขึ้น เอน้ำที่อิ่มตัวจะไปทำการระเหย Al และ Si ออกมามากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้น ดังนั้นโครงสร้างของ CSH จึงมากขึ้นด้วย แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการอีฐที่มีความพรุนต่ำสูงๆ และมีความแข็งแรงที่เหมาะสม ดังนั้นจึงพิจารณาที่แรงกดอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปอีฐที่ทำให้ได้ความแข็งแรงที่สามารถใช้ในการก่อสร้างได้จริง และให้ความพรุนต่ำสูงด้วย

4.14 ผลการศึกษากิจกรรมของการปรับสภาพด้วยความร้อนต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.20 สภาวะดินเบาลำปางที่ใช้ทำอีฐในการทดลองและสมบัติเชิงกลของอีฐ

ดินเบา	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล				
	ดินเบา (%)	Ca(OH) ₂ (%)	ยิปซั่ม (%)	%การหดตัว	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความแข็งแรงอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
calcline non - calcline	70	20	10	0.22	1.02	1.49	10.99	43.7
	70	20	10	10.14	1.23	1.57	13.6	33.4

จากผลการทดลอง การใช้ดินเบาลำปางที่ไม่ได้ Calcline พบว่าค่าความแข็งแรงที่ได้จะสูงกว่าค่าความแข็งแรงที่ได้จากการใช้ดินเบาลำปางที่ Calcline ดังนั้นการทำอีฐชนิดนี้เผ่าสามารถนำดินเบาที่ไม่ผ่านการ Calcline มาใช้ทำอีฐที่จะให้ค่าความแข็งแรงที่ได้มาตรฐานที่สามารถนำอีฐไปใช้งานได้ แต่เห็นว่าจะให้ค่าความหนาแน่นที่ค่อนข้างสูงด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการอีฐที่มีค่าความหนาแน่นที่ต่ำๆ เนื่องจากต้องการทำอีฐมวลเบาที่มีคุณสมบัติในการเป็น

อุณหภูมิร้อน ดังนั้นจึงเลือกสภาวะที่ใช้ดินเบาที่ Calcine เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นที่ต่ำ และให้ค่าความแข็งแรงที่เหมาะสมที่จะสามารถนำอิฐไปใช้งานได้

จากการทดลองนี้ทำให้ทราบว่า การใช้ดินเบาที่ผ่านการ Calcine เมื่อเทียบกับดินเบาที่ไม่ได้ผ่านการ Calcine น่าจะทำให้การละลายของเอนออนต่างๆในดินเบาทั้งสองสภาวะมีความแตกต่างกัน ซึ่งความเข้มข้นของเอนออนแต่ละชนิดจะส่งผลต่อชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่ในอิฐ โดยสารประกอบเหล่านี้จะเป็นตัวรับผิดชอบความแข็งแรงของอิฐ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าดินเบาที่ไม่ผ่านการแคลไชนต์ทำให้ระบบมีอัตราส่วนระหว่าง CaO/SiO_2 ที่เหมาะสมสามารถเกิดเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานได้มากกว่าหรือมีขนาดเล็กกว่าอิฐที่ให้ดินเบาที่ผ่านการแคลไชนต์

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายในการศึกษาปฏิกิริยาโพลิมเมอร์ไรเซชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเบาล้าง โดยศึกษาถึงอิทธิพลที่ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาเคมีทั้งสองดังกล่าวเกิดขึ้นได้

โดยปฏิกิริยาโพลิมเมอร์ไรเซชันจะแบ่งซึ่งจากการที่วัสดุเกิดเป็นเนื้อแก้ว (Glassy phase) ที่มีความต่อเนื่องกันของพันธะระหว่างโมเลกุลสูง ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงมาก และจะแบ่งซึ่งจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมินาไฮเดรต (CAH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) ที่เพิ่มมากขึ้น

โดยงานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยขึ้นรูปวัสดุตัวอย่างเป็นอิฐ และได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพในด้านต่างๆ กล่าวคือ เปอร้ซันต์การหดตัว, ความหนาแน่น, ความแข็งแรง และการดูดซึมน้ำซึ่งเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของอิฐ อีกทั้งยังพิจารณาได้จากโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางแร่ของอิฐ ที่สามารถยืนยันโครงสร้างของ Glassy phase ที่ได้จากปฏิกิริยาโพลิมเมอร์ไรเซชัน และ CSH และ/หรือ CAH และ/หรือ CASH ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก

สำหรับการสังเคราะห์วัสดุอิฐโพลิมเมอร์ไรเซชันน้ำหนาเบา ใช้วัสดุวัตถุดิบตั้งต้นสองชนิดคือ ดินเบาแห้งล้างและเถ้าแกลบ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาในช่วง 13.0-33.5 และของไฮเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาในช่วง 0.7-3.0 ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยของความละเอียดของดินเบา อุณหภูมิในการเผาแคลไชนต์ดินเบา ความเข้มข้นของสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างดินเบาและเถ้าแกลบ อุณหภูมิและเวลาในการบ่มวัสดุ โดยศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงความร้อนและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอิฐโพลิมเมอร์ จากผลการทดลองพบว่าวัสดุอิฐโพลิมเมอร์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าความแข็งแรงทนต่อการกดอัดมากกว่าวัสดุที่กระตุ้นด้วยสารละลายยาโปแตสเซียม

ไฮดรอกไซด์ โดยอุณหภูมิและเวลาป่นวัสดุที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและ 5 วันตามลำดับ และมีอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 13 และมีอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 1 ซึ่งจะทำให้ได้วัสดุซีโอไฟลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นโดยรวมเท่ากับ 880 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความแข็งแรงทนต่อการกดอัดเท่ากับ 1.5 เมกะปาสคาล และเมื่อผสมเข้ากับดินเบาในอัตราส่วน 40ต่อ60 ซึ่งจะทำให้ได้อัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาเปลี่ยนไปเป็น 22.5 และมีอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาเป็น 1.7 จะทำให้ค่าความแข็งแรงทนต่อการกดอัดเพิ่มขึ้นเป็น 2.4 เมกะปาสคาล และมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 1,010 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งแรงและความแน่นตัวของวัสดุซีโอไฟลิเมอร์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างโซเดียมต่ออะลูมินา โดยความแน่นตัวจะลดลงเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวลดลง และจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีโอไฟลิเมอร์ พบว่าความต่อเนื่องของเฟสจะมีเพิ่มขึ้น หรือความเป็น Glassy phase จะมีเพิ่มขึ้น โดยพบว่าองค์ประกอบทางแร่ที่เหลืออยู่โดยไม่รวมเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันคือ คอวซ์ นอกจากนี้ยังพบว่าดินเบาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพไม่สามารถพัฒนาให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันได้

