

# 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](mailto:kpimrakp@science.cmu.ac.th), [kpimraksak@hotmail.com](mailto:kpimraksak@hotmail.com)

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุที่มีน้ำหนักเบาจากดินเบาแหล่งล่ำปางโดยใช้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโพลีเมอร์เรซิ่น เนื่องจากว่าในดินเบาล่ำปางมีองค์ประกอบทางแร่เป็นแร่ดินเหนียวชนิดและมีประกอบด้วยซิลิกาที่อยู่ในรูปกึ่งสัณฐานอยู่ด้วยดินเบาล่ำปางจึงจัดได้ว่าเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยสามารถให้ซิลิกอนและอะลูมิเนียมไออนได้ ในสภาวะที่เป็นเบส ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดซิลิกาไฮเดรต หรืออะลูมิเนียมซิลิกาไฮเดรตและสารเชื่อมประสานชนิดอะลูมิเนียมซิลิกาเจลโพลีเมอร์ได้ 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](mailto:kpimrakp@science.cmu.ac.th), [kpimraksa@hotmail.com](mailto: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  $\text{kg/m}^3$  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  $500^\circ\text{C}$  and  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  molar ratio of 0.3 and cured at  $130^\circ\text{C}$  for 6 hours has compressive strength and bulk density of 10 MPa and  $870 \text{ kg/m}^3$ . 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 ( $\text{SiO}_2$ ) 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 IPU5 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) โดยวัสดุดิบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเหล่านี้ได้ง่ายต้องมีความเป็นผลึกน้อยเพื่อให้เกิดการละลายได้ดี จากงานวิจัย [3, 4] พบว่าดินเบามีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยากับโลมทำให้ได้สารประกอบใหม่ที่มีสมบัติในการเชื่อมประสานได้ เนื่องจากองค์ประกอบหลักที่มีในดินเบาคือซิลิกา จึงสามารถถูกละลายได้ง่ายจากสารจำพวกอัลคาไลต์ 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 ศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโฟลิมเมอร์เรเซชันของดินเบา โดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้

1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในช่วง 80-200 องศาเซลเซียสที่ต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโฟลิมเมอร์เรเซชันของดินเบา โดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้

1.3.5 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโฟลิมเมอร์เรเซชันของดินเบา โดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้

1.3.6 ศึกษาอิทธิพลของความดันที่มีต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเบา โดยใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้

1.3.7 ศึกษาลักษณะเฉพาะของสารประกอบใหม่ที่ได้นั้นเชิงลึก เพื่ออธิบายกลไกของการเกิดสารประกอบใหม่ และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติวัสดุที่ได้นั้นลักษณะเฉพาะของสารประกอบใหม่

1.3.8 เขียนแผนผังอะแกรมของการเกิดสารประกอบใหม่ที่ได้นั้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโฟลิมเมอร์เรเซชันของดินเบาแห้งสำหรับ

### 2. วัตถุประสงค์

2.1 ศึกษาอิทธิพลของความละเอียดและการปรับสภาพด้วยความร้อนของดินเบาแห้งต่อมวลสำหรับใช้ต่อความสามารถในการละลายของดินเบาแห้ง

2.2 ศึกษาอิทธิพลของความละเอียดและการปรับสภาพด้วยความร้อนของดินเบาแห้งต่อมวลสำหรับใช้ต่อความเข้มข้นของตัวเร่ง, อุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มร้อน, อัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา และอัตราส่วนระหว่างดินเบาแห้งต่อมวลเมแทกแลบ ที่มีผลต่อสมบัติ

ทางกลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไร้เซชัน และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอีพอกซีโมร่าจากดินเอดะดอมลำปาง

2.3 ศึกษาอิทธิพลของความละเอียด, ปริมาณโสม์หรืออัตราส่วนของ  $\text{CaO/SiO}_2$ , ความเข้มข้นของต่าง, อุณหภูมิและเวลาในการบ่ม ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุก่อสร้งที่ทำจากดินเอดะดอมลำปาง

### 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 ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งมีองค์ประกอบของ  $\text{Na}_2\text{O}$  13.44%,  $\text{SiO}_2$  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. เครื่องอะตอมมิกรับซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตริ์ (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))

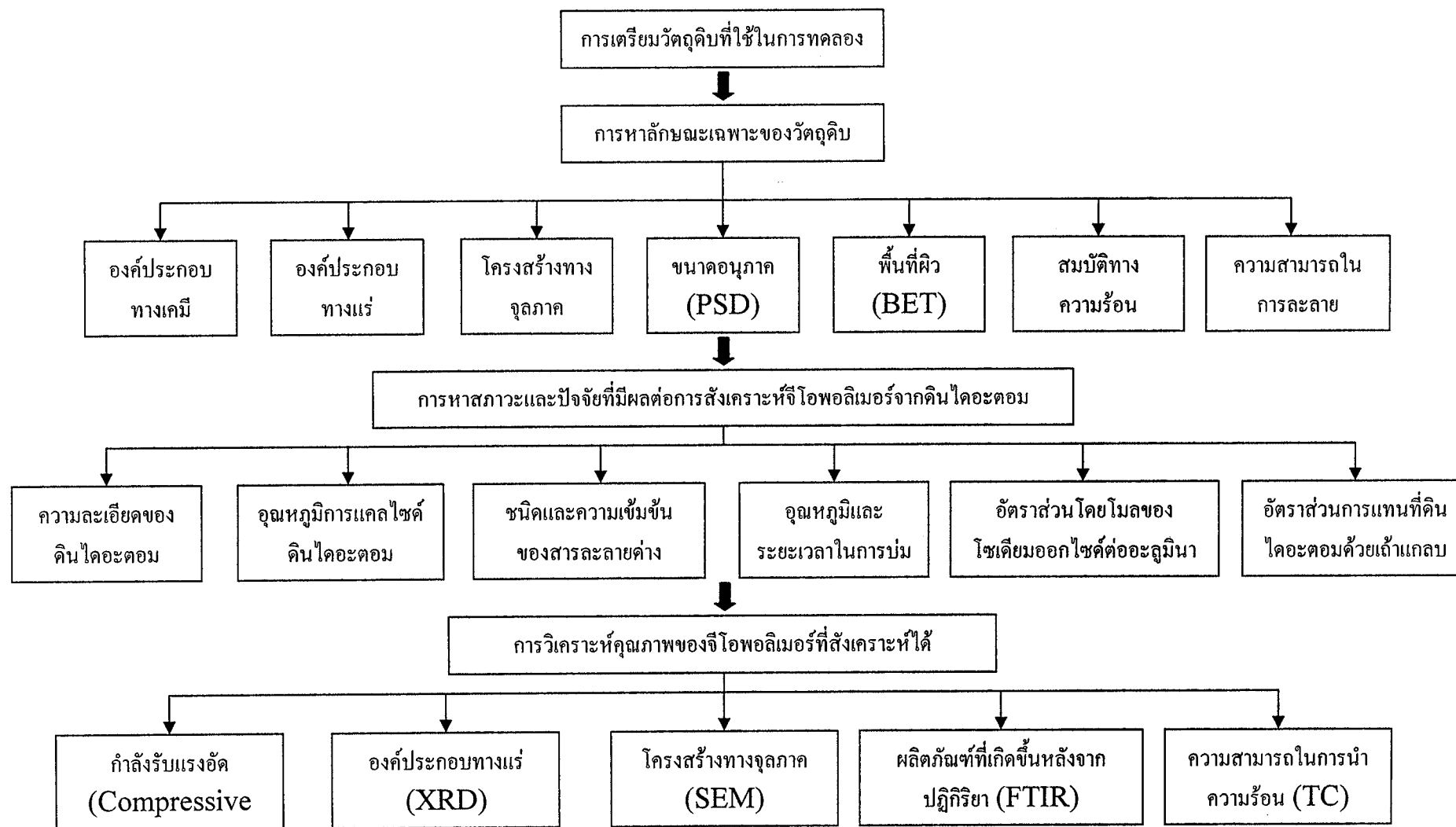
16. เครื่องวิเคราะห์การนำความร้อน (Thermal Conductometer) ตาม ASTM C5930-01

