

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา
เคมีชนิดปอซโซลานิกและโพลีเมอร์ไรเซชันของ
ดินเบาแหล่งลำปาง สำหรับการทำวัสดุมวลเบา

ผู้วิจัย

ผศ.ดร. เกศรินทร์ พิมรักษา

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5180350

ชื่อโครงการ: ศึกษาความสามารกในการเกิดปฏิกิริยาเคมีชนิดปอซโซลานิกและโพลีเมอร์เรซิ่นของดินเบาแหล่งล่ำปาง ส่ำหรับการทำวัสดุมวลเบา

ผู้นอภักวิจัย และสสณำบ้น: นางสว เกศรินทร์ พิมรักษ

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

อีเมล: kpimrakp@science.cmu.ac.th, kpimraksak@hotmail.com

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุที่มีน้ำหนักเบาจากดินเบาแหล่งล่ำปางโดยใช้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโพลีเมอร์เรซิ่น เนื่องจากว่าในดินเบาล่ำปางมีองค์ประกอบทางแร่เป็นแร่ดินเหนียวชนิดและมีประกอบด้วยซิลิกาที่อยู่ในรูปกึ่งสัณฐานอยู่ด้วยดินเบาล่ำปางจึงจัดได้ว่าเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยสามารถให้ซิลิกอนและอะลูมิเนียมไออนได้ ในสภาวะที่เป็นเบส ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดซิลิกาไฮดรต หรืออะลูมิเนียมซิลิกาไฮดรต และสารเชื่อมประสานชนิดอะลูมิเนียมซิลิกาเจลโพลีเมอร์ได้ ส่ำหรับการสังเคราะห์วัสดุเจลโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักเบา ได้ใช้วัตถุดิบตั้งต้นสองชนิดคือดินเบาแหล่งล่ำปางและเถ้ากลบ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาในช่วง 13.0-33.5 และของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาในช่วง 0.7-3.0 ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยของมวลและเอนเียของดินเบา อุนหนุมีในการเผาแคลเซิตดินเบา ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์อัตราส่วนระหว่างดินเบาและเถ้ากลบ อุนหนุมีและเวลาในการบ่มวัสดุ โดยศึกษาสมบัติเชิงกลเชิงความร้อนและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเจลโพลีเมอร์ จากผลการทดลองพบว่าวัสดุเจลโพลีเมอร์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าความแข็งแรงทนต่อการกดอัดมากกว่าวัสดุที่กระตุ้นด้วยสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยอุนหนุมีและเวลาบ่มวัสดุที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและ 5 วันตามลำดับ และมีอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 13 และมีอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 1 ซึ่งจะทำให้ได้

วัสดุซิลิโคนโพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นโดยรวมเท่ากับ 880 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความแข็งแรงทนต่อการกดอัดเท่ากับ 1.5 เมกะปาสคาล และเมื่อผสมเข้ากับดินเหนียวในอัตราส่วน 40ต่อ60 ซึ่งจะทำให้ให้อัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาเปลี่ยนไปเป็น 22.5 และอัตราส่วนระหว่างไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเป็น 1.7 จะทำให้ค่าความแข็งแรงทนต่อการกดอัดเพิ่มขึ้นเป็น 2.4 เมกะปาสคาล และมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 1,010 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งแรงและความแน่นตัวของวัสดุซิลิโคนโพลีเมอร์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินา โดยความแน่นตัวจะลดลงเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวลดลง สำหรับการสังเคราะห์วัสดุที่มาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์คืออุณหภูมิในการเผาแคลไฮดรอกไซด์ดินเหนียว ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์ อลูมินาและเวลาในบ่ม จากผลการทดลองพบว่าวัสดุที่มีน้ำหนักเบาที่สุดที่ได้จากการใช้ดินเหนียวที่ผ่านการเผาแคลไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 0.3 โดยใช้อุณหภูมิในการบ่มที่ 130 องศาเซลเซียส ทำให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงทนต่อการกดอัดเท่ากับ 10 เมกะปาสคาล และมีความหนาแน่นโดยรวมเท่ากับ 870 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากการพิจารณาจากสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ทั้งสองวิธีดังกล่าว พบว่าวัสดุที่บดตั้งต้นชนิดดินเหนียวเหมาะกับการเตรียมวัสดุที่มีน้ำหนักเบาโดยใช้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากกว่าปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันในทุกกรณี

คำหลัก : ดินเหนียว, แคลเซียมไฮดรอกไซด์, ปฏิกิริยาปอซโซลานิก, แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต, ปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน, โครงสร้างคล้ายซีโอไลต์

Abstract**Project Code : MRG5180350****Project Title : Study on chemical reactivity of pozzolanic and polymerization reactions of Lampang diatomaceous earth for a production of lightweight materials****Investigator : Miss Kedsarin Pimraksa****E-mail Address : kpimrakp@science.cmu.ac.th, kpimraksa@hotmail.com****Project Period : 2 Years****Abstract:**

Pozzolanic and polymerization reactions of diatomaceous earth (DE) from Lampang province were studied for the syntheses of lightweight materials. Due to semicrystalline silica and some clay minerals containing in Lampang diatomaceous earth (LDE), LDE was, therefore, classified as pozzolanic material. In alkaline environment, silicon and aluminum ions from LDE are spontaneously dissolved that hence the developments of various hydrated silicate/aluminosilicate products and geopolymeric aluminosilicate binders. For 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. Thermal conductivity of the material was also measured. 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/m^3 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 $1,010 \text{ kg/m}^3$. The densification of geopolymer material was dependent on $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio in that its structure was less dense with a decrease in the ratio. For the syntheses of pozzolanic reaction products, calcinations temperature of DE, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content, NaOH concentration, curing time and temperature were studied. The lightweight material made of LDE calcined at 500°C and CaO/SiO_2 molar ratio of 0.3 and cured at 130°C for 6 hours has compressive strength and bulk density of 10 MPa and 870 kg/m^3 . Considered in terms of mechanical and thermal properties, LDE as starting material for lightweight material production was more favorable to pozzolanic reaction than polymerization reaction in all cases.

Keywords : Diatomaceous earth, Hydrated lime, Pozzolanic reaction, Calcium silicate hydrate, Polymerization, Zeolite-like structure

1. Executive summary

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ดินเบา (Diatomaceous earth) เป็นแร่ที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) อยู่สูงอาจมากกว่า 85% มักพบในพื้นที่ที่เป็นทะเลน้ำจืดและน้ำเค็ม ดินเบาเกิดมาจากการที่สาหร่ายไดอะตอมได้ตั้งอาชิลิกาที่ละลายอยู่ในน้ำไปสร้างเป็นโครงสร้างของตัวมันเอง โดยซิลิกาจะอยู่ในรูปโอปาลีนฐาน (Opaline silica: $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบหลวมๆ ทำให้อนุภาคของดินเบามีรูพรุนมาก เมื่อไดอะตอมตายลงจะเกิดการทับถมกันเกิดเป็นแหล่งดินเบา สามารถพบดินเบาได้ทั่วไปตามแหล่งน้ำที่มีอายุเก่าแก่ แหล่งที่พบมากที่สุดได้แก่ อเมริกา ซิสี ยุโรป ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น เกาหลี และจีน ซึ่งดินเบาแต่ละแหล่งจะมีคุณภาพแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากอายุของการทับถมและชนิดของน้ำ ส่งผลทำให้ดินเบามีความบริสุทธิ์ และระดับของความบริสุทธิ์ (Degree of crystallinity) ที่แตกต่างกัน และปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลเป็นอย่างไรมากต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของดินเบา สำหรับในประเทศไทยมีแหล่งดินเบาที่สำคัญอยู่ที่จังหวัดลำปาง โดยมีกำลังสำรองถึงประมาณร้อยละ 65% ซึ่งคาดว่าจะยังเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญอีกหนึ่งสำหรับอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง ในการศึกษาขั้นต้นจากการได้จับสนับสนุนการวิจัยจากโครงการ IPUS พบว่าดินเบาที่พบในลำปางมาจากการสะสมทับถมในทะเลน้ำจืด มีสิ่งเจือปนค่อนข้างมากทั้งสารอินทรีย์ และแร่ดิน แต่อย่างไรก็ตามดินเบาแหล่งลำปางมีองค์ประกอบของซิลิกามากกว่า 65% [1] ในปัจจุบันนี้การใช้ประโยชน์ของดินเบาในต่างประเทศ ใช้เป็นตัวช่วยกรอง (Filter aid) ตัวดูดซับ (Absorbent) และวัดอุณหภูมิความร้อน (Thermal insulator) เนื่องมาจากการมีรูพรุนมากในดินเบา ใช้เป็นผงขัดละเอียด (Mild abrasive) เนื่องมาจากการมีความแข็งมาก โดยมีราคาขายอยู่ที่ประมาณต้นละหนึ่งหมื่นบาทในประเทศไทย ส่วนการใช้ฐานในประเทศไทยใช้เส้นทางเกษตรกรรมโดยใช้ดูดซับของเสียในฟาร์มกุ้ง โดยมีราคาขายอยู่ที่ต้นละสองพันบาทในประเทศไทย

เนื่องมาจากดินเบามีลักษณะเฉพาะที่ไม่เหมือนแร่ดินโดยทั่วไปในแง่การมีรูพรุนสูง มีความถ่วงจำเพาะต่ำมากประมาณ 1 [2] ทำให้ดินเบาได้รับความสนใจที่จะนำมาพัฒนาให้สามารถทำวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำในงานวิจัยนี้ โดยคาดว่าวัสดุที่ได้จะมีค่าการนำความร้อนต่ำและสามารถที่จะพัฒนาให้เป็นวัสดุสำหรับงานก่อสร้าง เช่น อิฐและกระเบื้องที่มีสมบัติฉนวนความร้อนที่มีราคาถูกได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการช่วยประหยัดพลังงานในการก่อสร้างและ

ในชีวิตประจำวัน และพัฒนาให้ใช้งานด้านการดูดซับ (Absorption) สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

การทำวัสดุก่อสร้งดังกล่าวสามารถทำได้โดยวิธีการเผาผนึกแบบดั้งเดิม (Conventional solidification หรือ Sintering) ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานค่อนข้างมาก เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิเผาสูงถึง 1200 องศาเซลเซียส ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการทำวัสดุก่อสร้งโดยใช้วิธีใหม่ที่ใช้พลังงานในการ Solidification ต่ำกว่าวิธีการเผา นั่นคือในช่วงอุณหภูมิประมาณ 80 – 200 องศาเซลเซียส การใช้อุณหภูมิต่ำลงในการทำวัสดุก่อสร้งจะใช้หลักการละลายของสารตั้งต้น (Dissolution) และการตกตะกอนใหม่ (Reprecipitation) กลายเป็นสารประกอบที่สามารถเชื่อมประสานหรือวัสดุซีเมนต์ (Cementitious materials) ได้ โดยปฏิกิริยาเคมีที่ควบคุมการเกิดวัสดุซีเมนต์นี้จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้มี 2 ประเภท คือ 1) ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) และ 2) ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) โดยวัตถุดิบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเหล่านี้ได้ง่ายต้องมีความเป็นผลึกน้อยเพื่อให้เกิดการละลายได้ดี จากงานวิจัย [3, 4] พบว่าดินเบามีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยากับโลมทำให้ได้สารประกอบใหม่ที่มีสมบัติในการเชื่อมประสานได้ เนื่องจากองค์ประกอบหลักที่มีในดินเบาคือซิลิกา จึงสามารถถูกชะละลายได้ง่ายจากสารจำพวกอัลคาไลต์ และอัลคาไลต์เอริทที่มีสมบัติเป็นด่าง โดยมีปัจจัยมากมาย ได้แก่ ความเข้มข้นของชนิดของต่างอุณหภูมิและความดัน และการปรับสภาพวัตถุดิบทางกลและความร้อน ที่คาดว่าจะส่งผลเป็นอย่างมากต่อการชะละลาย และจะส่งผลต่อเนื่องต่อขั้นตอนการเกิดวัสดุซีเมนต์ โดยคาดว่าในงานวิจัยนี้จะสามารถสังเคราะห์วัสดุซีเมนต์ได้หลายชนิดและมีสมบัติที่สามารถประยุกต์ใช้ในงานหลากหลาย เช่น ทำหน้าที่เป็นวัสดุฉนวนความร้อน และทำหน้าที่ในการยึดจับ (Encapsulation) ของเสียที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ดังนั้นการทราบถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของดินเบาจะทำให้สามารถผลิตวัสดุที่มีสมบัติทางกลและความร้อนที่ดีได้ และองค์ความรู้ใหม่ที่จะได้จากงานวิจัยนี้คือ การทราบและเข้าใจถึงขอบเขต (Boundary) และขีดจำกัดระหว่างความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของดินเบา และความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งในปัจจุบันนี้ยังไม่มีความวิจัยได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาทั้งสอง

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและโพลิเมอร์ไรเซชันของดินเบาในสภาวะที่ถูกกระตุ้นด้วยไฮดรอกไซด์ และ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้การปรับสภาพด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 80 – 200 องศาเซลเซียส

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

1.3.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะ (Characteristics) อย่างละเอียดของดินเบาแห้งสำหรับใช้ทำ องค์ประกอบทางแร่ องค์ประกอบทางเคมี ความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะ และความสามารถในการละลาย (Solubility)

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของการกระจายขนาดอนุภาคของดินเบา และการปรับสภาพด้วยความร้อนของดินเบา (Thermal treatment) ที่มีความสามารถในการละลายของดินเบา โดยใช้ค่าการนำไฟฟ้าและการวัดปริมาณไอออนเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการละลาย

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโฟลิมเมอร์ไรเซชันของดินเบา โดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้

1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในช่วง 80-200 องศาเซลเซียสที่ต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโฟลิมเมอร์ไรเซชันของดินเบา โดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้

1.3.5 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโฟลิมเมอร์ไรเซชันของดินเบา โดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้

1.3.6 ศึกษาอิทธิพลของความดันที่มีต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเบา โดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้

1.3.7 ศึกษาลักษณะเฉพาะของสารประกอบใหม่ที่ได้นั้นเชิงลึก เพื่ออธิบายกลไกของการเกิดสารประกอบใหม่ และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติวัสดุที่ได้นั้นลักษณะเฉพาะของสารประกอบใหม่

1.3.8 เขียนแผนผังอะแกรมของการเกิดสารประกอบใหม่ที่ได้นั้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโฟลิมเมอร์ไรเซชันของดินเบาแห้งสำหรับ

2. วัตถุประสงค์

2.1 ศึกษาอิทธิพลของความละเอียดและการปรับสภาพด้วยความร้อนของดินเบาแห้งต่อมวลสำรองที่ต่อความสามารถในการละลายของดินเบาแห้ง

2.2 ศึกษาอิทธิพลของความละเอียดและการปรับสภาพด้วยความร้อนของดินเบาแห้งต่อมวลสำรองและความเข้มข้นของตัวเร่ง อุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มร้อน อัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา และอัตราส่วนระหว่างดินเบาแห้งต่อมวลเม็ดแกลบ ที่มีผลต่อสมบัติ

ทางกลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไร้เซชัน และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอีพอกซีโมร่าจากดินเอดะดอมลำปาง

2.3 ศึกษาอิทธิพลของความละเอียด, ปริมาณโสม์หรืออัตราส่วนของ CaO/SiO_2 , ความเข้มข้นของต่าง, อุณหภูมิและเวลาในการบ่ม ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุก่อสร้างที่ทำจากดินเอดะดอมลำปาง

3. วิธีการทดลอง

3.1 การศึกษาปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไร้เซชันของดินเบาแหล่งลำปาง

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย

1. ดินเอดะดอมลำปางจากอำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง
2. แก้วแกลบได้จากการเผาแกลบข้าวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง

3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

4. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

5. สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งมีองค์ประกอบของ Na_2O 13.44%, SiO_2 32.39% และน้ำ 54.17% โดยน้ำหนัก

6. น้ำผสมตัวอย่างใช้น้ำกลั่น

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

1. แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร
2. เครื่องชั่งแบบดิจิทัลอลูมิเนียมละเอียด 0.01 กรัม รุ่น ES-1000HA บริษัท ZEPPER
3. เต้าเผาไฟฟ้า บริษัท Lenton Thermal Design Limited
4. ตู้อบไฟฟ้า บริษัท Memmert
5. เครื่องผสมจีโอพอลิเมอร์เพสต์
6. เครื่องสั่น
7. เครื่องบดชนิด Ball Mill
8. เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตริ์ (Atomic Absorption Spectrometer (AAS)) Model-670
9. เครื่องทดสอบกำลังอัด (Universal Compressive Strength)
10. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Laser Particle Size Analyzer Malvern Instrument) รุ่น Mastersizer S
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์ (Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-ray Micro Analysis) รุ่น

JSM-6335F

12. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction (XRD), Broker รุ่น D8 Advance)
13. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence (XRF, Horiba รุ่น Mesa-soon)

14. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ
(Simultaneous Thermal Analysis (STA) รุ่น 449C NETZSCH

15. เครื่องฟูริเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์
(Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR))

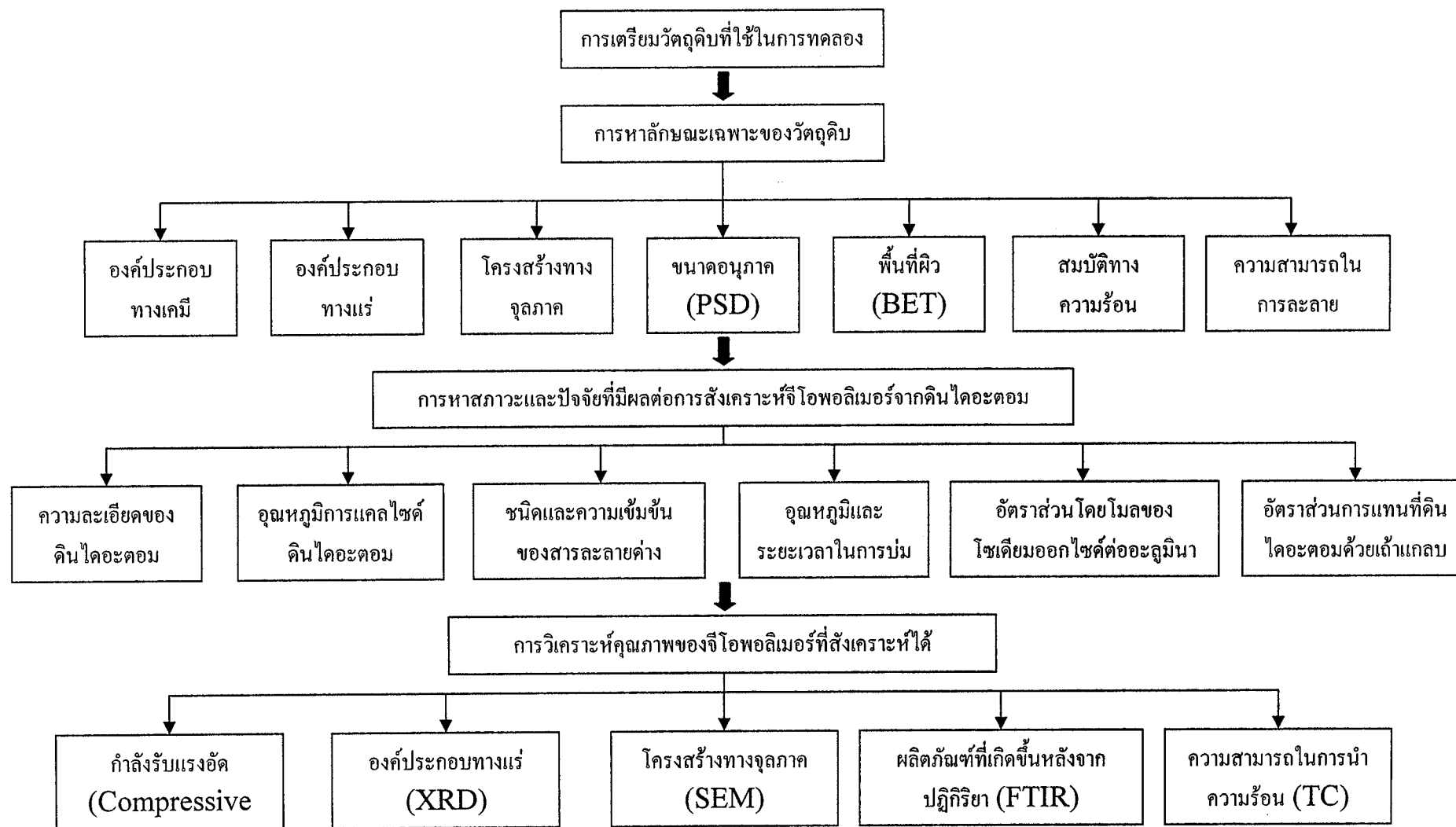
16. เครื่องวิเคราะห์การนำความร้อน (Thermal Conductometer) ตาม ASTM C5930-01

3.1.3 การทดสอบอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางกลของเฟสดี

วัสดุซีโอพอลิเมอร์เฟสดีที่ได้จากการสังเคราะห์ขนาด 5×5×5 เซนติเมตร จะถูกทดสอบหาต่ำความหนาแน่น วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค กลไกปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นของซีโอพอลิเมอร์ และทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยมีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่

1. ความละเอียดของดินโดอะตอมที่ทำการศึกษาคือ ดินโดอะตอมที่ไม่ัดขนาด, ช่วงขนาดใหญ่ (กว้างตะแกรง 80 เมช), ขนาดกลาง (ผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และต่ำกว่า 200 เมช) และขนาดเล็ก (ผ่านตะแกรง 325 เมช)
2. อุณหภูมิการปรับสภาพดินโดอะตอมด้วยความร้อนที่ใช้ในการศึกษาคือ 400, 600, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส
3. ชนิดของต่างที่ใช้ศึกษาคือ สารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 4, 6, 8, 10 และ 12 โมลาร์
4. อุณหภูมิการบ่มร้อนที่ศึกษาคือ 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาการบ่ม 1, 2, 3, 4 และ 5 วัน
5. อัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่ศึกษาคือ 1, 2 และ 3

6. ผลของการแทนที่ดินโดอะตอมลำปางด้วยแก้วแคลบโดยมีอัตราส่วนการแทนที่ของแก้วแคลบที่ศึกษาคือ 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.1.4 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.4.1 ดินไดอะตอม

ดินไดอะตอม (Diatomaceous Earth) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จาก อ.แม่พระ จ.ลำปาง ซึ่งเป็นพื้นที่ศักยภาพของดินไดอะตอม เนื่องจากมีองค์ประกอบเป็นซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก อีกทั้งยังมีปริมาณสารองเหลืออยู่มากถึง 200 ล้านตัน จึงเหมาะสมต่อการพัฒนาและนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนได้ ในการทดลองได้ทำการศึกษาขนาดดินไดอะตอมที่ไม่ผ่านการแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 80, 140, 200 และ 325 เมช เพื่อใช้สำหรับศึกษาอิทธิพลของความสามารถและเอชียดที่มีต่อความสามารถในการละลายและกำลังรับแรงอัดของซีโอพอลิเมอร์เฟสส์ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม คือ

- (1) ดินไดอะตอมที่ไม่ทำการคัดขนาด ใช้สัญลักษณ์ ODE
- (2) ดินไดอะตอมที่คัดตะแกรงขนาด 80 เมช ใช้สัญลักษณ์ R80DE
- (3) ดินไดอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และคัดตะแกรงขนาด 200 เมช ใช้สัญลักษณ์ R200DE
- (4) ดินไดอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช ใช้สัญลักษณ์ P325DE

จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลของการแคลเซียมไดอะตอมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ 400, 600, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถในการจะละลายเอาไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมออกมาจากวัสดุดิบ โดยหากปริมาณของซิลิกอนและอะลูมิเนียมมีค่ามาก แสดงว่าวัสดุดิบดังกล่าวมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างได้ดี ซึ่งส่งผลให้ไดมอโนเมอร์เพื่อเกิดปฏิกิริยาซีโอพอลิเมอร์ เรซินชั้นในปริมาณมาก ซึ่งวิธีการเตรียมตัวอย่างได้อ้างอิงจากสภาวะที่ใช้ในการผสมซีโอพอลิเมอร์ โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. ชั่งวัสดุดิบที่เตรียมไว้ 20 กรัม
2. เติมสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเท่ากับ 1:5)
3. กวนสารละลายให้เข้ากันด้วย Magnetic Stirrer เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
4. กรองเอาส่วนของเหลวไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของซิลิกอนและอะลูมิเนียม ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี (AAS)

3.1.4.2 แก้วแกลบ

แก้วแกลบ (Rice Husk Ash) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการเผาแกลบข้าวที่ได้มาจากโรงสีข้าวในจังหวัดเชียงใหม่ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นทำการ

บดแห้งโดยใช้เครื่องบดชนิด Ball Mill เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำเอาแก้วกลบที่ได้จากการเตรียมจะถูกใช้
ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ดินไคอะคอมด้วยแก้วกลบต่อไป

3.1.4.3 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

งานวิจัยนี้ได้ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ดที่ผลิตโดยบริษัท E. Merck, Darmstadt, Germany โดยผสมเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำกลั่นเพื่อให้มีความเข้มข้น 4, 6, 8, 10 และ 12 โมลาร์

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีและส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)	ร้อยละโดยน้ำหนัก		ความหนาแน่น (g/cm ³)	ปริมาตร 1000 ml.	
	Na ₂ O	H ₂ O		NaOH (g)	H ₂ O (g)
4	14.07	85.93	1.137	160	977
6	19.86	80.14	1.208	240	968
8	25.32	74.68	1.264	320	944
10	30.40	69.60	1.316	400	916
12	35.20	64.80	1.364	480	884

3.1.4.4 สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

งานวิจัยนี้ได้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ด ที่ผลิตโดยบริษัท E. Merck, Darmstadt, Germany โดยผสมเกล็ดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำกลั่น เพื่อให้มีความเข้มข้น 4, 6, 8, 10 และ 12 โมลาร์

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีและส่วนผสมของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)	ร้อยละโดยน้ำหนัก		ความหนาแน่น (g/cm ³)	ปริมาตร 1000 ml.	
	K ₂ O	H ₂ O		KOH (g)	H ₂ O (g)
4	19.50	80.50	1.149	224	925
6	27.41	72.59	1.226	336	890
8	34.22	65.78	1.309	448	861
10	42.07	57.93	1.331	560	771
12	48.34	51.66	1.390	672	718

3.1.4.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต
งานวิจัยนี้จะใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตชนิดที่ 2 ตาม มอก. 433-2539 โดยมี
องค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของโซเดียมซิลิเกต

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
Silica (SiO ₂)	32.39
Sodium oxide (Na ₂ O)	13.44
Water (H ₂ O)	54.17
Mole ratio (Na ₂ O/SiO ₂)	1:2.45

3.1.5 ระบบสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา
ในการทดลองจะมีตัวแปรสำหรับการหาปริมาณของส่วนผสมทั้งหมด 5 ตัวแปร ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์คือ

$$XXDEXX \quad XXM(Na, K) \quad (XX)$$

สัญลักษณ์จะมีความหมายดังนี้

ตัวเลข “XX” หน้า DE หมายถึง อัตราส่วนของดินไคอะตอมที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100

ตัวเลข “XX” หลัง DE หมายถึง อัตราส่วนการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยแก้วแอลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100

ตัวเลข “XX” หน้า M หมายถึง ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ 4, 6, 8, 10 และ 12 โมลาร์

สัญลักษณ์ (Na, K) หมายถึง ชนิดของสารละลายต่างที่ใช้ในการทดลอง คือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ตัวเลข “XX” ใน () หมายถึง อัตราส่วนโดยโมลระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาที่ใช้ในการศึกษาค้นนี้คือ 1, 2 และ 3

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ เช่น "80DE20 10M(Na) (1)" หมายถึง จีโอพอลิเมอร์ฟอสต์ที่ใช้ดินเโดอะตอมและแก้วแกลบเป็นสารตั้งต้นในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ เป็นตัวกระตุ้นและมีส่วนโซเดียมโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 1

3.1.6 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

3.1.6.1 การศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพดินเโดอะตอมที่มีต่อการกำลัรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ฟอสต์

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาผลของความละเอียดของดินเโดอะตอมและอุณหภูมิการแคลเซชันเโดอะตอมที่มีต่อการกำลัรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ โดยรายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1.5 การผสมจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) เท่ากับ 1.23 หลังจากการผสมและเทแบบทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน เมื่อครบกำหนดเวลา นำตัวอย่างออกจากตู้อบและถอดแบบในวันถัดไป โดยทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่อายุ 7 วัน ก่อนทำการทดสอบกำลัรับแรงอัด ความละเอียดและอุณหภูมิการแคลเซชันเโดอะตอมที่เหมาะสมจะถูกนำมาใช้ในการเตรียมวัตถุดิบเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆต่อไป

3.1.6.2 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการกำลัรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ฟอสต์

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 โมลาร์ และอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.23 จะถูกใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์ฟอสต์ โดยมีองค์ประกอบทางเคมีโดยโมลของส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 3.4 ตั้งแต่ตัวอย่างที่ 1 ถึง 10 ตัวอย่างที่อายุ 7 วัน หลังจากการถอดแบบจะถูกวัดขนาดและชั่งน้ำหนักก่อนทำการวิเคราะห์กำลัรับแรงอัด

3.1.6.3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มร้อนที่มีต่อการกำลัรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

การศึกษาส่วนนี้ได้ใช้ส่วนผสม 100DE0 10M (Na) (1) ดังตารางที่ 3.4 ในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์ฟอสต์ หลังจากการผสมและหล่อแบบตัวอย่างจะถูกทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาที่แตกต่างกัน 1, 2, 3, 4 และ 5 วัน เมื่อครบกำหนดเวลานำตัวอย่างออกจากตู้อบและถอดแบบใน

วันถัดไป เมื่อตัวอย่างมีอายุ 7 วันจะทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความหนาแน่นก่อนทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.1.6.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$)

การทดลองจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ เป็นตัวกระตุ้น อัตราส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาที่ทำการศึกษาคือ 1, 2 และ 3 โดยมีองค์ประกอบทางเคมีโมลของส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 3.4 ตั้งแต่ตัวอย่างที่ 4, 11 และ 12 อัตราส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเพิ่มปริมาณของสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ในส่วนผสม

หลังจากการผสมและหล่อแบบตัวอย่างจะถูกทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน เมื่อครบกำหนดจึงนำตัวอย่างออกจากตู้อบและถอดแบบในวันถัดไป หลังจากการถอดแบบทั้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 7 วัน จึงทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนที่จะทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.1.6.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ดินโตะตอมด้วยเถ้าแกลบ

ในการทดลองจะทำการศึกษาผลของปริมาณการแทนที่ดินโตะตอมด้วยเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 และ 0:100 โดยน้ำหนัก เพื่อให้อัตราส่วนของโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาแตกต่างกัน ในการผสมจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.23 หลังจากหล่อแบบทำการบ่มที่ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน โดยมีองค์ประกอบทางเคมีโมลของส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 4 ตัวอย่างที่ 4 และ 13 ถึง 17

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของส่วนผสมซีโอพอลิเมอร์เฟสส์

Mix. No.	Symbol	Mole ratio				W/B
		SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Na ₂ O/ Al ₂ O ₃	Na ₂ O/SiO ₂	H ₂ O/Na ₂ O	
1	100DE0 4M(Na) (1)	13	0.68	0.05	19.53	0.8
2	100DE0 6M(Na) (1)	13	0.79	0.06	16.39	0.8
3	100DE0 8M(Na) (1)	13	0.90	0.07	13.94	0.8
4	100DE0 10M(Na) (1)	13	1.00	0.08	12.16	0.8
5	100DE0 12M(Na) (1)	13	1.09	0.08	10.86	0.8
6	100DE0 4M(K) (1)	13	0.66*	0.05*	19.53*	0.8
7	100DE0 6M(K) (1)	13	0.76	0.06	16.20	0.8
8	100DE0 8M(K) (1)	13	0.84	0.06	13.96	0.8
9	100DE0 10M(K) (1)	13	0.94	0.07	11.89	0.8
10	100DE0 12M(K) (1)	13	1.02	0.08	10.53	0.8
11	100DE0 10M(Na) (2)	13	2.00	0.15	11.57	0.8
12	100DE0 10M(Na) (3)	13	3.00	0.23	11.38	0.8
13	80DE20 10M(Na) (1)	16.18	1.23	0.08	12.16	0.8
14	60DE40 10M(Na) (1)	22.63	1.69	0.07	12.16	0.8
15	40DE60 10M(Na) (1)	33.55	2.45	0.07	12.11	0.8
16	20DE80 10M(Na) (1)	75.00	5.40	0.07	12.04	0.8
17	0DE100 10M(Na) (1)	1414.81	101.00	0.07	12.04	0.8

*หมายเหตุ ตัวอย่างที่ 6 - 10 คำนวณจากอัตราส่วนของ (Na₂O+K₂O)/Al₂O₃, (Na₂O+K₂O)/SiO₂ และ H₂O/(Na₂O+K₂O)

3.2 การศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเบาแหล่งลำปาง

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย

1. ดินเบาลำปางหรือดินเบาโคอะคอมไมท์
2. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂)
3. ยิปซัม (CaSO₄·2H₂O)
4. อะซีโตน(Acetone)
5. น้ำกลั่น

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

1. เครื่องอัดอัฐไฮดรอลิก
2. ตู้อบแห้งชนิดไฟฟ้า

3. ชุดตะแกรงร่อนขนาดมาตรฐาน 80 Mesh บริษัท Bunsektirul รุ่น JIS Style wire screen
4. เครื่องร่อนตะแกรงร่อนมาตรฐาน บริษัท Retseh
5. เครื่องอัดไอน้ำ(Autoclave),Pressing sterilizer model no 1941x
6. อุปกรณ์วัดความยาว Vernier caliper รุ่น NAUF-CH Stainless steel
7. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด บริษัท A&D Company limited รุ่น D 0001
8. เครื่อง Compressive strength tester
9. ชุดอุปกรณ์มอริอู
10. ถังมือ
11. ผ้าปิดจมูก
12. กระบอบอกดวง
13. SEM, Field emission scanning electron microscope รุ่น JSM-5910LV ของ บริษัท jeol
14. XRD, X-ray diffraction
15. XRF, X-ray fluorescence

3.2.3 วิธีการทดลอง

3.2.3.1 การหาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ

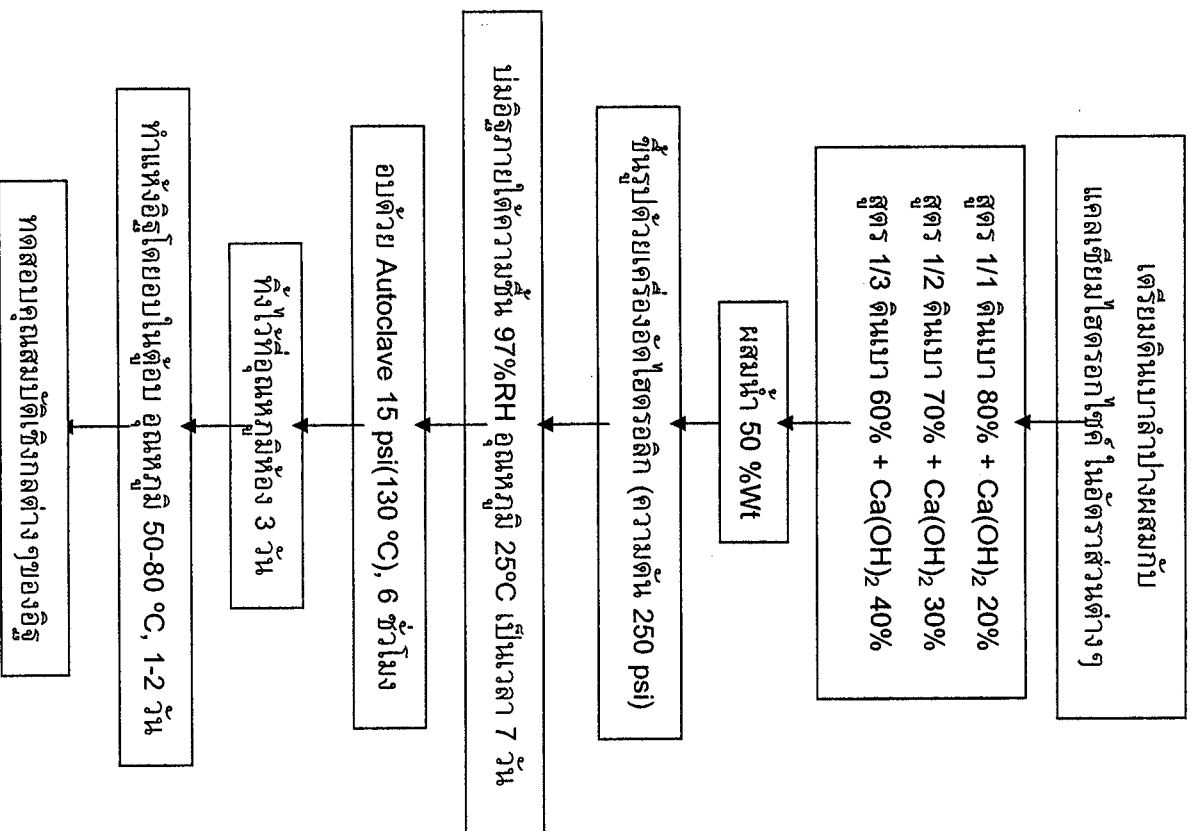
- 1) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินเบา
- 2) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินเบาที่ผ่านการเผาแล้ว