สำหรับการสังเคราะห์วัสดุที่มาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์คืออุณหภูมิในการเผาแคลไซต์ดินเบา ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิและเวลาในป่น และการปรับสภาพด้วยความร้อน จากผลการทดลองพบว่าวัสดุที่มีน้ำหนักเบาที่สุดคุณภาพดีได้จากการใช้ดินเบาที่ผ่านการเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 0.3 โดยใช้อุณหภูมิในการป่นที่ 130 องศาเซลเซียส ทำให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงทนต่อการกดอัดเท่ากับ 10 เมกะปาสคาล และมีความหนาแน่นโดยรวมเท่ากับ 870 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อใช้อุณหภูมิการป่นสูงขึ้นเป็น 180 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงกดอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณ 10% เท่านั้น และพบว่าอัตราที่ทำให้จากดินเบาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนมีความแข็งแรง 13.6 เมกะปาสคาล โดยมีค่ามากกว่าอัตราที่ทำให้จากดินเบาที่ผ่านการปรับสภาพ ที่มีความแข็งแรงถึง 10.9 เมกะปาสคาล

จากการพิจารณาจากสมบัติเชิงกลและความร้อนของวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ทั้งสองวิธีดังกล่าว พบว่าวัสดุที่ป่นตั้งต้นชนิดดินเบาเหมาะสมกับการเตรียมวัสดุที่มีน้ำหนักเบาโดยใช้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากกว่าปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันในทุกกรณี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ขาญยุทธ สีแดง, อัมรินทร์ นันทเสน และ เกศรินทร์ พิมรักษา, การผลิตอิฐเบาชนิดไม่เผา จากดินเบาแหล่งลำปาง, การนำเสนองานวิจัยสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี (IRPUS), เมษายน, กรุงเทพฯ, 2547
- [2] ธนิตา นันทสว่าง, สุมิตร ห่วงนาคและ เกศรินทร์ พิมรักษา, การผลิตอิฐเบาชนิดไม่เผา จากดินเบาแหล่งลำปางเพื่อใช้ในงานก่อสร้างอาคารภายนอก, การนำเสนองานวิจัยสำหรับ นักศึกษาปริญญาตรี (IRPUS), พฤษภาคม, กรุงเทพฯ, 2548
- [3] M. G. Stamatakis, D. Fragoulis, The influence of biogenic microsilica rock on the properties of blended cement, *Cem. Concr. Comp.* 25 (2003) 177-184.
- [4] H. Boeke, Oezlem, Basak Ipekoglu, E. Ugurlu, K. Serifaki, G. Toprak, Characteristics of lime produced from limestone containing diatoms, *Constr. Build. Mat. Article in press*, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.010.
- [5] T. Chareerat, K. Pimraksa, P. Chindaprasit, A. Maegawa, S. Hatanaka, Composition and microstructure of fly ash geopolymer containing rice husk ash. *Technology and Innovation for Sustainable Development Conference, Khon Kaen*, (2008) 168-171.
- [6] J. Van, D. Van, G.C. Lukey, The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers. *Chem. Eng. J.* 89 (2002) 63-73.
- [7] P. Chindaprasit, T. Chareerat, W. Kunawanakit, Geopolymer from Mae Moh fly ash. *KKU Eng. J.* 32 (2005) 715-724.
- [8] ภูวิศ ตริสุวรรณ, สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ, ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ผลกระทบของมวลละเอียดของเถ้ากลบ-เปลือกไม้ต่อกำลังอัดและระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์พลัสที่ทำการเก็บถนอม-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, พัทยา, MAT 306-MAT311, 2551
- [9] T. Chareerat, P. Chindaprasit, S. Nontanandh, Effect of fly ash fineness on properties and durability of fly ash geopolymer. *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์แห่งชาติ ครั้งที่ 2, ขอนแก่น*, 216-224, 2551
- [10] A. Sathonsaowaphak, P. Chindaprasit, K. Pimraksa, Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. *J. Haz. Mat.* 168 (2009) 44-50.
- [11] J. W. Phair, J.S.J Van Deventer, Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers. *Inter. J. Min. Proc.* 66(1-4) (2002) 121-143.

- [12] J.G.S. Van Jaarsveld, J.S.J Van Deventer, Effect of the alkali metal activator on the properties of fly-ash based geopolymers. *Ind. Eng. Chem. Res.* 38(10) (1999) 3932–3941.
- [13] J.C. Swanepoel, C.A. Strydom, Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *App. Geochem.* 17(8) (2002) 1143-1148.
- [14] K. Sagoe-Crentsil, Properties and performance of Si-rich geopolymer binder systems. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตและซีโอพอลิเมอร์แห่งชาติ ครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 5-13, 2551
- [15] T. Bakharev, Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1224-1232.
- [16] K.Pimraksa, P.Chindaprasit, Lightweight bricks made of diatomaceous earth lime and gypsum, *Ceram. Inter.* (2008)
- [17] D. Damidot, F.P.Glasser, Investigation of the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ system at 25°C by thermodynamic calculation, *Cem. Concr. Res.* (1995).

6. Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจากสกว.

เตรียม Manuscript สำหรับตีพิมพ์ในวารสารวิชาการต่างประเทศเรื่อง
“Lightweight geopolymeric materials from highly siliceous materials” (ตั้งเอกสารแนบ)

Lightweight geopolymeric materials from highly siliceous materials

K. Pimraksa^{1*}, P. Chindaprasirt², T. Lertkositpong¹, K. Sagoe-Crentsil⁴

¹*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineer, Khon Kaen University*

^{2,3}*Department of Industrial Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University*

⁴*CSIRO, Melbourne, Australia*

Abstract

The syntheses of lightweight geopolymeric materials highly siliceous materials viz. diatomaceous earth (DE) and rice husk ash (RHA) using $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios of 13.0-33.5 and $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios of 0.7-3.0 were studied. The effects of fineness and calcination temperature of DE, concentrations of NaOH and KOH, DE to RHA ratio, curing temperature and time on the mechanical properties and microstructures of the geopolymer pastes were studied. The optimum calcination temperature of DE was 800 °C. The increases in fineness of DE and in alkali concentration resulted in an increase in compressive strength of geopolymer paste. Geopolymer pastes activated with NaOH gave higher compressive strengths than those with KOH. The optimum curing temperature and time were 75 °C and 5 days. The lightweight geopolymeric material with bulk density of 880 kg/m³ and compressive strength of 1.5 MPa was obtained. The $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios of the material were 13 of 1.0, respectively. The incorporation of 40% RHA that changed $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios to 22.5 and 1.7 enhanced the compressive strength of geopolymer paste to 2.4 MPa with only a slight increase of bulk density to 1,010 kg/m³.

Keyword: Diatomaceous earth; Rice Husk Ash; Geopolymer; Lightweight materials

* Corresponding author. Tel.: +66 53-943404; Fax: +66 53-892262;

E-mail address: kpimrakp@science.cmu.ac.th

1. Introduction

Manufacture of Portland cement is energy intensive and emits a large amount of carbon dioxide of approximately 7% of global emission [1]. The process also produces pollution in the forms of dust, noise and vibration with operating machinery and during blasting in quarries. Efforts, therefore, have been made to develop alternative cementitious materials to reduce the mentioned problems. One of the promising findings is to develop a geopolymeric material with low CO₂ emission and low energy requirement. The geopolymeric material is produced from the dissolution of aluminosilicate oxides and the polymerization reaction of those dissolved species in the presence of alkali ions for charge balancing in framework cavities nearby AlO₄ location. The reaction forms SiO₄ and AlO₄, tetrahedral frameworks linked by shared oxygens as polysialates or polysialate-siloxo or polysialate-disiloxo depending on the SiO₂/Al₂O₃ ratio in the system [2]. The connection of the tetrahedral frameworks is performed by covalent bonds in the long range. Geopolymer structure is therefore perceived as dense amorphous and/or semi-crystalline 3-D aluminosilicate microstructure.