### 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 อีกทั้งยังมีปริมาณสารองเกลียอยู่มากถึง 200 ล้านตัน จึงเหมาะสมต่อการพัฒนาและนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนได้ ในการทดลองได้ทำการศึกษาขนาดดินไดอะตอมที่ไม่ผ่านการแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 80, 140, 200 และ 325 เมช เพื่อใช้สำหรับศึกษาอิทธิพลของความสามารถและเอชียดที่มีต่อความสามารถในการละลายและกำลังรับแรงอัดของซีโอพอลิเมอร์เฟสส์ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม คือ

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

จากนั้นทำการศึกษาอิทธิพลของการแคลเซียมดินไดอะตอมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 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 แล้วเก็บที่ได้จากการเตรียมจะถูกใช้  
ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ดินไคอะคอมด้วยแก้วแอลบต่อไป

### 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 <sup>3</sup> ) | ปริมาตร 1000 ml. |                      |
|----------------------------|-------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------|
|                            | Na <sub>2</sub> O | H <sub>2</sub> O |                                  | NaOH (g)         | H <sub>2</sub> 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 <sup>3</sup> ) | ปริมาตร 1000 ml. |                      |
|-------------------------------|------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------|
|                               | K <sub>2</sub> O | H <sub>2</sub> O |                                  | KOH (g)          | H <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> )                       | 32.39       |
| Sodium oxide (Na <sub>2</sub> O)                 | 13.44       |
| Water (H <sub>2</sub> O)                         | 54.17       |
| Mole ratio (Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> ) | 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 ใน  
อัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100

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

ตัวเลข “XX” หน้า M หมายถึง ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือ  
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ 4, 6, 8, 10 และ 12 โมลาร์

สัญลักษณ์ (Na, K) หมายถึง ชนิดของสารละลายต่างที่ใช้ในการทดลอง คือสารละลาย  
โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

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

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ เช่น "80DE20 10M(Na) (1)" หมายถึง จีโอพอลิเมอร์ฟอสต์ที่ใช้ดินเโดอะตอมและเถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้นในอัตราส่วน 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 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยเถ้าแกลบ

ในการทดลองจะทำการศึกษาผลของปริมาณการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยเถ้าแกลบ 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 <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> 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 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/SiO<sub>2</sub> และ H<sub>2</sub>O/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)

### 3.2 การศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเบาแหล่งลำปาง

#### 3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย

1. ดินเบาลำปางหรือดินเบาโคอะคอมไมท์
2. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>)
3. ยิปซัม (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)
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. ชุดอุปกรณ์มมิอู
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

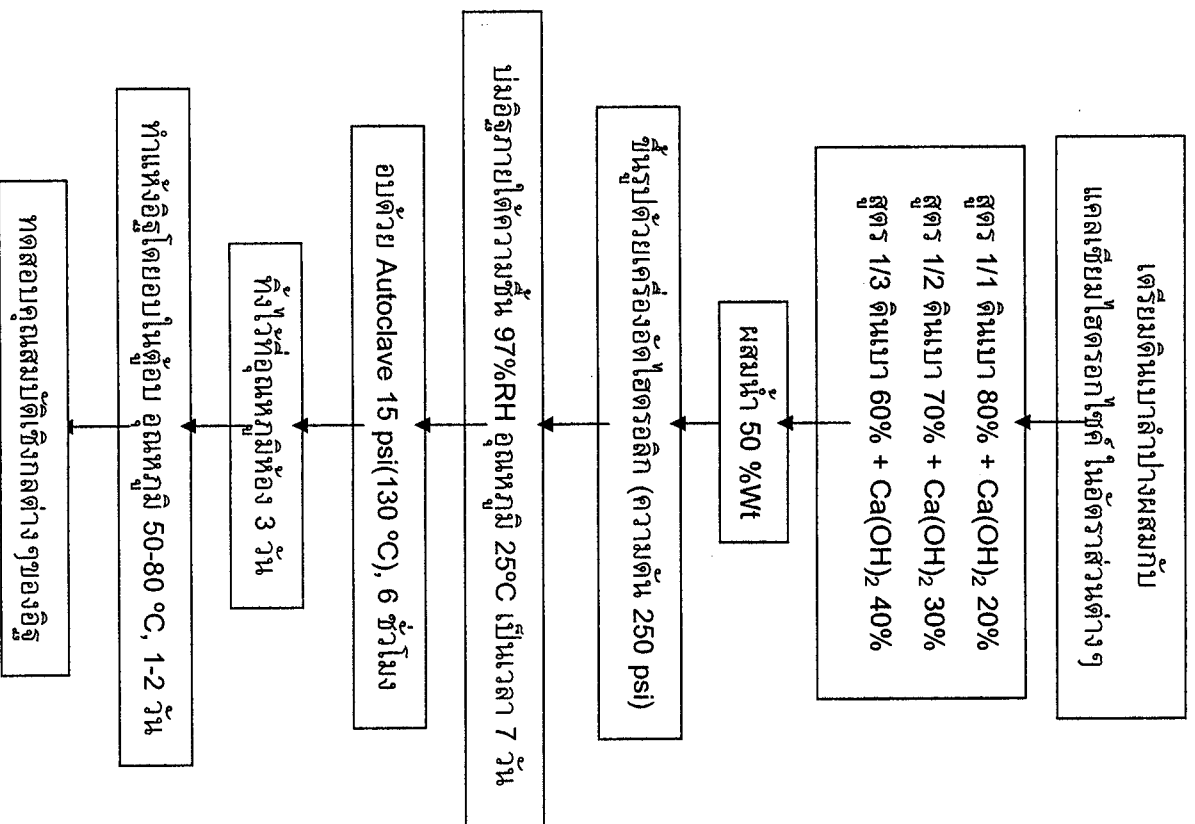
- 1) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินเบา
- 2) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินเบาที่ผ่านการเผาแล้ว