3.2.3.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่เหมาะสมในการลดความหนาแน่นของ

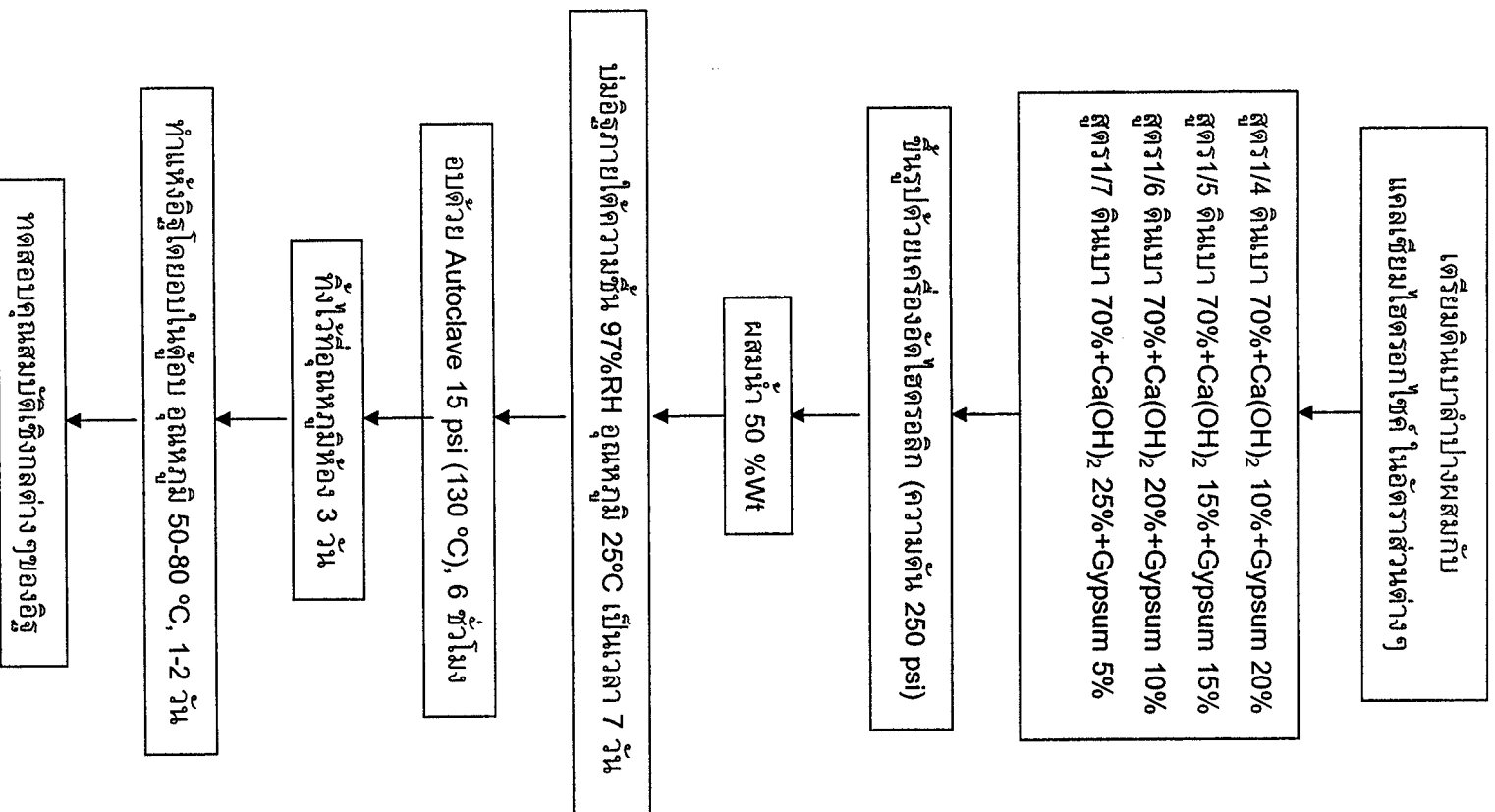
อิฐมวลเบาไดอะตอมไมท์

- 1) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์
- 2) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณยิปซัม
- 3) ศึกษาอิทธิพลของแรงอัดในการขึ้นรูปอิฐมวลเบา
- 4) ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการ Autoclave
- 5) ศึกษาอิทธิพลของความดันหรืออุณหภูมิในการ Autoclave

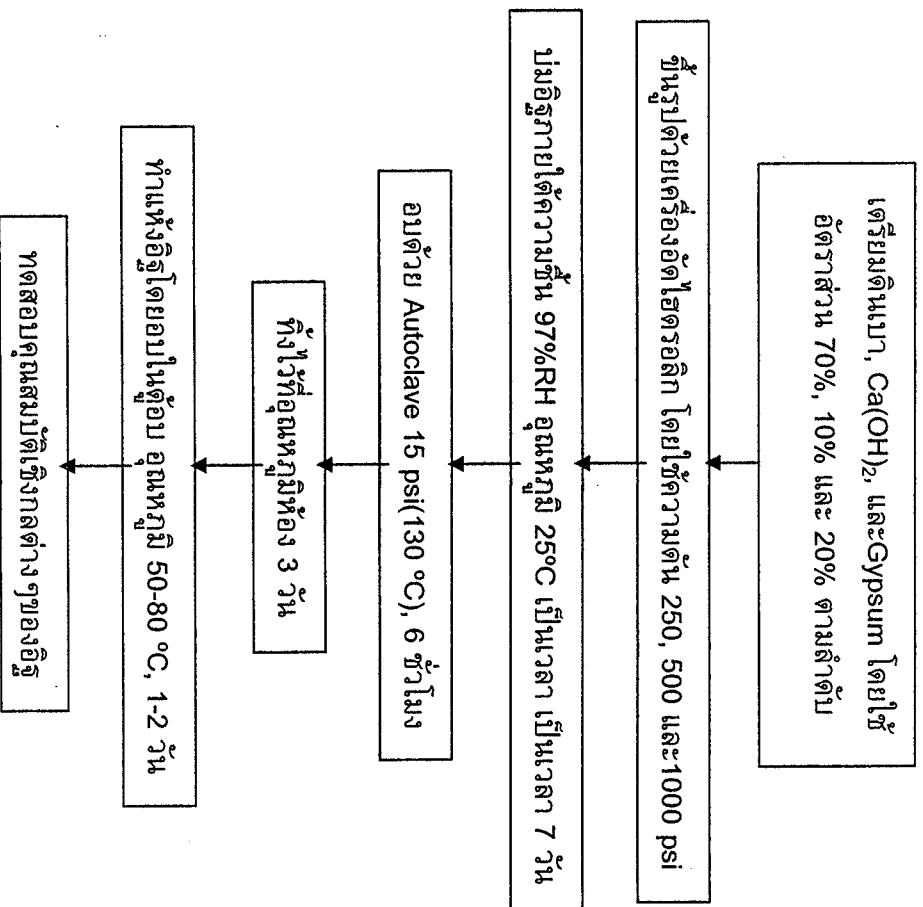
1) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรืออัตราส่วนของ CaO/SiO_2



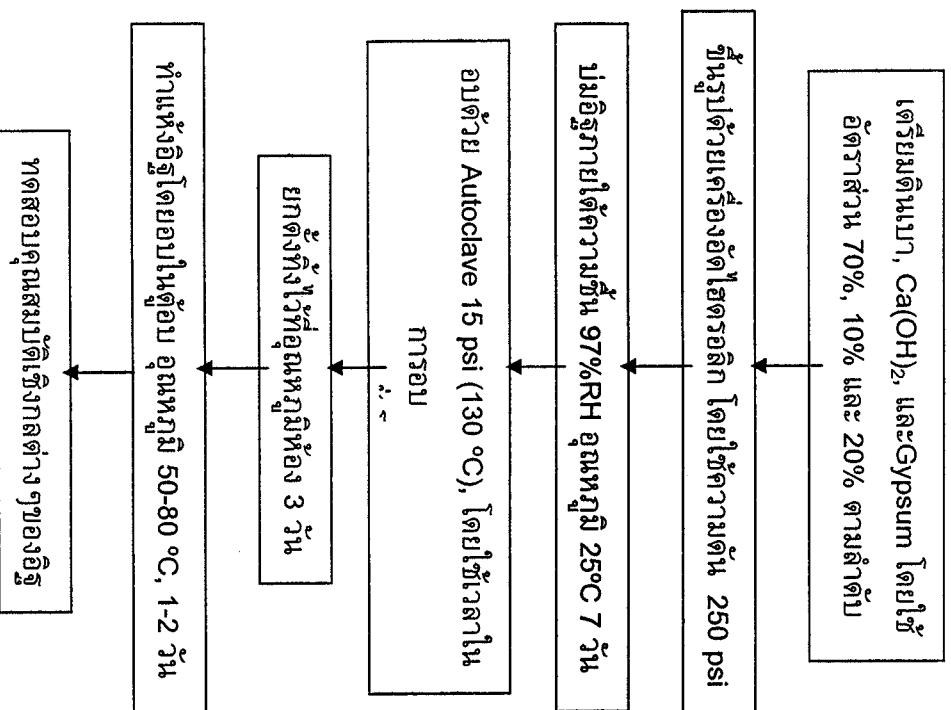
2) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณยิปซัม



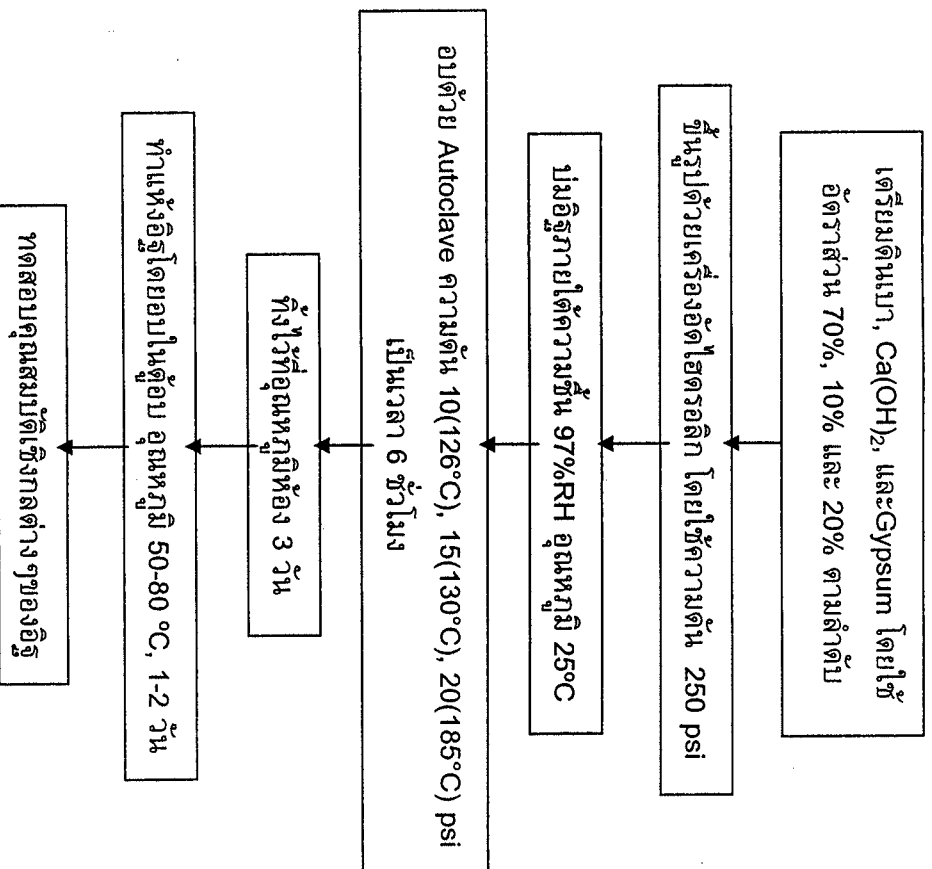
3) ศึกษาอิทธิพลของแรงอัดในการขึ้นรูปอิฐมวลเบา



4) ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการ Autoclave



5) ศึกษาอิทธิพลของความดันหรืออุณหภูมิในการ Autoclave



3.2.3.3 วิธีการทดลองอย่างละเอียด

1) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรืออัตราส่วนของ



- 1) นำดินเผามาใส่ถาด calcine
- 2) จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 °C และร่อนผ่านตะแกรงที่ 80 เมช
- 3) นำดินเผา, Ca(OH)_2 และยิปซัมมาผสมให้เข้ากัน โดยเขย่าเป็นเวลา 5 นาที
- 4) นำวัตถุดิบที่ทำการผสมเรียบร้อยแล้วใส่ในถาด
- 5) ตวงน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเท่ากับ 60 % โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ
- 6) ทำการผสมวัตถุดิบน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยสังเกตได้จากสีของเนื้อวัตถุดิบ โดยควรจะเป็นสีเดียวกันทั้งหมด

7) จากนั้นนำวัตถุดิบที่เตรียมทำการกดอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยใช้แรงกดประมาณ 250 psi

8) เมื่อขึ้นรูปเสร็จแล้วนำไปเก็บในกล่อง เพื่อเก็บความชื้นให้อิฐเป็นเวลา 7 วัน

9) จากนั้นนำอิฐเข้าไปอบในหม้อ Autoclave โดยให้มีความดัน 15 psi เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

10) เมื่อ Autoclave เสร็จแล้ว นำอิฐมาวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 วัน
11) แล้วจึงสามารถนำอิฐไปทดสอบสมบัติต่างๆได้

2) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮปซั่ม

ทำการทดลองตามรายละเอียดข้างต้น และทำการเพิ่มปริมาณไฮปซั่ม โดยไฮปซั่มที่อบ
ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

3) ศึกษาอิทธิพลของแรงอัดในการขึ้นรูปอิฐมวลเบา

ทำการทดลองตามรายละเอียดข้างต้น โดยเปลี่ยนความดันในการกดอัดของเครื่องอัดไฮ
ดรอลิกเป็น 500 psi และ 1000 psi

4) ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการ Autoclave

ทำการทดลองตามรายละเอียดข้างต้น โดยเปลี่ยนระยะเวลาในการ Autoclave เป็น 3
ชั่วโมง และ 9 ชั่วโมง

5) ศึกษาอิทธิพลของความชื้นหรืออุณหภูมิในการ Autoclave

ทำการทดลองตามรายละเอียดข้างต้น โดยเปลี่ยนความชื้นในการ Autoclave เป็น 10
psi และ 20 psi

4. ผลการทดลอง

ผลการศึกษาปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของดินเบาแหล่งลำปาง

4.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะของดินไคอะตอมลำปางและถ้ำเกลบที่ใช้ในการสังเคราะห์โอพอลิเมอร์

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมลำปางที่ยังไม่ผ่านการแคลไซต์และคัตขนาด (ODE), ดินไคอะตอมที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช (R80DE), ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และค้ำตะแกรงขนาด 200 เมช (R200DE), ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช (P325DE) และถ้ำเกลบที่ผ่านการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (RHA) ซึ่งพบว่าดินไคอะตอมที่ไม่ค้ำขนาดมีองค์ประกอบเป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นหลัก โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา (Si/Al) เท่ากับ 11.98 นอกจากนี้ยังพบเฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ในปริมาณที่ใกล้เคียงกับอะลูมินาอีกด้วย และเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมที่มีประสิทธิภาพและอะลูมินาจึงทำให้ดินไคอะตอมมีคุณสมบัติการเป็นสารพอสโซลาน (pozzolanic material) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างควมเข้มข้นสูงในปฏิกิริยาจิโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ ส่วนถ้ำเกลบจะมีองค์ประกอบเป็นซิลิกาส่วนใหญ่และมีอะลูมินาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่งผลให้อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาสูงถึง 1,317.5

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมที่ผ่านการค้ำขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนพบว่า ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช มีปริมาณซิลิกามากกว่าดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และค้ำตะแกรงขนาด 200 เมช และดินไคอะตอมที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช ($\text{SiO}_{2\text{P325DE}} > \text{SiO}_{2\text{R200DE}} > \text{SiO}_{2\text{R80DE}}$) ตามลำดับ ในทางกลับกัน ดินไคอะตอมที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช มีปริมาณอะลูมินามากกว่าดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และค้ำตะแกรงขนาด 200 เมช และดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช ($\text{Al}_2\text{O}_{3\text{R80DE}} > \text{Al}_2\text{O}_{3\text{R200DE}} > \text{Al}_2\text{O}_{3\text{P325DE}}$) ทั้งนี้เนื่องจากดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช ประกอบด้วยเปลือกของไคอะตอมที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช จึงมีปริมาณซิลิกาสูงกว่าดินไคอะตอมขนาดอื่น โดยดินไคอะตอมที่ค้ำตะแกรง 80 เมช ประกอบด้วยแร่ดินซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคของไคอะตอมจึงทำให้ดินไคอะตอมที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช มีปริมาณอะลูมินาซึ่งเป็นองค์ประกอบของแร่ดินในปริมาณที่มากกว่าดินไคอะตอมขนาดเล็กละเอียด

ตารางที่ 4.1 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของดินไดอะตอมที่ยังไม่ผ่านการแคลไซต์และแก้ว
แคลบที่ผ่านการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

Chemical composition	ODE	R80DE	R200DE	P325DE	RHA
SiO ₂	77.46	66.48	75.52	79.76	85.25
Al ₂ O ₃	10.97	13.18	12.15	10.81	0.11
Fe ₂ O ₃	9.08	17.59	9.98	7.42	0.18
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
K ₂ O	1.07	1.12	1.04	0.94	1.80
CaO	0.35	0.47	0.39	0.21	0.79
MgO	0.31	0.36	0.20	0.12	0.31
TiO ₂	0.41	0.43	0.44	0.42	0.03
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81
SO ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
Mn ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29
LOI	0.35	0.37	0.29	0.32	10.29
Molar SiO ₂ /Al ₂ O ₃ ratio	11.98	8.52	10.50	12.09	1317.5

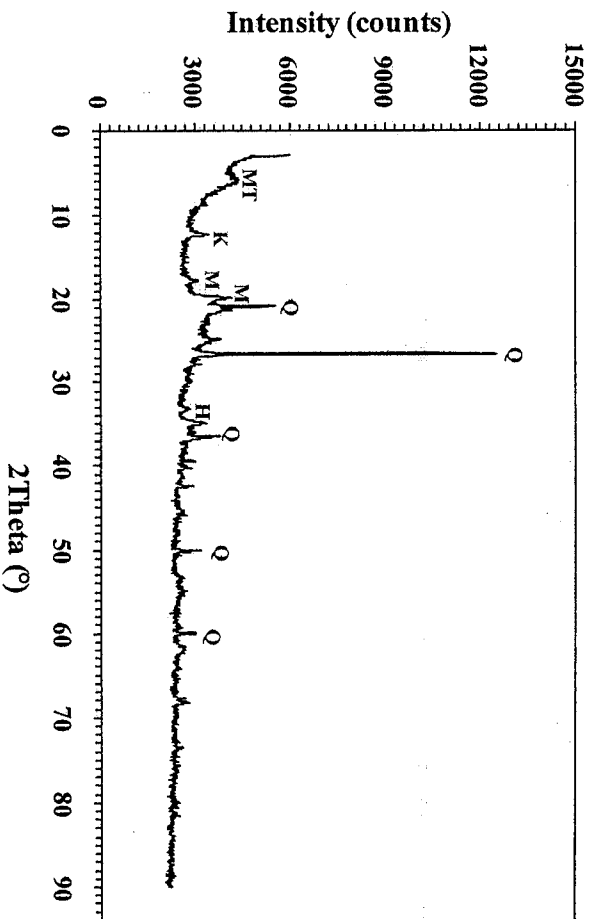
4.1.2 องค์ประกอบทางแร่

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินไดอะตอมและแก้วแคลบ ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าดินไดอะตอมและแก้วแคลบมีองค์ประกอบทางแร่ที่เหมือนกัน คือ ควอตซ์ (Quartz; SiO₂) ซึ่งจะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26 องศา เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางแร่ของดินไดอะตอมยังพบว่ามีแร่ดินชนิดมัสโคไวท์ (Muscovite: M), เคโอลินไนท์ (Kaolinite: K) และมอนท์โมริลโลไนท์ (Montmorillonite: MT) เจือปนอยู่เพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินไดอะตอมที่พบว่ามีส่วนประกอบอยู่เพียงร้อยละ 10.97 โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของแร่ (XRD Quantitative) พบว่าดินไดอะตอมมีองค์ประกอบของแร่มัสโคไวท์, ควอตซ์และเฮมาไทท์ (Hematite: H) ร้อยละ 69.9, 25.1 และ 5 โดยน้ำหนัก

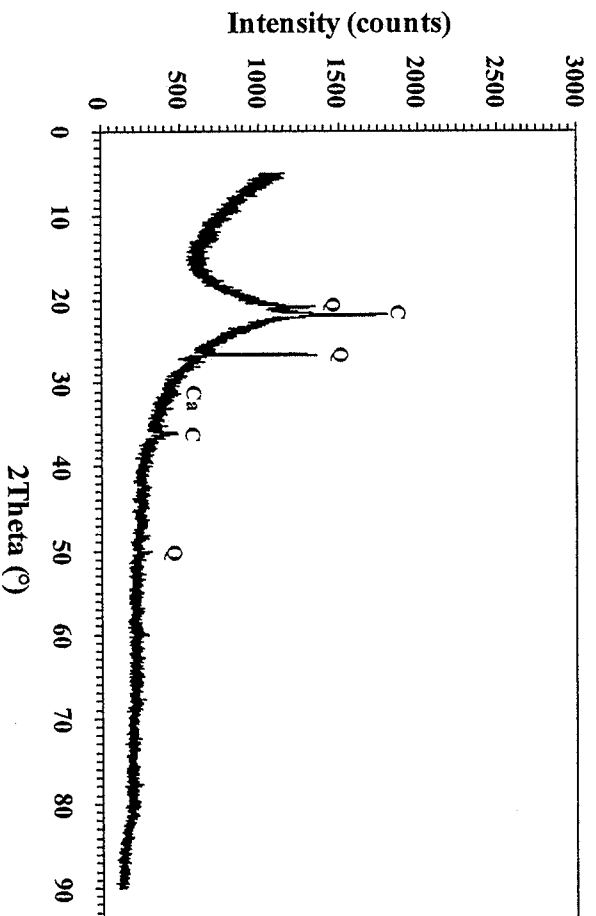
ถ้าแก้วแคลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.2 จะแสดงถึงส่วนที่เป็นผลึก คือ ควอตซ์ และคริสโตบาลีท์ (Cristobalite: C) ซึ่งอาจเกิดจากอุณหภูมิในการ

เผาสูงเกินไป และใช้เวลานาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของซิลิกาอสัณฐานเป็นผลึก [5] นอกจากนี้ยังพบส่วนที่เป็นอสัณฐานของซิลิกาในถ้ำแกลบอีกด้วย

พล็อตปรากฏในช่วง 2θ เท่ากับ $20 - 30$ องศา จะแสดงถึงลักษณะความเป็นอสัณฐาน (amorphous) และกึ่งผลึก (semi-crystalline) ของซิลิกาที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาจากรูปถ้ำแกลบจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าดินไดอะตอม เนื่องจากมีความเป็นอสัณฐานมากกว่าดินไดอะตอม



รูปที่ 4.1 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของดินไดอะตอม



รูปที่ 4.2 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของถ้ำแกลบ

เมื่อ MT = Montmorillonite ($(\text{Na,Ca})_{0.3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)

M = Muscovite ($\text{KAl}_2\text{Si}_2\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$)

K = Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)

Q = Quartz (SiO_2)

H = Hematite (Fe_2O_3)

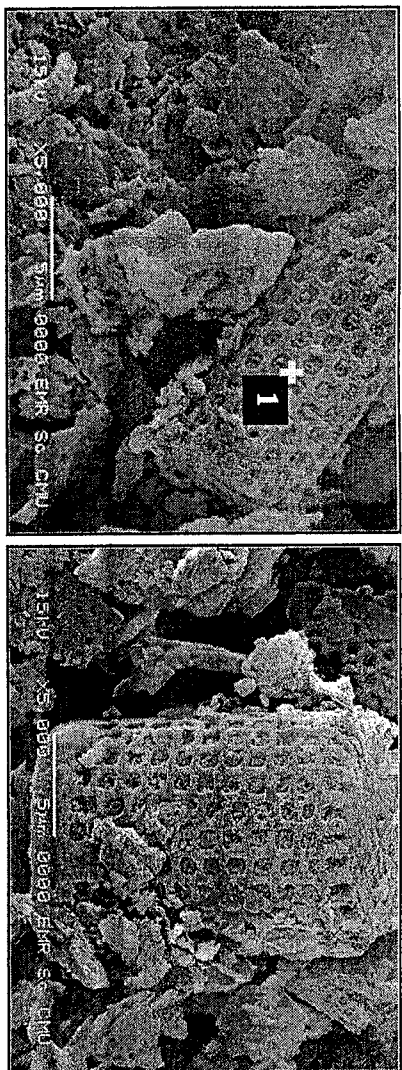
C = Cristobalite (SiO_2)

Ca = Calcite (CaCO_3)

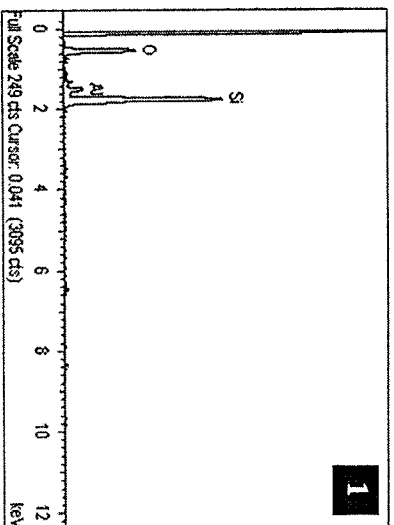
4.1.3 รุปร่างอนุภาค

ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของดินไคอะตอมและเข้าแถบที่ผ่านการแคลเซตที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยรูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของดินไคอะตอมซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของดินที่มีลักษณะเป็นแผ่นอยู่รวมกับอนุภาคของสารวัยแคลไซต์ด้วยจำพวกไคอะตอมที่มีลักษณะเป็นรูปทรงระบอกและมีรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งเป็นเหตุผลทำให้ดินไคอะตอมมีค่าความหนาแน่นมวลรวมน้อยเมื่อเทียบกับดินชนิดอื่นๆ และเมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy dispersive x-ray spectrometry; EDS) ดังรูปที่ 4.3 (ข) และตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละน้ำหนัก (weight%) และร้อยละโดยอะตอม (atomic%) ของธาตุในตำแหน่งที่วิเคราะห์ โดยจะเห็นว่า พื้นที่ของไคอะตอมบริเวณหมายเลข 1 มีองค์ประกอบเป็นซิลิกอนและอะลูมิเนียม โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 8.9 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอม

รูปที่ 4.4 (ก) แสดงรูปร่างอนุภาคของเข้าแถบ โดยพบว่าลักษณะภายนอกมีพื้นผิวที่ขรุขระ ส่วนภายในดังรูป (ข) มีลักษณะเป็นโครงสร้างแหที่สานและซ้อนทับกันอยู่เป็นจำนวนมาก จึงทำให้เข้าแถบมีพื้นที่ผิวและความพรุนตัวสูง ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยซีเอกซ์ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 (ค) และตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละโดยน้ำหนัก (weight%) และร้อยละโดยอะตอม (atomic%) ของธาตุในตำแหน่งที่วิเคราะห์ โดยพบว่ามีส่วนประกอบเป็นซิลิกอนเพียงอย่างเดียว ซึ่งต่างกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่มีทั้งซิลิกาและอะลูมินา ทั้งนี้เนื่องจากอะลูมินาที่มีในเข้าแถบมีปริมาณเพียงร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก จึงทำให้มีโอกาสพบมากที่จะตรวจพบ

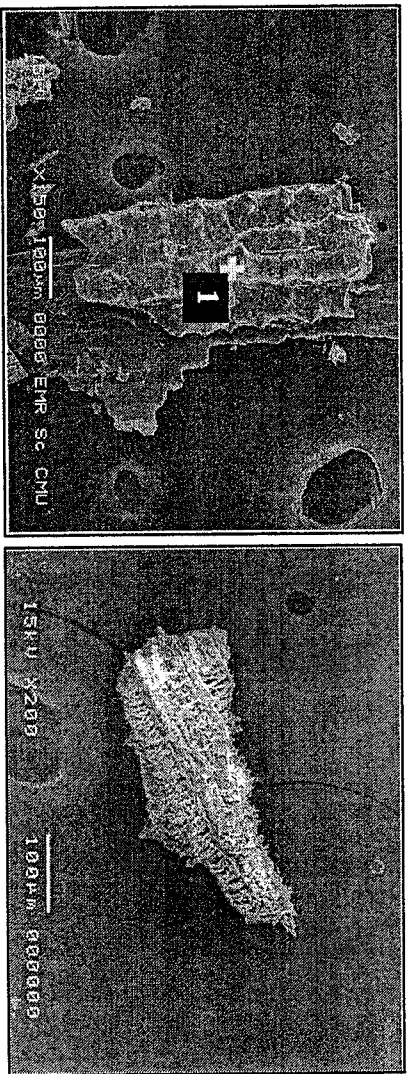


ก. อนุภาคของไดอะตอมที่มีรูพรุนจำนวนมากอยู่รวมกับอนุภาคของดิน



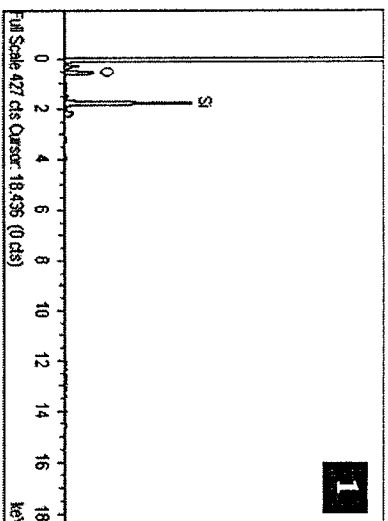
ข. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของดินไดอะตอมที่ไม่ผ่านการแคลไซต์



ก. พื้นผิวของเก้าแกลบที่ขรุขระ

ข. โครงสร้างหนที่สานกันอยู่ภายใน



ก. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของแก้วแอลบที่ผ่านการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 700 °C

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมและแก้วแอลบเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS

Element	DE		RHA	
	weight%	atomic%	weight%	atomic%
Si	24.87	16.08	49.42	35.76
Al	2.83	1.91	-	-
O	72.29	82.02	50.58	64.24
Si/Al	8.90	8.14	-	-

4.1.4 ขนาดอนุภาค

ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของดินไคอะตอมและแก้วแอลบแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยพบว่า ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของดินไคอะตอมที่ไม่ทำการคัซขนาด, ดินไคอะตอมที่คัซขนาดและแกรขนาด 80 เมช, ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรขนาด 140 เมช และคัซตะแกรขนาด 200 เมช, ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรขนาด 325 และแก้วแอลบที่ผ่านการบดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 73, 350, 89, 19 และ 62 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของดินไคอะตอมที่คัซตะแกรขนาด 80 เมช มีค่ามากเนื่องจากอนุภาคที่คัซตะแกรขนาดใหญ่เป็นอนุภาคของทรายซึ่งมีขนาดใหญ่ โดยการร่อนดินไคอะตอมผ่านตะแกรขนาด 325 เมช จะได้ดินไคอะตอมที่มีขนาดเล็กลงถึง 19 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นผลดีต่อการทำปฏิกิริยาซีโอพอลิเมอร์ เซชันเนื่องจากวัตถุดิบที่มีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวสัมผัสมีค่าสูงกว่าวัตถุดิบขนาดหยาบ ดังนั้นจึงถูกหุ้และละลายด้วยสารละลายต่างได้ดี และเกิดเป็นมอนอเมอร์ปริมาณมากเพื่อใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาพอลิ-เมอร์เซชันต่อไป

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ และเข้าแถบ

วัตถุติด	ขนาดอนุภาค (μm)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย* (μm)
ODE	1-100	73
R80DE	184-594	350
R200DE	76-112	89
P325DE	3.3-42	19
RHA	0.5-300	62

หมายเหตุ *Distribution type: Volume mean diameters D[4.3]

4.1.5 พื้นที่ผิว

พื้นที่ผิวของดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาดแตกต่างกันและเข้าแถบที่ผ่าน การบดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าพื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาค กล่าวคือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ โดย P325DE มีขนาด อนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19 ไมโครเมตร ซึ่งเล็กกว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ R200DE และ R80DE ที่มีค่าเท่ากับ 89 และ 350 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่งผลให้พื้นที่ผิวของ P325DE มีค่าสูงที่สุด ถึง 61.28 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้เข้าแถบ (RHA) ยังมีพื้นที่ผิวสูงกว่าดินไคอะตอมที่ไม่ ผ่านการคัดขนาด (ODE) เนื่องจากเข้าแถบมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับดินไคอะตอมที่มีทั้งซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลักอีกทั้งยังพบมวลรวมขนาดเล็กละเอียด เช่น หินทราย รวมอยู่กับดินไคอะตอม จึงทำให้เข้าแถบมีพื้นที่ผิวสูงกว่าดินไคอะตอม

4.1.6 ความถ่วงจำเพาะ

ผลการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัตถุติดตามมาตรฐาน ASTM D854-92 ดัง ตารางที่ 4.4 พบว่าค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะของดินไคอะตอมมีค่าลดลงเมื่อความละเอียดของ ดินไคอะตอมเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช จะไม่มีมวล รวมขนาดละเอียด เช่น หินทราย หลงเหลืออยู่ อีกทั้งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกาซึ่งเป็น โมเลกุลขนาดเล็กและมีมวลโมเลกุลต่ำ จึงทำให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ดินไคอะตอมขนาดอื่น โดยดินไคอะตอม ODE มีค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.25 และ เข้าแถบมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.08

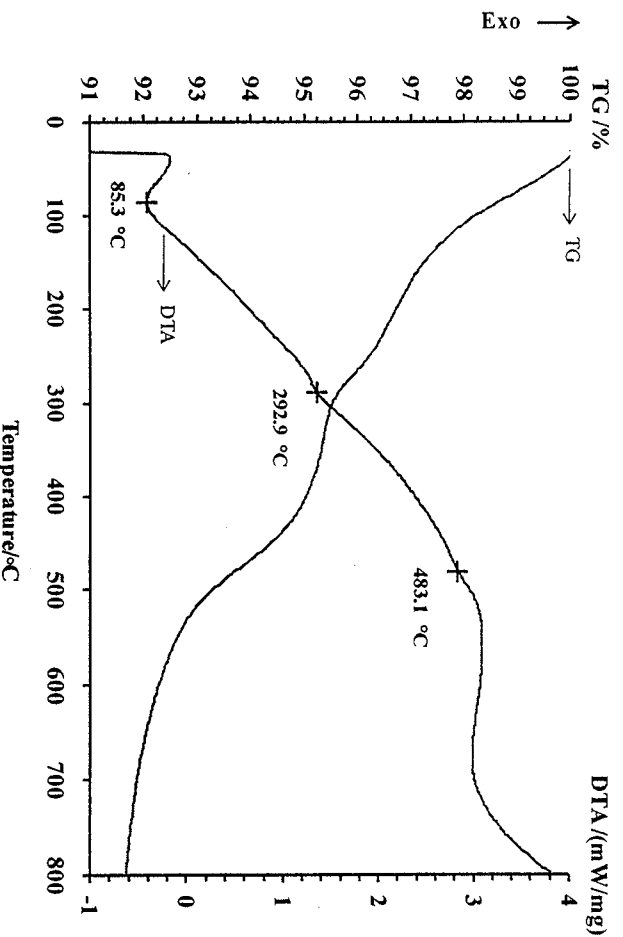
ตารางที่ 4.4 ความถ่วงจำเพาะและพื้นที่ผิวของดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาดแตกต่างกันและเข้าแถบ