Nowadays, lightweight construction materials are used to reduce the weight of building structures and improve thermal insulation of buildings. This study, therefore, focused on the production of lightweight geopolymer. Suitable lightweight source materials containing silica and/or alumina and are abundant in Thailand are diatomaceous earth (DE) and rice husk ash (RHA). DE is a sedimentary rock consisting principally of highly porous skeletons of diatom, in other word, a loosely packed mineral. The porous silica structure gives DE useful characteristics such as unique particulate structure, low bulk density, high absorptive capacity and high surface area [3]. The deposit of DE in Lampang province in the north is quite large

with estimation of more than 100 million tons. The mineral composition consists primarily of silica with some clay minerals viz. montmorillonite, kaolinite and muscovite [4]. These clay minerals render DE as a suitable source for making geopolymer. Rice husk ash (RHA) is considered useful to help increase the dissolved SiO_4 species during dissolution and for subsequent polymerization stages [X: S. Detphan, P. Chindaprasit, Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials,.....].

It is still not certain whether 3D built-up structures of geopolymer made of highly porous silica are impeded due to its characteristic long ranged bonding of inorganic polymer chains. This research, therefore, aims to study reduction of unit weight, developments of strength and microstructure after the chemical reaction of polymerization. Thermal conductivity is also investigated. The knowledge of the production of DE lightweight geopolymer should be beneficial to the understanding of the mechanism and to develop the lightweight materials.

2. Materials and methods

2.1 Materials

DE was obtained from Lampang province in northern Thailand. It had particle size ($d_{4.3}$) of 73 μm , specific surface area by BET of 46.8 m^2/g and specific gravity of 2.55. Mineralogical compositions of DE consisted of quartz, montmorillonite, muscovite, kaolinite, hematite, some semi-crystalline phase and amorphous phases. Laboratory grade sodium hydroxide (NaOH) and potassium hydroxide (KOH) and industrial sodium silicate (Na_2SiO_3) with 32.39% SiO_2 , 13.44 % Na_2O and 54.17% H_2O were used.

RHA with particle size ($d_{4.3}$) of 62 μm , specific surface area by BET of 48.7 m^2/g was obtained from burning of rice husk at 700 °C in oxidation atmosphere. Amorphous silica is obtained by burning rice husk at temperature lower than 700 °C [XX: P.Chindaprasit, P. Kanachanda, A. Sathonsaowaphak and HT. Cao, Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash, Construction and Building Materials, 21, 2007, 1356-1361]. XRD indicated that the mineralogical compositions of RHA composed basically of amorphous phase of silica with only small amount of cristobalite. Chemical compositions of DE and RHA are given in Table 1. Photomicrographs of DE and RHA are shown in Fig. 1.

Table 1 Chemical compositions of DE and RHA (Si/Al ratio is molar ratio of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)

Raw materials	Chemical composition (wt %)											Si/Al ratio
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	SO_3	LOI	
DE	77.46	10.97	9.08	tr	1.07	0.35	0.31	0.41	tr	tr	0.35	11.98
CDE800	66.48	13.18	18.31	tr	1.12	0.47	tr	0.43	tr	tr	tr	
MDE800	75.52	12.15	10.27	tr	1.24	0.39	tr	0.44	tr	tr	tr	
FDE800	79.76	10.81	7.42	tr	1.26	0.33	tr	0.42	tr	tr	tr	
RHA	85.25	0.11	0.18	tr	1.80	0.79	0.3	0.03	1.10	0.08	10.29	1315
FRHA	96.47	0.00	0.32	tr	1.50	0.75	tr	0.02	0.61	tr	tr	

Tr = trace (0-0.049%)

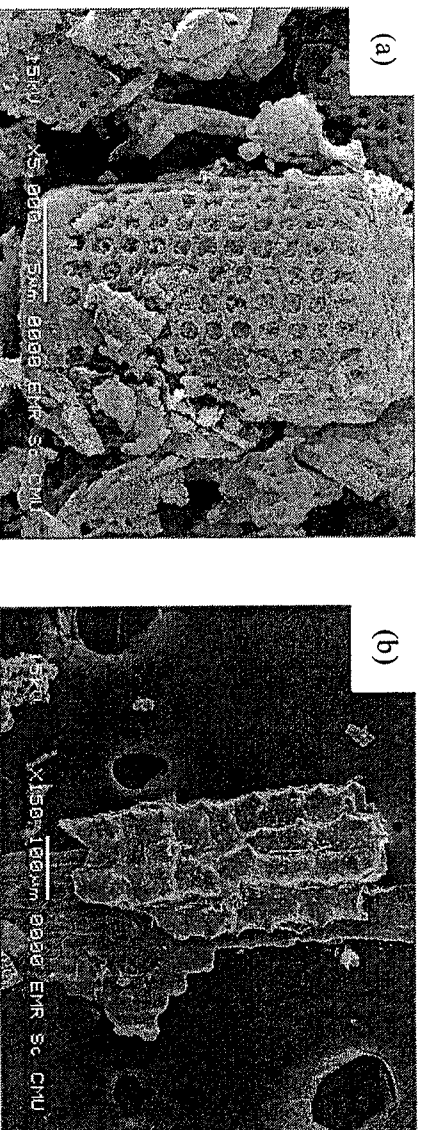


Fig. 1 Photomicrographs of (a) DE and (b) RHA

DE was calcined at 400, 600, 800 and 1000 °C (DE400, DE600, DE800 and DE1000). After calcination, DE was sieved into three lots of coarse, medium and fine particle sizes. Coarse DE (CDE) was the portion larger than sieve No. 80. Medium DE (MDE) was the portion larger than sieve No. 200. Fine DE (FDE) was the portion passed sieve No. 325. Fine portion of RHA was obtained from sieving passed also sieve No. 325. The chemical compositions of DE, sieved DE800 and RHA are shown in Table 1.

The leachings of Si and Al ions of calcined DE and RHA were measured. The leaching test was carried out by stirring the calcined DE in 10 Molar (M) NaOH solution with solid to liquid ratio of 1:10 for 24 h. The dissolved Si and Al ions were verified quantitatively using

Atomic Absorption Spectroscopy (AAS).