#### 3.2.3.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่เหมาะสมในการลดความหนาแน่นของ

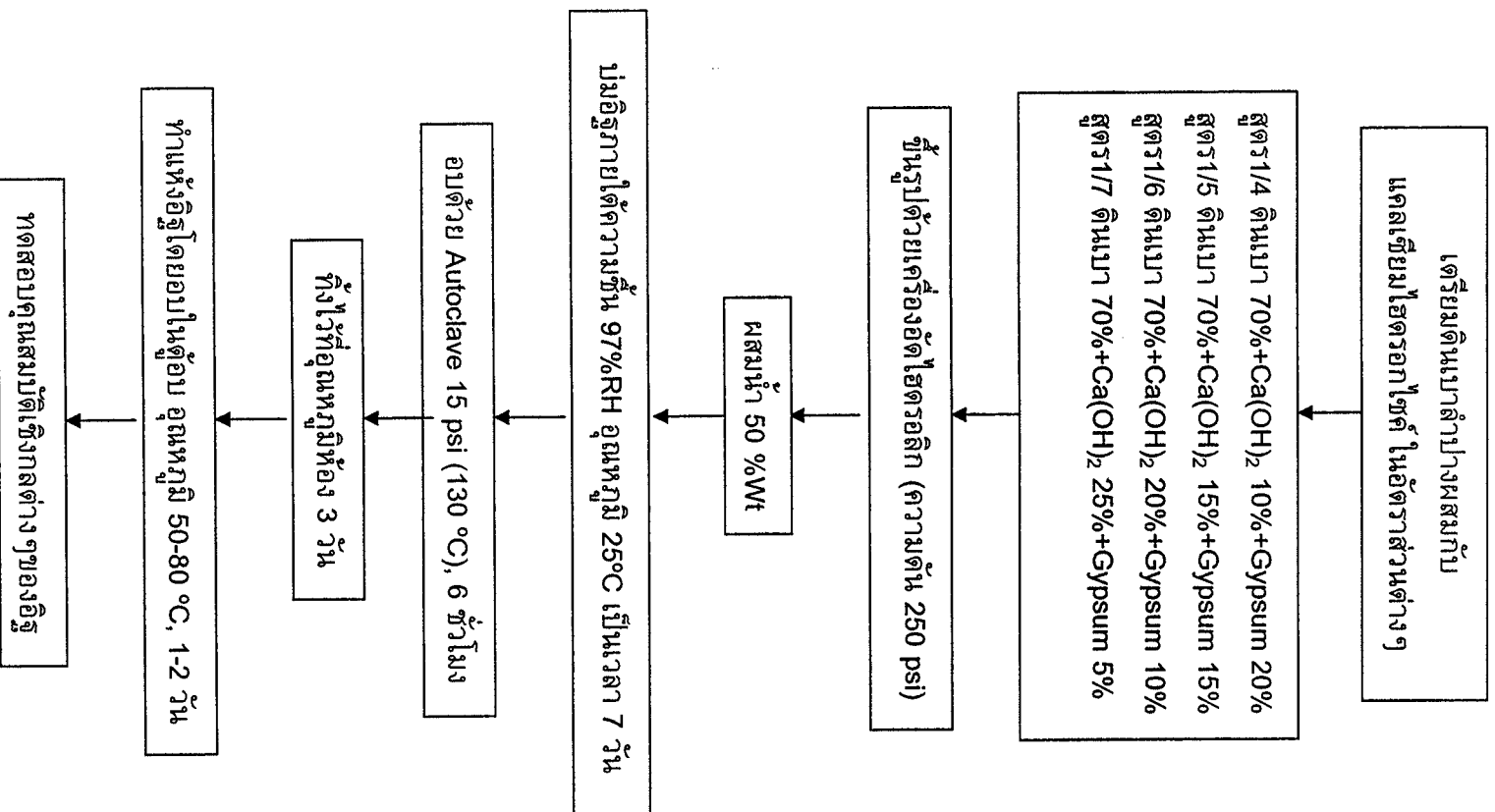
#### อิฐมวลเบาไดอะตอมไมท์

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

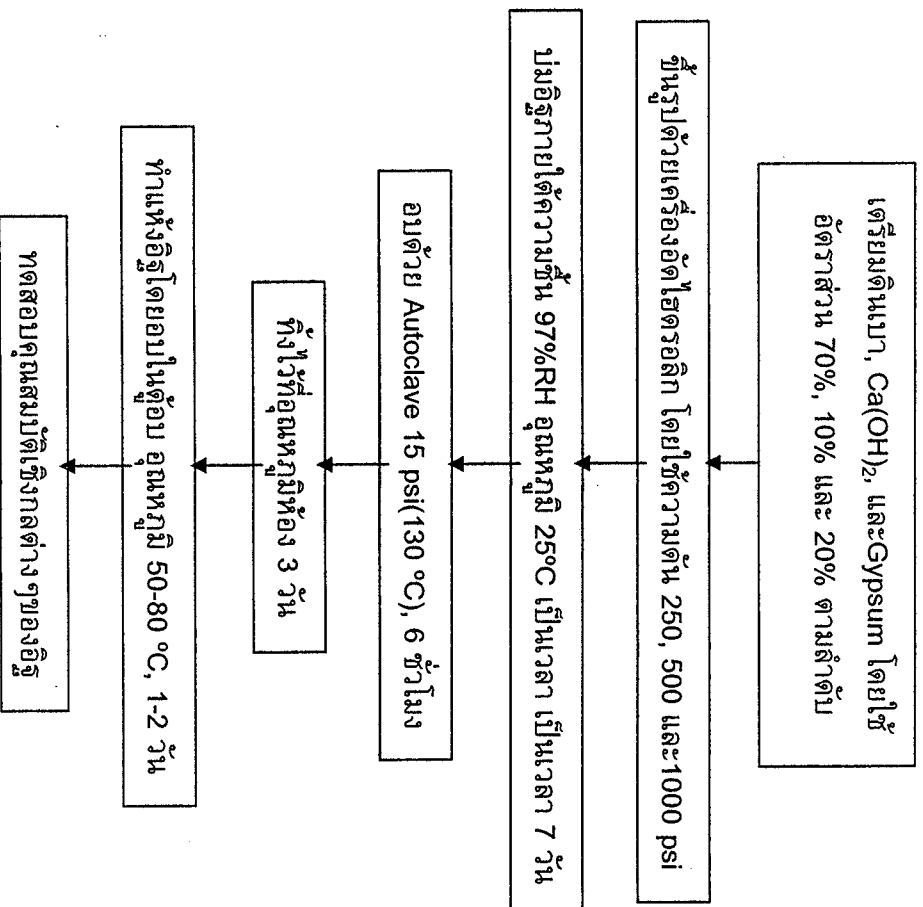
1) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรืออัตราส่วนของ  $\text{CaO/SiO}_2$