ชนิดของวัตถุดิบ	สัญลักษณ์	ความถ่วงจำเพาะ	พื้นที่ผิว (m^2/g)
ดินไคอะตอมที่ไม่ผ่านการตัดขนาด	ODE	2.25	42.99
คั้งตะแกรงขนาด 80 เมช	R80DE	2.34	27.50
ผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และคั้ง 200 เมช	R200DE	2.32	41.56
ผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช	P325DE	2.19	61.28
เข้าแถบที่ผ่านการบด 2 ชั่วโมง	RHA	2.08	46.82

4.1.7 สมบัติทางความร้อน

สมบัติเชิงความร้อนของวัตถุดิบถูกวิเคราะห์ออกมาในรูปของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง ในระหว่างการให้ความร้อนอุณหภูมิของตัวอย่างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ 2 ลักษณะ คือ ดูดความร้อน (endothermic) และคายความร้อน (exothermic) ซึ่งกราฟที่ได้บ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งอาจพิจารณาได้จากน้ำหนักที่สูญเสียไป (mass loss) ของเส้นกราฟ TG

ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของดินไคอะตอม ดังรูปที่ 4.5 พบว่า ปฏิกิริยาพิคการดูดความร้อน (endothermic) ที่อุณหภูมิ 85.3 และ 292.9 องศาเซลเซียส ซึ่งสัมพันธ์กับการสูญเสียน้ำหนักที่มีค่าร้อยละ 3.32 และ 1.35 โดยการเปลี่ยนแปลงของพิคที่อุณหภูมิดังกล่าวเกิดขึ้นจากน้ำที่พื้นผิวของอนุภาค (adsorbed water) ระเหยออกไป นอกจากนี้ยังพบพิคดูดความร้อนที่อุณหภูมิ 483.1 องศาเซลเซียส อันเป็นผลมาจากการระเหยน้ำออกไปจากโครงสร้างของแร่ (dehydration) ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 3.72



รูปที่ 4.5 TG - DTA เทอร์โมแกรมของดินไคอะตอม

4.1.8 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมาจากดินไคอะตอมที่ยังไม่ผ่านการแคลไซต์และคัตขนาด (ODE) และถ้าแก่กลบที่ผ่านการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง (RHA) แสดงดังตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่าถ้าแก่กลบมีความสามารถในการละลายซิลิกอนออกมาได้มากกว่าดินไคอะตอม เนื่องจากเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางแร่ดังหัวข้อที่ 4.1.2 พบว่าถ้าแก่กลบมีความเป็นอัสฐานมากกว่าดินไคอะตอมจึงทำให้สารประกอบต่างๆ ถูกชะละลายออกมาได้ง่ายขึ้น ในทางตรงข้ามดินไคอะตอมจะถูกชะละลายอะลูมิเนียมออกมาในปริมาณที่มากกว่าถ้าแก่กลบ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี กล่าวคือ ดินไคอะตอมและถ้าแก่กลบมีปริมาณซิลิกาและอะลูมิเนียมร้อยละ 77.46, 10.97 และ 85.25, 0.11 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งดินไคอะตอมมีปริมาณซิลิกาน้อยกว่าถ้าแก่กลบและมีอะลูมิเนียมในปริมาณที่มากกว่า จึงทำให้ดินไคอะตอมมีความเข้มข้นของซิลิกอนที่ถูกชะละลายออกมาน้อยกว่าถ้าแก่กลบและมีค่าความเข้มข้นของอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมามากกว่าถ้าแก่กลบ

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของดินไคอะตอมที่มีความละเอียดแตกต่างกัน พบว่าปริมาณซิลิกอน (Si) ที่ถูกชะละลายด้วยต่างของดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช (P325DE) มีค่ามากที่สุด เนื่องจากดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช มีความละเอียดสูงกว่าดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และต่างตะแกรงขนาด 200 เมช (R200DE) และดินไคอะตอมที่ต่างตะแกรงขนาด 80 เมช (R80DE) ตามลำดับ จึงทำให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างได้มากกว่า ปริมาณซิลิกอนที่ถูกชะละลายออกมาจึงมีค่าสูง ในทางตรงข้ามปริมาณอะลูมิเนียม (Al) ที่ถูกชะละลายออกมาจาก

วัตถุดิบที่ต่างประเทศขนาด 80 เมช มีค่าสูงที่สุด ซึ่งเป็นไปตามผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเเดอะดอมที่ผ่านการคำนวณโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาดต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1

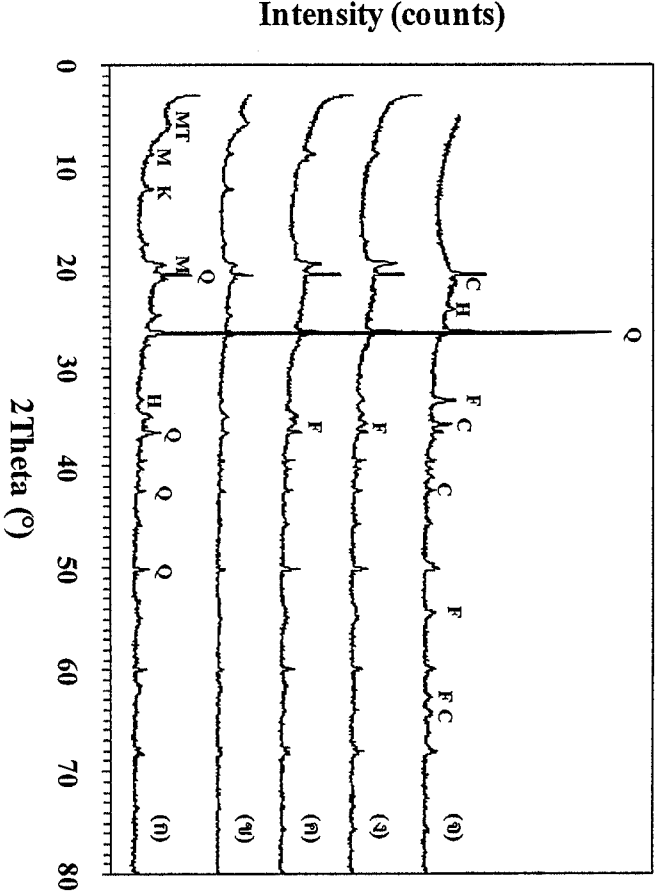
ตารางที่ 4.5 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมาจากดินเเดอะดอมและเถ้าแกลบ

Sample	Si-Concentration (mg/l)	Al-Concentration (mg/l)
ODE	2,085.00	219.45
R80DE	2,043.45	296.25
R200DE	2,113.50	229.65
P325DE	2,745.00	204.75
RHA	5,305.20	12.32

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการแคลไชน์ดินเเดอะดอมที่มีต่อความสามารถในการละลาย แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการแคลไชน์เพิ่มขึ้นเป็น 800 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณซิลิกอนและอะลูมิเนียมถูกชะละลายออกมาจากการแคลไชน์ที่อุณหภูมิ 600, 1000 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งตรงข้ามกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่กล่าวว่า อุณหภูมิในการแคลไชน์เพิ่มขึ้น ทำให้วัตถุดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นผลึกซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยา [6] ทั้งนี้หากพิจารณาแบบการเลี้ยงเบบรังสีเอกซ์ของดินเเดอะดอมที่ผ่านการแคลไชน์ที่อุณหภูมิต่างกัน ดังรูปที่ 4.6 พบว่าการแคลไชน์ดินเเดอะดอมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของแร่มอนท์โมริลไนด์ (Montmorillonite) ส่งผลให้แตกหักพังทลาย ณ ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 6.5 องศาหายไป ทำให้พื้นผิวของอนุภาคมีประจุลบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส โครงสร้างของแร่เคโอลิน (Kaolinite) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเมตะกาลิน (Metakaolin) ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าเคโอลินที่จึงทำให้ดินเเดอะดอมมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ส่งผลให้ดินเเดอะดอมที่ผ่านการแคลไชน์ที่อุณหภูมิตั้งแต่กล่าวมาปริมาณซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมาสูงกว่าที่อุณหภูมิอื่น แต่เมื่อทำการแคลไชน์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 1,000 องศาเซลเซียส ปริมาณของซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมามีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแร่ควอตซ์ (Quartz) เป็นคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) และแร่เฮมาไทท์ (Hematite) เป็นแมग्เนไทท์ (Magnetite; Fe₃O₄) ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายยาลีก่อนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมาจากดินไต่ตะตอมเมื่อแคลเซียมที่อุณหภูมิต่างกัน

Sample	Si-Concentration (mg/l)	Al-Concentration (mg/l)
Calcined 400 °C	1,685.55	157.95
Calcined 600 °C	3,538.50	1,010.40
Calcined 800 °C	4,140.00	1,259.40
Calcined 1,000 °C	2,979.00	348.15



รูปที่ 4.6 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของดินไต่ตะตอม (ก) ไม่แคลเซียม (ข) แคลเซียม 400 °C (ค) แคลเซียม 600 °C (ง) แคลเซียม 800 °C และ (จ) แคลเซียม 1000 °C

เมื่อ MT= Montmorillonite ($(\text{Na,Ca})_{0.3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)
M = Muscovite ($\text{KAl}_2\text{Si}_2\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$)
K = Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)
Q = Quartz (SiO_2)
H = Hematite (Fe_2O_3)
C = Cristobalite (SiO_2)
F = Magnetite (Fe_3O_4)

4.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำลัรับแรงอัดของซีโอพอลิเมอร์โฟสฟต์

4.2.1 ผลของการปรับสภาพดินไคอะตอม

การปรับสภาพดินไคอะตอมที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 2 ปัจจัยคือ

4.2.1.1 ความละเอียดของดินไคอะตอม

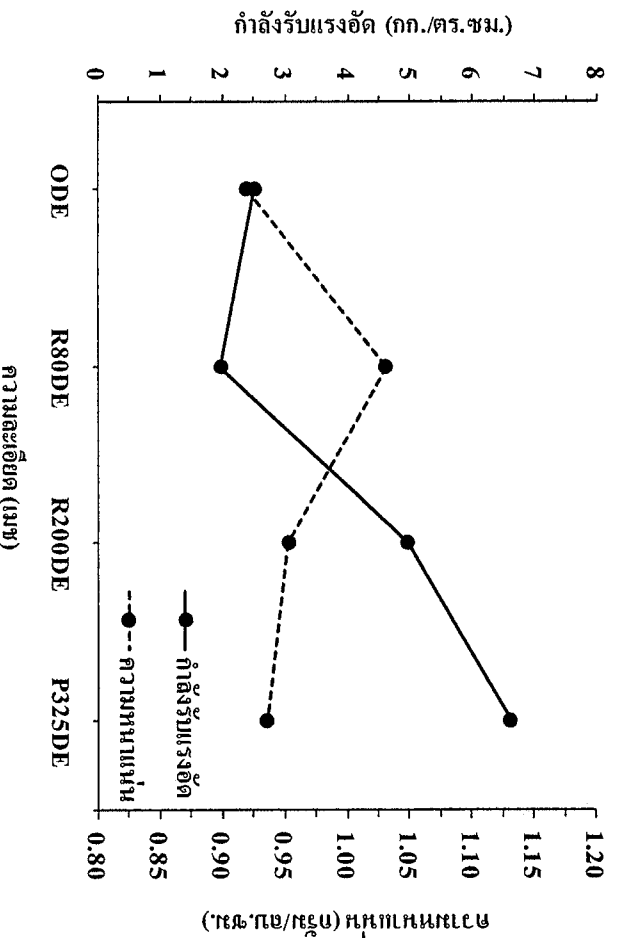
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของซีโอพอลิเมอร์โฟสฟต์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ดินไคอะตอมที่ยังไม่ผ่านการแคลซ์ชต์และมีความละเอียดต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน ของซีโอพอลิเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับค่าความละเอียดของดินไคอะตอม โดยดินไคอะตอม P325DE ให้กำลังรับแรงอัดของซีโอพอลิเมอร์สูงกว่าดินไคอะตอม R200DE, ODE และ R80DE ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่สามารถใช้ในการละลายของดินไคอะตอมดังตารางที่ 4.5 เนื่องจากดินไคอะตอมละเอียดมีพื้นที่ผิวสูงและมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่าดินไคอะตอมขนาดหยาบ สารประกอบซิลิกอนและอะลูมิเนียมจึงถูกชะละลายออกมาเพื่อทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์เร็วมากขึ้น [7-9] ทำให้โมเลกุลมีการเชื่อมต่อยะหว่างพันธะและสามารถรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากความหนาแน่นของซีโอพอลิเมอร์พบว่าซีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมโดยใช้ดินไคอะตอม R80DE ให้ความหนาแน่นมากที่สุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดอนุภาคของดินไคอะตอมมีขนาดเล็ก เนื่องจากอนุภาคที่ต่างตะแกรงขนาด 80 เมช เป็นอนุภาคของทรายซึ่งมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก ทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานมีความมากกว่าดินไคอะตอมขนาดเล็กละเอียดที่มีน้ำหนักเบา

4.2.1.2 อุณหภูมิการแคลซ์ชต์ดินไคอะตอม

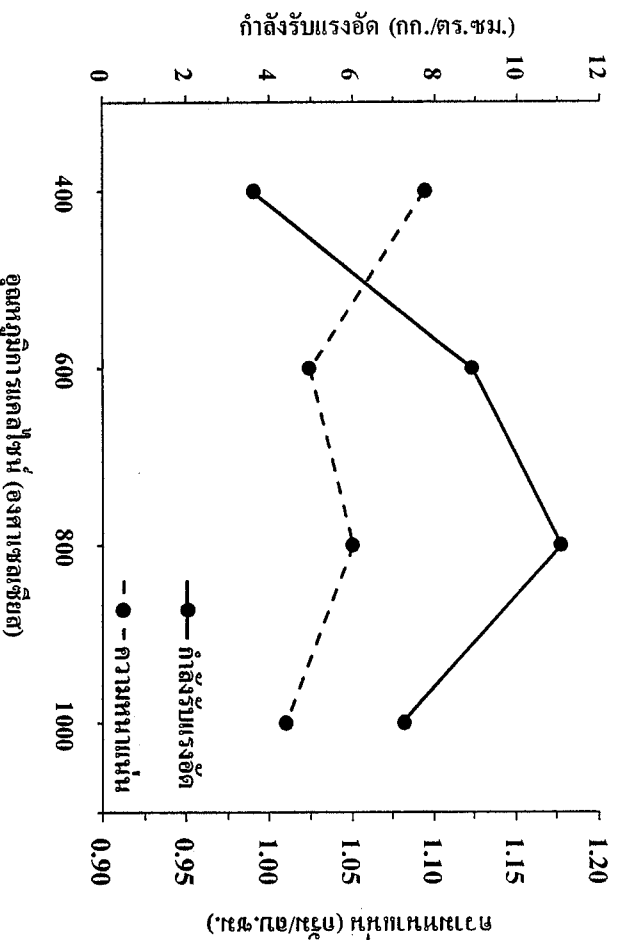
รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของซีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากดินไคอะตอมที่ผ่านการแคลซ์ชต์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยพบว่ากำลังรับแรงอัดจะพัฒนาตามอุณหภูมิการแคลซ์ชต์ที่เพิ่มขึ้นในช่วง 400 - 800 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการแคลซ์ชต์ดินไคอะตอมเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์วัสดุซีโอพอลิเมอร์ คือ 800 องศาเซลเซียส จากแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 4.6 พบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของแร่มอนทโมริลโลไนท์และเคโอไลไนท์ ทำให้พื้นผิวของอนุภาคมีประจุลบเพิ่มขึ้นจากการที่พันธะถูกทำลาย ส่งผลให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของดินไคอะตอมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สูงกว่าอุณหภูมิการแคลซ์ชต์อื่น นอกจากนี้ยังพบว่าการแคลซ์ชต์ดินไคอะตอมที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้ซีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแร่ควอตซ์ไปเป็นควอร์ตบาไลท์ และแร่เฮมาไทท์ (Fe_2O_3) เป็นแม่เหล็กไทท์ (Fe_3O_4) ซึ่งเป็นแร่ที่มีความเสถียรสูง ดังนั้นดินไคอะตอมจึงมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ดังเช่นผลการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายในตารางที่ 4.6

ผลการคำนวณค่าความหนาแน่นของชิ้นงานพบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมโดยใช้ดินไดอะตอมที่ผ่านการแคลไชน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นสูงที่สุดเนื่องจากชิ้นงานมีการหดตัวหลังจากการบ่มมาก ปริมาตรของชิ้นงานมีค่าน้อย ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรของชิ้นงานจึงมีค่าสูง โดยชิ้นงานที่เตรียมได้จากดินไดอะตอมที่ผ่านการแคลไชน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นเพียง 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จากผลการศึกษาอิทธิพลของมวลและเอเียดและอุณหภูมิการแคลไชน์ดินไดอะตอมที่มีต่อความสามารถในการละลายและกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัตถุดิบเพื่อใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์คือ แคลไชน์ดินไดอะตอมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์กับความละเอียดของดินไดอะตอม

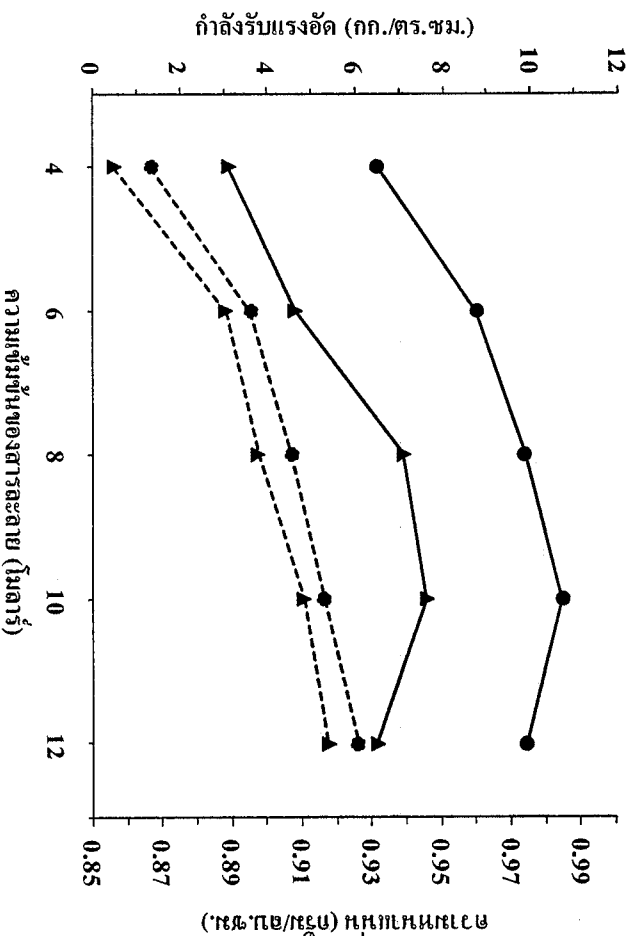


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของเจลไอพอลิเมอร์กับอุณหภูมิ การแคลไซน์ดินโซเดียม

4.2.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

การทดลองส่วนนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของวัสดุเจลไอพอลิเมอร์ โดยคาดว่าจะความเข้มข้นของสารละลายจะมีผลต่อความสามารถในการชะละลายอนุภาคของวัสดุดิบ จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 พบว่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์เจลไอพอลิเมอร์จากดินโคอะคอมคือ 10 โมลาร์ เนื่องจากมีความเข้มข้นของโซเดียม (Na) ในปริมาณที่เพียงพอสำหรับการดัดแปรพันธะของ $[\text{AlO}_4]^-$ ในสายโซ่ของพอลิเมอร์ เมื่อใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (12 โมลาร์) จีไอพอลิเมอร์ให้กำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากความรุนแรงของสารละลายทำให้ส่วนผสมมีลักษณะหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของความสมารถในการชะละลายซิลิกาและอะลูมินาออกมาจากวัสดุดิบ ทำให้เจลไอพอลิเมอร์ที่ได้จากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 12 โมลาร์ มีกำลังรับแรงอัดลดลง [10] ทั้งนี้การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการสังเคราะห์เจลไอพอลิเมอร์ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นเดียวกัน เป็นผลมาจากโซเดียมไอออน (Na^+) มีขนาดเล็กกว่าโพแทสเซียมไอออน (K^+) ดังนั้นโซเดียมจึงมีความแข็งแรงจากการเกิดพันธะ (bond strength = valence/cation radius) สูงกว่าโพแทสเซียม ทำให้การดัดแปรพันธะ (bond strength) ในสายโซ่ของพอลิเมอร์ให้พันธะที่มีความแข็งแรงมากกว่าการใช้โพแทสเซียมไอออนในการดัดแปรพันธะ ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้แตกต่างจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ Phair และ Van Deventer [11] ที่กล่าวว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ส่วนผสมมีการก่อตัวที่เร็วกว่า

และให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงกว่าการใช้สารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น ทั้งนี้ชนิดของวัตถุดิบที่แตกต่างกันมีผลอย่างมากต่อการเลือกใช้ชนิดของสารละลายยัลลาไกลนที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ดังเช่นงานวิจัยของ Van Jaarsveld และ Van Deventer ที่กล่าวว่าทางเลือกชนิดโอออนบวกของสารอัลคาไลน์เพื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายข้อ ซึ่งมีความสำคัญที่สุดคือ ชนิดของวัตถุดิบตั้งต้นและการประยุกต์ใช้งาน [12]



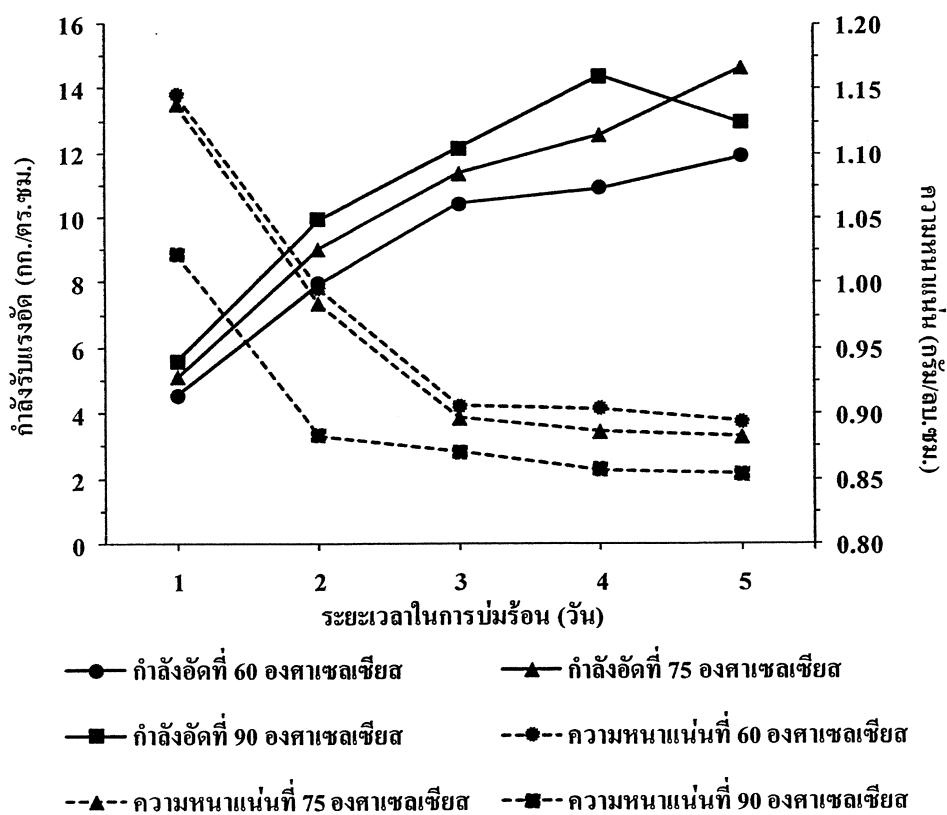
—●— กำลังอัดของการใช้ NaOH —▲— กำลังอัดของการใช้ KOH
 ---▲--- ความหนาแน่นของการใช้ NaOH ---▲--- ความหนาแน่นของการใช้ KOH

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

4.2.3 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มร้อน

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่ทำการบ่มร้อนภายใต้อุณหภูมิ 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลาที่แตกต่างกันคือ 1, 2, 3, 4 และ 5 วัน ได้แสดงดังรูปที่ 4.10 การทดลองส่วนนี้จีโอพอลิเมอร์พสต์หลังจากการผสมและหล่อแบบจะถูกทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนทำการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ ผลการทดสอบพบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มเป็นตัวแปรที่สำคัญที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ขึ้น จากรูปที่ 4.10 การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้กำลังรับแรงอัดต่ำที่สุดทุกช่วงเวลาการบ่มกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการบ่มที่อุณหภูมิ 75 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการบ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 วัน กลับให้กำลังแรงอัดต่ำลง ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่าผิวของตัวอย่างเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการแห้ง

(drying crack) และการสูญเสียน้ำอย่างเห็นได้ชัด กล่าวโดยสรุปสภาวะการบ่มที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินไดอะตอมคือ ใช้อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และบ่มเป็นระยะเวลา 5 วัน จีโอพอลิเมอร์ที่ได้มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการบ่มอื่นโดยมีค่าประมาณ 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีความหนาแน่นเพียง 0.88 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเป็นวัสดุมวลเบาในอนาคต โดยทำการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์ให้ตรงกับที่มาตรฐานกำหนด นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ในระหว่างการบ่มร้อนทำให้ตัวอย่างมีน้ำหนักลดลง จากการศึกษาของ Swanepoel และ Strydom [13] พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการบ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีขนาดลูกบาศก์ 50×50×50 มม. คือ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ทั้งนี้มีเหตุผลมาจากตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงกว่าตัวอย่างขนาดใหญ่ ทำให้สามารถสูญเสียความชื้นได้มากกว่าและส่งผลเสียต่อการลดลงของกำลังรับแรงอัดในที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า การสูญเสียน้ำเป็นสาเหตุที่สำคัญของการสูญเสียกำลังรับแรงอัด เนื่องจากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันยังจำเป็นต้องใช้น้ำเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และป้องกันการแตกร้าวของชิ้นงานจากการแห้งและแตกร้าวอันเป็นผลมาจากน้ำที่ระเหยออกไป

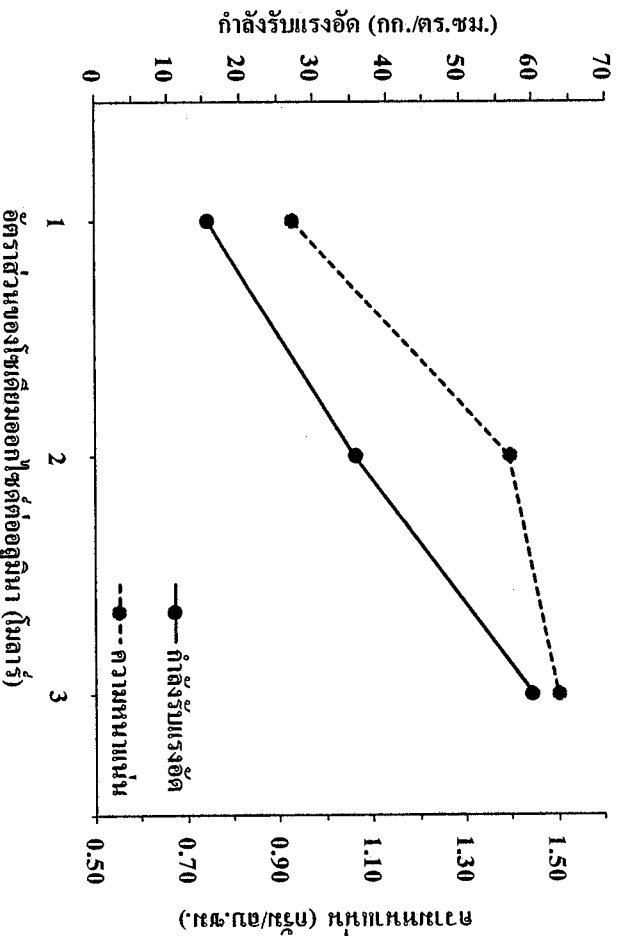


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์กับอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มร้อน

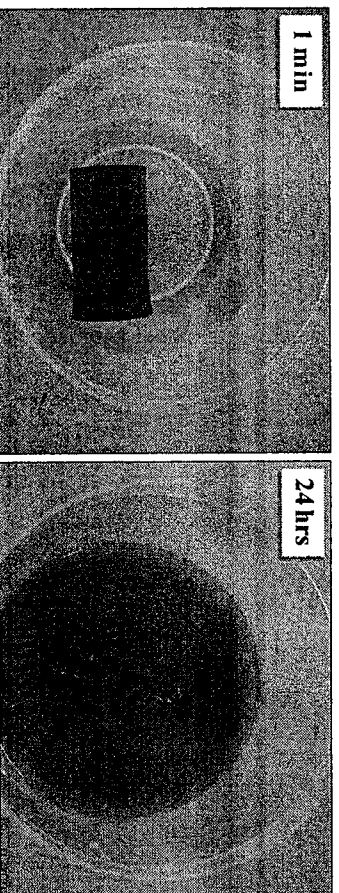
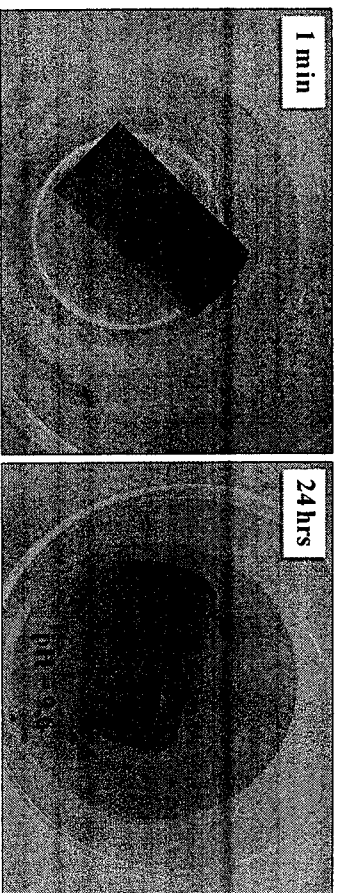
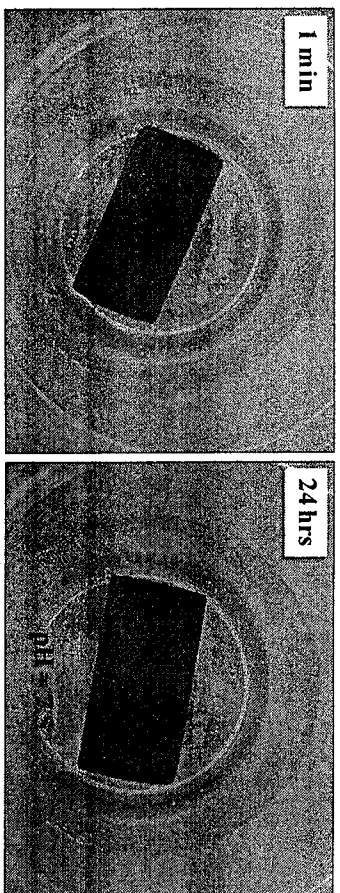
4.2.4 ผลของอัตราส่วนโมลระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$)

การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาที่มีต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของวัสดุซีโอพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยอัตราส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาที่เพิ่มขึ้น ได้จากการเพิ่มปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสม จากผลการทดลองพบว่า กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาสูงขึ้น โดยซีโอพอลิเมอร์ที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 3 ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดถึง 60 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งที่อัตราส่วนดังกล่าวมีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณมากทำให้ความเข้มข้นค่าพีเอชของระบบสูงขึ้น [14] ส่งผลให้ความสามารถในการละลายยวติลิกอนและอะลูมิเนียมออกไซด์ในอะซิติกมีค่าเพิ่มขึ้นและเกิดเป็นหน่วยของซิลิเกต ($\text{Si}(\text{OH})_4$) และอะลูมินา ($\text{Al}(\text{OH})_3$) มอนอเมอร์ในปริมาณมากเพื่อใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันต่อไป

อย่างนี้ก็ตามอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 และ 3 ส่งผลให้โครงสร้างของซีโอพอลิเมอร์ไม่เสถียรเมื่อสัมผัสกับน้ำ ดังรูปที่ 4.12 อันเป็นผลมาจากโซเดียมไอออน (Na^+) ที่หลงเหลือจากการดูดประจุ ณ ตำแหน่งของ $\text{Al}(\text{OH})_4$ สามารถละลายออกมาได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับน้ำ โดยโซเดียมไอออนที่ละลายออกมาเกิดการรวมตัวกับน้ำกลายเป็นสารละลายที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง ซึ่งทำให้สามารถละลายสารประกอบของซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ในสายโซ่ของพอลิเมอไรซ์ออกมาได้ โครงสร้างของซีโอพอลิเมอร์จึงละลายน้ำได้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของซีโอพอลิเมอร์กับอัตราส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา

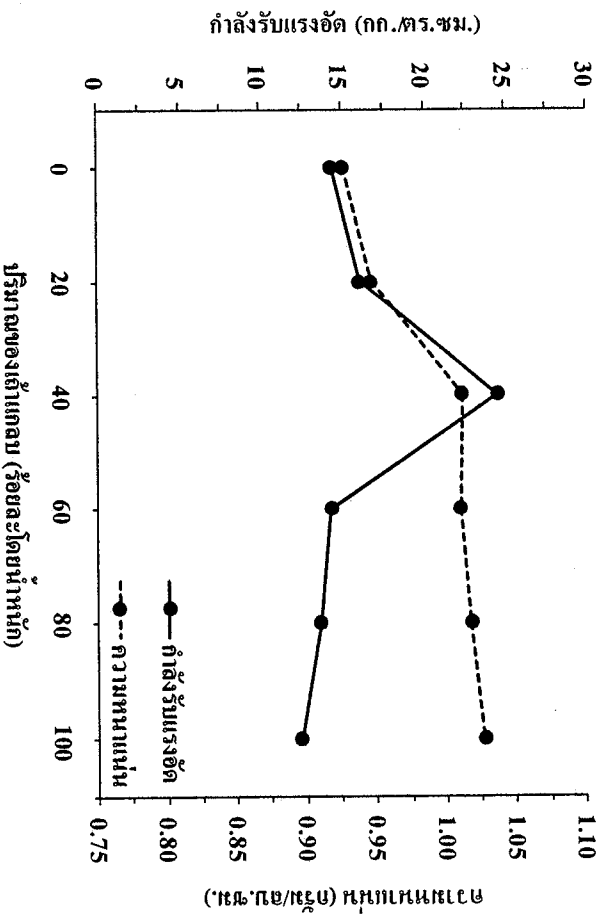


รูปที่ 4.12 จีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาแตกต่างกันเมื่อแช่ในน้ำ

4.2.5 ผลของอัตราส่วนการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยแก้วเกลบ

รูปที่ 4.13 แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยแก้วเกลบร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าการแทนที่แก้วเกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไป โดยทำให้อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 13 ถึง 14.81 และโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) เพิ่มขึ้นในช่วง 1 ถึง

101 ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างที่ 4 และ 13 ถึง 17 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ถ้าแลกเปลี่ยนถึงที่อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 22:6$) ซึ่งทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็น 24 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีความหนาแน่น 1.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากเพิ่มปริมาณแก้วแลกเปลี่ยนกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยแก้วแลกเปลี่ยนปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ทำให้ในระบบมีหน่วยของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_4^-$) และซิลิเกต ($\text{Si}(\text{OH})_4$) เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างสร้างที่แข็งแรง แต่เมื่อปริมาณแก้วแลกเปลี่ยนมากเกินไป (ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก) ทำให้ระบบมีซิลิกาหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาอยู่มากและส่งผลในด้านลบต่อการกำลังรับแรงอัด นอกจากนี้ปริมาณน้ำ (V/B) ที่ใช้ในส่วนผสมอาจส่งผลต่อการกำลังรับแรงอัดที่ลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ถ้าแลกเปลี่ยนเพิ่มขึ้น กล่าวคือปริมาณน้ำที่ใช้ในทุกส่วนผสมมีค่าเท่ากัน โดยจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากแก้วแลกเปลี่ยนมีความต้องการน้ำในปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดินไคอะตอม ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์จากแก้วแลกเปลี่ยนปริมาณน้ำส่วนเกินมาก ซึ่งงานจึงมีรอยแตกเร็วเกิดขึ้นหลังจากการปรมีร่อน ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง



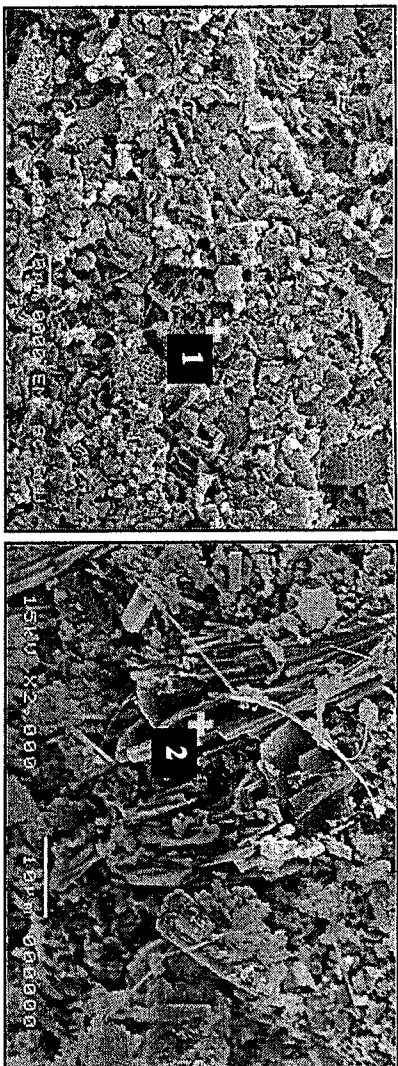
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์กับร้อยละการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยแก้วแลกเปลี่ยน

4.3 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค SEM-EDS

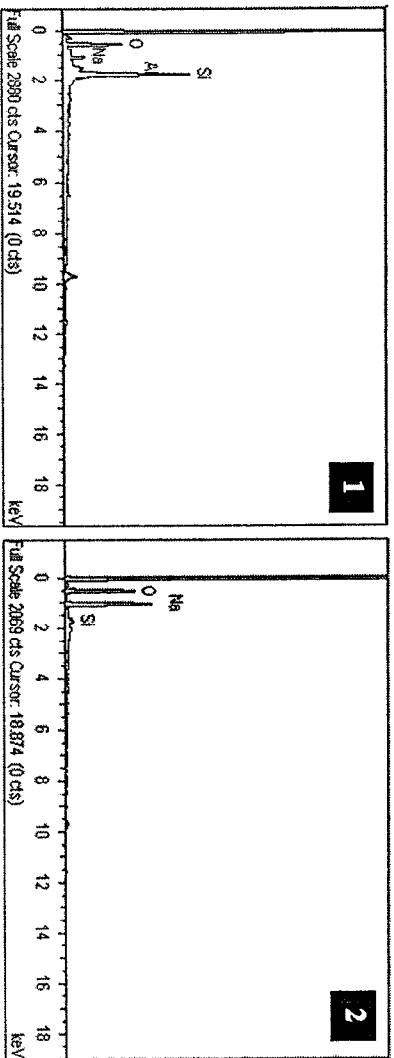
4.3.1 ผลของผลและเอียงของดินไคอะตอม

ภาพถ่ายโดยโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ดินไคอะตอมที่ไม่ผ่านการแคลไซต์และมีความละเอียดแตกต่างกัน ดัง

รูปที่ 4.14 - 4.16 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของดินเอดะตอมและผลึกของโซเดียมซิลิเกตหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาอยู่ภายในผลึกจำนวนมาก เมื่อใช้ดินเอดะตอมที่ล้างตะกาวขนาด 80 เมช ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มากความสามารถในการถูกชะละลายด้วยน้ำได้ช้าและเกิดปฏิกิริยาได้ไม่เท่ากับอนุภาคขนาดเล็ก ดังนั้นโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์จึงไม่มีความแน่นตัวหรือเป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีลักษณะเหมือนกับโครง สร้างทางจุลภาคของวัตถุดิบเริ่มต้นที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา จากผลการวิเคราะห์ด้วย EDS ดังรูปที่ 4.14 (ง) พบว่ามีองค์ประกอบเป็นโซเดียม, ซิลิกอน และออกซิเจนเป็นหลัก ซึ่งใกล้เคียงกับโครงสร้างทางเคมีของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ดังนั้นการใช้ดินเอดะตอม R80DE ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ทำให้สารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกตหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งแสดงถึงการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรซันที่ไม่สมบูรณ์ ในกรณีที่ดินเอดะตอมมีความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น R200DE และ P325DE อนุภาคของดินเอดะตอมจำนวนมากได้ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยา โดยขั้นต้นเป็นปฏิกิริยาการชะละลายของซิลิกอนและอะลูมิเนียม ซึ่งเกิดที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคนั้นจะจับตัวกันเป็นอนุกรมของโมเลกุลขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นในขั้นตอนของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซัน ทำให้โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์มีความแน่นตัวมากกว่าดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ดินเอดะตอม R80DE ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDS) ดังตารางที่ 4.7 พบว่าอัตราส่วนของ Si/Al ที่พบจากเนื้อวัสดุจีโอพอลิเมอร์ R80DE, R200DE และ P325DE มีค่าเท่ากับ 9.77, 10.15 และ 10.69 ตามลำดับ และมีอัตราส่วนของ Na/Al เท่ากับ 2.46, 1.69 และ 1.38 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากดินเอดะตอมที่มีขนาดละเอียดมีความสามารถในการถูกชะละลายได้มากกว่าทำให้เนื้อของจีโอพอลิเมอร์มีอัตราส่วนโดยโมลของ Si/Al สูงกว่าดินเอดะตอมขนาดหยาบ อย่างไรก็ตามอัตราส่วนโดยโมลของ Na/Al มีค่าลดลงเมื่อดินเอดะตอมมีความละเอียดเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยามีการใช้โซเดียมอะตอมเพื่อดุลประจุ ณ ตำแหน่งอะลูมิเนียมแทนไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_4^-$) มากขึ้น ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์จึงมีโครงสร้างที่แน่นตัวและมีแข็งแรง ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด กล่าวคือกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ดินเอดะตอม P325DE มีค่ามากที่สุด อันเป็นผลมาจากการมีโครงสร้างที่แน่นตัวกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ดินเอดะตอม R200DE และ R80DE ตามลำดับ

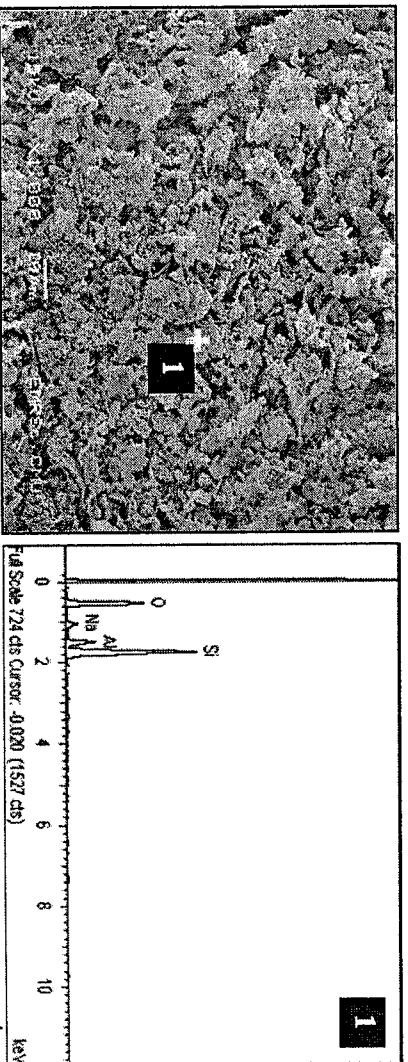


- ก. อนุภาคไคอะตอมที่หลงเหลือจำนวนมาก ข. โขี้เฝยมลิกเกตที่หลงเหลือจากปฏิกิริยา

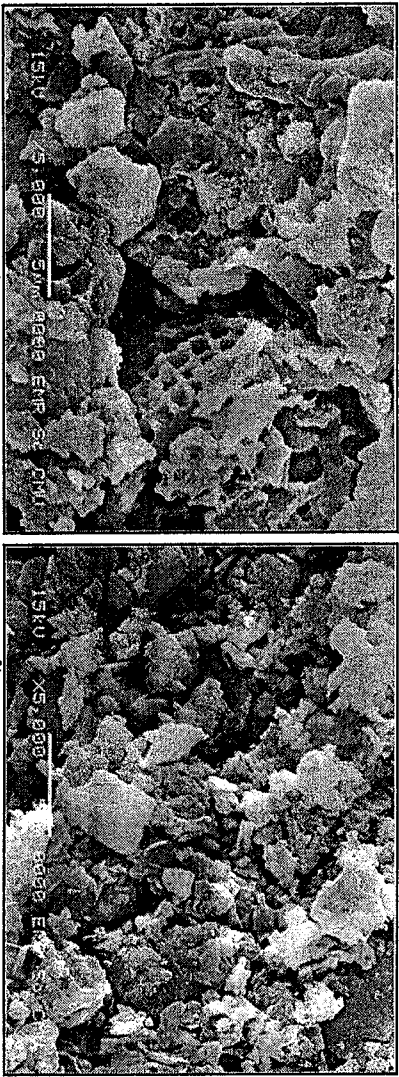


- ค. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1 ง. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 2

รูปที่ 4.14 โครงสร้างทางจุลภาคของซีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ดินไคอะตอมที่ล้าง
ตะกั่วขนาด 80 เมช (R80DE)

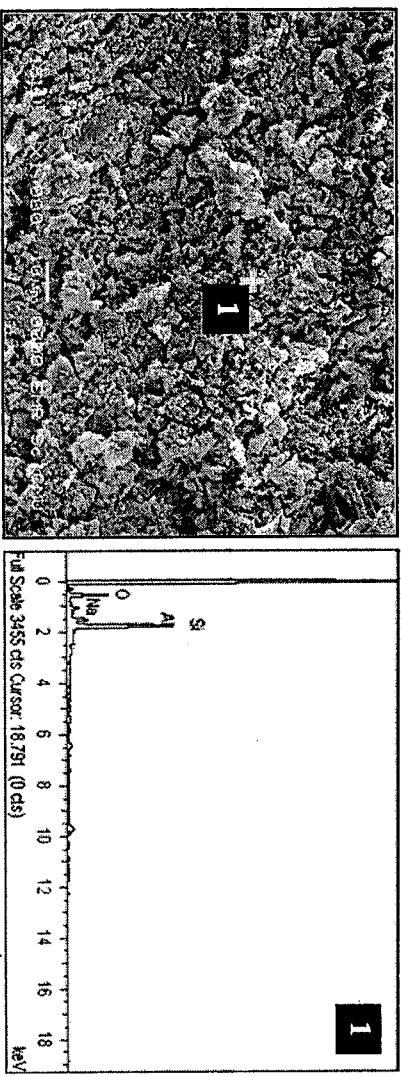


รูปที่ 4.15 โครงสร้างทางจุลภาคของซีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ดินไคอะตอมที่ร่อน
ผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และล้างตะกั่วขนาด 200 เมช (R200DE)



ก. อนุภาคใต้ตะตอมที่หลงเหลือในเพสต์

ข. เนื้อวัสดุมีความแน่นตัว



ค. เนื้อซีโอพอลิเมอร์ที่หนาแน่น

จ. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

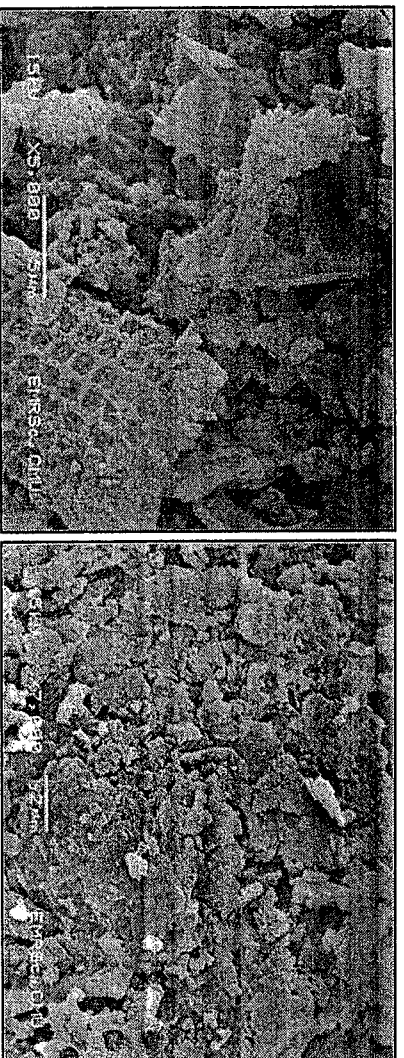
รูปที่ 4.16 โครงสร้างทางจุลภาคของซีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ดินใต้ตะตอมที่ม
ผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช (P325DE)

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของซีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ดินใต้ตะตอมที่มี
ความละเอียดต่างกันเมื่อวิเคราะห์ด้วย EDS

Element	R80DE				R200DE		P325DE	
	weight%		atomic%		weight%	atomic%	weight%	atomic%
	1	2	1	2				
Si	35.60	18.61	25.03	18.43	36.98	27.54	38.99	27.59
Al	3.44	-	2.52	-	3.42	2.52	3.56	2.62
Na	7.49	33.09	6.44	33.18	4.97	3.42	4.15	3.59
O	53.47	48.30	66.01	48.38	54.63	66.52	53.30	66.21
Si/Al	9.77	-	9.89	-	10.15	10.89	10.69	9.80
Na/Al	2.46	-	3.11	-	1.69	1.67	1.38	1.60

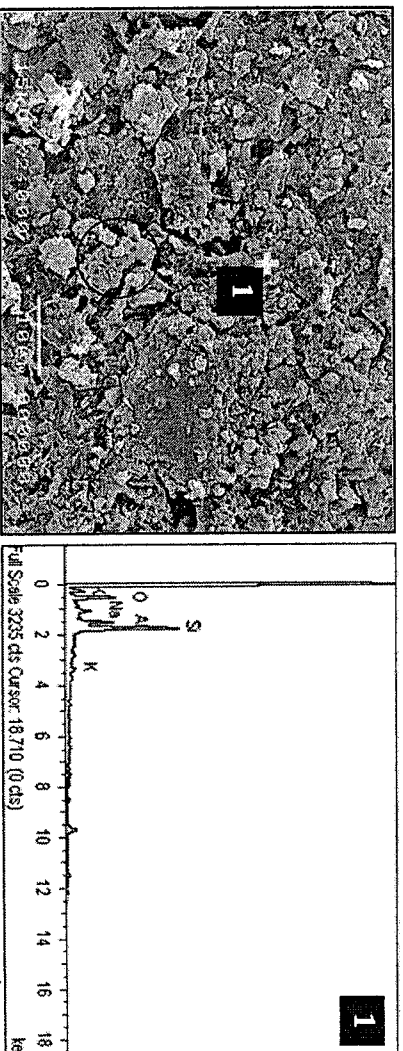
4.3.2 จีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะที่เหมาะสม

รูปที่ 4.17 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของดินไคอะตอมที่ใช้เป็นวัตถุดิบและจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากส่วนผสม 100DEO 10M (Na) (1) ดังตารางที่ 3.4 หลังจากการผสมและหล่อแบบตัวอย่างถูกทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 วัน ซึ่งเห็นได้ว่าเฟสของจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วยอนุภาคของดินไคอะตอมบางส่วนที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีความสามารถในการถูกชะละลายต่ำ อยู่รวมกับเมตริกซ์ที่มีความต่อเนื่องกันของจีโอพอลิเมอร์ ดังรูป (ค) ซึ่งมีความแน่นตัวมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้นที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา ดังรูป (ก) โดยเนื้อของวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีอัตราโดยโมลของ Si/Al เท่ากับ 10.23 และ Na/Al เท่ากับ 1.38 เมื่อวิเคราะห์ด้วย EDS ดังรูป (ง) และตารางที่ 4.8



ก. ดินไคอะตอมที่ใช้เป็นวัตถุดิบ
แน่นตัว

ข. เมตริกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีความ



ค. อนุภาคของดินไคอะตอมที่หลงเหลือ

ง. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

รูปที่ 4.17 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่เตรียมจากสภาวะที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์จากดินไดอะตอมที่สภาวะเหมาะสม เมื่อวิเคราะห์ด้วย EDS

Element	GDE	
	weight%	atomic%
Si	37.35	26.18
Al	3.46	2.52
Na	4.10	3.51
K	2.75	1.44
O	52.34	66.35
Si/Al	10.23	10.44
Na/Al	1.38	1.67

4.3.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา

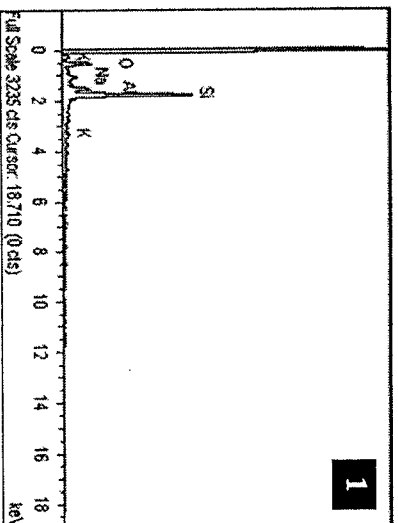
โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากดินไดอะตอมที่มีอัตราส่วนโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.18 - 4.20 พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1 มีความแน่นตัวของจีโอพอลิเมอร์น้อยกว่าที่อัตราส่วนเท่ากับ 2 และ 3 โดยสังเกตพบรูพรุนบางส่วนที่กระจายตัวอยู่ภายในเพสต์ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของดินไดอะตอมที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.18 ส่วนจีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2 และ 3 แสดงให้เห็นถึงเฟสของแก้ว (glassy phase) ที่มีความเรียบและมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง โดยไม่พบอนุภาคของดินไดอะตอมหลงเหลืออยู่ภายในเมตริกซ์ ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 เนื่องจากปริมาณสารอัลคาไลน์ที่เพิ่มขึ้นสามารถละลายสารประกอบซิลิกอนและอะลูมิเนียมออกมาได้มากขึ้นและเกิดเป็นโครงสร้างของแก้วอะลูมินอสิลิกเกตที่มีความต่อเนื่องและแน่นตัวสูง (homogeneity and dense) ทำให้จีโอพอลิเมอร์สามารถรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ EDS พบว่าจีโอพอลิเมอร์ในทุกอัตราส่วนประกอบด้วยซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) เป็นหลักโดยมีโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากตารางที่ 4.9 แสดงร้อยละโดยน้ำหนัก (weight%) และร้อยละโดยอะตอม (atomic%) ของธาตุในตำแหน่งที่วิเคราะห์ ซึ่งเห็นว่าอัตราส่วนโมลของ Si/Al ที่พบจากเนื้อวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 5.64, 8.14 และ 11.38 ซึ่งที่อัตราส่วนโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1 ความสามารถในการละลายอะลูมิเนียม (Al^{3+}) ออกจากแร่ดินมีค่ามากกว่าเนื่องจากอะลูมิเนียมมีความสามารถในการละลายง่ายกว่าซิลิกอน และเมื่ออัตราส่วน

โดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เพิ่มขึ้น ซิลิกอน (Si^{4+}) จึงสามารถถูกชะละลายออกมาได้มากขึ้นทำให้อัตราส่วนของ Si/Al สูงขึ้น



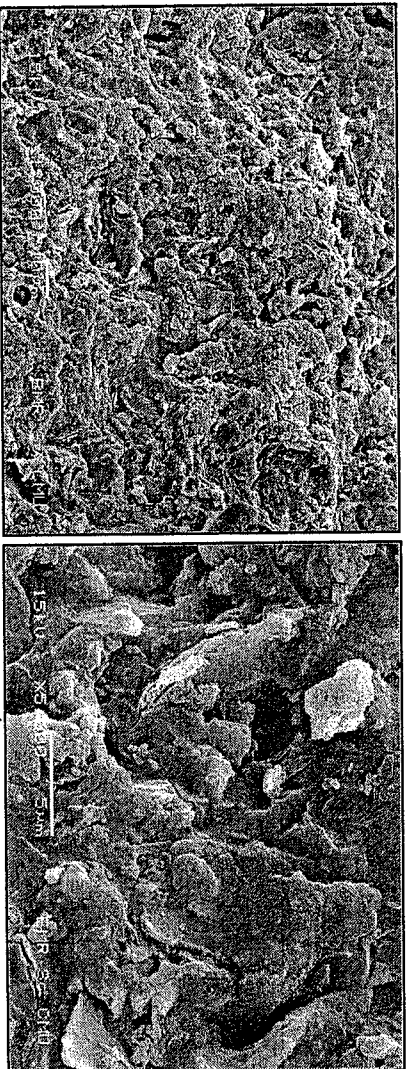
ก. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 2000 เท่า

ข. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า



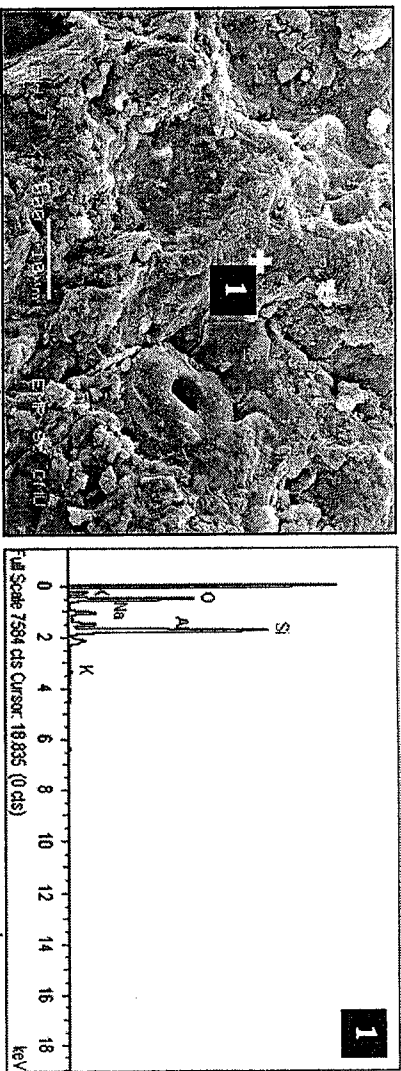
ค. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

รูปที่ 4.18 โครงสร้างทางจุลภาคและของซีโอพอลิเมอร์จากดินโคละตอมที่มี $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1$



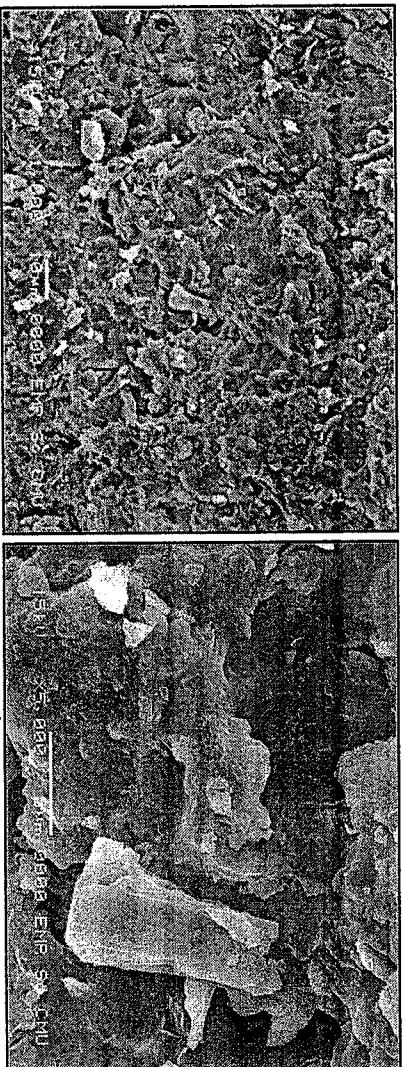
ก. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ข. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า

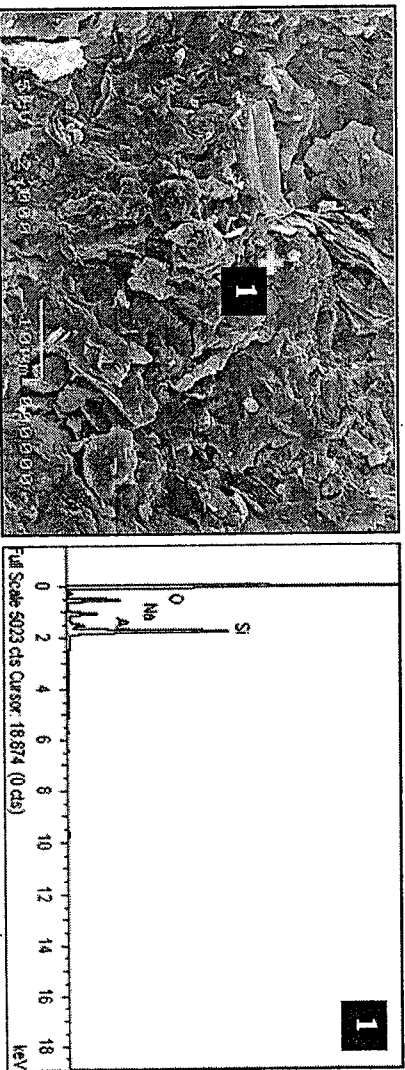


จ. จีโอพอลิเมอร์ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน จ. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

รูปที่ 4.19 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากดินเติอะตอมที่มี $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$



ก. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า ข. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า



ค. เนื้อวัสดุมีความเรียบมาก

ง. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

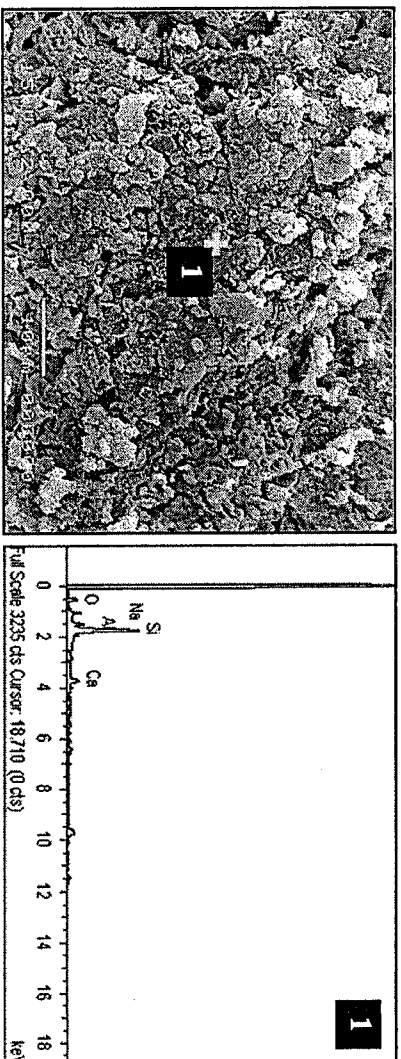
รูปที่ 4.20 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากดินเติอะตอมที่มี $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3$

ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่มีอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาแตกต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย EDS

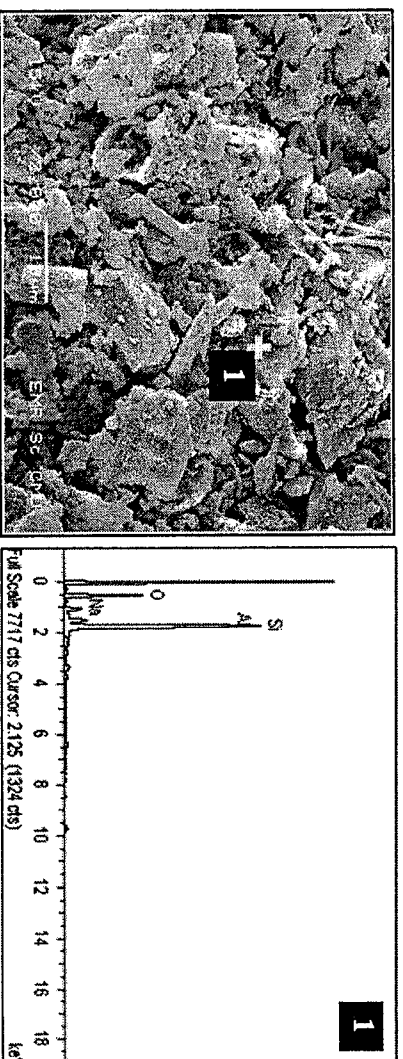
Element	Na ₂ O/Al ₂ O ₃ = 1		Na ₂ O/Al ₂ O ₃ = 2		Na ₂ O/Al ₂ O ₃ = 3	
	weight%	atomic%	weight%	atomic%	weight%	atomic%
Si	44.20	33.43	31.95	22.10	41.39	30.31
Al	7.65	6.03	3.86	2.78	3.54	2.70
Na	4.82	4.46	6.50	5.49	9.76	8.73
K	1.83	1.00	0.59	0.29	-	-
O	41.49	55.09	57.11	69.34	45.31	58.26
Si/Al	5.64	5.41	8.14	7.90	11.38	10.80
Na/Al	0.75	0.86	2.00	2.40	3.23	3.80

4.3.4 ผลของอัตราส่วนการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบ

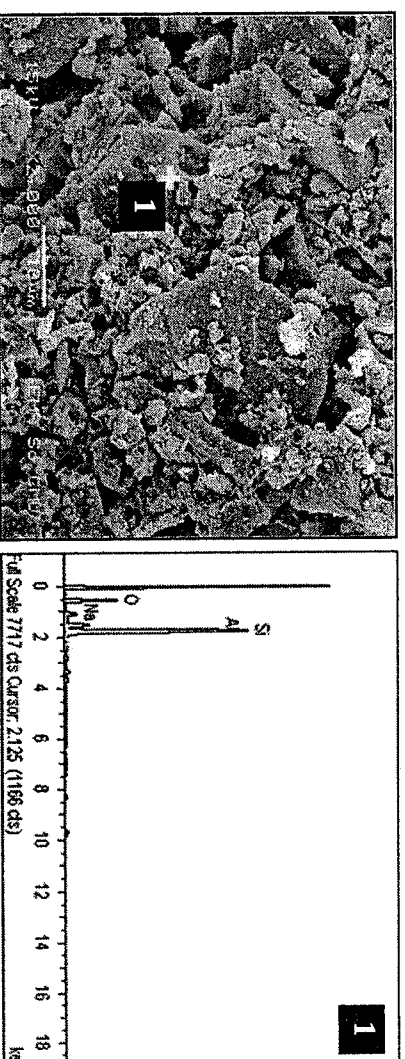
รูปที่ 4.21 - 4.26 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน รูปที่ 4.21 แสดงเมตริกซ์ของจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่ก่อนข้างหนาแน่น และยังพบอนุภาคของดินไคอะตอมบางส่วน (partially unreacted DE particles) ที่ไม่ทำปฏิกิริยาอยู่ภายในพสต์ เมื่อทำการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.23 พบว่าเนื้อวัสดุมีความแน่นตัว ซึ่งที่อัตราส่วนดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการชะละลายสารประกอบซิลิกาออสติฐานออกมาจากเถ้าแกลบเพื่อเกิดเป็นหน่วยของซิลิเกตมอนอเมอร์ที่เพียงพอลต่อการทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างสร้างที่แข็งแรง โดยอัตราส่วนการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 และ 80 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้เนื้อของวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีความแน่นตัวลดลงและไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 นอกจากนี้ยังพบว่าจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบล้วน ดังรูปที่ 4.26 มีความแน่นตัวสูง แต่ไม่พบเฟสที่มีความต่อเนื่องกันแบบแก้วอะลูมิโนซิลิเกต เนื่องจากปริมาณน้ำส่วนเกินในส่วนผสมมีผลต่อการลดลงของความหนาแน่นในการชะละลายเฟสออสติฐานออกมาจากดินไคอะตอม ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วย EDS พบว่าเนื้อวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบในปริมาณที่มากขึ้นจะมีอัตราส่วนโดยโมลของ Si/Al และ Na/Al เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังตารางที่ 3.4 ด้วยเหตุผลที่เถ้าแกลบมีองค์ประกอบของซิลิกาเป็นหลักและมีอะลูมินาเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการเพิ่มเถ้าแกลบในส่วนผสมจึงมีผลทำให้ปริมาณซิลิกาในระบอบให้สูงขึ้น



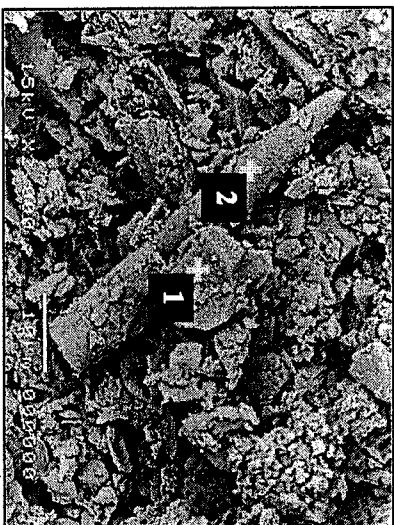
รูปที่ 4.21 โครงสร้างทางจุลภาคของซีโอพอลิเมอร์จากดินเฒ่าจอมล้วน (100DE0)



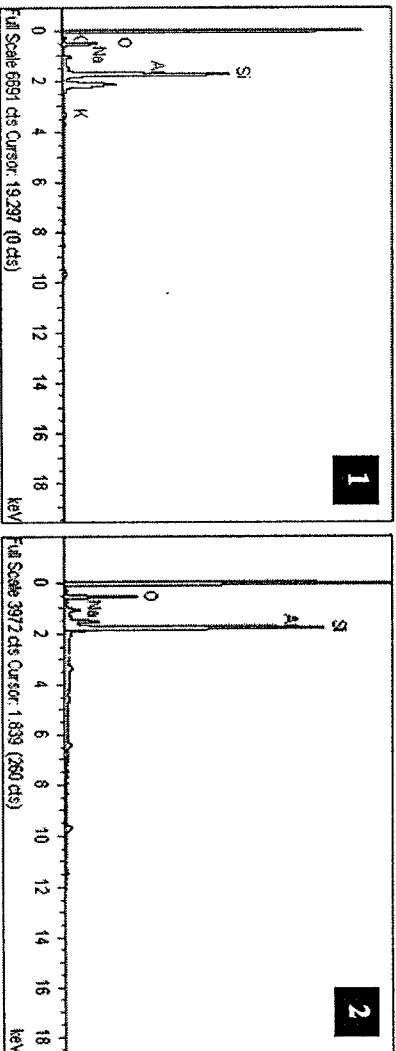
รูปที่ 4.22 โครงสร้างทางจุลภาคของซีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินเฒ่าจอมด้วยแถ่กล้วย
และ 20 โดยน้ำหนัก (80DE20)



รูปที่ 4.23 โครงสร้างทางจุลภาคของซีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินเฒ่าจอมด้วยแถ่กล้วย
และ 40 โดยน้ำหนัก (60DE40)