2.2 Details of tests

The mixing was done in an air conditioned room at approximately 25 °C. The proportion of each mix was stoichiometrically weighed according to Table 2. The mixing procedure started with mixing of NaOH (or KOH) solution, sodium silicate (Na_2SiO_3) and DE for 5 min. Water was then added and mixed for 5 min. The mixtures were cast in 50×50×50 mm acrylic cube

mould. The specimens were then wrapped with plastic film to prevent moisture lost. After delayed time of 1 hour, the specimens were cured in an electric oven. The specimens were cooled down in the oven and then demoulded the next day and kept at 23 °C until the testing ages. The compressive strength tests were performed at 7 days in accordance with ASTM C109 [5]. Density measurements were also conducted at age of 7 days using direct measurement. The reported strength and density were the mean of three tests. XRD and SEM analysis were conducted on the broken specimens after compressive strength test using a Philips X'Celerator diffractometer with a Cu K α_1 radiation and JSM-5910 LV microscope equipped with EDX microanalysis, respectively.

2.3 Test series

2.3.1 Effect of pre-treatment

In this series, fineness and calcination temperature of DE were studied. NaOH with concentration of 10 M and the Na₂SiO₃/NaOH ratio of 1.23 were used. After delayed time of 1 hour, specimens were cured at 60 °C for a period of 3 days.

2.3.2 Effect of synthesized condition on DE Geopolymer

The results of section 2.3.1 indicated that fine DE with optimum calcination temperature of 800 °C (FDE800) was suitable source material. It was, therefore, selected for the following tests.

(1) The concentrations of NaOH and KOH

The concentrations of NaOH and KOH of 4, 6, 8, 10 and 12 M and Na₂SiO₃/NaOH ratio of 1.23 were used. Compositions of geopolymer in mole ratios of samples No. 1 to 10 are shown

in Table 2. After delayed time of 1 hour, specimens were cured at 60 °C for a period of 3 days.

(2) Curing temperature and time

The 10 M NaOH and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 1.23 were used. After one hour delayed time, specimens were cured in an oven for different time intervals of 1, 2, 3, 4 and 5 days at curing temperatures of 60, 75 and 90 °C.

(3) Alkali content

In this test, 10 M NaOH; three $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios of 1, 2 and 3; and curing temperature of 60 °C for 3 days were used. Compositions of geopolymer in mole ratios of samples No. 11 to 13 are shown in Table 2.

2.3.3 Effect of incorporation of RHA

The geopolymer pastes with different DE: RHA ratios were used to obtain various $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios. The compositions of samples No. 14 to 17 are given in Table 2.

Table 2 Compositions of FDE800 geopolymer

Sample No.	Hydroxide	Molar	Mole ratio			
			$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$
1	NaOH	4	13.0	0.68	0.05	19.53
2		6	13.0	0.79	0.06	16.39
3		8	13.0	0.90	0.07	13.94
4		10	13.0	1.00	0.08	12.16
5		12	13.0	1.09	0.08	10.86
6	KOH	4	13.0	0.66 ^a	0.05 ^b	19.53 ^c
7		6	13.0	0.76	0.06	16.20

8	8	13.0	0.84	0.06	13.96	
9	10	13.0	0.94	0.07	11.89	
10	12	13.0	1.02	0.08	10.53	
11	NaOH	10	13.0	1.00	0.08	12.16
12	10	13.0	1.50	X	Y	
13	10	13.0	2.00	0.15	11.57	
14	10	13.0	3.00	0.23	11.38	
15	NaOH	10	16.6	1.25	0.08	12.16
16	10	22.5	1.67	0.07	12.16	
17	10	33.5	2.46	0.07	12.04	

3. Results and Discussion

3.1 Dissolubility of DE and RHA

Results of dissolubility of DE and RHA in 10M NaOH activation are shown in Table 3. The dissolution was related to the particle size and fineness of DE. The amount of leached silicon ion of CDE was 2040 mg/L and increased to 2110 and 2750 mg/L for finer DE and FDE. The finer DE possessed high surface area and allowed greater contact with the alkali solutions. Furthermore, the fine DE also contained high silica content (Table 1). For the calcined DE, the dissolution of silica and alumina were significantly affected by the calcination temperature. The dissolved silicon ions of the DE400 (DE calcined at 400 °C), DE600 and DE800 were 1690, 3540 and 4140 mg/L while those of alumina were 158, 1010, 1260 mg/L, respectively. High calcination temperature of 600 and 800 °C were need for the high dissolution of alumina ions.

The silica and alumina contained in clay minerals contributed to the increase in dissolved ions. The silica phase contained in DE was slightly changed with heat treatment. Kaolinite and montmorillonite could transform to metakaolin and disrupted montmorillonite with more active surfaces. Dissolution of silicate molecules at high pH (>10) resulted in the formation of silicic acid; H_3SiO_4^- , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, HSiO_4^{3-} and SiO_4^{4-} , dependent on pH of the system [X]. The measured pH of this experiment was around 14. Thus, the silicic acid species of geopolymeric system were normally $\text{H}_3\text{SiO}_4^{3-}$ and SiO_4^{4-} . To these respects, the DE800 was screened through 325 mesh size sieve and used to prepare geopolymeric materials for further tests.

Table 3 Contents of aluminum and silicon ions leached from DE and RHA

Materials	Silicon ion (mg/L)	Aluminum ion (mg/L)	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio
As-received DE	2090	219	
CDE	2040	296	
MDE	2110	230	
FDE	2750	205	
DE400	1690	158	
DE600	3540	1010	
DE800	4140	1260	
RHA	4840	0	
FRHA	5310	0	

3.2 Effect of pre-treatment on DE Geopolymer

3.2.1 Fineness of DE

The compressive strength and bulk density of geopolymer pastes with the difference finenesses are shown in Fig. 2. The strength development at 7 days of R80DE, R200DE and P325DE geopolymer pastes was 2.0, 5.0 and 6.6 kg/cm² respectively. The strength increases with an increase in the DE fineness. The reaction of DE geopolymer includes dissolution and polymerization [6]. DE with higher surface area would undergo a faster dissolution. This would increase the amount of silicon and aluminum ions in the solution and thus increases the strength of the paste. Data of bulk density clearly testified this trend.