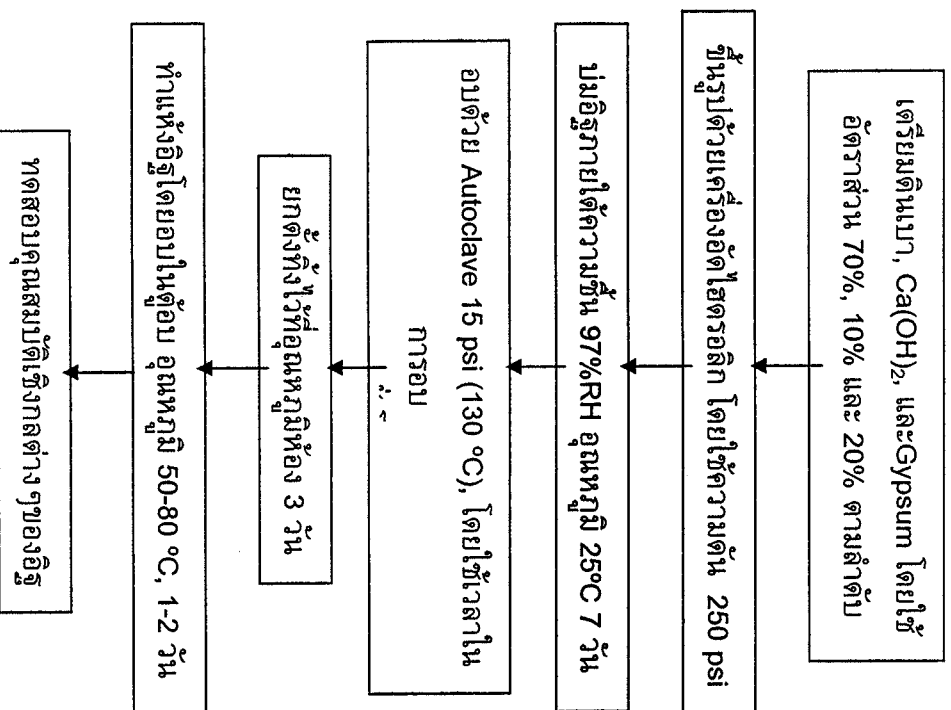
## 2) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณยิปซัม



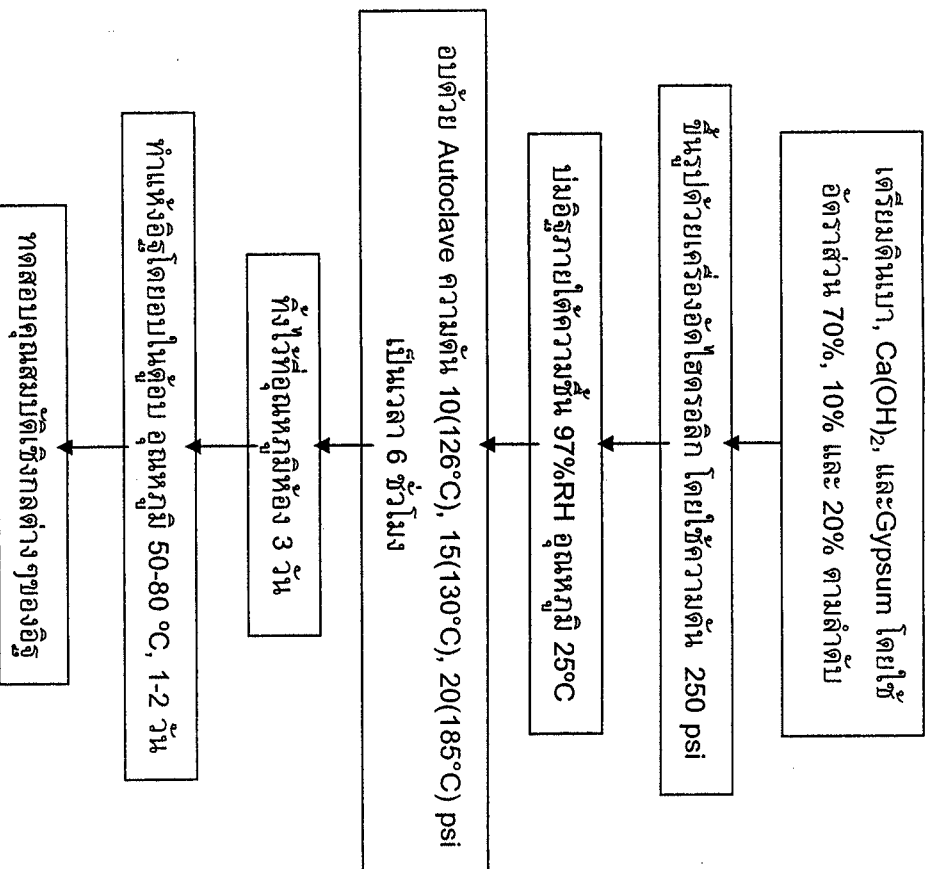
### 3) ศึกษาอิทธิพลของแรงอัดในการขึ้นรูปอิฐมวลเบา



#### 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,  $\text{Ca(OH)}_2$  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

##### ผลการศึกษาปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินเบาแหล่งลำปาง

4.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะของดินไคอะตอมลำปางและถ้าแก่ลบที่ใช้ใช้ในการสังเคราะห์โพลิเมอร์

##### 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมลำปางที่ยังไม่ผ่านการแคลไซต์และคัตขนาด (ODE), ดินไคอะตอมที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช (R80DE), ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และค้ำตะแกรงขนาด 200 เมช (R200DE), ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช (P325DE) และถ้าแก่ลบที่ผ่านการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (RHA) ซึ่งพบว่าดินไคอะตอมที่ไม่ค้ำขนาดมีองค์ประกอบเป็นซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นหลัก โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา (Si/Al) เท่ากับ 11.98 นอกจากนี้ยังพบเฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในปริมาณที่ใกล้เคียงกับอะลูมินาอีกด้วย และเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมที่มีปฏิกิริยาและอะลูมินาจึงทำให้ดินไคอะตอมมีคุณสมบัติการเป็นสารพอสโซลาน (pozzolanic material) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างควมเข้มข้นสูงในปฏิกิริยาจิโอพอลิเมอไรเซชันได้ ส่วนถ้าแก่ลบจะมีองค์ประกอบเป็นซิลิกาส่วนใหญ่และมีอะลูมินาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น 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 <sub>2</sub>                                             | 77.46 | 66.48 | 75.52  | 79.76  | 85.25  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                               | 10.97 | 13.18 | 12.15  | 10.81  | 0.11   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                               | 9.08  | 17.59 | 9.98   | 7.42   | 0.18   |
| Na <sub>2</sub> O                                            | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.06   |
| K <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub>                                             | 0.41  | 0.43  | 0.44   | 0.42   | 0.03   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.81   |
| SO <sub>3</sub>                                              | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.08   |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                               | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.29   |
| LOI                                                          | 0.35  | 0.37  | 0.29   | 0.32   | 10.29  |
| Molar SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ratio | 11.98 | 8.52  | 10.50  | 12.09  | 1317.5 |