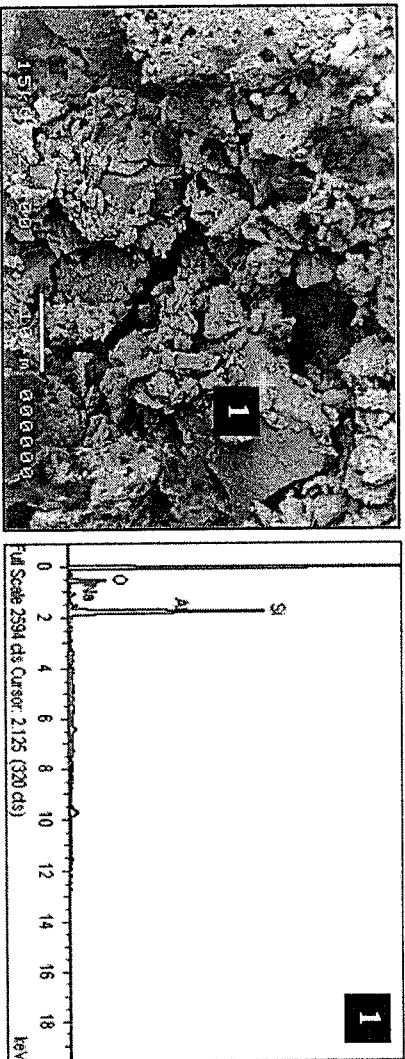
ก. อนุภาคของโตะตะอมและแก้วกลบที่เหลือ



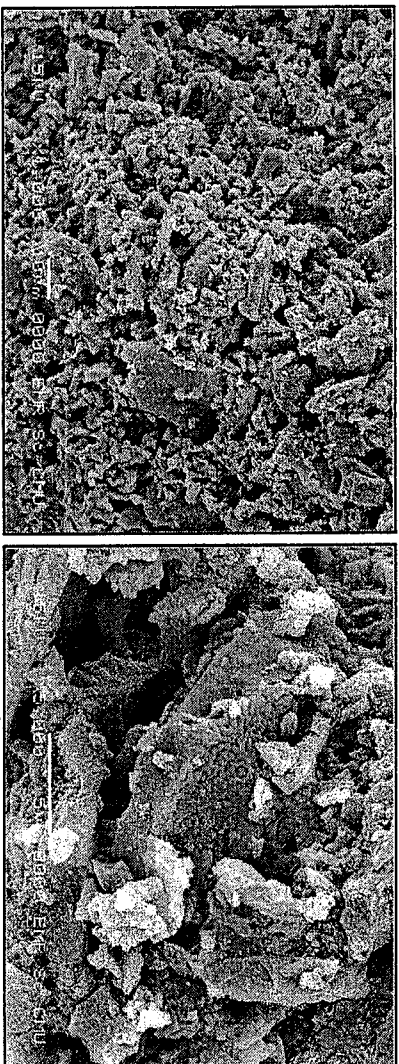
ข. EDS spectrum ตำแหน่งของแก้วกลบ

ค. EDS spectrum ตำแหน่งของโตะตะอม

รูปที่ 4.24 โครงสร้างทางจุลภาคของซีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินโตะตะอมด้วยแก้วกลบร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (40DE60)

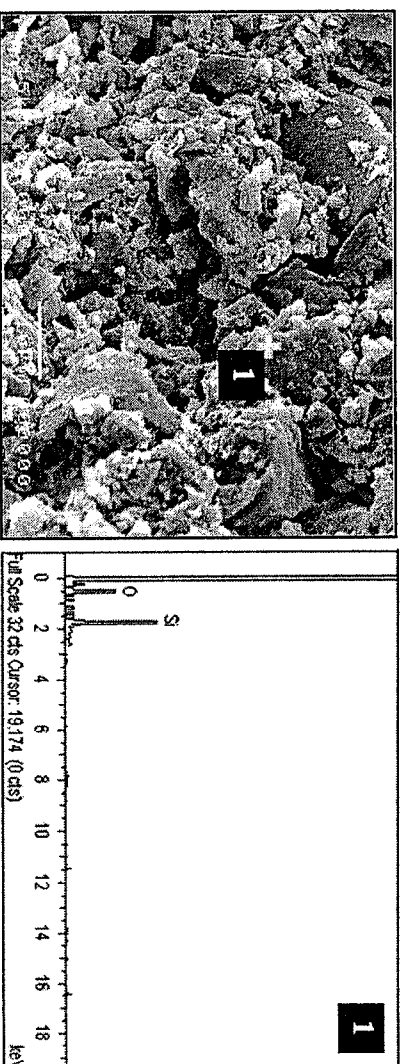


รูปที่ 4.25 โครงสร้างทางจุลภาคของซีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินโตะตะอมด้วยแก้วกลบร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก (20DE80)



ก. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ข. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.26 โครงสร้างทางจุลภาคของซิลีโอพอลิเมอร์จากถ้ำแม่กลบส่วน (ODE100)

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบทางเคมีของซิลีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยถ้ำแม่กลบในส่วนแตกต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย EDS

Element	100DE0		80DE20		60DE40	
	weight%	atomic%	weight%	atomic%	weight%	atomic%
Si	38.79	31.12	39.86	28.44	43.98	32.17
Al	7.72	6.45	3.94	2.93	2.78	2.11
Na	8.56	8.39	4.59	4.00	3.67	3.28
Ca	10.92	6.14	-	-	-	-
O	34.01	47.90	51.61	64.64	49.58	62.43
Si/Al	4.93	4.63	10.14	9.27	15.70	14.38
Na/Al	1.32	1.50	1.43	1.18	1.60	1.75

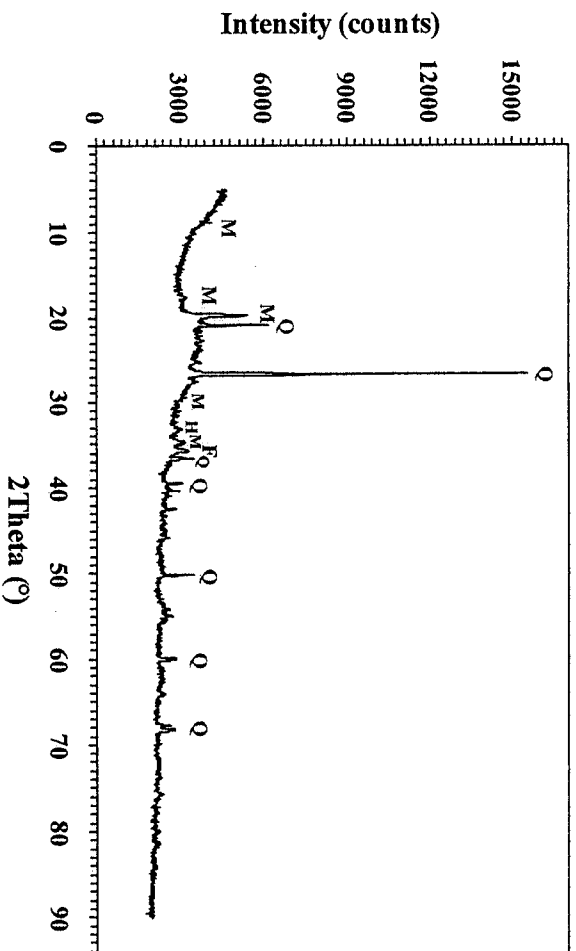
ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

Element	40DE60				20DE80		0DE100	
	weight%		atomic%		weight%	atomic%	weight%	atomic%
	1	2	1	2				
Si	49.66	44.62	37.04	32.70	55.18	41.49	23.18	14.67
Al	1.12	4.92	0.87	3.75	0.67	0.52	-	-
Na	1.84	3.49	1.58	3.12	1.72	1.66	-	-
K	1.58	-	0.85	-	-	-	-	-
O	45.81	46.98	59.66	60.43	42.42	56.32	76.82	85.33
Si/Al	44.25	8.83	44.00	8.35	98.50	74.00	-	-
Na/Al	2.00	0.83	2.33	1.00	3.50	3.50	-	-

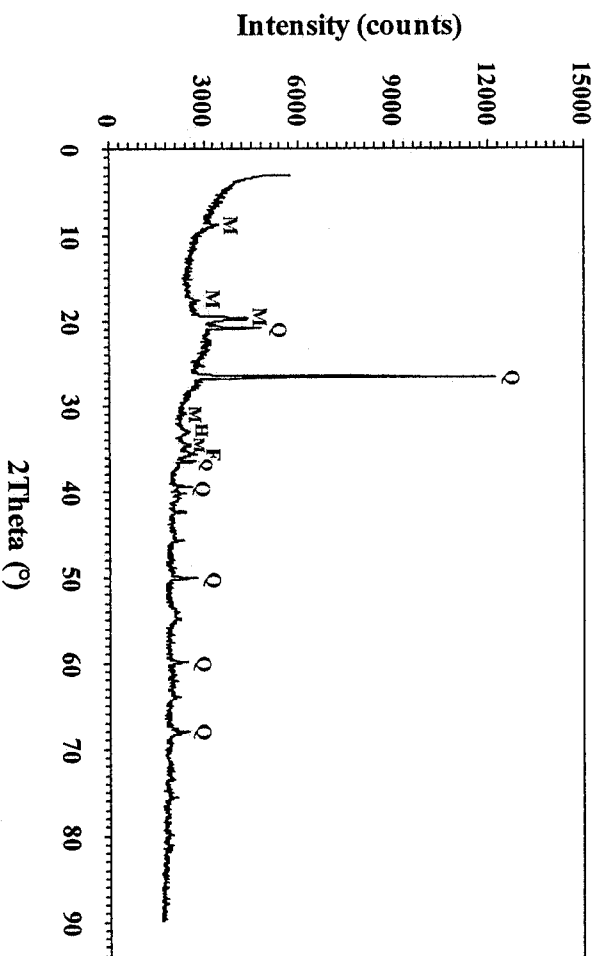
4.4 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

4.4.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา ($\text{Na}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$)

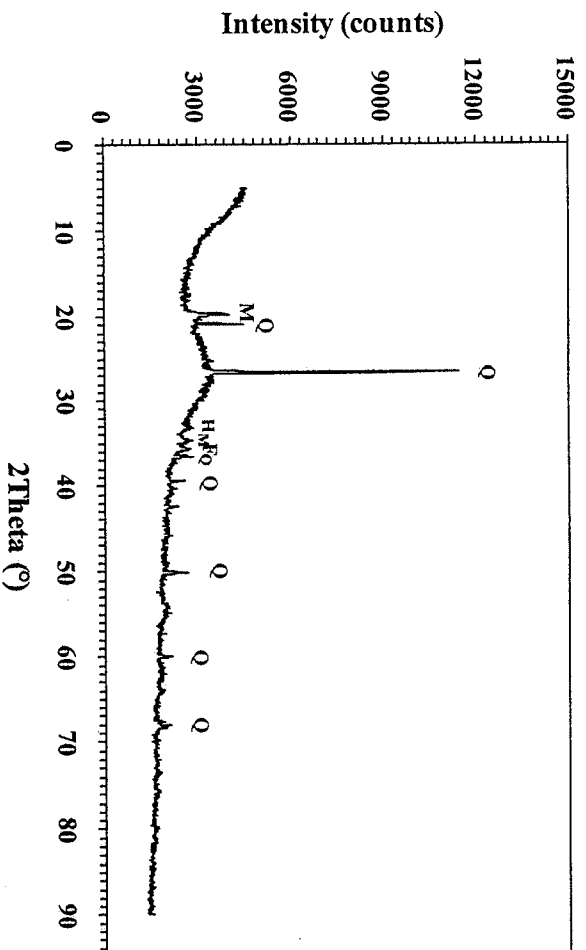
รูปที่ 4.27 - 4.30 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของดินไคอะตอมที่ใช้เป็นวัตถุดิบและวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่มีอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาแตกต่างกัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์ในทุกอัตราส่วนประกอบด้วยเฟสที่เป็นผลึก (crystalline phase) ได้แก่ มัสโคไวท์ (Muscovite), ควอตซ์ (Quartz), เฮมาไทท์ (Hematite) และแมกนีไทท์ (Magnetite) คล้ายกับสารประกอบที่พบในวัตถุดิบตั้งต้นรูปที่ 4.27 นอกจากนี้ยังพบที่เป็น Board peak ในช่วงมุม 2θ เท่ากับ 20 - 30 องศา ที่แสดงถึงเฟสอสัณฐาน (amorphous phase) หรือกิ่งผลึก (semi-crystalline) ของซิลิกาที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา โดยที่อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2 และ 3 ดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 จะเห็นว่าจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วยเฟสอสัณฐานปริมาณมากกว่าที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1 สังเกตได้จากแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2 และ 3 มีความเข้มของสารประกอบมัสโคไวท์และควอตซ์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมาจะยึดเหนี่ยวกันเป็นโครงสร้างรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) และประสานกันเป็นโครงข่ายของพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรง จึงทำให้ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2 และ 3 มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1 ดังหัวข้อ 4.2.4 ที่กล่าวมาข้างต้น กล่าวโดยสรุป ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมพบว่าไม่เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของเฟสที่เป็นผลึก แต่พบเฟสอสัณฐานของซิลิกาเกิดมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.27 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของดินเถ้าอะดอมที่ผ่านการแคลซ์ที่อุณหภูมิ 800 °C

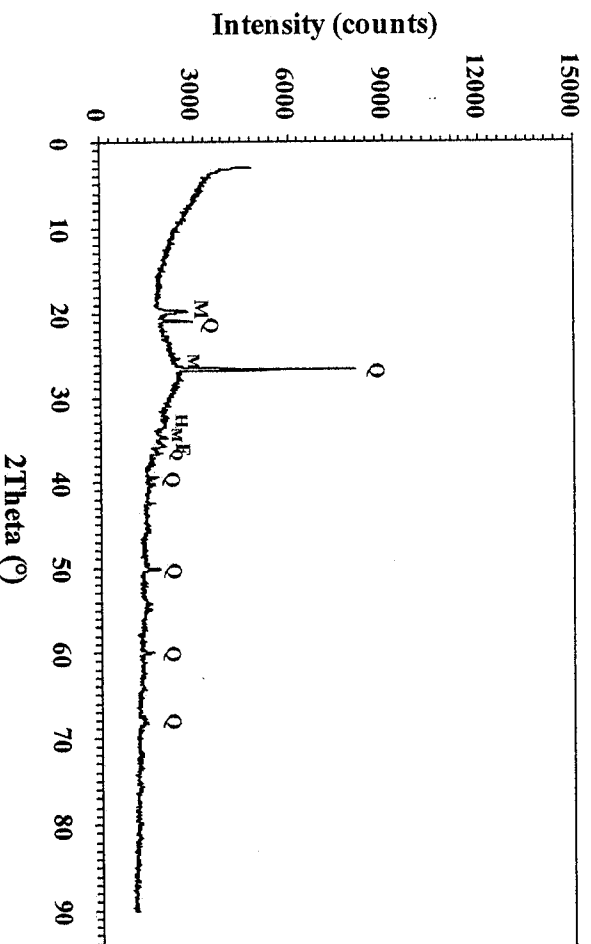


รูปที่ 4.28 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอพอลิเมอร์จากดินเถ้าอะดอมที่มี $\text{Na}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1$



รูปที่ 4.29

แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มโพลิเมอร์จากดินเถ้าอะดอมที่มี $\text{Na}_2\text{O}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$



รูปที่ 4.30

แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มโพลิเมอร์จากดินเถ้าอะดอมที่มี $\text{Na}_2\text{O}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3$

เมื่อ M = Muscovite ($\text{KAl}_2\text{Si}_2\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$)

K = Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)

Q = Quartz (SiO_2)

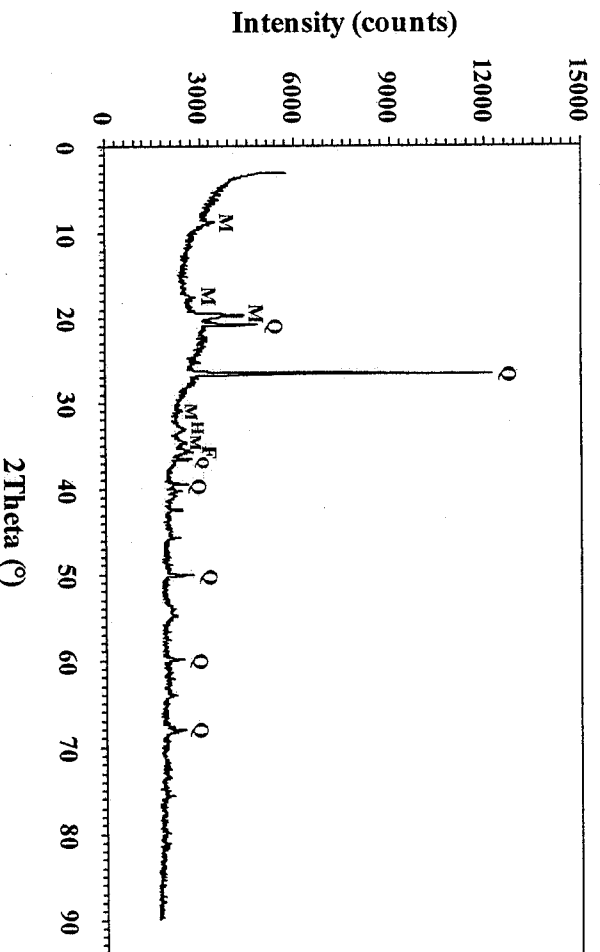
H = Hematite (Fe_2O_3)

C = Cristobalite (SiO_2)

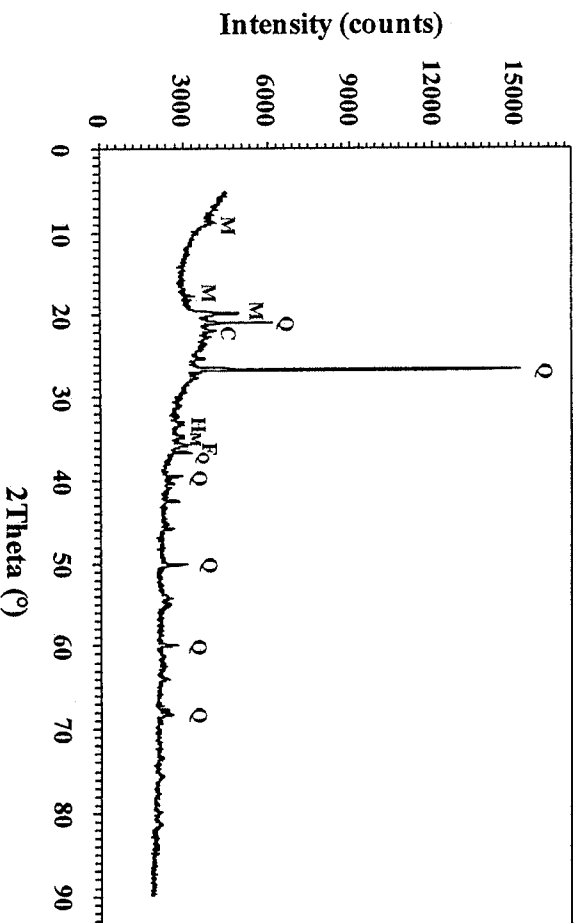
F = Magnetite (Fe_3O_4)

4.4.2 ผลของอัตราส่วนการแทนที่หินไดอะตอมด้วยแก้วกลบ

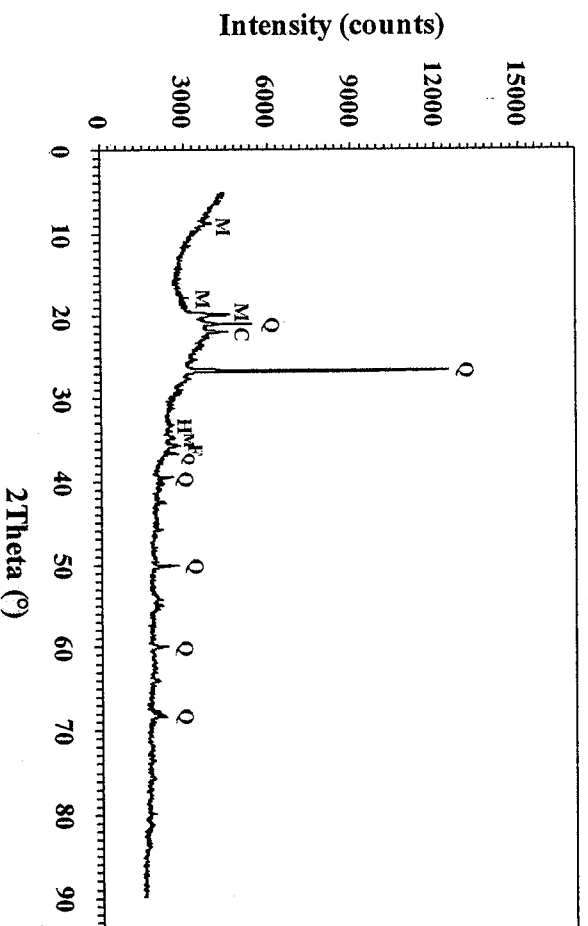
การศึกษารูปทรงประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่หินไดอะตอมด้วยแก้วกลบในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.31 - 4.36 จะเห็นว่า ความเข้มของสารประกอบมัสโคไวท์ (Muscovite) ลดลงเมื่อมีการแทนที่หินไดอะตอมด้วยแก้วกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วยเฟสที่เป็นผลึกซึ่งส่วนใหญ่เป็นชนิดเดียวกับที่พบในหินไดอะตอมและแก้วกลบที่ใช้เป็นวัตถุดิบได้แก่ มัสโคไวท์, ควอตซ์ (Quartz), เฮมาไทท์ (Hematite), แมกนีไทท์ (Magnetite) และคริสโตบาลีท์ (Cristobalite) และพบว่ามีสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่จากการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากหินไดอะตอมผสมแก้วกลบคือ อะเคอมาไนท์ (Akeemantite) ปริมาณเล็กน้อย ซึ่งพบในตัวอย่างที่มีการแทนที่หินไดอะตอมด้วยแก้วกลบในอัตราส่วนร้อยละ 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่แก้วกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้นปรากฏเป็นลักษณะของวัสดุที่มีโครงสร้างของความเป็นผลึกน้อย (low degree of crystalline) เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากหินไดอะตอมล้วน เนื่องจากการแทนที่หินไดอะตอมด้วยแก้วกลบเป็นการเพิ่มซิลิกาอสัณฐานให้กับระบบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัด ของจีโอพอลิเมอร์ พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่หินไดอะตอมด้วยแก้วกลบในอัตราส่วนร้อยละ 60 โดยน้ำหนักขึ้นไปให้กำลังรับแรงอัดน้อยกว่าที่อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากแก้วกลบมีความต้องการน้ำในปริมาณที่น้อยกว่าจีโอพอลิเมอร์จากหินไดอะตอม ซึ่งในทางปฏิบัติได้ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อของแข็ง (W/B) เท่ากันทุกส่วนผสม ดังนั้นจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง



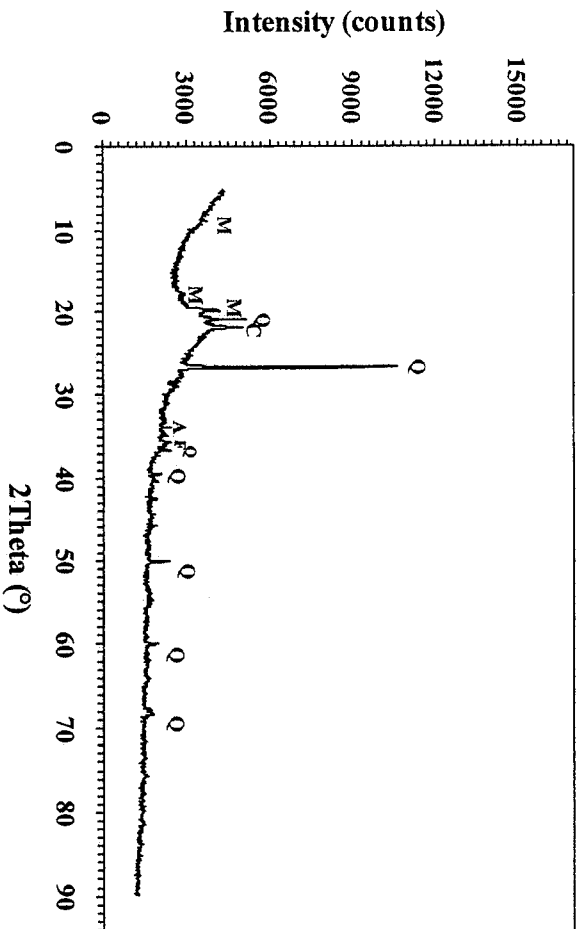
รูปที่ 4.31 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์จากหินไดอะตอมล้วน



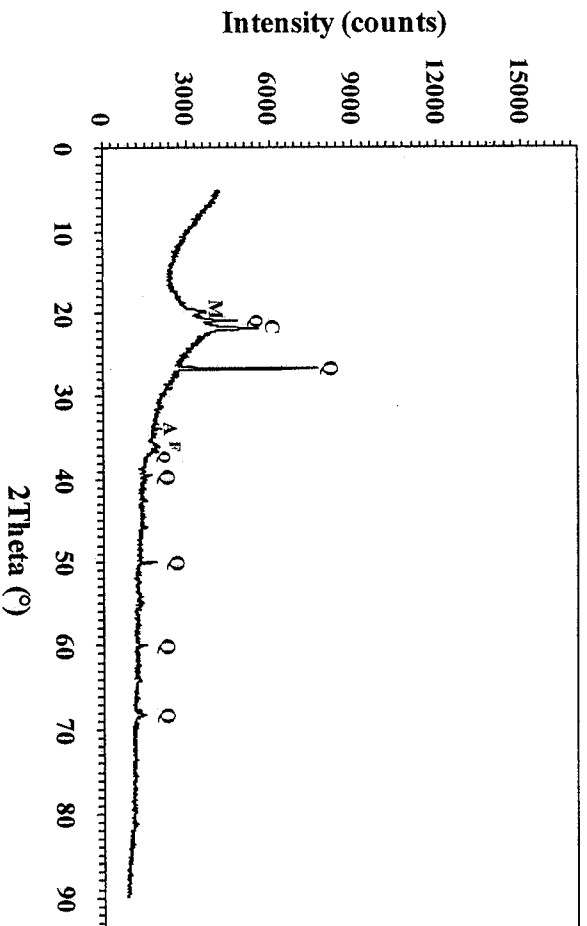
รูปที่ 4.32 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้า
แกลบ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



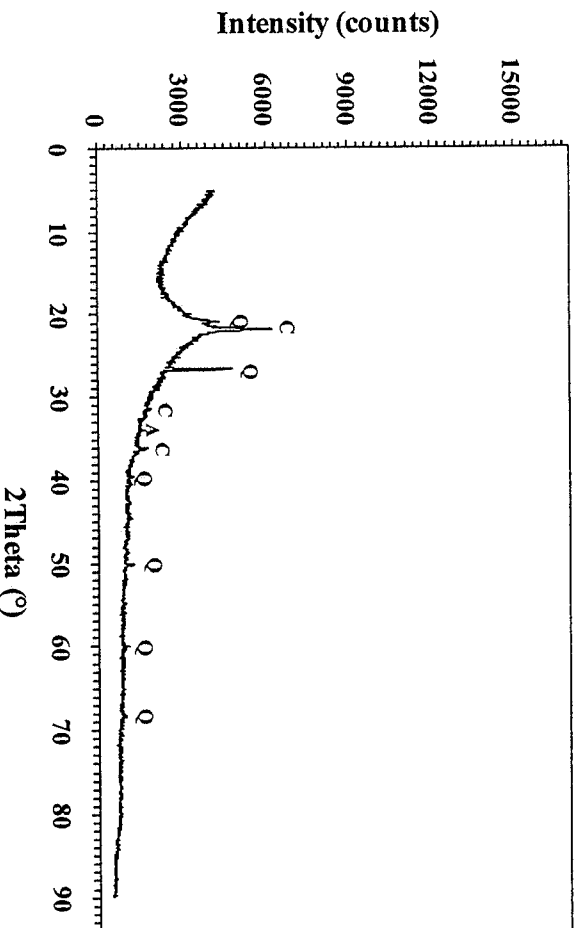
รูปที่ 4.33 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้า
แกลบ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.34 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินโซเดียมด้วยแก้ว
แคลบร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.35 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินโซเดียมด้วยแก้ว
แคลบร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.36 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบล้วน

เมื่อ M = Muscovite ($\text{KAl}_2\text{Si}_6\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$)

K = Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)

Q = Quartz (SiO_2)

H = Hematite (Fe_2O_3)

C = Cristobalite (SiO_2)

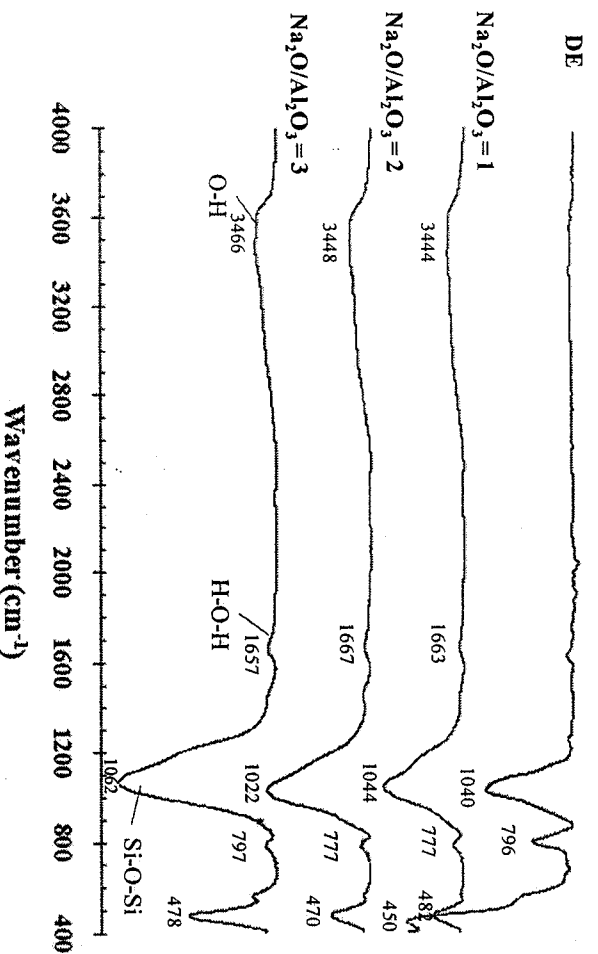
F = Magnetite (Fe_3O_4)

A = Akermanite ($\text{MgAlSi}_{1.5}\text{O}_6$)

4.5 ผลการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาด้วยเทคนิค FTIR

เทคนิคการดูดกลืนแสงอินฟราเรดจะถูกใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของสารจีโอพอลิเมอร์ รูปที่ 4.37 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของดินไดอะตอมและจีโอพอลิเมอร์จากดินไดอะตอมที่มีอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาแตกต่างกัน พบว่าดินไดอะตอมจะดูดกลืนแสงที่ความถี่ 1040 และ 796 cm^{-1} ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของพันธะ Si-O-Si stretching และยังพบพีคในช่วง 450 - 480 cm^{-1} เป็นพีคของพันธะ O-Si-O bending ภายหลังจากการกระตุ้นดินไดอะตอมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่าโครงสร้างโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวใหม่ ทำให้สเปกตรัมที่ตำแหน่ง Si-O-Si เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบ นอกจากนี้ยังปรากฏพีคช่วงกว้างที่ความถี่ประมาณ 3440 และ 1660 cm^{-1} ที่เป็นพีคของพันธะ O-H stretching และ H-O-H bending ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์โซล-เจลที่ใช้ในโน้ตการสร้างของโมเมกุลโดยการดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคหรือถูกกักไว้ในรูพรุนขนาดใหญ่ของเฟสดี

การเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบซิลิกา (Si-O-Si) ของตัวอย่างเพื่อแบ่งสัดส่วนการควบคุมแบบบล็อกโชน์ (degree of polycondensation) ของวัสดุซิลิโอะพอลิเมอร์ ได้จากการคำนวณหาพื้นที่พีคในช่วงคลื่นอินฟราเรด 1200-900 ซม.⁻¹ ซึ่งเป็นพีคที่มีลักษณะเด่นกว่าตำแหน่งอื่น อัตราส่วนพื้นที่พีคของซิลิโอะพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโมลของซิลิโอะพอลิเมอร์ต่ออะลูมินาแตกต่างกัน แสดงผลดังตารางที่ 4.11 พบว่าซิลิโอะพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโมลของซิลิโอะพอลิเมอร์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 3 ให้ค่าอัตราส่วนพื้นที่พีคสูงกว่าที่อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2 และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าที่อัตราส่วนโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 3 ให้तिकการควบคุมแบบบล็อกโชน์สูงที่สุดซึ่งทำให้หน่วยของซิลิเกตเกิดและอะลูมินาเกิดเกิดการเชื่อมต่อระหว่างพันธะมากขึ้น ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์อะลูมินซิลิเกตจึงสูงขึ้น [15] ส่งผลให้ซิลิโอะพอลิเมอร์สามารถรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นเป็น 60 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.37 อินฟราเรดสเปกตรัม (IR spectrum) ของซิลิโอะพอลิเมอร์จากดินเเดอะตอมที่มีอัตราส่วน โมลของซิลิโอะพอลิเมอร์ต่ออะลูมินาแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.11 พื้นที่พีคของซิลิกาที่ทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ของซิลิโอะพอลิเมอร์จากดินเเดอะตอมที่มีอัตราส่วนโมลของซิลิโอะพอลิเมอร์ต่ออะลูมินาแตกต่างกัน

Sample	Location of Si-O-Si (cm ⁻¹)	Corrected area	Peak area ratio
DE	1040	8.41	1
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1$	1044	8.70	1.03
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$	1022	10.45	1.24
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3$	1062	15.14	1.80

เมื่อ Peak area ratio คือ อัตราส่วนของพื้นที่พีคโอพอลิเมอร์ต่อพื้นที่พีคตินไคอะตอม
Corrected area คือ พื้นที่ของพีค Si-O-Si stretching ($1200 - 800 \text{ cm}^{-1}$)

4.6 ผลการศึกษาความสามารถในการนำความร้อนของจีโอพอลิเมอร์

ในชุดทดสอบนี้ได้ทำการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากการใช้สารละลายไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวกระตุ้นหลังจากการผสมและหล่อแบบตัวอย่างถูกทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนทำการป้อนตามอุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดสอบที่ผ่านมาตั้งหัวข้อ 4.2.3 คือการป้อนอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 วัน ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นและการนำความร้อนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์แสดงดังตารางที่ 4.12 โดยพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (100DE0 10M(Na) (1)) มีค่าการนำความร้อนสูงกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เล็กน้อย (100DE0 10M(K) (1)) เนื่องจากการใช้สารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ให้จีโอพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นตัวมากกว่า น้ำหนักรวมของวัสดุมีค่ามากส่งผลให้ค่าความหนาแน่นและการนำความร้อนสูงกว่า และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยการนำความร้อนของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ตินไคอะตอมด้วยแก้วแอลบในปริมาณต่างๆ พบว่าค่าการนำความร้อนของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณแก้วแอลบที่เพิ่มขึ้น กล่าวโดยสรุป จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตินไคอะตอมมีค่าเฉลี่ยการนำความร้อนเท่ากับ 0.30 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน โดยลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีรูพรุนจำนวนมากทำให้มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุฉนวนความร้อนได้

ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นและการนำความร้อนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

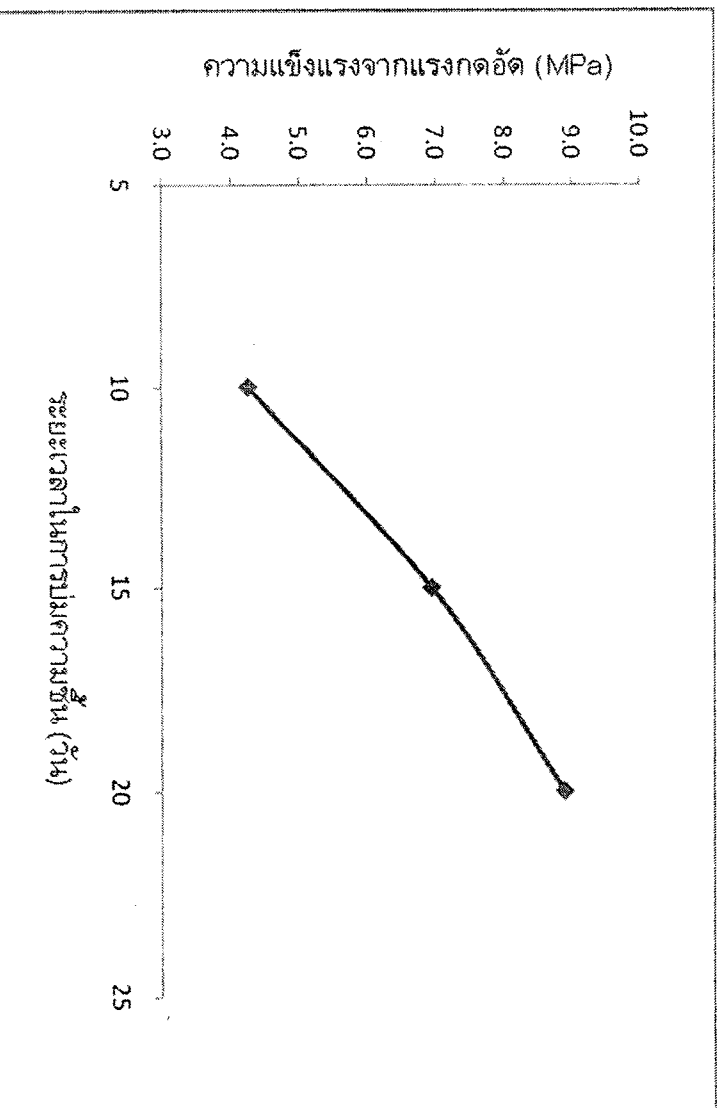
Sample	Density (g/cm^3)	Thermal conductivity (W/m.K)
100DE0 10M(Na) (1)	0.89	0.30
100DE0 10M(K) (1)	0.87	0.29
80DE20 10M(Na) (1)	0.95	0.31
60DE40 10M(Na) (1)	1.01	0.32
40DE60 10M(Na) (1)	1.01	0.32
20DE80 10M(Na) (1)	1.02	0.33
0DE100 10M(Na) (1)	1.03	0.35

ผลการศึกษาปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไธเรซชั้นของดินเบาแหล่งลำปาง

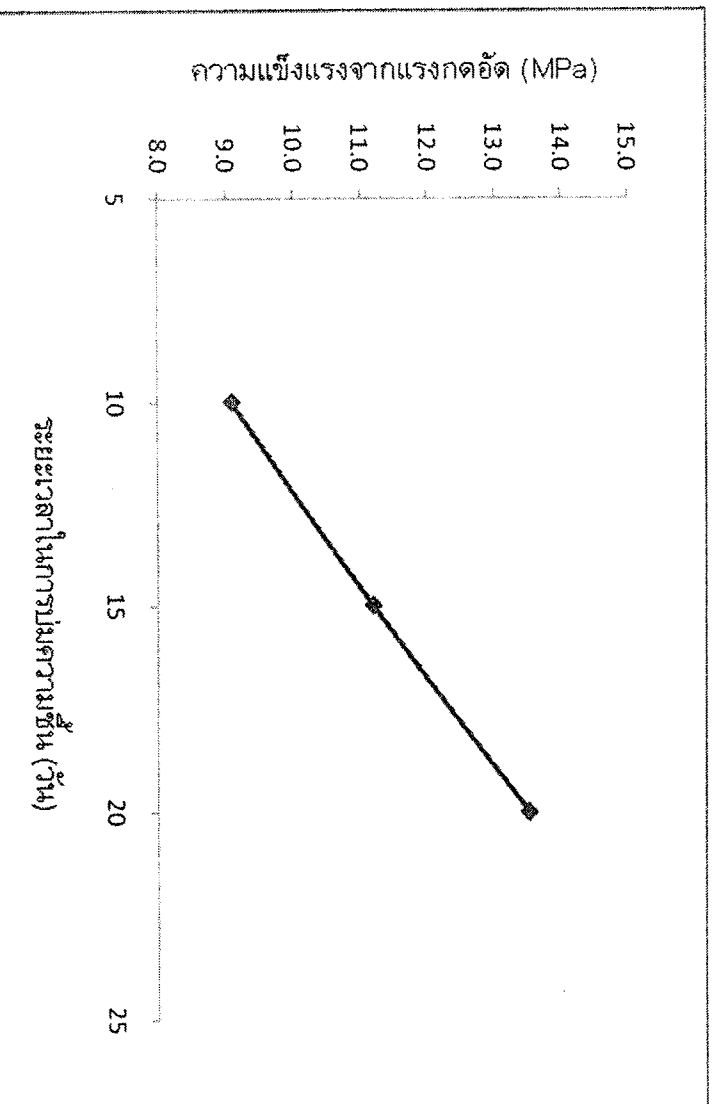
4.7 ผลการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการบ่มความชื้นที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.13 ระยะเวลาในการบ่มความชื้นของอิฐในการทดลองและสมบัติเชิงกลของอิฐ

ระยะเวลาในการ	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล	
	ดินเบา (%)	Ca(OH) ₂ (%)	ยิปซัม (%)	ความแข็งแรง จากแรงกดอัด หลังบ่มความชื้น (MPa)	ความแข็งแรง จากแรงกดอัด หลัง Autoclave (MPa)
บ่มความชื้น					
10	80	20	-	4.3	9.1
15	80	20	-	6.9	11.2
20	80	20	-	8.9	13.5



รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากแรงกดอัด (Compressive strength) ของอิฐหลังบ่มความชื้นกับระยะเวลาในการบ่มความชื้น



รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากแรงกดอัด (Compressive strength) ของอิฐหลังการบ่ม Autoclave กับระยะเวลาในการบ่มความชื้น

การทดลองนี้ได้ใช้ดินเบาล้างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเผาดินเบาก่อนที่จะนำมาผสม และขึ้นรูปอิฐจะทำให้อิฐมีความแข็งแรงสูง ทั้งนี้เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูงจะสามารถเพิ่มปริมาณ Active aluminosilicates โดย OH จะหลุดออกจากโครงสร้างของ Hydrous silica, IIIite, และ Montmorillonite ซึ่งจะทำให้ดินเบาเกิดความไม่เสถียรและมีความ Reactive เพิ่มขึ้น เมื่อนำดินเบาที่ผ่านการเผานี้ไปผสม และขึ้นรูปอิฐ จะทำให้สามารถเกิดโครงสร้างที่ทำให้อิฐเกิดความแข็งแรงได้ดียิ่งขึ้น นั่นคือ CSH (Calcium Silicate Hydrate)

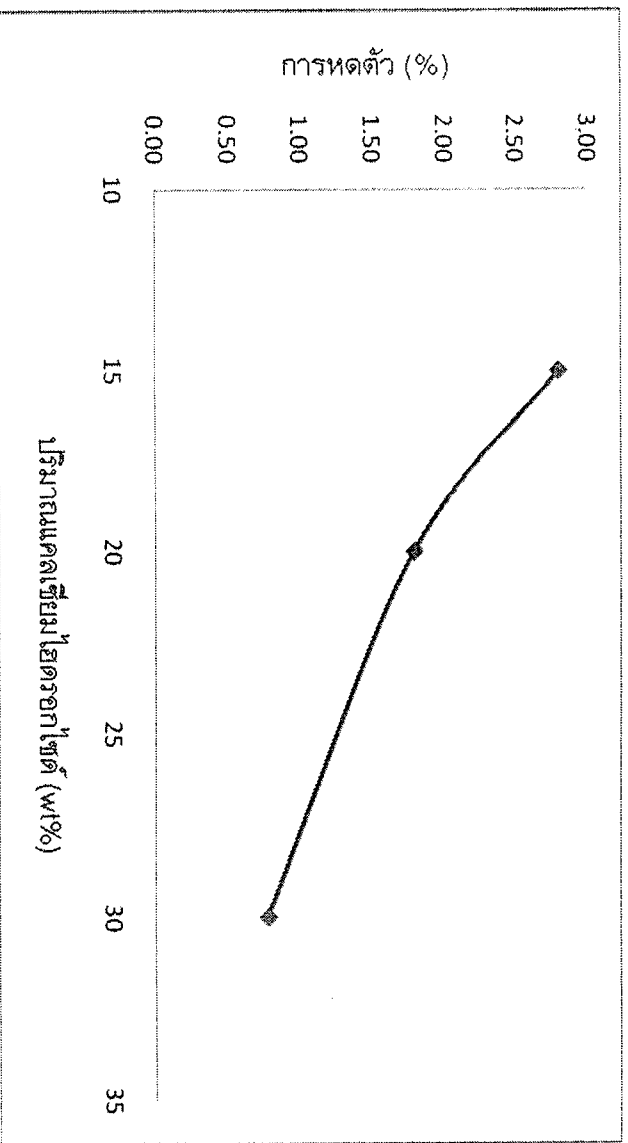
จากการทดลองพบว่า การใช้เวลาในการบ่มความชื้นมากขึ้น จะทำให้อิฐมีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ต่อเนื่องเป็นเวลานานทำให้กำลังอัดช่วงต้นไม่ก่อนดี แต่ยิ่งใช้เวลานานในการบ่มความชื้นนานขึ้น น้ำก็จะสามารถเข้าไปแทรกอยู่ในเนื้อของอิฐได้มากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดได้มาก ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงจากแรงกดอัดตามลำดับขึ้นด้วย แต่เมื่อนำไปบ่มด้วย Autoclave จะทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นอีก เนื่องจากการบ่มด้วย Autoclave มีไอน้ำอิ่มตัวที่มีพลังงานพื้นผิวสูงมีศักยภาพที่จะเดินทางทะลุชั้นของ CSH ที่มีลักษณะเป็นเจลและ CSH ที่มีลักษณะเป็นผลึก เข้าไปชะลอกล่อนและอลูมิเนียมที่เหลือจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่อุณหภูมิห้องได้เร็วขึ้น จึงเหมือนเป็น

การเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกให้เกิดขึ้นส่งผลทำให้เกิดโครงสร้าง CSH และ CAH ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น จากผลการทดลองจะทำการเลือกวันแม่ที่ 10 วันไปทำการทดลองในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆต่อไป เนื่องจากความแปรผันของค่าเป็นเวลา 10 วันเมื่อนำไปป้อนด้วย Autoclave ที่อุณหภูมิสูงถึง 180 °C อีฐสามารถทนได้ ไม่เกิดการแตกร้าวเสียหาย

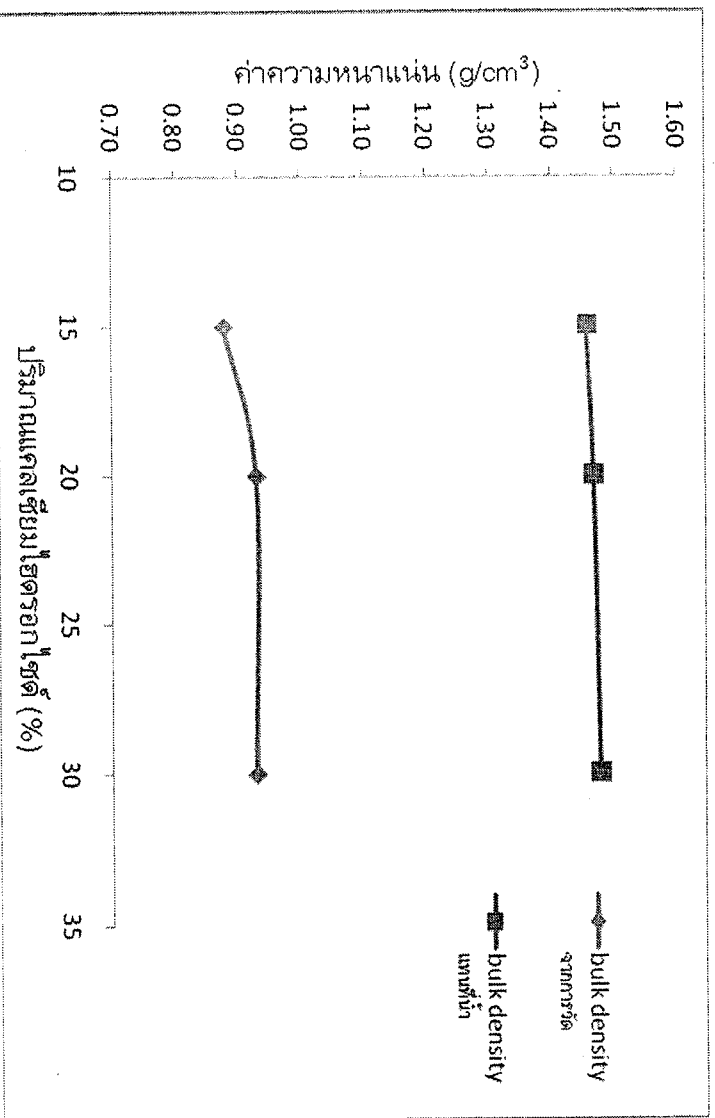
4.8 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรืออัตราส่วนระหว่าง CaO/SiO_2 โดยโมลที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.14 ส่วนผสมต่างๆของอีฐในการทดลองและสมบัติเชิงกลของอีฐ

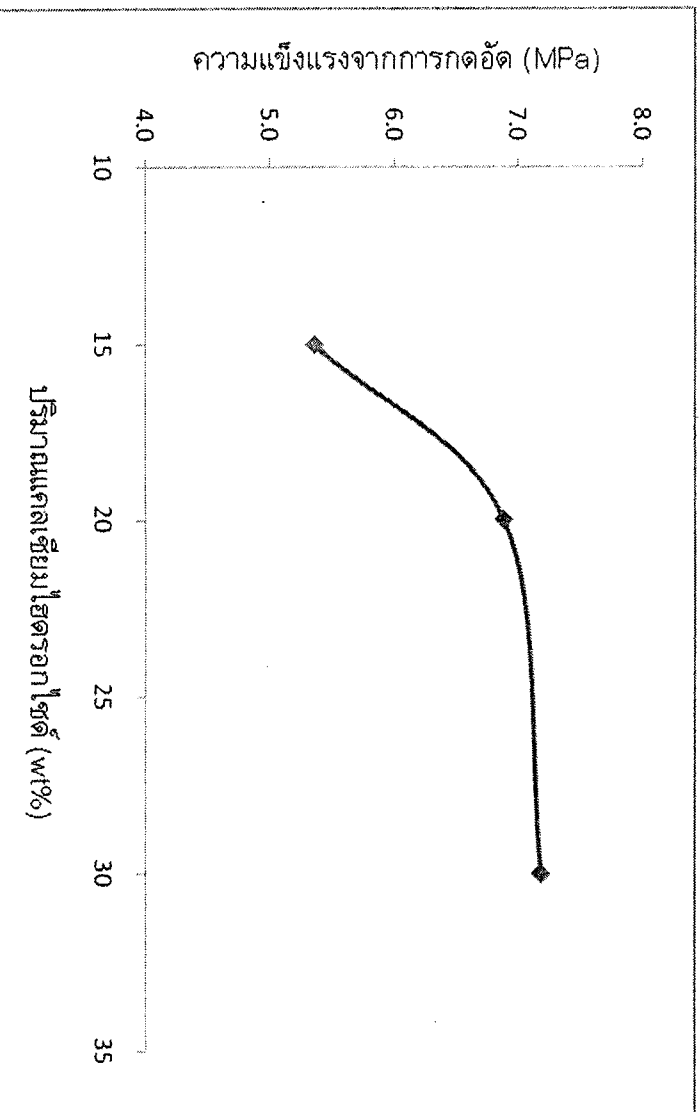
ส่วนผสม		สมบัติเชิงกล					
ดินเบา (%)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)	CaO/SiO_2	%การหดตัว	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความแข็งแรงจากแรงกดอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
85	15	0.25	2.81	0.88	1.46	5.4	62.4
80	20	0.35	1.80	0.93	1.47	6.9	58.4
70	30	0.60	0.78	0.93	1.48	7.2	57.2



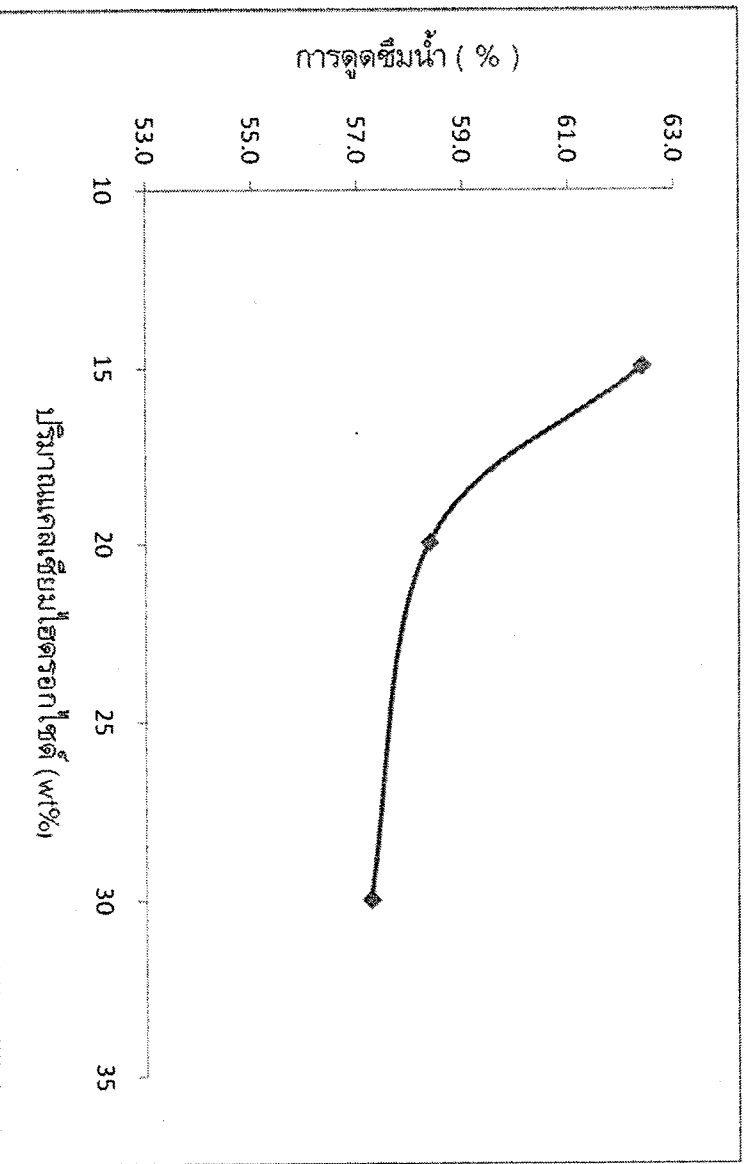
รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%การหดตัว (%Shrinkage) กับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (Bulk density) กับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากการกดอัด (Compressive strength) กับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์



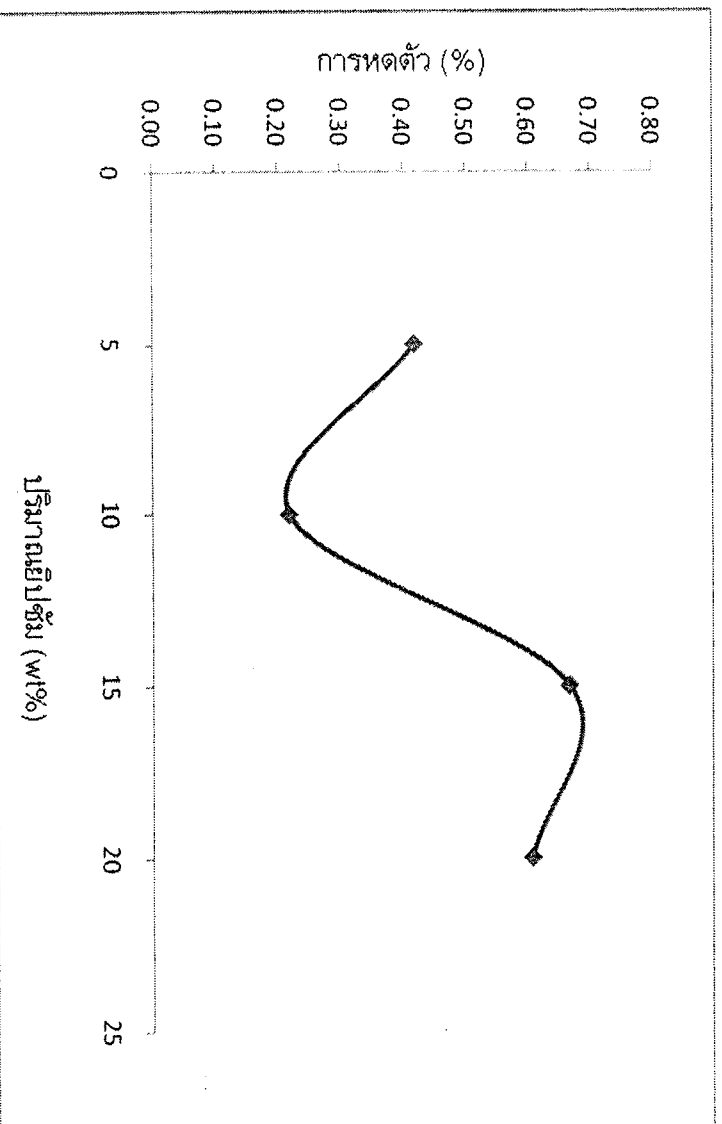
รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) กับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์

จากการทดลองพบว่า เมื่อมีการเติมปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้หุ้มมีความแข็งแรงมากขึ้น สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นและมีความการดูดซึมน้ำลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นจะทำให้ในระบบมีปริมาณของ Ca^{2+} สูงขึ้น จึงสามารถเกิดเป็นโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ได้ โดยอัตราส่วนของ CaO/SiO_2 ที่เหมาะสมคือ 0.35 และ 0.60 โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตนี้จะเป็นตัวที่ช่วยรับ締ชอบความแข็งแรงในอิฐ จึงทำให้ได้สมบัติดังกล่าวและจะเห็นว่าการเติมปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 30 w% การพัฒนาความแข็งแรงของอิฐเริ่มคงที่และมีความแข็งแรงมากที่สุด ผู้ทำการทดลองจึงได้เลือกสูตรที่มีการใช้ปริมาณดินเผา : แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 70 : 30 ไปทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่อไป เนื่องจากการเติมยิปซัมมีงานวิจัยอื่น ๆ กล่าวไว้ว่ายิปซัมสามารถช่วยในการละลายอะลูมิเนียมเออออกไซด์ที่เป็นอะลูมิเนียมซิลิเกตได้เพิ่มขึ้น จึงต้องการศึกษาการเติมยิปซัมที่มีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่อไป

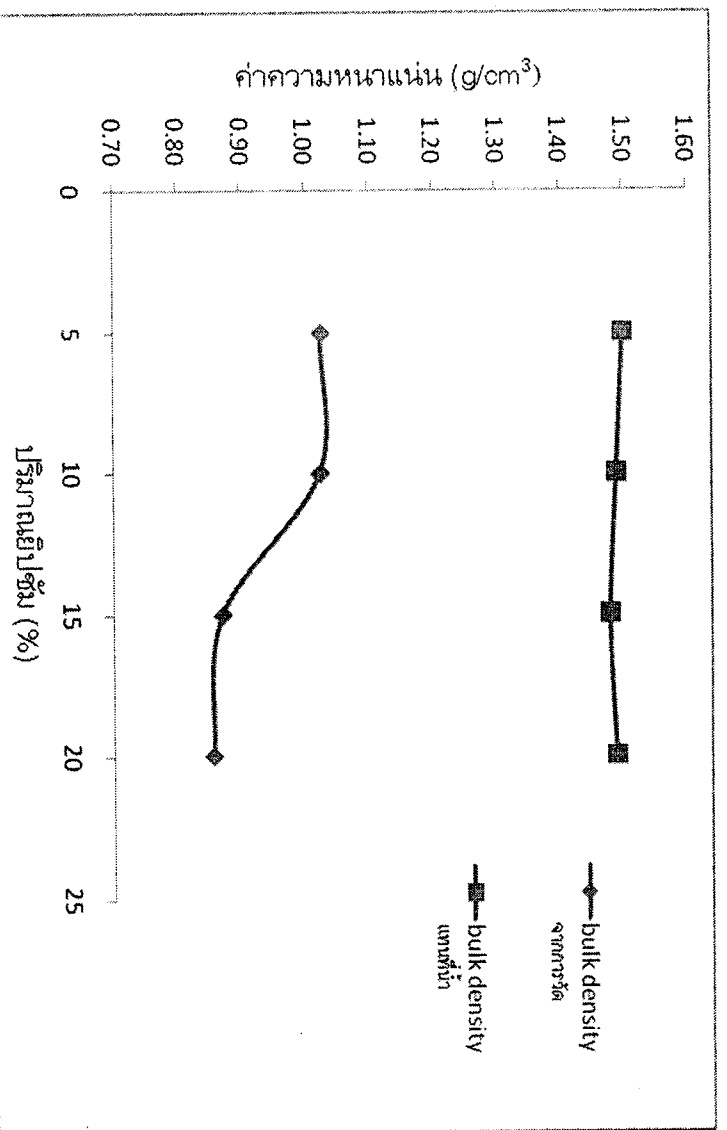
4.9 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณยิปซัมที่ต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.15 ส่วนผสมต่างๆของอิฐในการทดลองและสมบัติเชิงกลของอิฐ

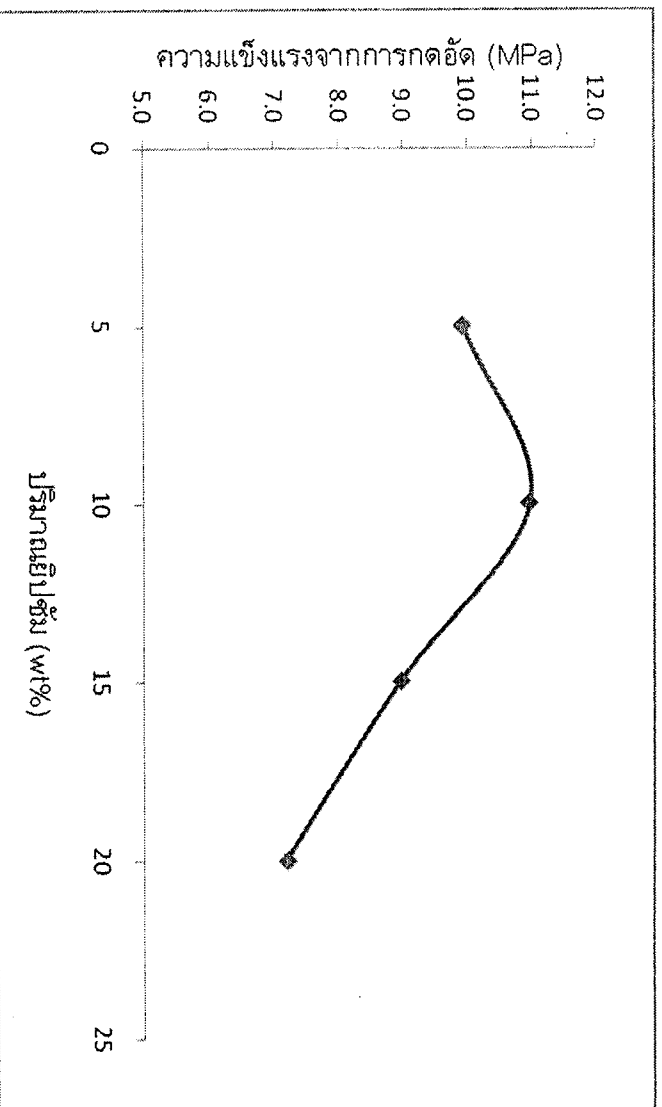
ส่วนผสมผสม			สมบัติเชิงกล				
ดินเผา (%)	Ca(OH)_2 (%)	ยิปซัม (%)	%การหดตัว	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความแข็งแรงจากแรงกดอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
70	10	20	0.61	0.86	1.49	7.2	71.0
70	15	15	0.67	0.87	1.48	8.9	70.1
70	20	10	0.22	1.02	1.49	10.9	42.9
70	25	5	0.42	1.02	1.50	9.9	43.7



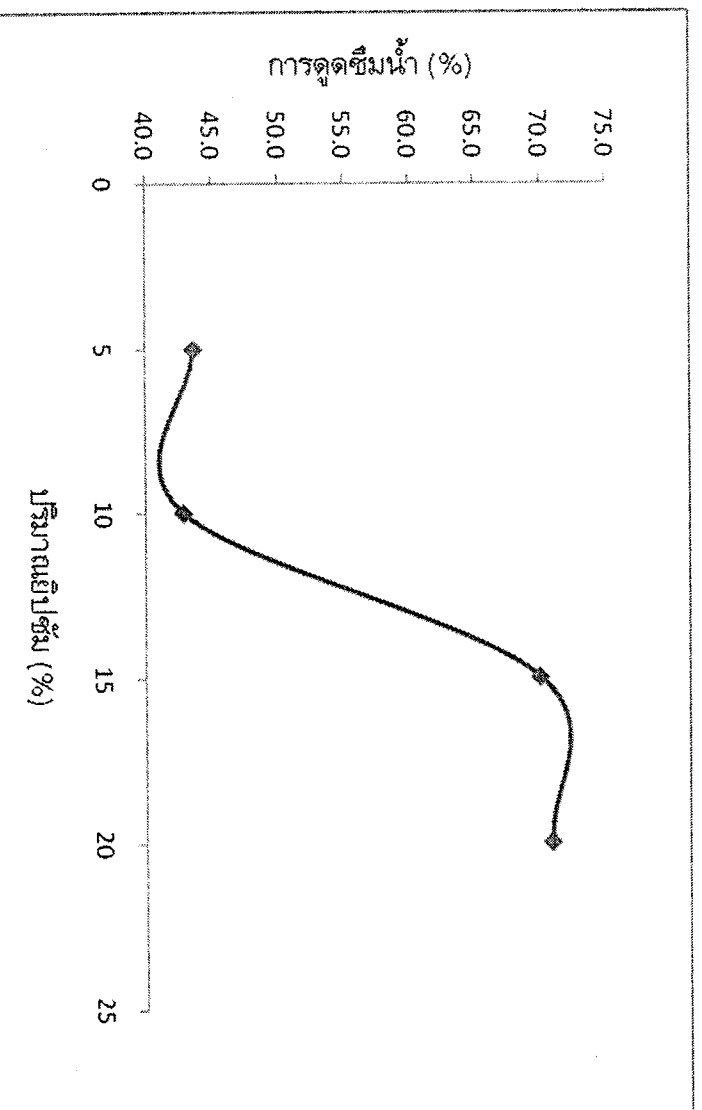
รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%การหดตัว (%Shrinkage) กับปริมาณเย็บซึม



รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (Bulk density) กับปริมาณเย็บซึม

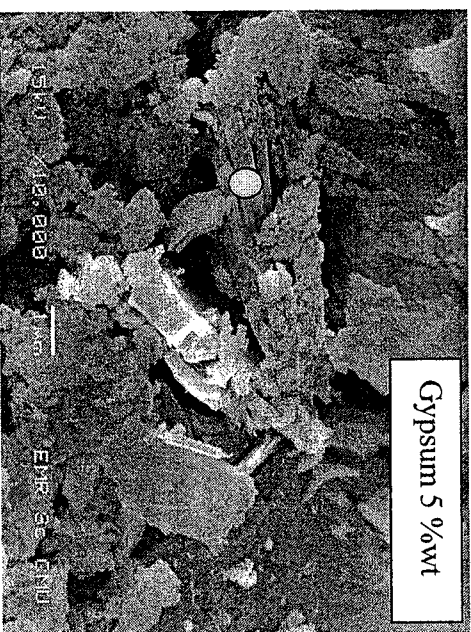
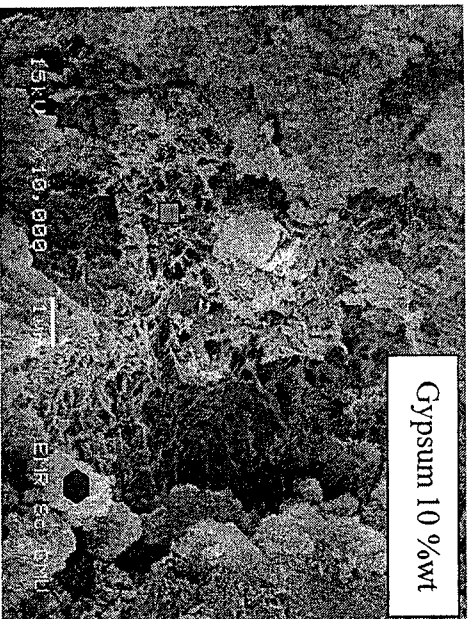
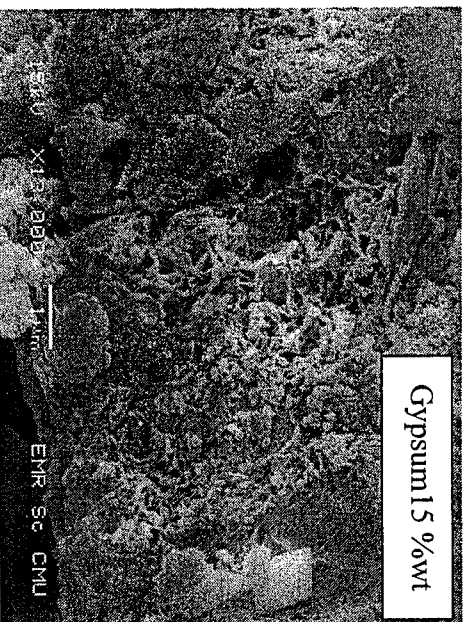
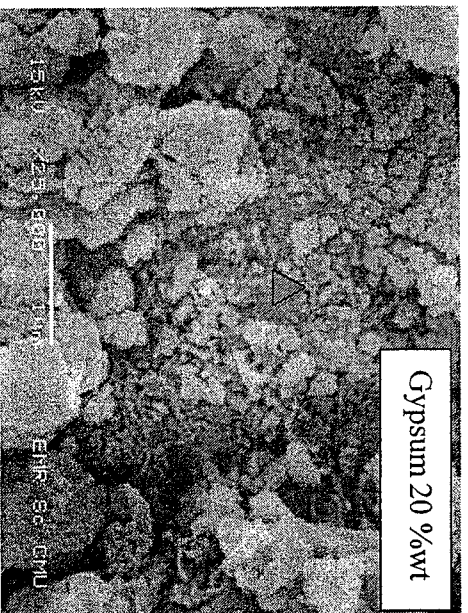


รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากการกดอัด (Compressive strength) กับปริมาณของยิปซั่ม



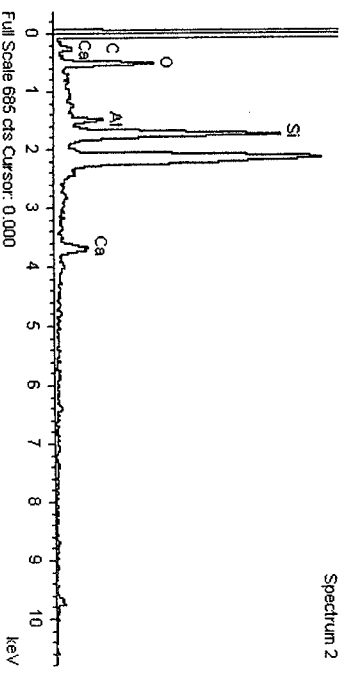
รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำ (Water absorption) กับปริมาณของยิปซั่ม

จากการทดลองพบว่า การเติมยิปซัมทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากกว่าอิฐที่ไม่ได้เติมยิปซัม และเมื่อทำการเติมยิปซัมในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้วัสดุมีความแข็งแรงลดลง และสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นที่ลดลงและค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาค โดยการเติมยิปซัมทำให้อะลูมินัมไฮดรอกไซด์ละลายออกมาได้มากขึ้น คาดว่าเกิดเป็นสารประกอบชนิดแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) สารประกอบบางอย่างที่มีเมื่อเติมยิปซัม แต่ไม่เกิดโครงสร้างนี้เมื่อไม่มีการเติมยิปซัมเป็นส่วนผสม ซึ่งจะศึกษาต่อไปในการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค



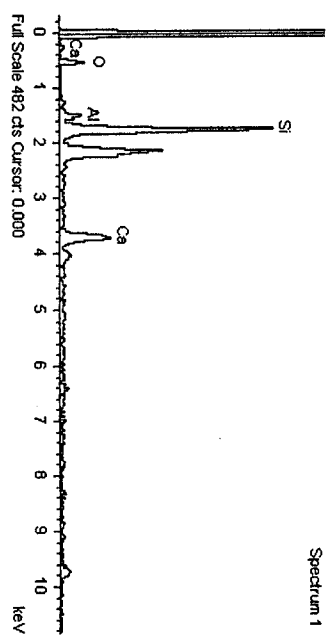
สัญลักษณ์ ▲

Element	Weight%	Atomic%
O	43.12	50.67
Al	4.40	3.07
Si	28.59	19.14
Ca	9.37	4.40
Totals	100.00	



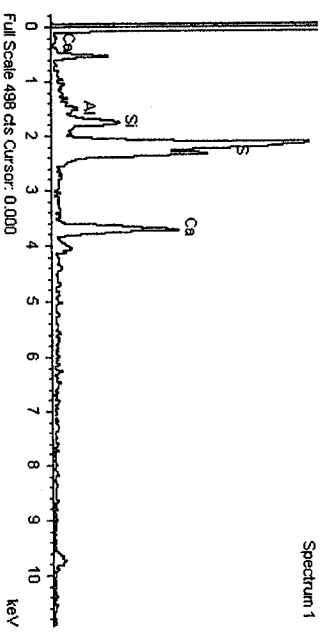
สัญลักษณ์

Element	Weight%	Atomic%
O	27.13	42.11
Al	3.31	3.05
Si	44.39	39.25
Ca	25.17	15.59
Totals	100.00	