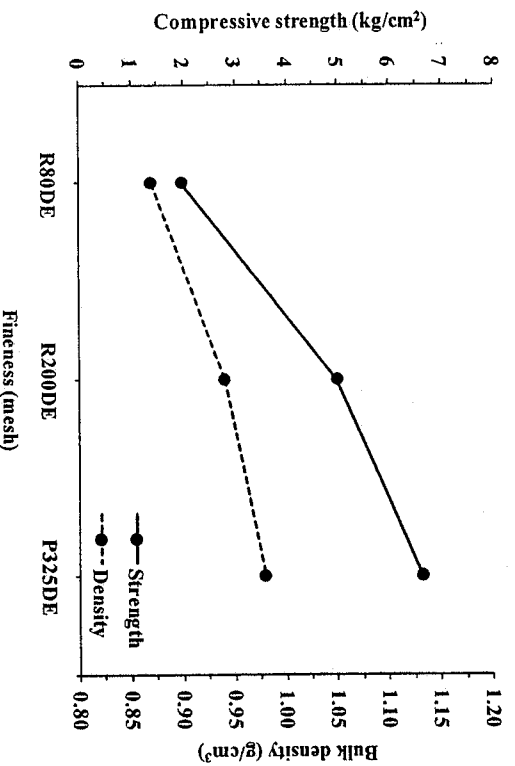
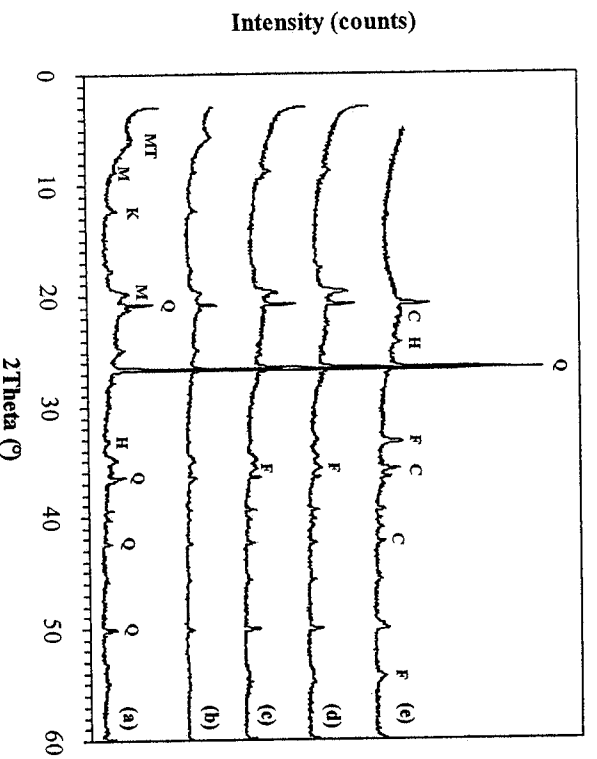


Fig. 2 Compressive strength and bulk density of geopolymer pastes with different finenesses of DE

3.1.2 Calcination temperature of DE

XRD patterns with different calcination temperatures of DE are shown in Fig. 3. The destruction of chemical structures of monmorillonite and kaolinite containing in 600, 800 and 1000 °C calcined DE are observed from the disappearances of peaks at 2 θ of 6.5° and 12.5°.

Hematite (Fe_2O_3) is transformed into magnetite (Fe_3O_4). Fig. 4 shows the results of compressive strength and bulk density of geopolymer pastes made of calcined DE. The strength of DE800 paste was significantly higher than those of noncalcined DE, DE400, DE600 and DE1000 °C. At low calcined temperature, the dissolution of silicon and aluminium ions was small. At high temperature of 1000 °C, quartz was transformed to cristobalite and the magnetite phase was also increased at the reactivity of DE1000, greatly reduced. Therefore, the strength of geopolymer made of DE1000 was relative low.



MT=Montmorillonite, M=Muscovite, K=Kaolinite, Q=Quartz, H=Hematite,
F=Magnetite, C=Cristobalite

Fig. 3 XRD patterns of calcined DE (a) noncalcined DE (b) DE400 (c) DE600 (d) DE800 (e)
DE1000

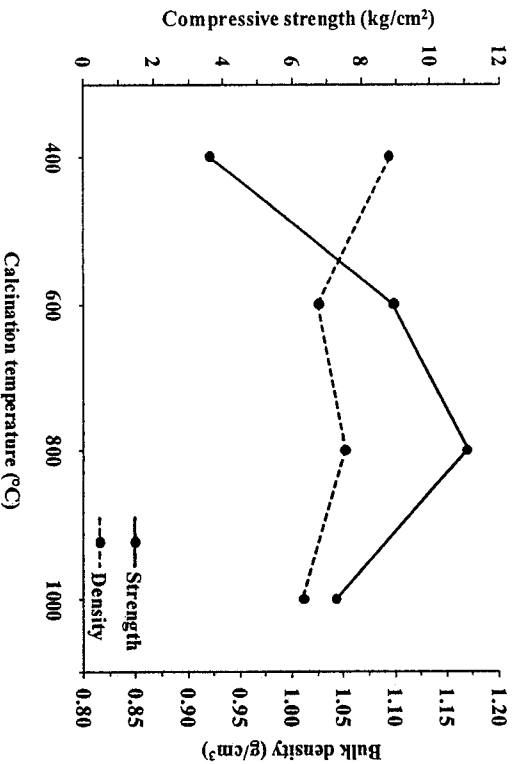


Fig. 4 Compressive strength and bulk density of geopolymer pates with different calcination temperatures of DE

3.2 Effect of synthesized condition on DE Geopolymer

3.2.1 Concentration of NaOH or KOH

Fig. 5 shows the results of compressive strength and bulk density of geopolymer with NaOH and KOH as alkaline activators. The mechanical properties increased along with an increase of concentration of NaOH or KOH. Hydroxide solution with higher concentration provided better dissolving ability of DE particles and increased production of more reactive bonds for the monomer, which increased geopolymerization of pastes [7]. When the concentration of hydroxide exceeded 10 M, the setting time was very fast. At high alkali concentration, excess hydroxide ion concentration caused aluminosilicate gel precipitation at the very early stages, resulting in lower strength geopolymer. [W.K. Lee, J.S.J Van Deventer, The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymer, Colloids Surf., A. 211 (2-3) (2002) 115-126]. The DE geopolymer with NaOH gave higher strength than that with KOH. Cation size of Na^+ was smaller than K^+ , thus Na^+ provided higher bond strength than that of K^+ .

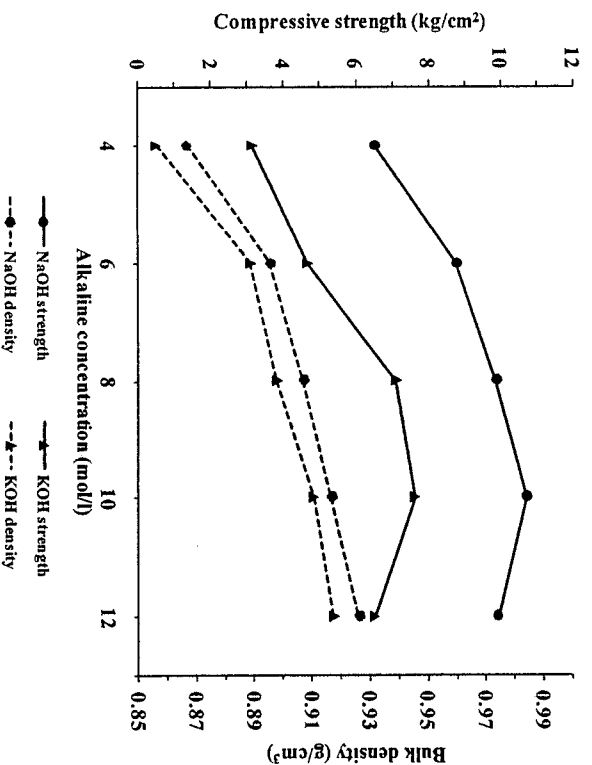


Fig. 5 Compressive strength and bulk density of geopolymer with different concentrations of NaOH or KOH

3.2.2 Curing temperature and time

The results of compressive strength and bulk density with different curing temperatures and times are given in Fig. 6. The optimum curing temperature and time were found to be 75 °C and 4-5 days. The strengths increased with the increases in curing temperature and time. For the high curing temperature of 90 °C, the strength after 5 days curing dropped. At high curing temperature, the sample could experience a substantial loss of moisture and the deterioration of strength would [8]. As expected, the density of geopolymer decreased with the increases in curing temperature and time. With the progress of polymerization, water was gradually removed and the SiO_4 and AlO_4 tetrahedral were linked to form amorphous geopolymers. The sample cured at 75 °C for 5 days has bulk density of 880 kg/m^3 while the strength was reasonably high at 1.5 MPa.