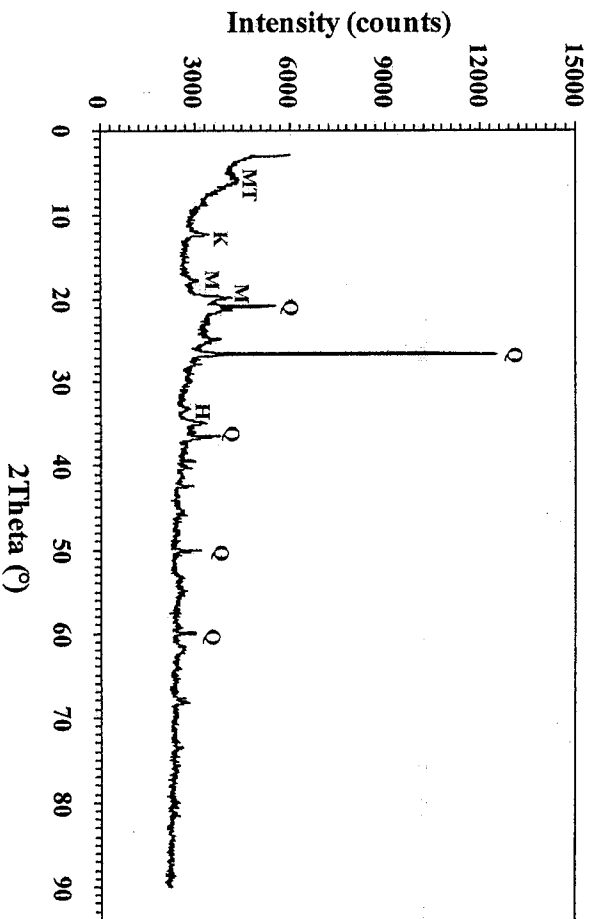
#### 4.1.2 องค์ประกอบทางแร่

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินไดอะตอมและแก้วแคลบ ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าดินไดอะตอมและแก้วแคลบมีองค์ประกอบทางแร่ที่เหมือนกัน คือ ควอตซ์ (Quartz; SiO<sub>2</sub>) 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

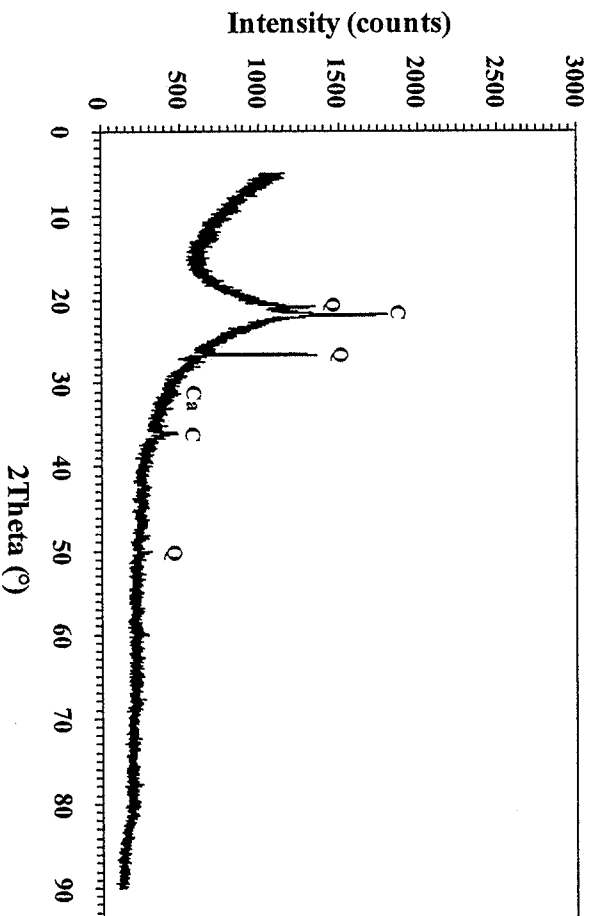
ถ้าแคลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.2 จะแสดงถึงส่วนที่เป็นผลึก คือ ควอตซ์ และคริสโตบาลีท์ (Cristobalite: C) ซึ่งอาจเกิดจากอุณหภูมิในการ

เผาสูงเกินไป และใช้เวลานาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของซิลิกาอสัณฐานเป็นผลึก [5] นอกจากนี้ยังพบส่วนที่เป็นอสัณฐานของซิลิกาในถ้ำแกลบอีกด้วย

พล็อตปรากฏในช่วง  $2\theta$  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 ( $\text{SiO}_2$ )

H = Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

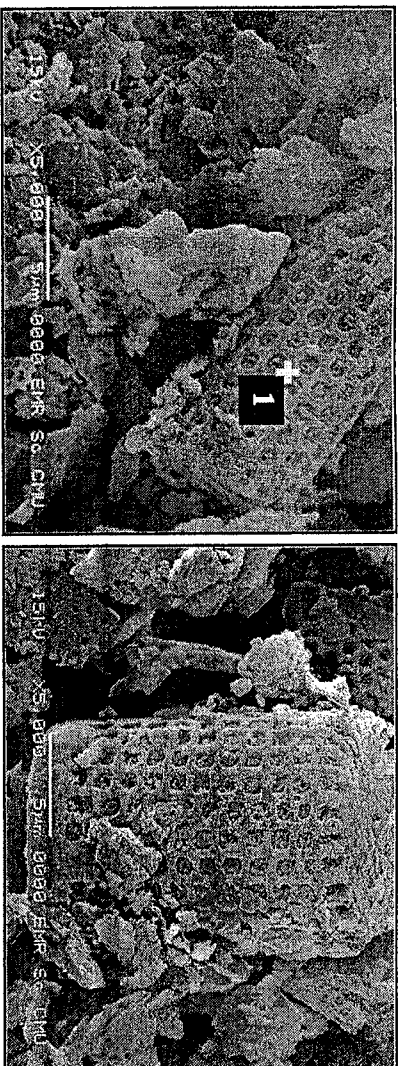
C = Cristobalite ( $\text{SiO}_2$ )

Ca = Calcite ( $\text{CaCO}_3$ )

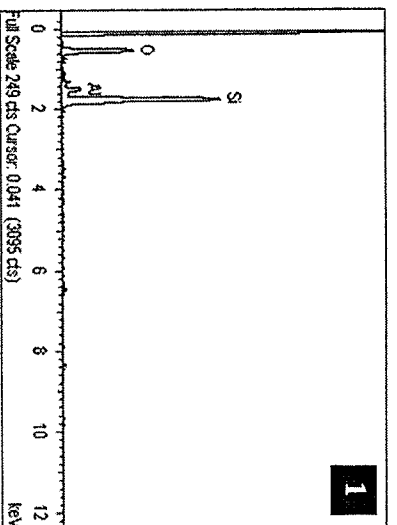
#### 4.1.3 รุปร่างอนุภาค

ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของดินไคอะตอมและเข้าแถบที่ผ่านการแคลเซดท์ที่อุณหภูมิ 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 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์องค์ประ- กอบทางเคมีของดินไคอะตอม