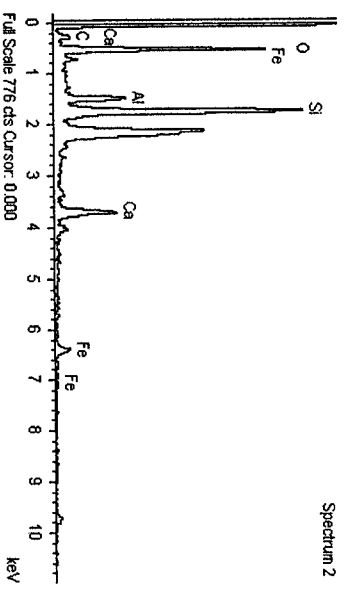
สัญลักษณ์

Element	Weight%	Atomic%
Al	2.64	3.52
Si	10.87	13.91
S	22.47	25.18
Ca	64.02	57.39
Totals	100.00	



สัญลักษณ์

Element	Weight%	Atomic%
O	49.91	62.49
Al	4.97	3.69
Si	19.49	13.90
Ca	10.61	5.30
Fe	7.97	2.86
Totals	100.00	



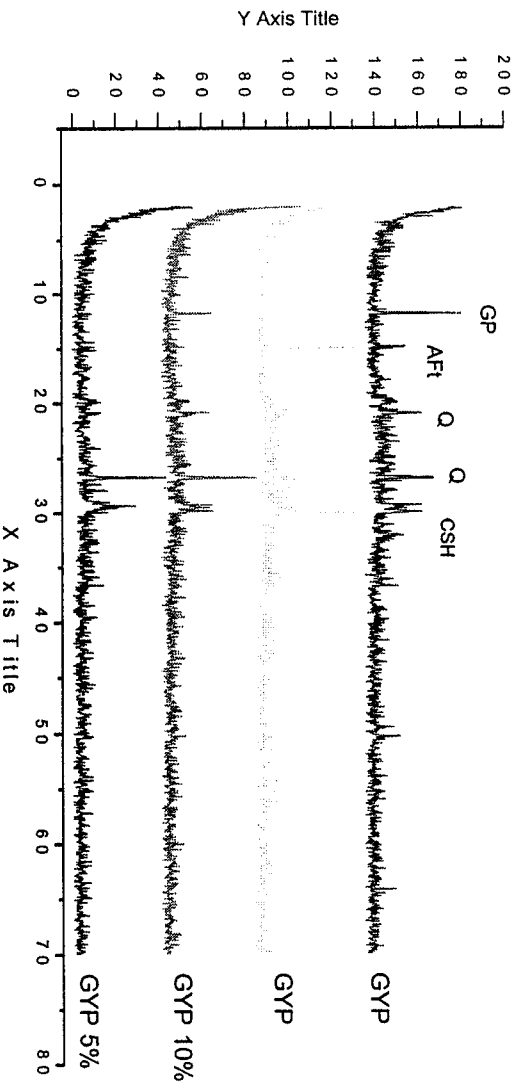
รูปที่ 4.48 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของอิฐเมื่อเติมปริมาณยิปซั่ม 20, 15, 10 และ 5 %wt และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS

จากผล EDS ของอิฐเมื่อเติมปริมาณยิปซั่ม 20%wt ที่บริเวณสัญลักษณ์ ▲ พบว่ามีปริมาณของธาตุ Si ที่สูงแต่มีธาตุ Ca และ Al ต่ำ จึงคาดว่าบริเวณนี้น่าจะเป็นอนุภาคของดินเบา ซึ่งพบอนุภาคของธาตุ Ca และ Al ปะปนอยู่ด้วย ซึ่งเป็นอนุภาคที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาต่อกัน ส่วนผล EDS ที่บริเวณสัญลักษณ์ ■ พบว่ามีปริมาณของธาตุ Ca และ Si ค่อนข้างสูง จึงคาดว่าน่าจะเป็น

โครงสร้างของ CSH ส่วนผล EDS ที่บริเวณสัญลักษณ์  จะพบว่าโครงสร้างมีลักษณะเป็นแผ่นซึ่งจากปริมาณของ Ca และ S ทำให้คาดได้ว่าเป็นอนุภาคของ CaSO_4 ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยานั้นคือยิปซัมที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยานั้นเองและจากผล EDS ที่บริเวณ

สัญลักษณ์  พบว่ามีปริมาณของธาตุ Si ค่อนข้างสูงรองลงมาจะพบปริมาณของธาตุ Ca และ Al ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นโครงสร้างที่พบนี้น่าจะเป็นโครงสร้าง Gismondine หรือ CASH

จากผลของ EDS ทั้งหมดจะพบว่าการเติมยิปซัมจะช่วยให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าที่ไม่ได้เติมยิปซัมแต่การเติมต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสม เพราะเมื่อเติมมากเกินไปจะทำให้โครงสร้างของ Ettringite ซึ่งโครงสร้างนี้จะไปทำลายการผืนกั๊กกันของโครงสร้าง CSH จึงทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง และจากการเติมยิปซัมปริมาณ 10% จะพบว่าโครงสร้างเส้นใยขนาดเล็กรู้จำนวนมากกว่าที่ปริมาณการเติมยิปซัมอื่นๆ ซึ่งคือโครงสร้างของ CSH และจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาของผู้วิจัย [16] พบว่าเมื่อมีการเติมยิปซัมจะพบโครงสร้างชนิดหนึ่งนอกเหนือจาก CSH ซึ่งเรียกว่า Gismondine ($\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$) หรือ CASH ซึ่งเป็นโครงสร้างที่คล้าย CSH แต่มีขนาดเล็กและปริมาณมากกว่า สานต่อกันอย่างแข็งแรง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้วัสดุที่เติมยิปซัมมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุที่ไม่ได้เติมยิปซัม



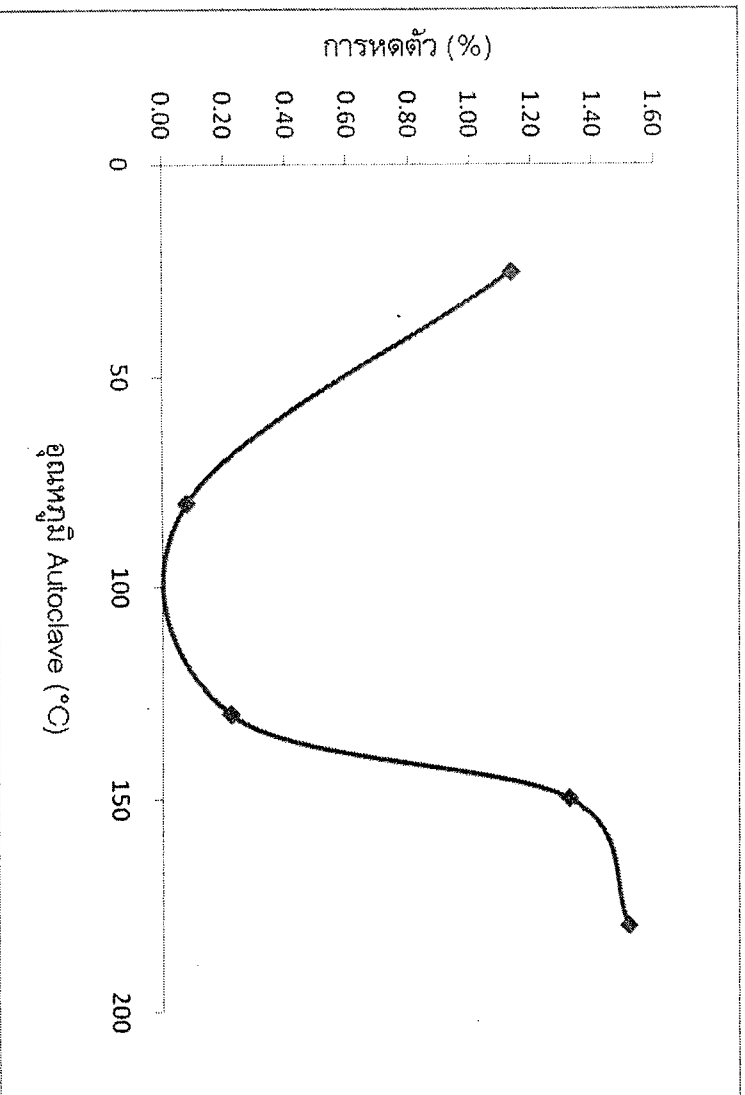
รูป 4.49 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของวัสดุเมื่อเติมปริมาณยิปซัม 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของอิฐเมื่อเติมปริมาณยิปซัมพบว่าเกิดเฟสของCSH ที่ยืนยันว่าค่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นกับอิฐ มาจากโครงสร้างของ CSH จริง และ พบเฟสของ Quartz และGypsum ซึ่งเป็นQuartzและGypsumที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาหรือยัง เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ และยังพบเฟสของ Ettringite (หรือ AFt) ที่เกิดขึ้นเมื่อเติมปริมาณ ยิปซัมเกิน 10 wt% โดยการศึกษา AFt ยืนยันให้เห็นถึงการมีอะลูมิเนียมเฟสละลายออกมาจาก วัสดุดิบตั้งต้นเป็นจำนวนมากขึ้น เกิดเป็นสารประกอบใหม่ชนิด AFt และเนื่องจาก AFt เป็น อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า CSH มาก ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการยึดกันระหว่างอนุภาค CSH ทำให้ ความแข็งแรงของอิฐลดลง

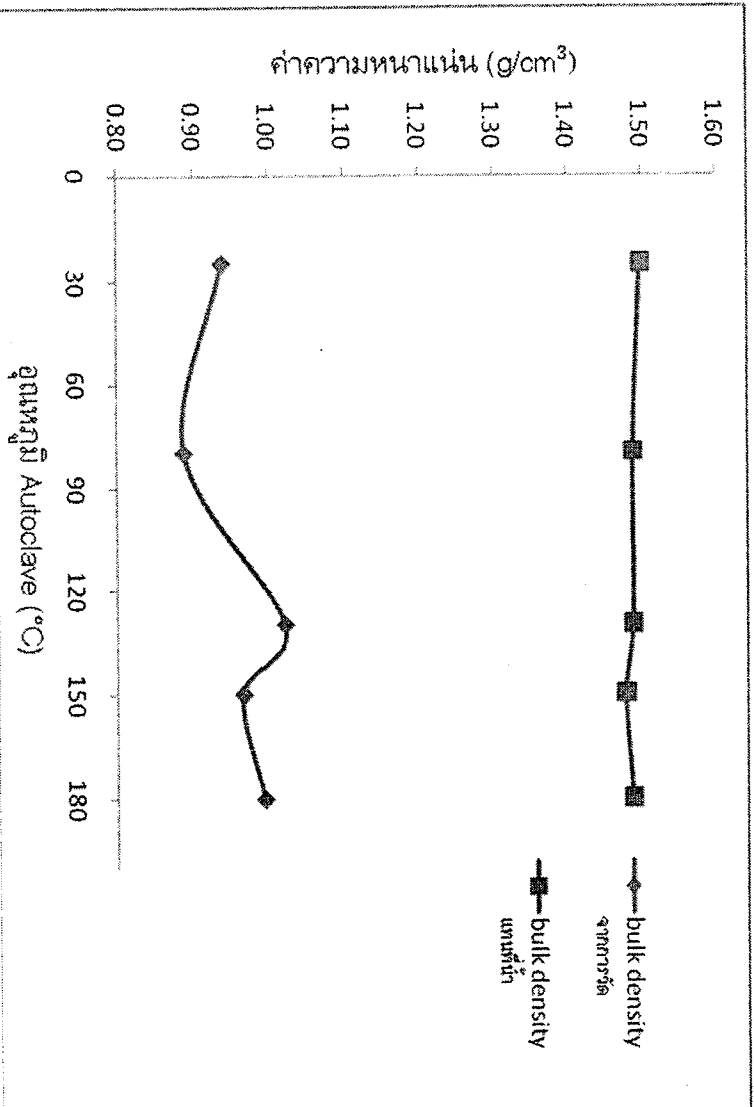
4.10 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการ Autoclave ที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.16 อุณหภูมิที่ใช้ในการ Autoclave ของอิฐในการทดลองและสมบัติเชิงกลของอิฐ

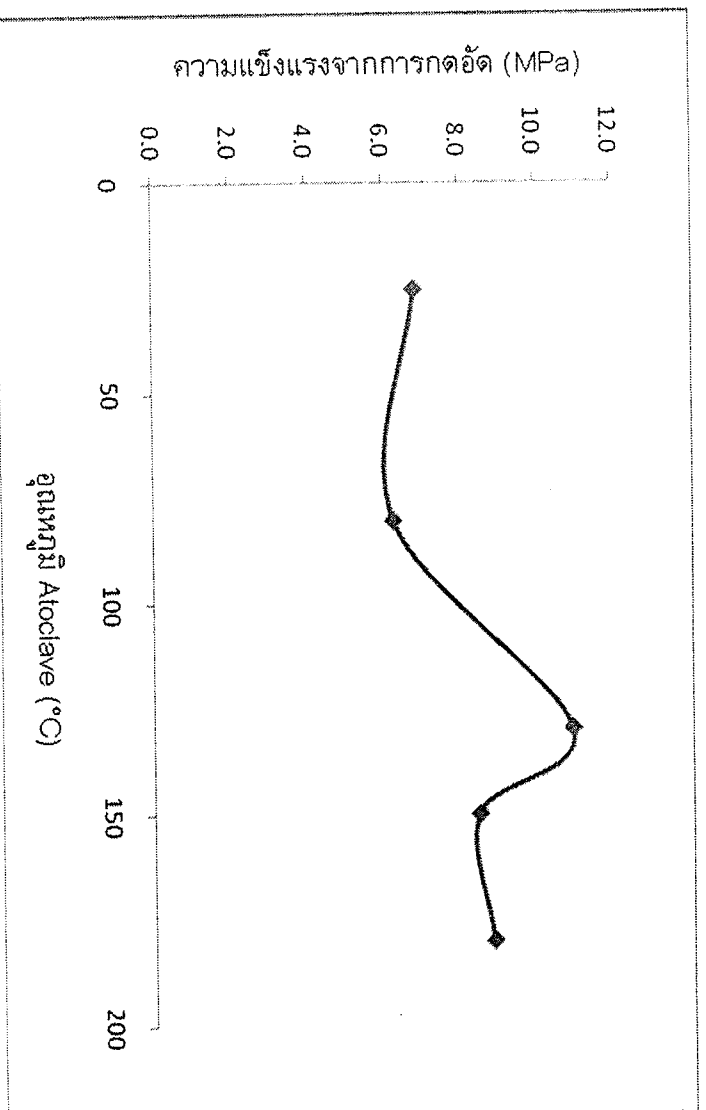
อุณหภูมิ ที่ใช้	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล				
	ดินเบา (%)	Ca(OH) ₂ (%)	ยิป ซั่ม (%)	%การ หดตัว	ความ หนา แน่น (g/cm ³)	ความ หนา แน่น (g/cm ³)	ความ แข็งแรง กดอัด (MPa)	การ ดูดซึ่ม น้ำ (%)
ในการ Autoclave (°C)								
25	70	20	10	1.14	0.94	1.50	6.9	54.3
80	70	20	10	0.08	0.89	1.49	6.3	61.6
130	70	20	10	0.22	1.02	1.49	10.9	42.9
150	70	20	10	1.33	0.97	1.48	8.5	50.2
180	70	20	10	1.52	1.00	1.49	8.8	48.3



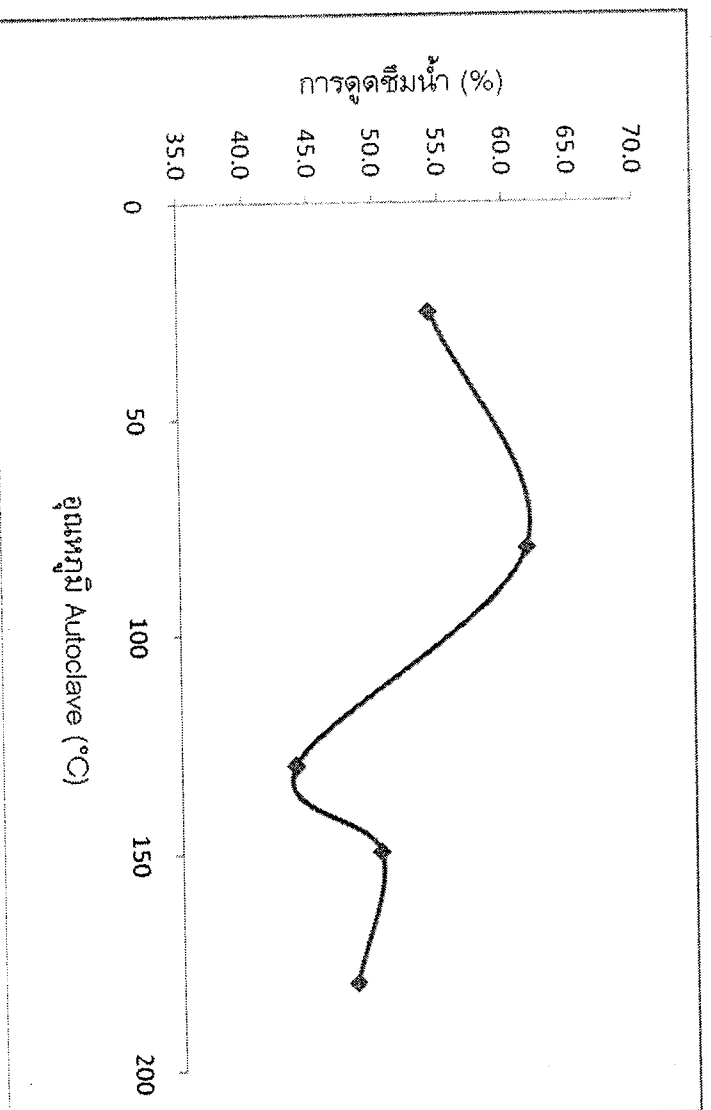
รูปที่ 4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%การหดตัว (%Shrinkage) กับอุณหภูมิในการ Autoclave



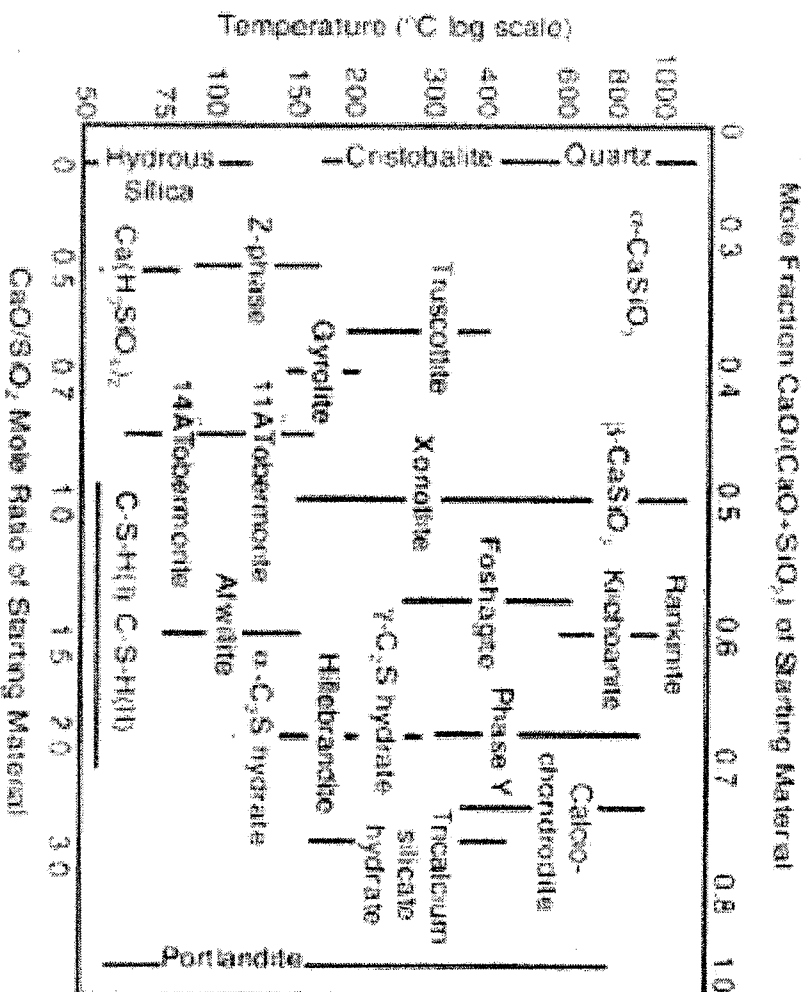
รูปที่ 4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (Bulk density) กับอุณหภูมิในการ Autoclave



รูปที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากการกดอัด (Compressive strength) กับอุณหภูมิในการ Autoclave



รูปที่ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) กับ อุณหภูมิในการ Autoclave



รูปที่ 4.54 สารประกอบที่เกิดขึ้นในระบบของ $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$

จากการทดลองพบว่า การใช้อุณหภูมิในการ Autoclave [17] อุณหภูมิที่ 25 $^{\circ}\text{C}$ และ 80 $^{\circ}\text{C}$ จะให้ค่าความแข็งแรงที่ต่ำคือประมาณ 7 MPa แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการ Autoclave ไปจนถึง 130 $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นช่วงของ Steam pressure ทำให้ได้เฟสของ CSH ที่เป็น Tobermorite ซึ่งเป็นผลึกรูปเข็ม มีความเสถียร จึงให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าการ Autoclave ที่อุณหภูมิอื่นๆ และจะพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการ Autoclave สูงขึ้นคือ 150 $^{\circ}\text{C}$ และ 180 $^{\circ}\text{C}$ ค่าความแข็งแรงจะลดลงสัมพันธ์ถึงค่าความหนาแน่นที่ลดลงและค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเกิดเฟสของ CSH อีกชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างทางแร่แตกต่างจาก Tobermorite จึงทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง ดังนั้นการใช้อุณหภูมิในการ Autoclave จะมีจุดที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดโครงสร้างของ CSH ที่ให้ค่าความแข็งแรงสูง นั่นคือการใช้อุณหภูมิในการ Autoclave ที่ 130 $^{\circ}\text{C}$

4.11 ผลการศึกษอิทธิพลขนาดอนุภาคของดินเบาลำปางที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.17 ขนาดดินเบาลำปางที่ใช้ทำอิฐในการทดลองและสมบัติเชิงกลของอิฐ

ขนาด	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล				
	ดินเบา (%)	Ca(OH) ₂ (%)	เถ้า (%)	%การหดตัว	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความแข็งแรงกดอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
เล็ก	70	20	10	0.22	1.02	1.49	10.99	43.7
หยาบ	70	20	10	13.65	1.19	1.52	5.0	38.8

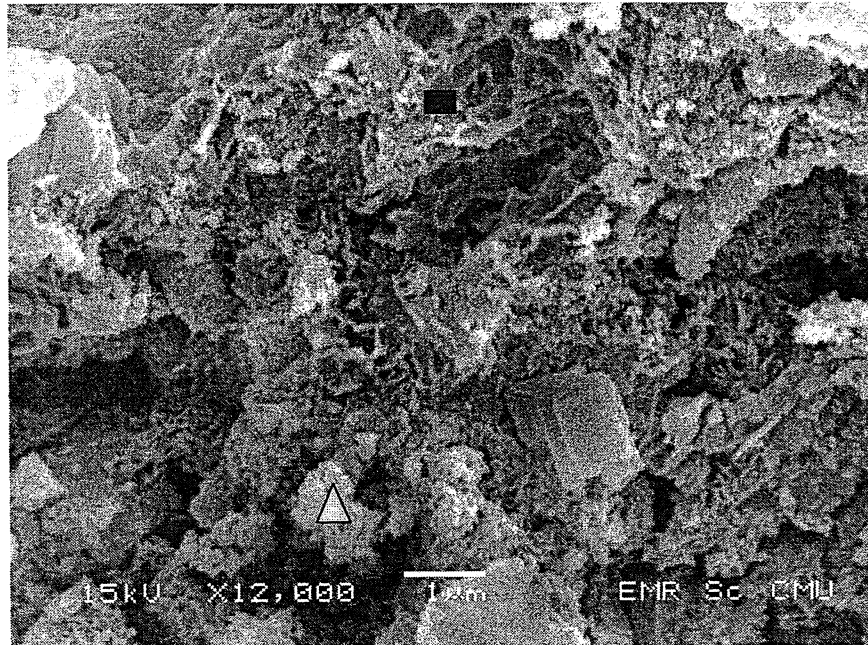
*ขนาดเล็ก = อนุภาคมีการกระจายขนาดอยู่สองขนาดคือ

0.33 μm และ 13 μm

ขนาดหยาบ = ค่าตั้งแต่เกรง 80 เมช (หรือ 180 μm)

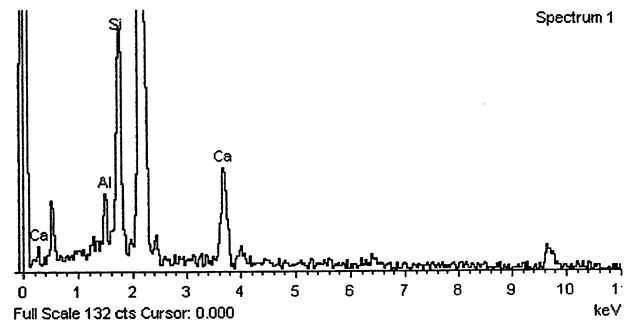
จากผลการทดลองพบว่าการใช้ดินเบาลำปางขนาดเล็กซึ่งมีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ 2 ขนาด คือ 0.33 และ 13 μm ให้ค่าความแข็งแรงของอิฐมากกว่าการใช้ดินเบายาหนาบ เนื่องจากขนาดอนุภาคเล็กมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสผสมและมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาปอซโซจึงเกิดขึ้นได้มากกว่า เกิดโครงสร้างของ CSH มาก ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงมากตามด้วย แต่จะเห็นว่าการใช้ดินเบาลำปางที่ค่าตะแกรง 80 mesh ให้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าซึ่งไม่สัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงที่ต่ำของอิฐ เนื่องจากส่วนนี้ต่างตะแกรงมีขนาดอนุภาคที่หลากหลายจึงทำให้เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นอิฐเกิดการ Pack ตัวที่ตึกกว่าจึงทำให้ค่าความหนาแน่นมากกว่าการใช้ดินเบาลำปางขนาดเล็ก โดยจะสัมพันธ์ถึงค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำลงด้วย

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค



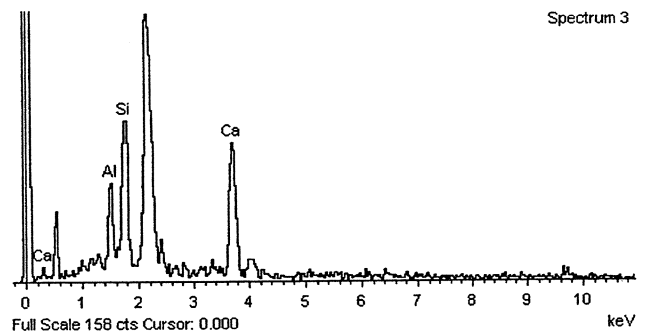
สัญลักษณ์ ■

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	



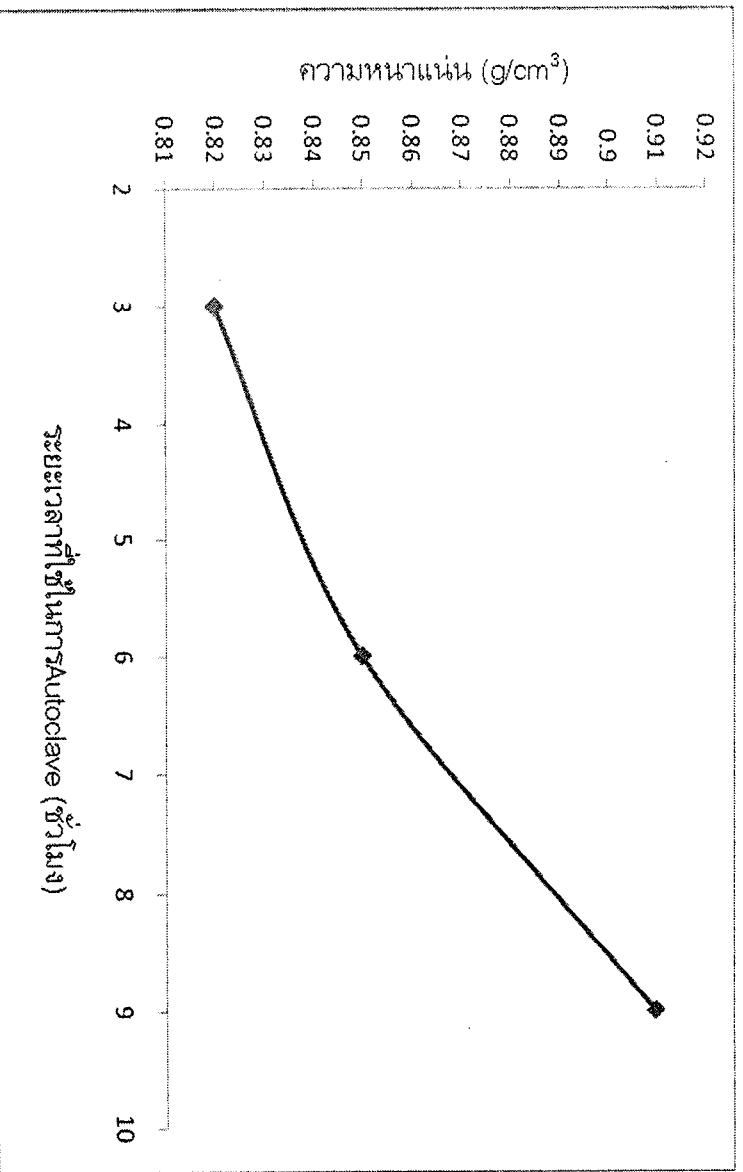
รูป 4.55 แสดงโครงสร้างทางจุลภาค และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอิฐที่ทำจากดินเบาขนาดหยาบ (อนุภาคค้ำตะแกรง 80 เมช (หรือ 180 μm))

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

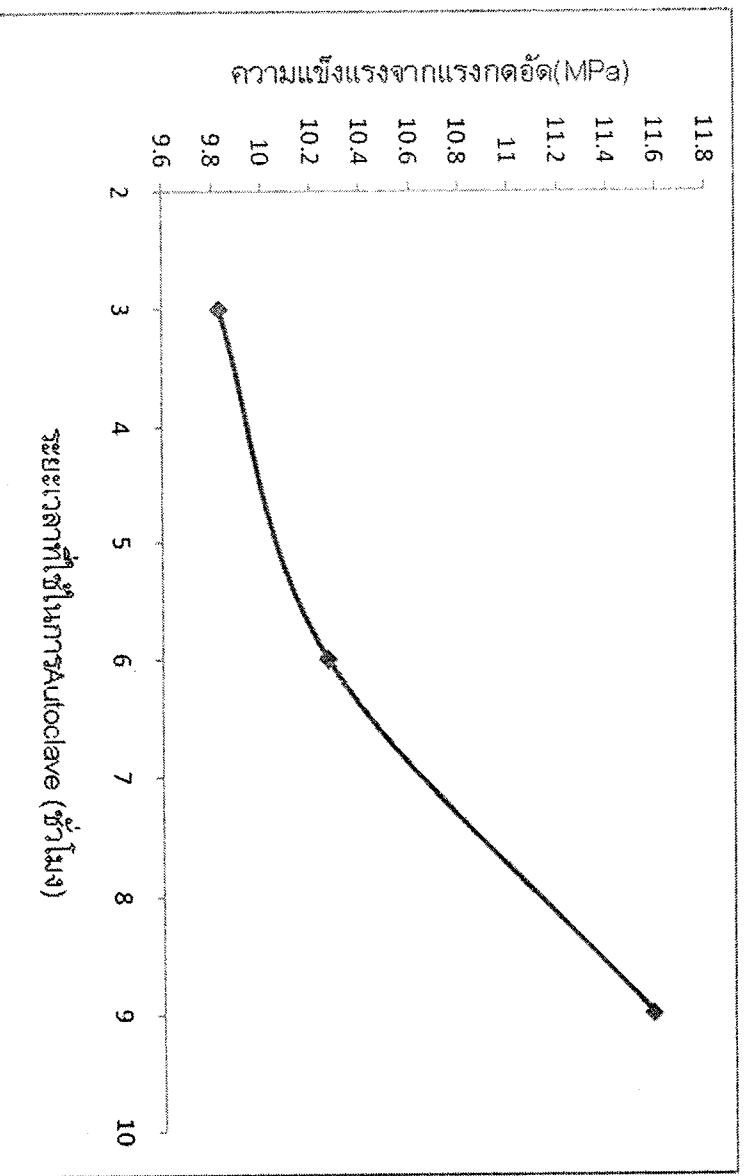
4.12 ผลการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการ Autoclave ที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.18 ระยะเวลาที่ใช้ในการ Autoclave อิฐในการทดลอง และสมบัติเชิงกลของอิฐ

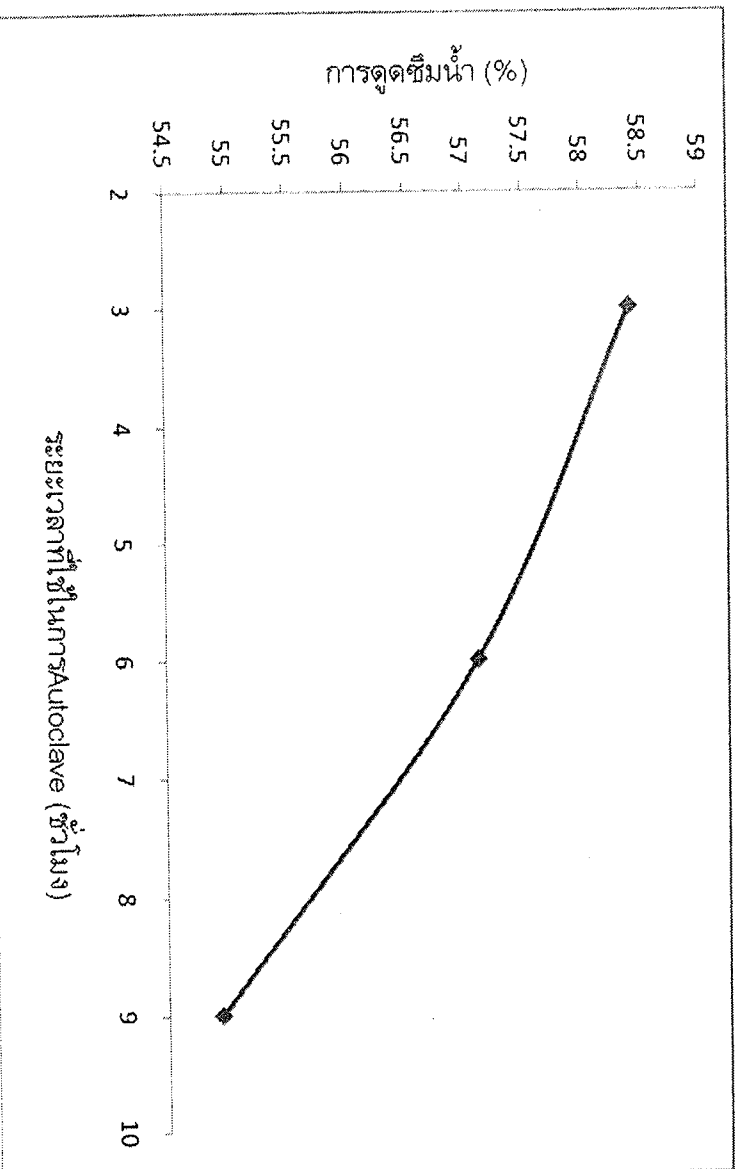
ระยะเวลาที่ใช้ในการ Autoclave (ชั่วโมง)	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล		
	ดินเบา (%)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)	ยิปซัม (%)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความแข็งแรงจากแรงกดอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
3	70	10	20	0.82	9.83	54.95
6	70	10	20	0.85	10.27	57.13
9	70	10	20	0.91	11.59	58.42



รูปที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (Bulk density) กับระยะเวลาที่ใช้ในการ Autoclave



รูปที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากการกดอัด (Compressive strength) กับระยะเวลาที่ใช้ในการ Autoclave