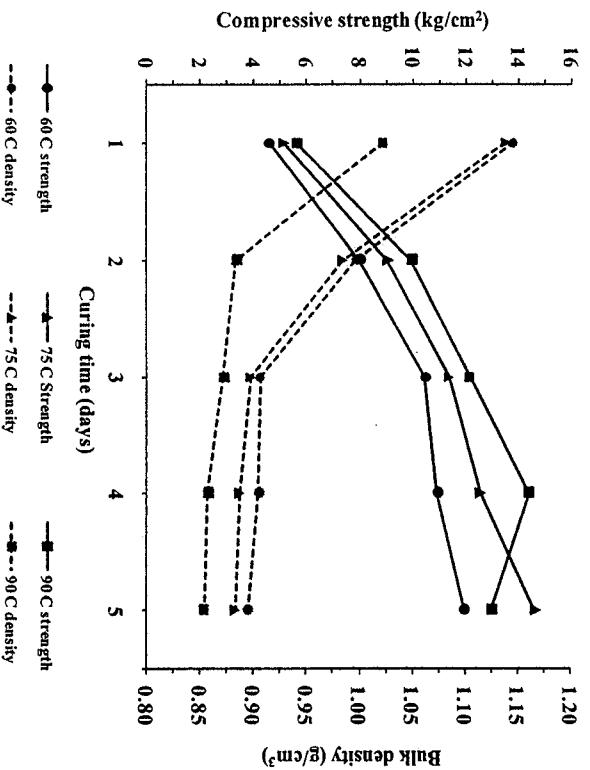


Fig. 6 Compressive strength and bulk density of geopolymers with different curing temperatures and times

3.2.3 Alkali content

Fig. 7 shows the compressive strength and bulk density of geopolymer pastes with varying $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratios of 1-3. The strength increased with an increase in $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio. However, high alkali content ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios of 2 and 3), makes polymerized networks less stable than $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio of 1 [XXX]. The density of geopolymer increased with an increase in $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio. The increase in the density of geopolymer paste to this level was undesirable.

Fig. 8 demonstrates morphological aspects of geopolymer pastes at different $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios. The geopolymer paste with $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ of 1 was less dense than those with $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios of 2 and 3. Some voids and unreacted DE could be observed in the sample with $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ of 1 (Fig. 8(a)). The dense amorphous glassy geopolymer matrices could be seen for $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ of 2 and 3 geopolymer (Fig. 8 (b) and (c)). The results of EDX analyses

of the DE geopolymers are also shown in Figs. 8 (a), (b) and (c). The major elements are Si and Al with the presence of a small amount of Na, K and Ca. Although the starting $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios of DE geopolymers were similar at 13.0, the ratios of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ for DE geopolymers obtained with different $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios were significantly different. The Si/Al ratios for DE geopolymers with Na/Al ratios of 1, 2 and 3 were 9.9, 13.9 and 17.4 respectively. The results suggested that the dissolubility of silica and alumina were dependent on Na/Al ratios [U. Rattanasak, P. Chindaprasit, Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, Mineral Engineering, 22, 12, 2009, 1073-1078]. It is shown here that using low Na/Al ratio (~ 1), the dissolubility of aluminates phases such as clay minerals in DE is favorable. The higher Na/Al ratios, the silicate phases are more susceptible in dissolving. In addition, it was shown that excess sodium ions were likely more localized in the geopolymer structure with higher used Na/Al ratio. The characteristic of EDX peaks of geopolymer pastes with Na/Al ratio of 2 was very similar to that of zeolite material which is a particulate material.

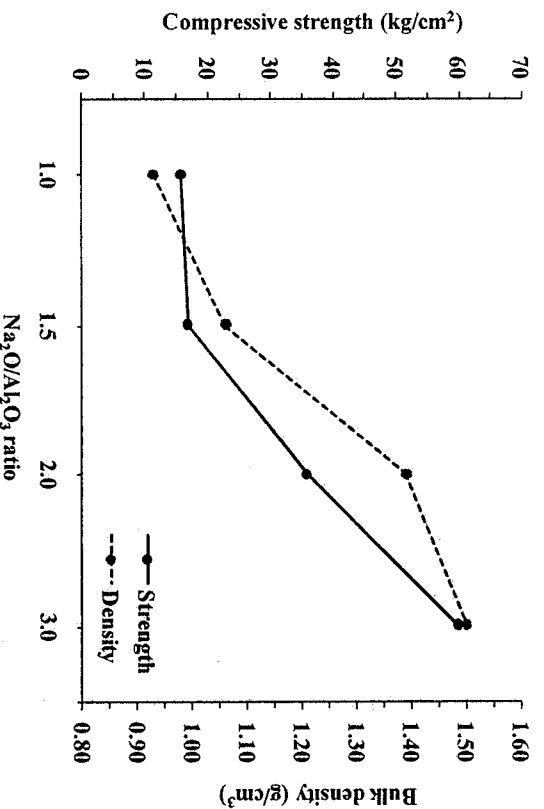


Fig. 7 Compressive strength and bulk density of geopolymer with different Na/Al ratios.

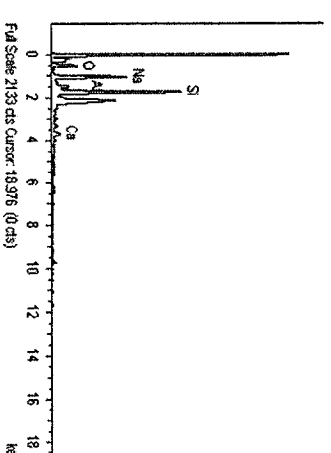
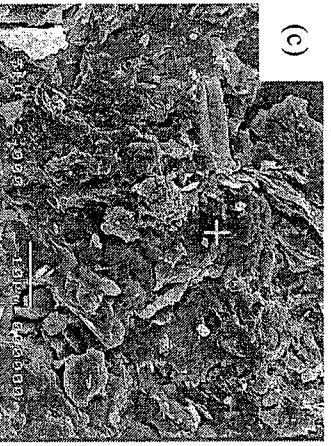
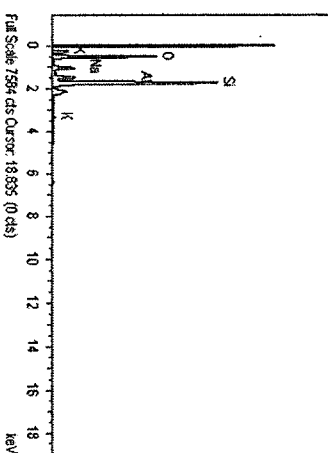
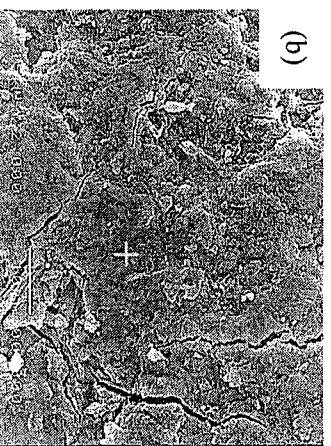
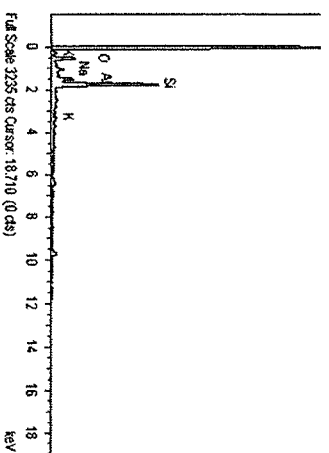
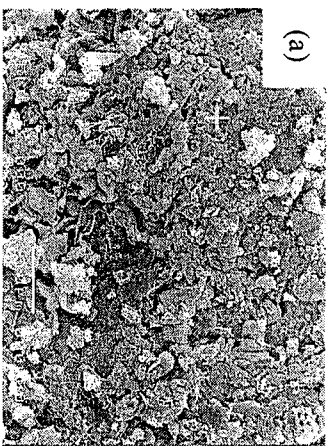