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

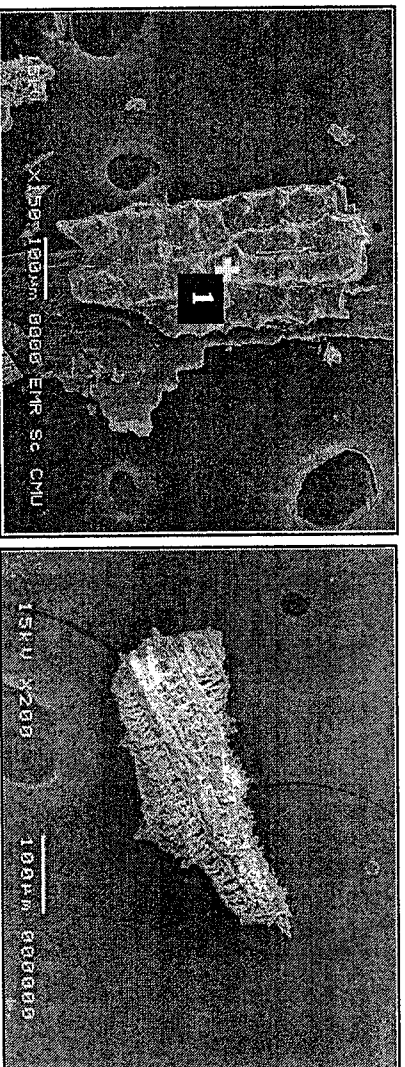


ก. อนุภาคของไดอะตอมที่มีรูพรุนจำนวนมากอยู่รวมกับอนุภาคของดิน



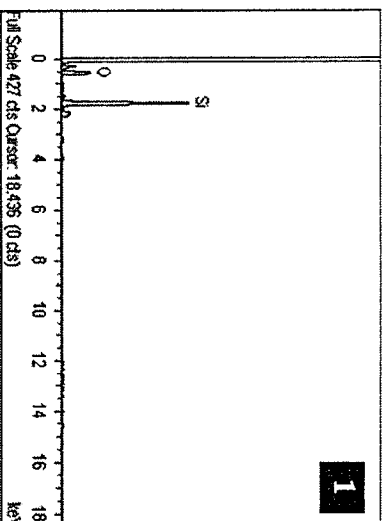
ข. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

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 จะได้ดินไคอะตอมที่มีขนาดเล็กถึง 19 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นผลดีต่อการทำปฏิกิริยาซีโอพอลิเมอร์ เซชันเนื่องจากวัตถุดิบที่มีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวสัมผัสมีค่าสูงกว่าวัตถุดิบขนาดหยาบ ดังนั้นจึงถูกชะละลายด้วยสารละลายต่างๆ ได้ดี และเกิดเป็นมอนอเมอร์ปริมาณมากเพื่อใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาพอลิ-เมอร์เซชันต่อไป

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ และเข้าแถบ

| วัตถุติด | ขนาดอนุภาค ( $\mu\text{m}$ ) | ขนาดอนุภาคเฉลี่ย* ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------|------------------------------|-------------------------------------|
| 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 เมื่อเทียบกับดินไคอะตอมที่มีทั้งซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลักอีกทั้งยังพบมวลรวมขนาดเล็ก เช่น ทราย รวมอยู่กับดินไคอะตอม จึงทำให้เข้าแถบมีพื้นที่ผิวสูงกว่าดินไคอะตอม

#### 4.1.6 ความถ่วงจำเพาะ

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

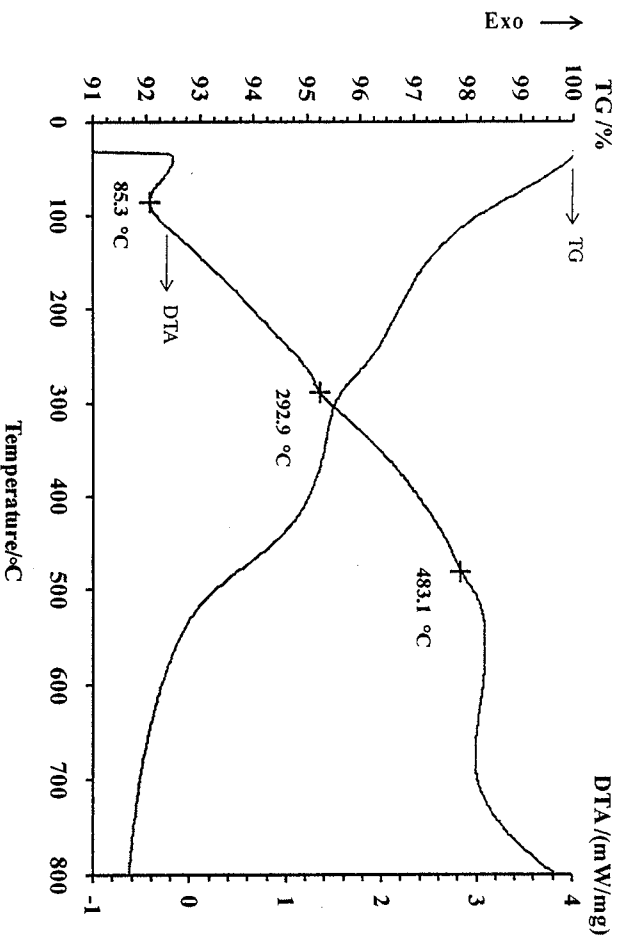
ตารางที่ 4.4 ความถ่วงจำเพาะและพื้นที่ผิวของดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาดแตกต่างกันและเข้าแถบ

| ชนิดของวัตถุดิบ                       | สัญลักษณ์ | ความถ่วงจำเพาะ | พื้นที่ผิว ( $m^2/g$ ) |
|---------------------------------------|-----------|----------------|------------------------|
| ดินไคอะตอมที่ไม่ผ่านการตัดขนาด        | ODE       | 2.25           | 42.99                  |
| ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช                  | R80DE     | 2.34           | 27.50                  |
| ผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และค้ำ 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

สมบัติเชิงความร้อนของวัตถุดิบวิเคราะห์ออกมาในรูปของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง 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)

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

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของดินไคอะตอมที่มีความละเอียดแตกต่างกัน พบว่าปริมาณซิลิกอน (Si) ที่ถูกชะละลายด้วยตัวของดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 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 ซึ่งเป็นไปตามผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเเดอะตอมที่ผ่านการคำนวณโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาดต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1