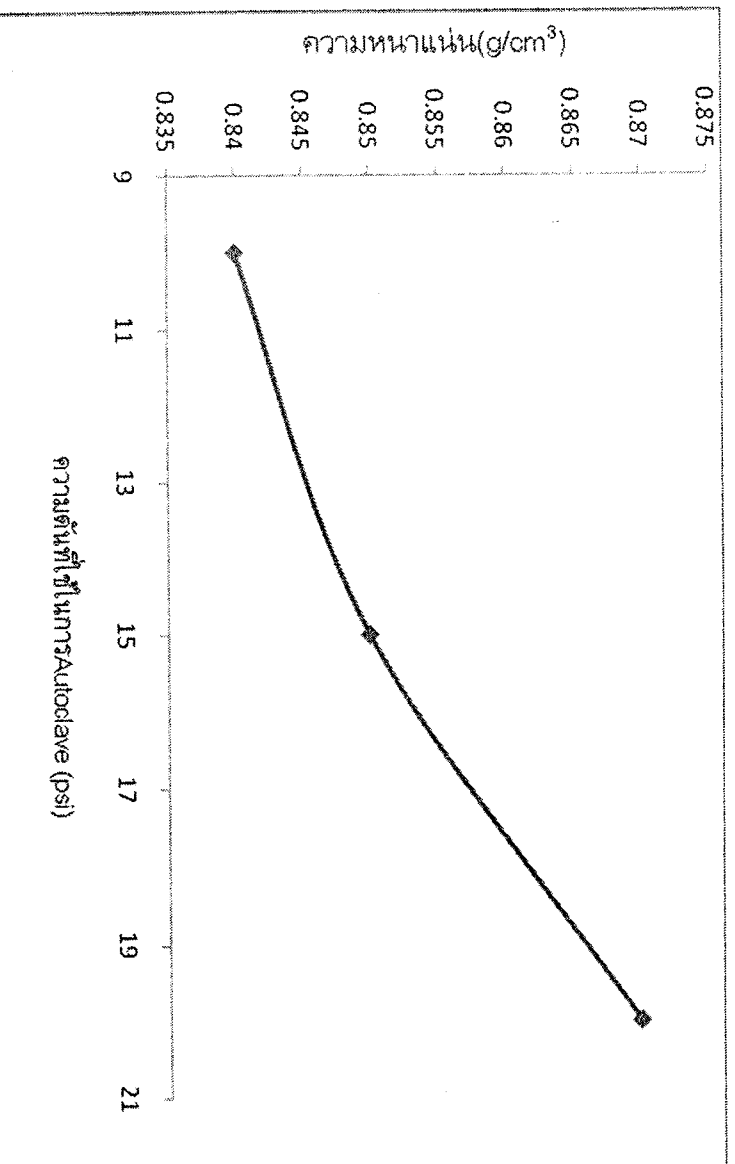
รูปที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) กับระยะเวลาที่ใช้ในการต้มด้วย Autoclave

จากการทดลองพบว่า การใช้เวลาในการ Autoclave อีซูมากขึ้น จะทำให้อีซูมีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจาก ยิ่งใช้เวลานานในการ Autoclave มากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิเวลาในการจัดเรียงตัวชิดกันมากขึ้น ซึ่งจะเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาปอลิไซคลาน และเกิดโครงสร้างของ CSH มากขึ้น รวมทั้งการใช้ระยะเวลาในการ Autoclave มากขึ้น ทำให้อิออนที่อยู่ในรูพรุนของอีซูมีความอึดตัวมากขึ้น ไอออนที่อึดตัวจะใช้เวลานานในการระเหยเอา AI และ Si ออกมามากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอลิไซคลานมากขึ้น ดังนั้นโครงสร้างของ CSH จึงมากขึ้นด้วย แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการอีซูที่มีความพรุนตัวสูงๆ และมีค่าความแข็งแรงที่เหมาะสม ดังนั้นจึงพิจารณาที่แรงกดอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปอีซูที่ทำให้ได้ความแข็งแรงที่สามารถใช้ในการก่อสร้างได้จริง และให้ความพรุนตัวสูงด้วย

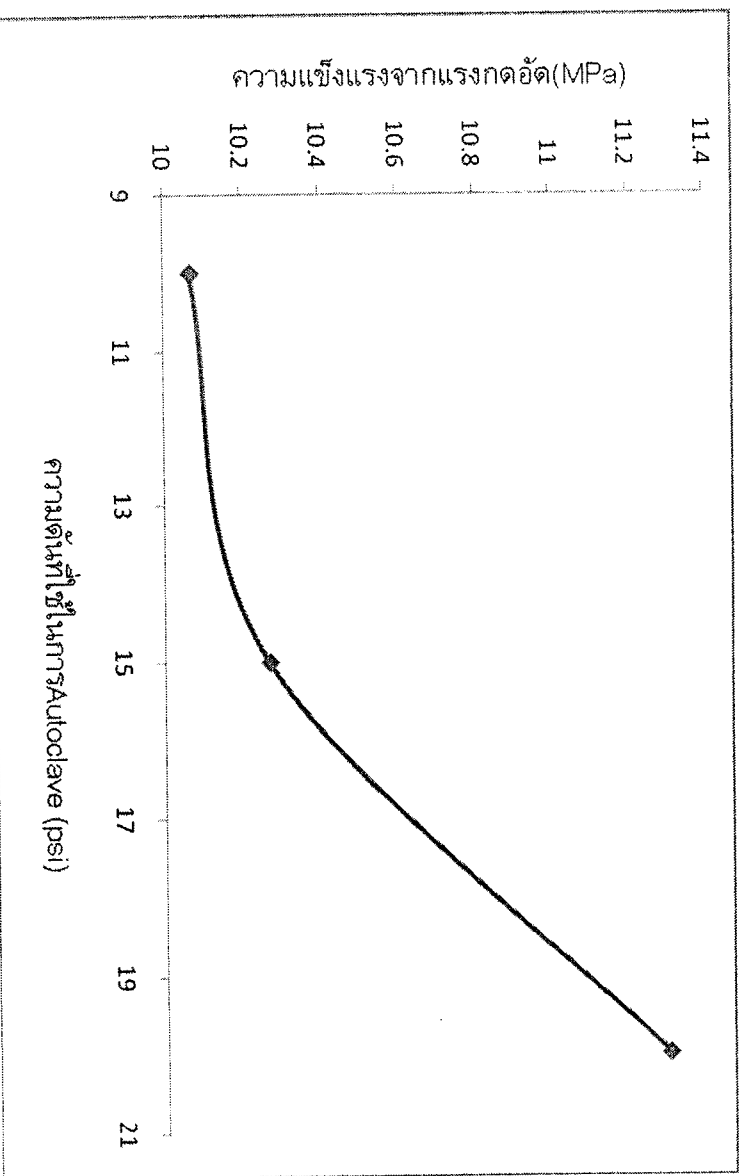
4.13 ผลการศึกษาอิทธิพลของความดันที่ใช้ในการ Autoclave

ตาราง 4.19 ความดันที่ใช้ในการ Autoclave อิฐในการทดลอง และสมบัติเชิงกลของอิฐ

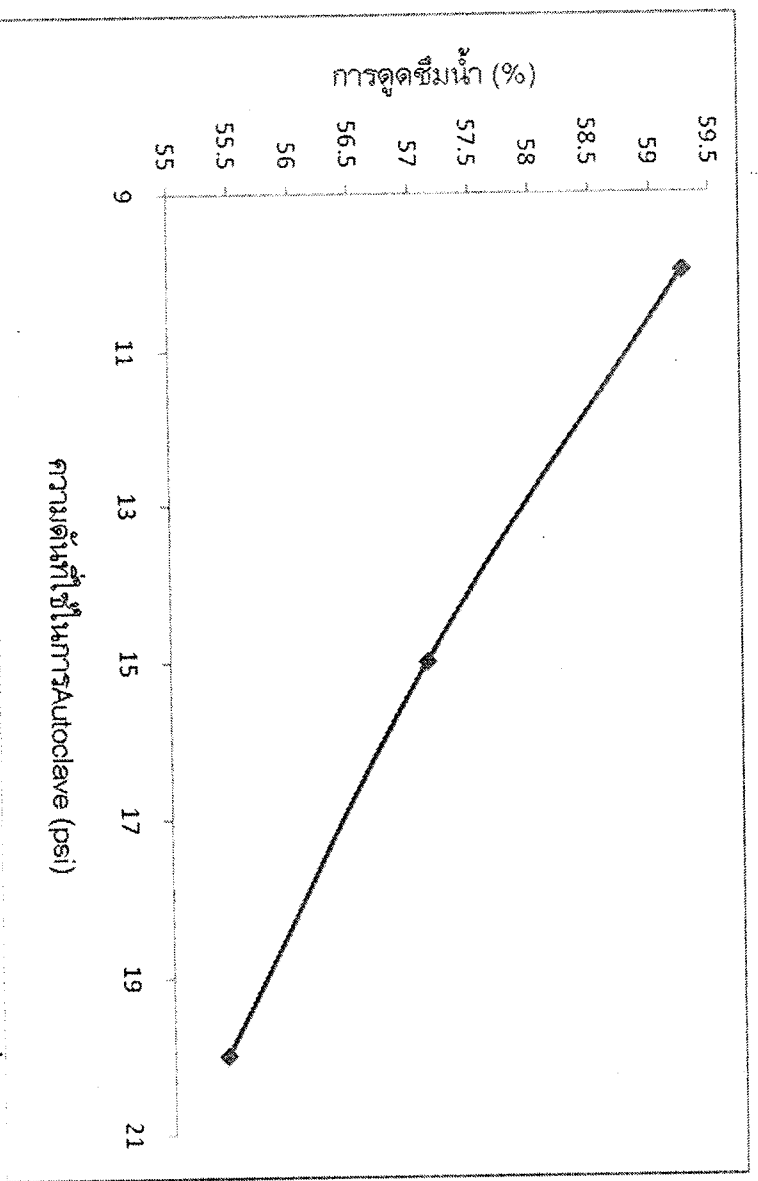
ความดันที่ใช้ในการ Autoclave (psi)	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล		
	ดินเผา (%)	Ca(OH) ₂ (%)	ยิปซั่ม(%)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความแข็งแรงจากแรงกดอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
10	70	10	20	0.83	10.07	59.28
15	70	10	20	0.85	10.27	57.13
20	70	10	20	0.90	11.31	55.44



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 ผลการศึกษากิจกรรมของการปรับสภาพด้วยความร้อนต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน

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 Calcineg เมื่อเทียบกับดินเบาที่ไม่ได้ผ่านการ Calcine น่าจะทำให้การละลายของเอนออนต่างๆในดินเบาทั้งสองสภาวะมีความแตกต่างกัน ซึ่งความเข้มข้นของเอนออนแต่ละชนิดจะส่งผลต่อชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่ในอิฐ โดยสารประกอบเหล่านี้จะเป็นตัวรับผิดชอบความแข็งแรงของอิฐ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าดินเบาที่ไม่ผ่านการแคลไชนต์ทำให้ระบบมีอัตราส่วนระหว่าง CaO/SiO_2 ที่เหมาะสมสามารถเกิดเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานได้มากกว่าหรือมีขนาดเล็กกว่าอิฐที่ให้ดินเบาที่ผ่านการแคลไชนต์

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายในการศึกษาปฏิกิริยาโพลิมเมอร์ไรเซชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเบาล้าง

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

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

สำหรับการสังเคราะห์วัสดุอิฐโพลิมเมอร์ที่มีน้ำหนักรีด ใช้วัสดุวัตถุดิบตั้งต้นสองชนิดคือ ดินเบาแห้งล้างและเถ้าแกลบ โดยใช้อัตราส่วนผสมโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาในช่วง 13.0-33.5 และของไฮเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาในช่วง 0.7-3.0 ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยของความละเอียดของดินเบา อุณหภูมิในการเผาแคลไชนต์ดินเบา ความเข้มข้นของสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างดินเบาและเถ้าแกลบ อุณหภูมิและเวลาในการบ่มวัสดุ โดยศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงความร้อนและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอิฐโพลิมเมอร์ จากผลการทดลองพบว่าวัสดุอิฐโพลิมเมอร์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าความแข็งแรงทนต่อการกดอัดมากกว่าวัสดุที่กระตุ้นด้วยสารละลายลาไปโปแตสเซียม

ไฮดรอกไซด์ โดยอุณหภูมิและเวลาป้อนวัสดุที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและ 5 วันตามลำดับ และมีอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 13 และมีอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 1 ซึ่งจะทำให้วัสดุซิลิโอฟลิเมอรัที่มีความหนาแน่นโดยรวมเท่ากับ 880 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความแข็งแรงทนต่อการกัดอัดเท่ากับ 1.5 เมกะปาสคาล และเมื่อผสมเข้ากับดินเบาในอัตราส่วน 40ต่อ60 ซึ่งจะทำให้ได้อัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาเปลี่ยนไปเป็น 22.5 และอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาเป็น 1.7 จะทำให้ค่าความแข็งแรงทนต่อการกัดอัดเพิ่มขึ้นเป็น 2.4 เมกะปาสคาล และมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 1,010 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งแรงและความแน่นตัวของวัสดุซิลิโอฟลิเมอรัขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างโซเดียมต่ออะลูมินา โดยความแน่นตัวจะลดลงเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวลดลง และจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซิลิโอฟลิเมอรั พบว่าความต่อเนื่องของเฟสจะมีเพิ่มขึ้น หรือความเป็น Glassy phase จะมีเพิ่มขึ้น โดยพบว่าองค์ประกอบทางแร่ที่เหลืออยู่โดยไม่รวมเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันคือ คอวซ์ นอกจากนี้ยังพบว่าดินเบาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพไม่สามารถพัฒนาให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันได้

สำหรับการสังเคราะห์วัสดุที่มาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์คืออุณหภูมิในการเผาแคลไซต์ดินเบา ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิและเวลาในบ่ม และการปรับสภาพด้วยความร้อน จากผลการทดลองพบว่าวัสดุที่มีน้ำหนักเบาที่มีคุณภาพดีได้จากการใช้ดินเบาที่ผ่านการเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 0.3 โดยใช้อุณหภูมิในการบ่มที่ 130 องศาเซลเซียส ทำให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงทนต่อการกัดอัดเท่ากับ 10 เมกะปาสคาล และมีความหนาแน่นโดยรวมเท่ากับ 870 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อใช้อุณหภูมิการบ่มสูงขึ้นเป็น 180 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงต่อการกัดอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณ 10% เท่านั้น และพบว่าอัตราที่ทำการดินเบาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนมีความแข็งแรง 13.6 เมกะปาสคาล โดยมีค่ามากกว่าอัตราที่ทำการดินเบาที่ผ่านการปรับสภาพ ที่มีความแข็งแรงถึง 10.9 เมกะปาสคาล

จากการพิจารณาจากสมบัติเชิงกลและความร้อนของวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ทั้งสองวิธีดังกล่าว พบว่าวัตถุดิบตั้งต้นชนิดดินเบาเหมาะสมกับการเตรียมวัสดุที่มีน้ำหนักเบาโดยใช้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากกว่าปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันในทุกกรณี

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-เปลือกไม้ต่อกำลังอัดและระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์พลาสต์ที่ทำจากเถ้ากลบ-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%)

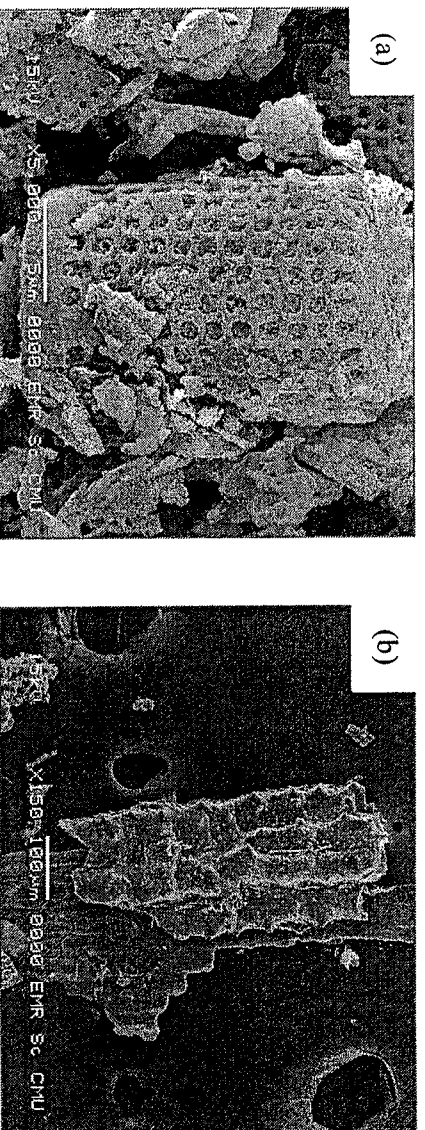


Fig. 1 Photomicrographs of (a) DE and (b) RHA

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.

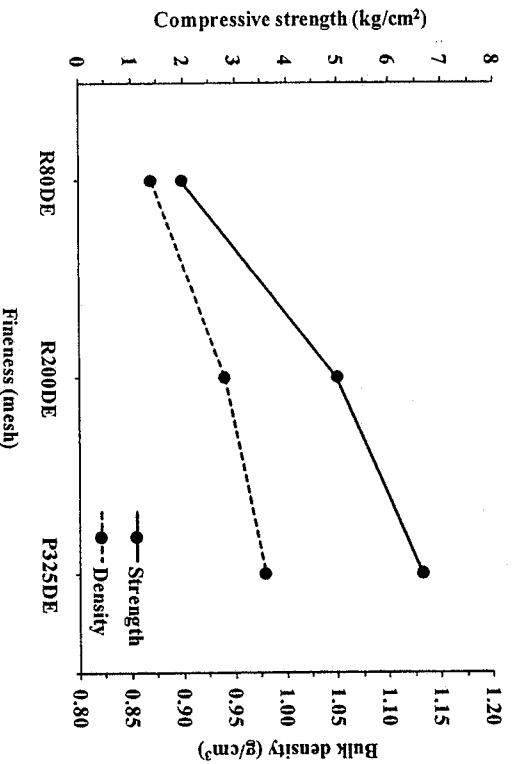
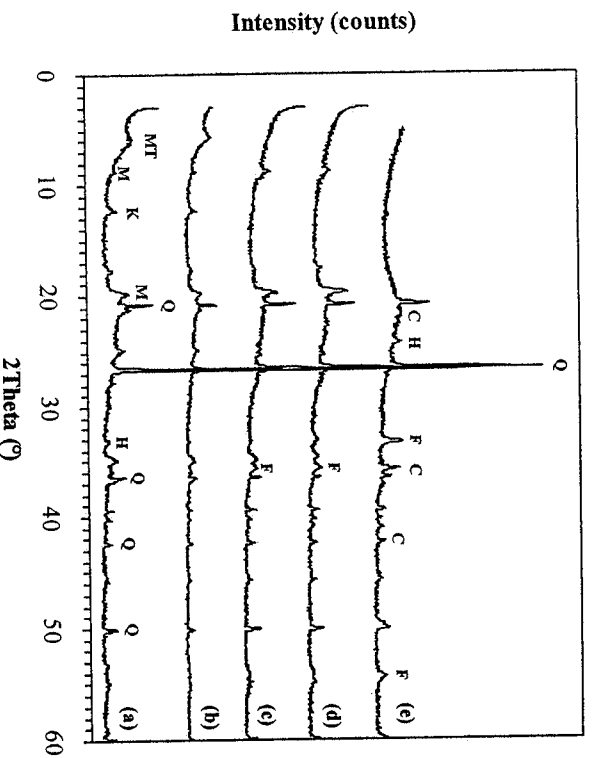


Fig. 2 Compressive strength and bulk density of geopolymer pastes with different finenesses of DE

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

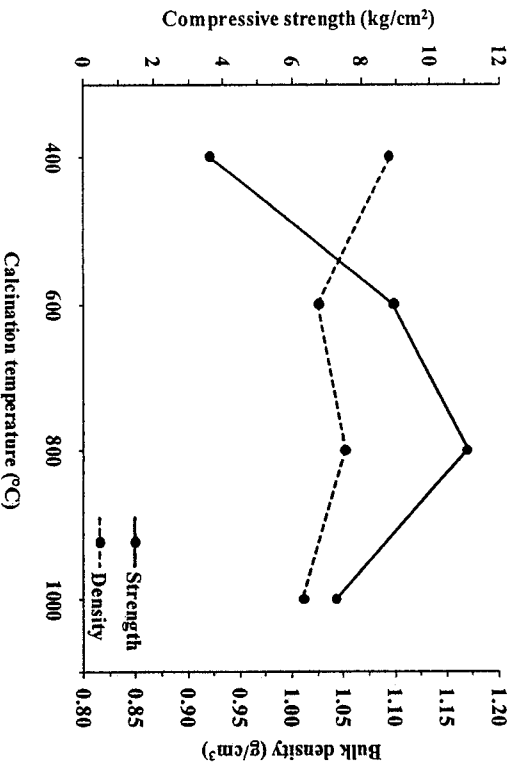


Fig. 4 Compressive strength and bulk density of geopolymer pates with different calcination temperatures of DE

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^+ .

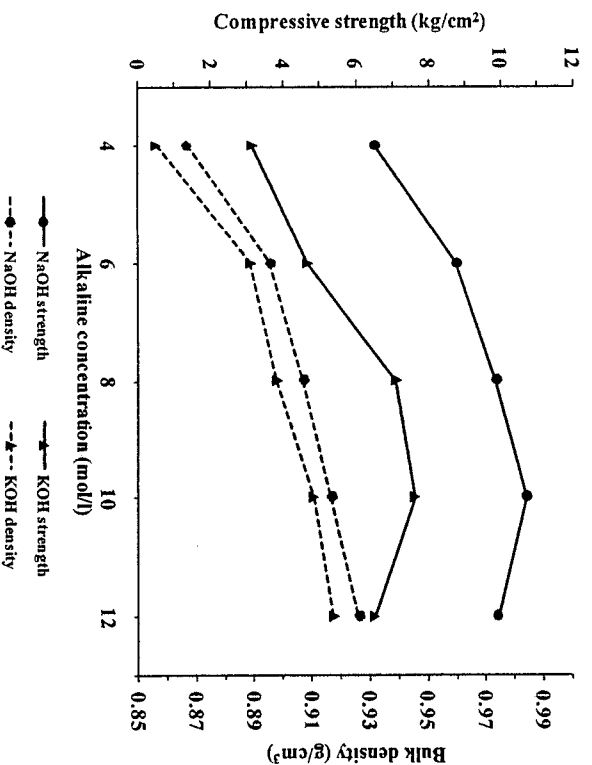


Fig. 5 Compressive strength and bulk density of geopolymer with different concentrations of NaOH or KOH

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.

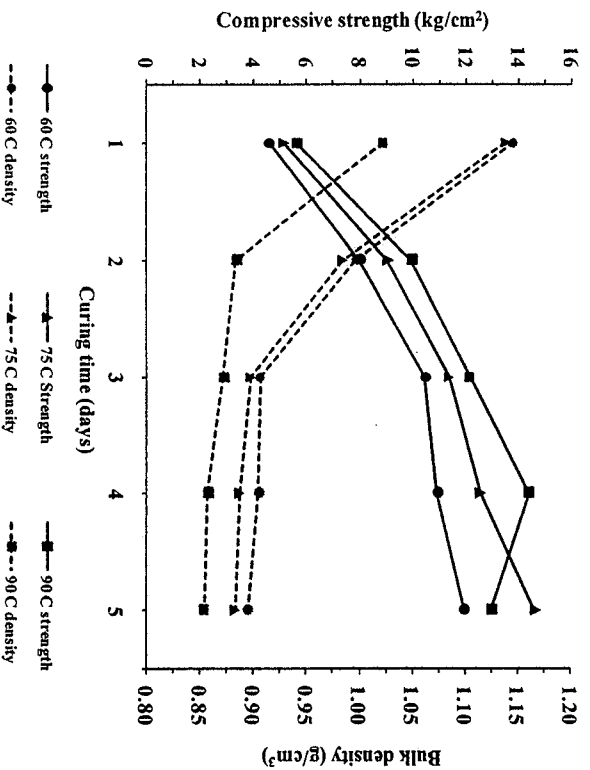


Fig. 6 Compressive strength and bulk density of geopolymers with different curing temperatures and times

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.

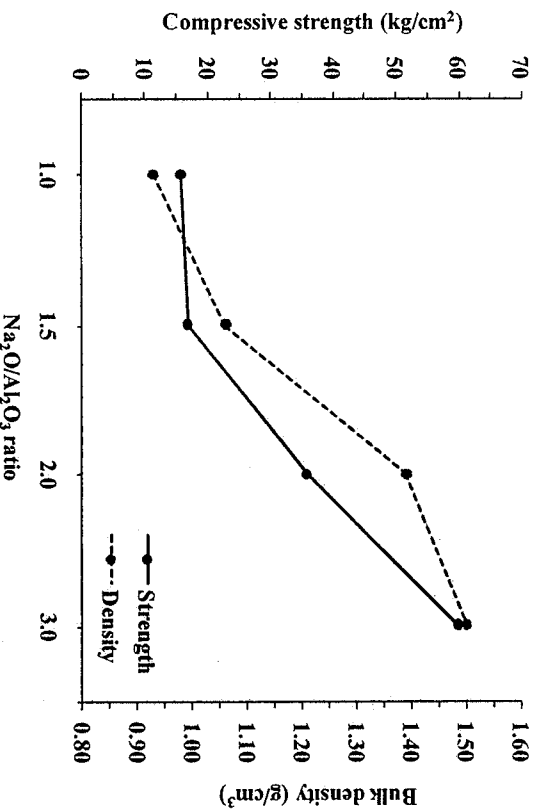


Fig. 7 Compressive strength and bulk density of geopolymer with different Na/Al ratios.

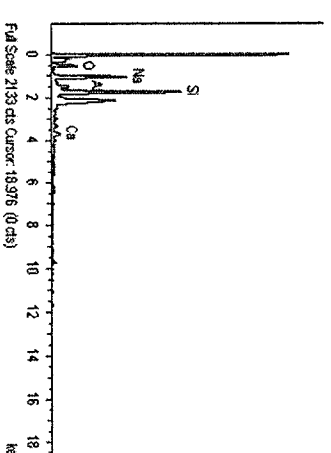
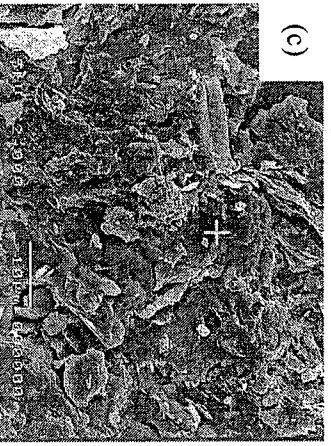
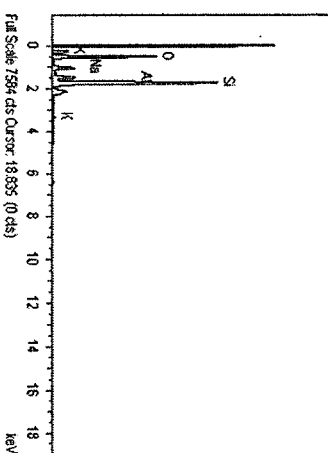
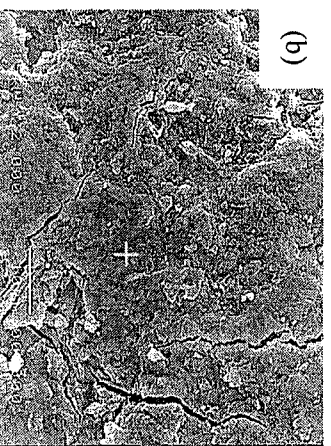
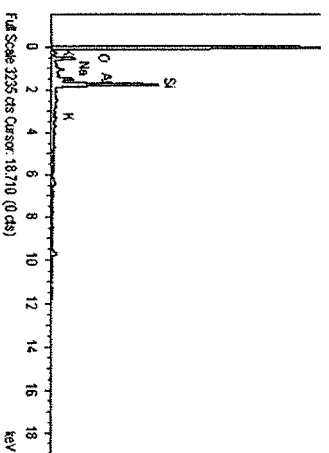
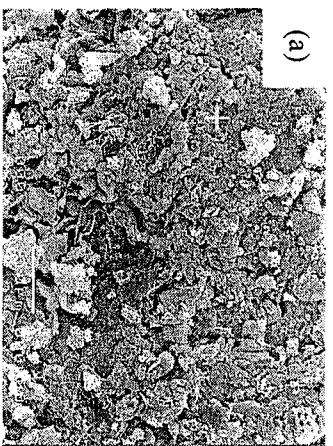


Fig. 8 SEM-EDX analyses of geopolymer pastes (a) $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1$ (b) $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$
(c) $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3$

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

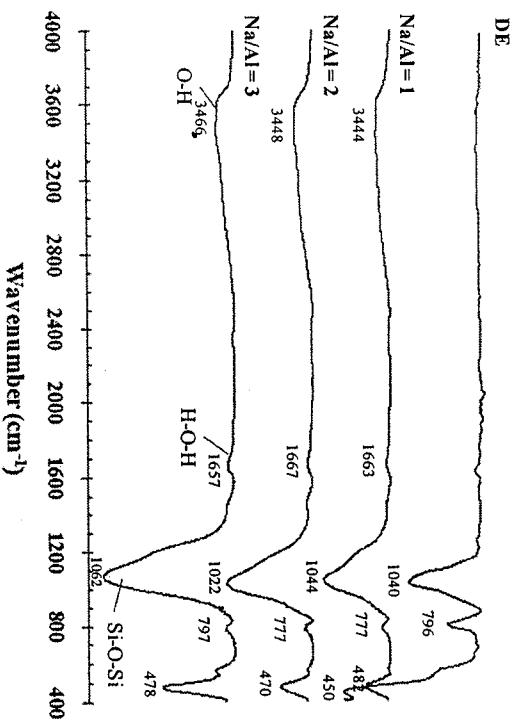
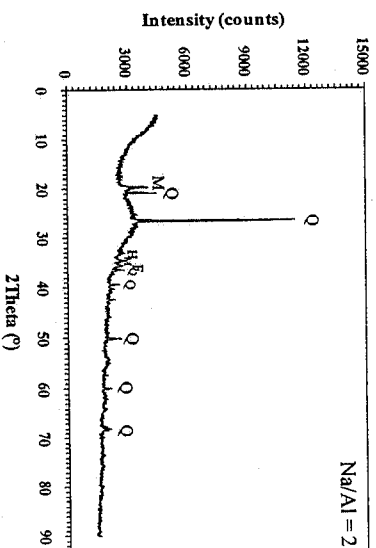
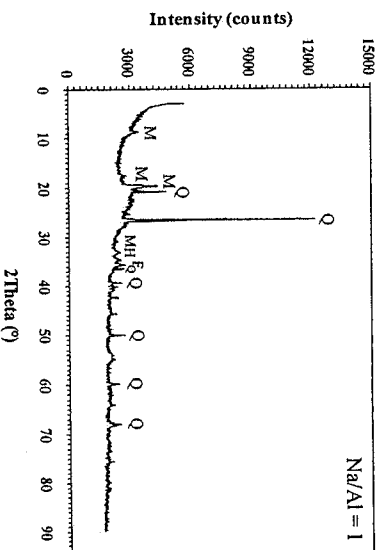


Fig. 9 IR spectra of diatomaceous earth and geopolymer with different Na/Al ratios.

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



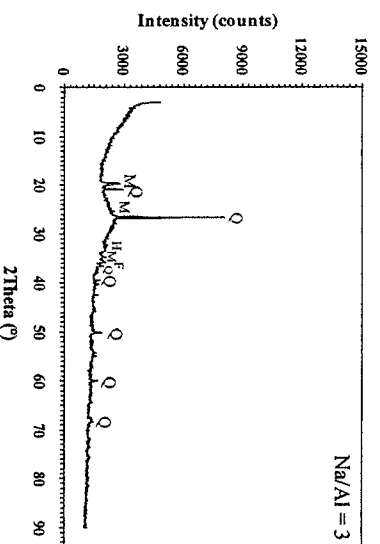


Fig. 10 XRD patterns of DE geopolymer pastes with different Na/Al ratios.

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.

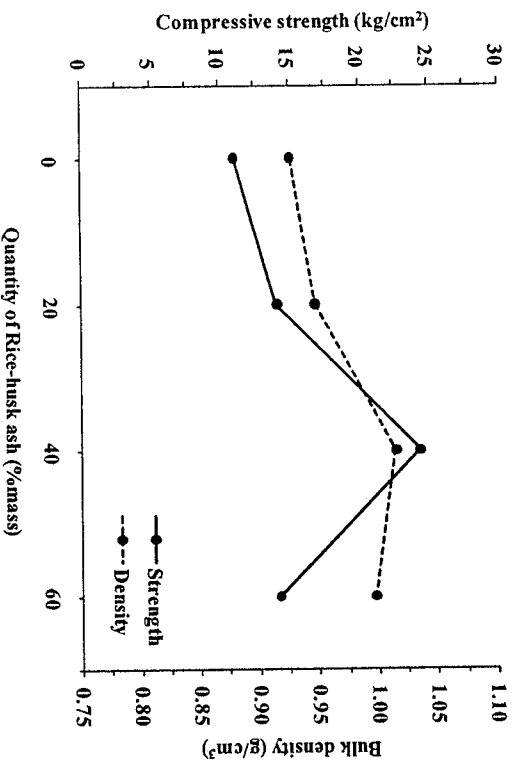
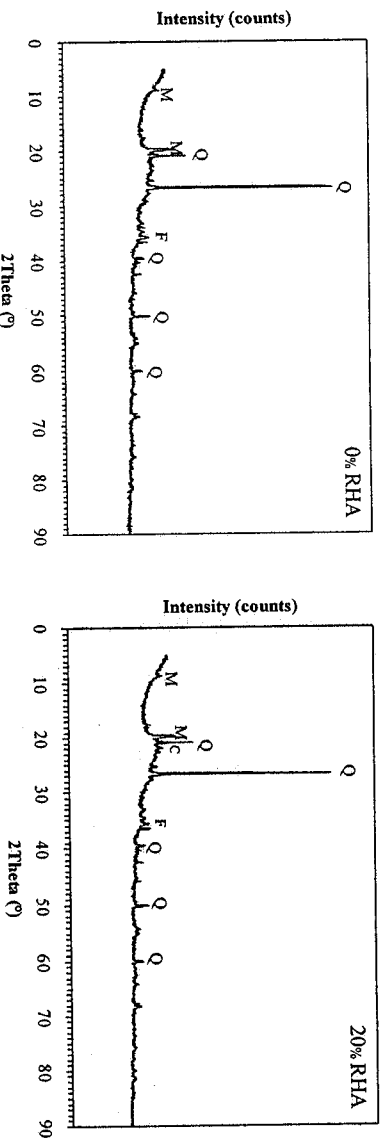
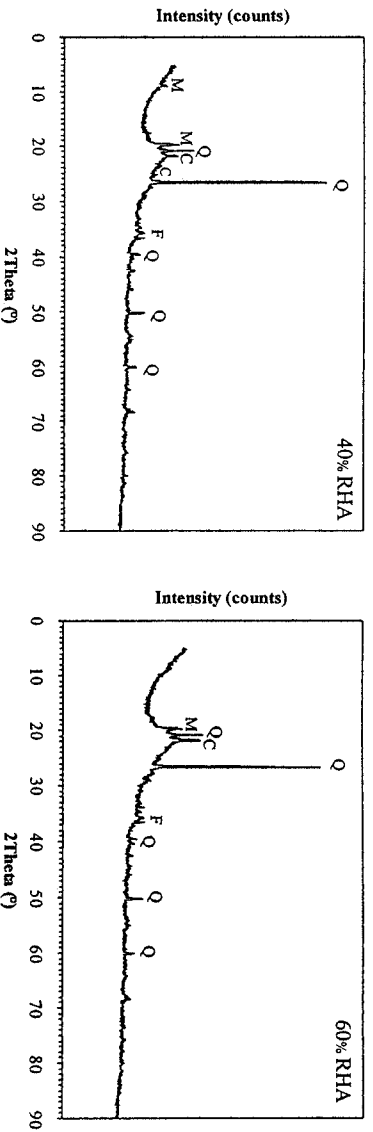


Fig. 11 Compressive strength and bulk density of geopolymers pastes with different RHA contents.





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 $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios of the mixtures also affected the properties of the geopolymer pastes. At $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio of 13.0, the increase in $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 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.