Fig. 8 SEM-EDX analyses of geopolymer pastes (a) $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1$ (b) $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$
(c) $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3$

Fig. 9 demonstrates the molecular bonding of geopolymer pastes at different $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios.

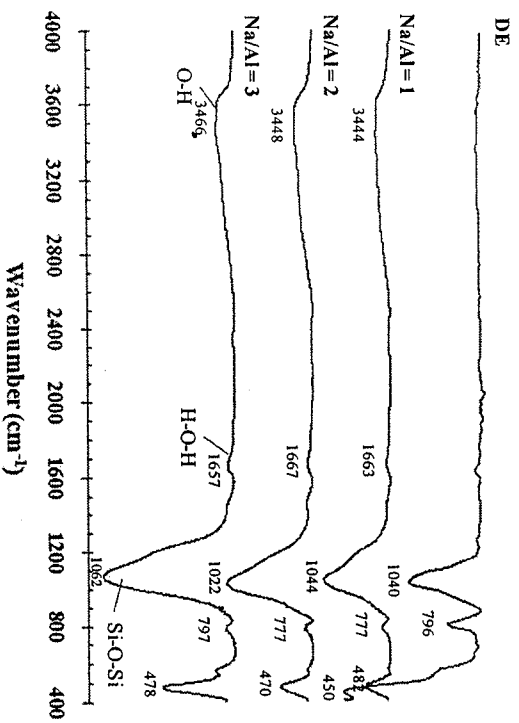
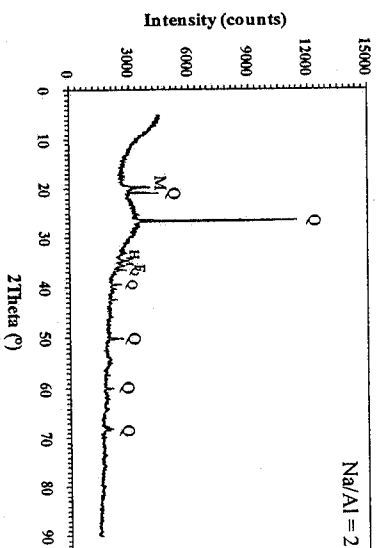
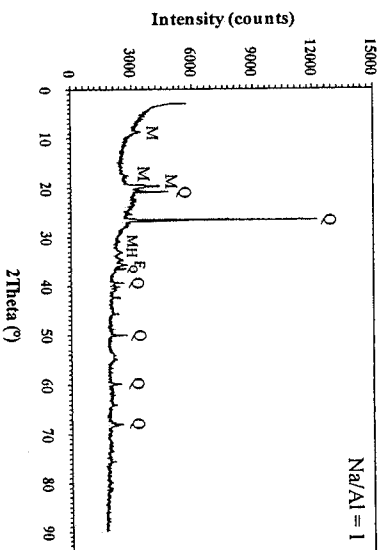
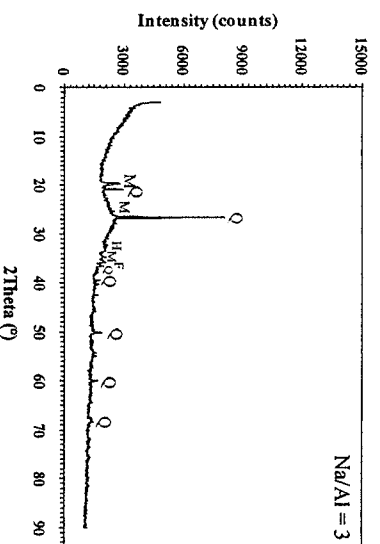


Fig. 9 IR spectra of diatomaceous earth and geopolymer with different Na/Al ratios.

Table 4 Peak area ratio from IR spectra of pastes at Si-O-Si stretching

Sample	Location of Si-O-Si (cm ⁻¹)	Corrected area	Peak area ratio
DE	1040	8.41	1
Na ₂ O/Al ₂ O ₃ = 1	1044	8.70	1.03
Na ₂ O/Al ₂ O ₃ = 2	1022	10.45	1.24
Na ₂ O/Al ₂ O ₃ = 3	1062	15.14	1.80





M=Muscovite, Q=Quartz, F=Magnetite

Fig. 10 XRD patterns of DE geopolymer pastes with different Na/Al ratios.

3.3 Effect of proportion of DE and RHA

The RHA was used to adjust the dissolution of silica phase. The Si/Al ratios of 16.6 to 33.5 of samples No. 15 to 17 are shown in Table 2. Fig. 11 shows the compressive strength and bulk density of geopolymer pastes made of the mixtures of DE800 and RHA. The strengths increased with the increase in the amount of RHA up to 40% of solid powder which corresponded to Si/Al ratio of 22.5. The strength increased to 2.4 MPa due to the proper obtained -Si-O-Al- bonds in geopolymeric structures. An increase in the replacement level of RHA beyond this level resulted in a decrease in the strength. This is due to the obtained -Si-O-Al- bonds of high Si/Al ratio which did not favor for a condensation as long chain polymeric structure [XXXXX]. Thus, they acted as defect sites and exerted a negative effect on strength of geopolymeric materials. Although, the strength increased, the density values were low at 925-1010 kg/m³ which were highly desirable.

Fig. 12 shows XRD patterns of geopolymer pastes with 0, 20, 40 and 60% RHA. The degree of crystalline structure decreased with the replacement of DE with RHA. This could be seen at the hump peaks around 18-30 degree increased with the increase in the RHA content as a result of increases in the glassy phase. The geopolymer pastes contained similar

crystalline phases to those of original DE and RHA. Quartz, muscovite, magnetite and cristobalite which were originally found in DE and RHA were undissolvable. No new crystalline phase was observed, but the increase in RHA content. The broad below 80 of 2 θ was evident with the increase in RHA content. This peak suggested the formation of a mesoporous material of poorly crystalline nature. [E. Alvarez-Ayuso, X. Querol]. The increase in the glassy phase of geopolymers was responsible for the increase in strength.