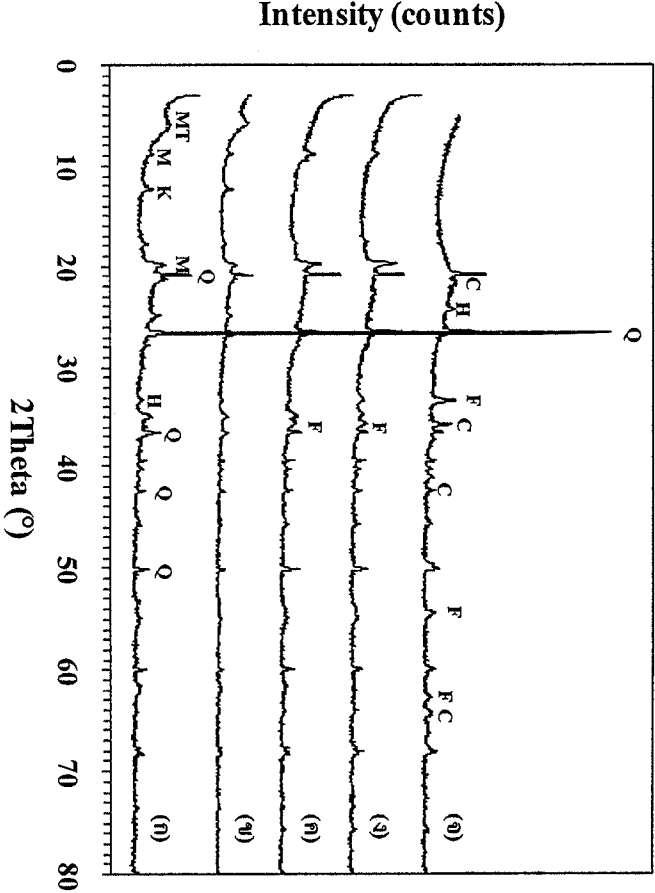
ตารางที่ 4.5 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมาจากดินเเดอะตอมและเถ้าแกลบ

| 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                   |

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการแคลไชน์ดินเเดอะตอมที่มีต่อความสามารถในการละลาย แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการแคลไชน์เพิ่มขึ้นเป็น 800 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณซิลิกอนและอะลูมิเนียมถูกชะละลายออกมาจากการแคลไชน์ที่อุณหภูมิ 600, 1000 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งตรงข้ามกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่กล่าวว่า อุณหภูมิในการแคลไชน์เพิ่มขึ้น ทำให้วัตถุดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นผลึกซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยา [6] ทั้งนี้หากพิจารณาแบบการเลี้ยงเบบรังสีเอกซ์ของดินเเดอะตอมที่ผ่านการแคลไชน์ที่อุณหภูมิต่างกัน ดังรูปที่ 4.6 พบว่าการแคลไชน์ดินเเดอะตอมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของแร่มอนท์โมริลไนด์ (Montmorillonite) ส่งผลให้แตกหักพังทลาย ณ ตำแหน่ง 2 $\theta$  เท่ากับ 6.5 องศาหายไป ทำให้พื้นผิวของอนุภาคมีประจุลบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส โครงสร้างของแร่เคโอลินท์ (Kaolinite) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเมตะกาลิน (Metakaolin) ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าเคโอลินท์จึงทำให้ดินเเดอะตอมมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ส่งผลให้ดินเเดอะตอมที่ผ่านการแคลไชน์ที่อุณหภูมิตั้งแต่กล่าวมาปริมาณซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมาสูงกว่าที่อุณหภูมิอื่น แต่เมื่อทำการแคลไชน์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 1,000 องศาเซลเซียส ปริมาณของซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมามีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแร่ควอตซ์ (Quartz) เป็นคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) และแร่เฮมาไทท์ (Hematite) เป็นแมกเนไทท์ (Magnetite; Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) 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 ( $\text{SiO}_2$ )  
H = Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )  
C = Cristobalite ( $\text{SiO}_2$ )  
F = Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

## 4.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำลัรับแรงอัดของซีโอพอลิเมอร์โฟสฟต์

### 4.2.1 ผลของการปรับสภาพดินไคอะตอม

การปรับสภาพดินไคอะตอมที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 2 ปัจจัยคือ

#### 4.2.1.1 ความละเอียดของดินไคอะตอม

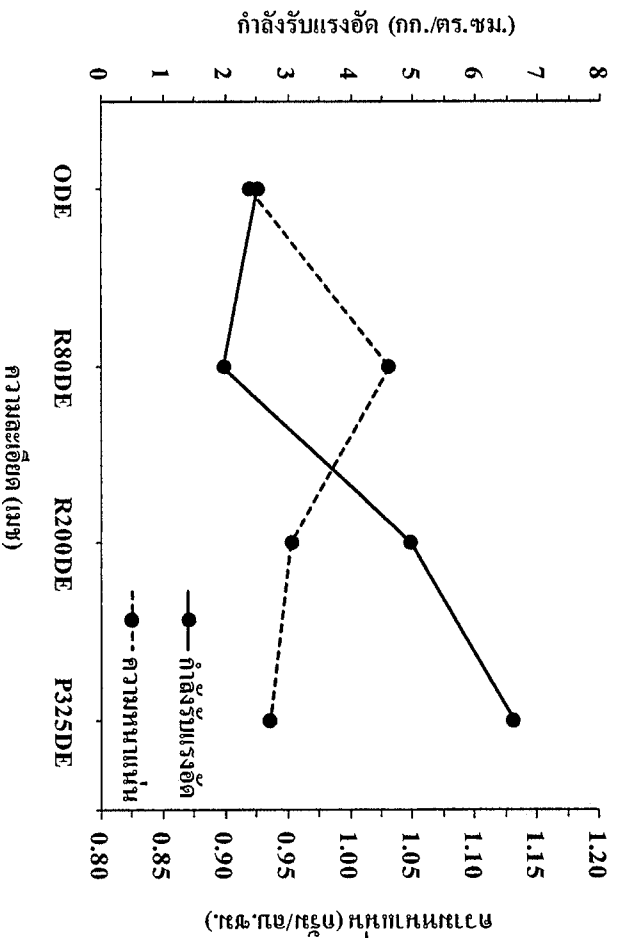
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของซีโอพอลิเมอร์โฟสฟต์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ดินไคอะตอมที่ยังไม่ผ่านการแคลซ์ชต์และมีความละเอียดต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน ของซีโอพอลิเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับค่าความละเอียดของดินไคอะตอม โดยดินไคอะตอม P325DE ให้กำลังรับแรงอัดของซีโอพอลิเมอร์สูงกว่าดินไคอะตอม 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