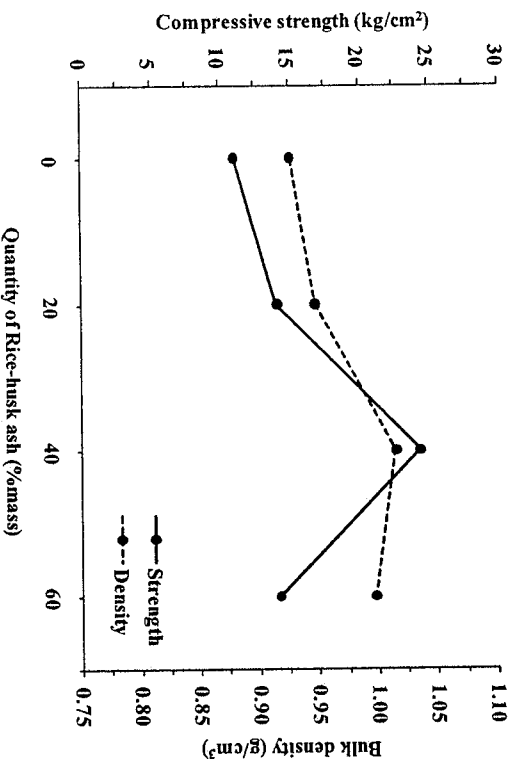
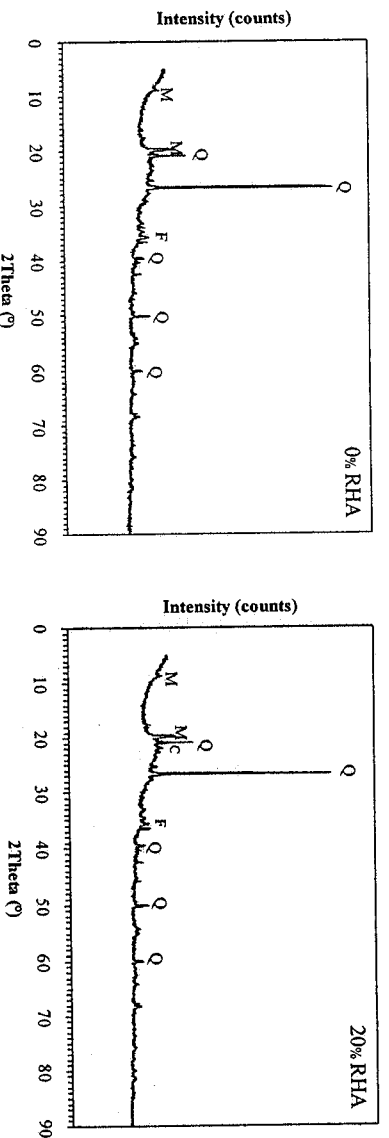
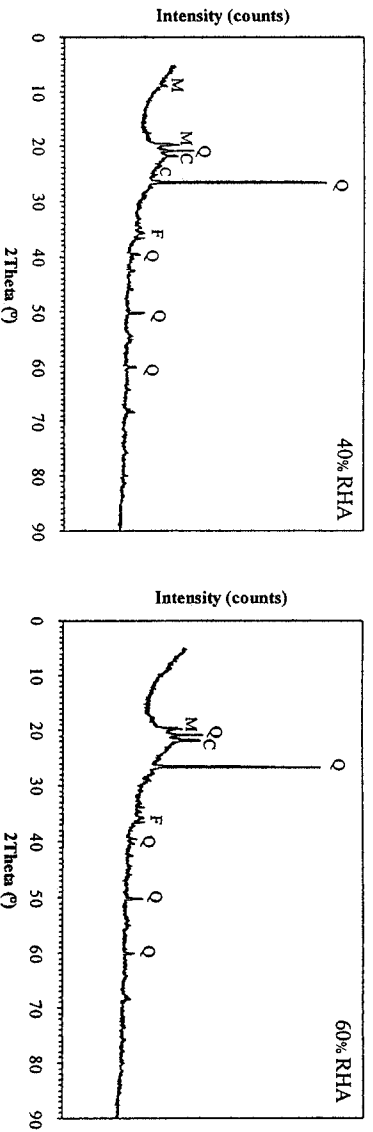


Fig. 11 Compressive strength and bulk density of geopolymers pastes with different RHA contents.





M=Muscovite, Q=Quartz, F=Magnetite, C=Cristobalite

Fig. 12 XRD pattern of geopolymer pastes with 0, 20, 40 and 60% RHA

4. Conclusions

Based on the results of investigation, the following conclusions could be drawn. DE could be used to produce lightweight geopolymeric material. The DE should be calcined and sieved to obtain fine reactive particles suitable for use as a source material. The fine DE was more reactive due to the increase in the surface area. This allowed greater contact of DE particle surface with alkali solution and hence a faster leaching of silica and alumina. The XRD patterns of the clained DE indicated the transformation of chemical structures of montmorillonite and kaolinite. The optimum calcinations temperature of diatomaceous warth was 800 °C. With regards to the types of alkali, geopolymer pastes activated with 10M NaOH possessed higher compressive strength than that with 10M NaOH. Curing temperature and duration also affected the properties of the geopolymers. The optimum curing temperature and time were 75 °C and 5 days. The Na₂O/Al₂O₃ ratios of the mixtures also affected the properties of the geopolymer pastes. At SiO₂/Al₂O₃ ratio of 13.0, the increase in Na₂O/Al₂O₃ ratios from 1.0 to 3.0 increased the compressive strength from 1.1 to 6.0 MPa. However, the bulk density values also increased from 0.93 to 1.5 g/cm³. To maintain the low density of geopolymer pastes, RHA was incorporated to the mixed.

Acknowledgements

This work was supported by Thailand Research Fund (TRF) (MRG5180350).

References

- [1]VM. Maholtra, 2002. Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology. ACI concrete International, 24(7): 22.
- [2]J. Daviddivit, 1994. Geopolymer: Man Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement. Journal of materials education, 16(2): 91-13.
- [3]A. Chaisena et al, 2004. Effect of thermal and acid treatments on some physic-chemical properties of Lampang diatomite. Journal Science Technology, 11: 289-299.
- [4] K. Pimraksa, P. Chindaprasirt, 2008. Lightweight bricks made of diatomaceous earth, lime and gypsum. Ceramic International, 35(1): 471-478.
- [5] American Society for Testing and Materials, 2001. ASTM C109 : Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars. Annual Book of ASTM Standard, 4: 83-87.
- [6]P. Chindaprasirt et al, 2006. A comparative study of preparation and properties of high calcium fly ash-based geopolymer. International Conference on pozzolan, concrete and geopolymer: 63-71.
- [7] H.Wang et al, 2005. Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. Colloids and Surfaces A: Physicochem, 268: 1-6.
- [8] T. Bakharev, 2005. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. Cement and Concrete Research, 35(6): 1224-1232.