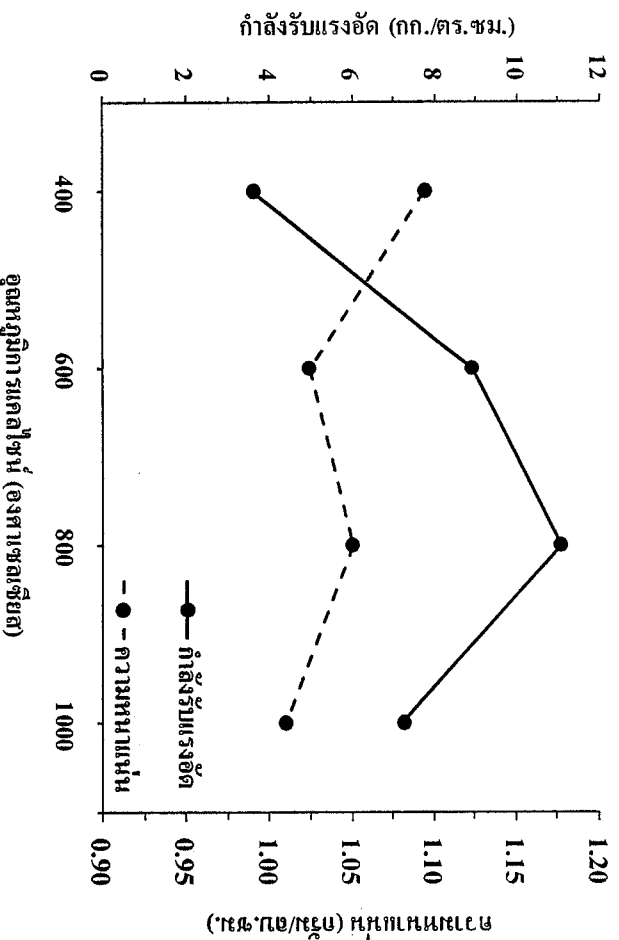
รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของซีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากดินไคอะตอมที่ผ่านการแคลซ์ชต์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยพบว่ากำลังรับแรงอัดจะพัฒนาตามอุณหภูมิการแคลซ์ชต์ที่เพิ่มขึ้นในช่วง 400 - 800 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการแคลซ์ชต์ดินไคอะตอมเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์วัสดุซีโอพอลิเมอร์ คือ 800 องศาเซลเซียส จากแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 4.6 พบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของแร่มอนทินไมไรต์และเคโอลิไนท์ ทำให้พื้นผิวของอนุภาคมีประจุลบเพิ่มขึ้นจากการที่พันธะถูกทำลาย ส่งผลให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของดินไคอะตอมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สูงกว่าอุณหภูมิการแคลซ์ชต์อื่น นอกจากนี้ยังพบว่าการแคลซ์ชต์ดินไคอะตอมที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้ซีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแร่ควอตซ์ไปเป็นควอร์ตไบไลท์ และแร่เฮมาไทท์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เป็นแม่เหล็กไทท์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ซึ่งเป็นแร่ที่มีความเสถียรสูง ดังนั้นดินไคอะตอมจึงมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ดังเช่นผลการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายในตารางที่ 4.6

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

จากผลการศึกษาอิทธิพลของความละเอียดและอุณหภูมิการแคลไชน์ดินไดอะตอมที่มีต่อความสามารถในการละลายและกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัตถุดิบเพื่อใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์คือ แคลไชน์ดินไดอะตอมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์กับความละเอียดของดินไดอะตอม

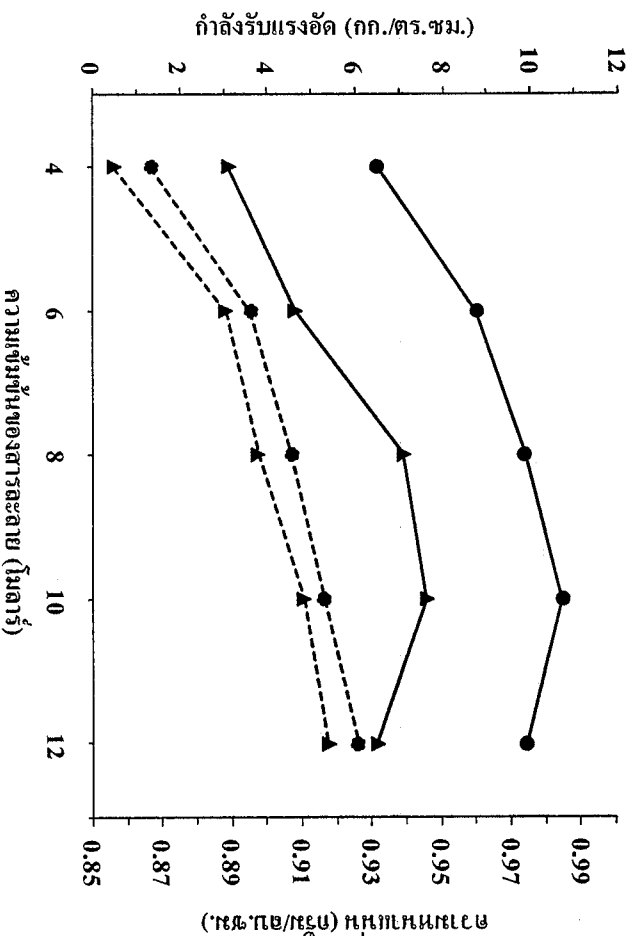


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของเจลไอพอลิเมอร์กับอุณหภูมิ การแคลไซน์ดินโซเดียม

#### 4.2.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

การทดลองส่วนนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของวัสดุเจลไอพอลิเมอร์ โดยคาดว่าจะความเข้มข้นของสารละลายจะมีผลต่อความสามารถในการชะละลายอนุภาคของวัสดุดิบ จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 พบว่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์เจลไอพอลิเมอร์จากดินโคอะคอมคือ 10 โมลาร์ เนื่องจากมีความเข้มข้นของโซเดียม (Na) ในปริมาณที่เพียงพอสำหรับการดัดแปร ๑๐ โมลาร์ เนื่องจากมีความเข้มข้นของโพลิมอร์ เมื่อใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (12 โมลาร์) จีไอพอลิเมอร์ให้กำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากความรุนแรงของสารละลายทำให้ส่วนผสมมีลักษณะหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของความสมารถในการชะละลายซิลิกาและอะลูมินาออกมาจากวัสดุดิบ ทำให้เจลไอพอลิเมอร์ที่ได้จากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 12 โมลาร์ มีกำลังรับแรงอัดลดลง [10] ทั้งนี้การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการสังเคราะห์เจลไอพอลิเมอร์ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นเดียวกัน เป็นผลมาจากโซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) มีขนาดเล็กกว่าโพแทสเซียมไอออน ( $\text{K}^+$ ) ดังนั้นโซเดียมจึงมีความแข็งแรงจากการเกิดพันธะ (bond strength = valence/cation radius) สูงกว่าโพแทสเซียม ทำให้การดัดแปร ๑๐ โมลาร์ของเจลไอพอลิเมอร์ให้พันธะที่มีความแข็งแรงมากกว่าการใช้โพแทสเซียมไอออนในการดัดแปร 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