

1. Executive summary

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ดินเบา (Diatomaceous earth) เป็นแร่ที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) อยู่สูงอาจมากกว่า 85% มักพบในพื้นที่ที่เป็นทะเลน้ำจืดและน้ำเค็ม ดินเบาเกิดมาจากการที่สาหร่ายไดอะตอมได้ดึงเอาซิลิกาที่ละลายอยู่ในน้ำไปสร้างเป็นโครงร่างของตัวเอง โดยซิลิกาจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Opaline silica: $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบหลวมๆ ทำให้อนุภาคของดินเบา มีรูพรุนมาก เมื่อไดอะตอมตายลงจะเกิดการทับถมกันเกิดเป็นแหล่งดินเบา สามารถพบดินเบาได้ทั่วไปตามแหล่งน้ำที่มีอายุเก่าแก่ แหล่งที่พบมากที่สุดได้แก่ อเมริกา ชิลี ยุโรป ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น เกาหลี และจีน ซึ่งดินเบาแต่ละแหล่งจะมีคุณภาพแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากอายุของการทับถมและชนิดของน้ำ ส่งผลทำให้ดินเบา มีความบริสุทธิ์ และระดับของความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ที่แตกต่างกัน และปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลเป็นอย่างมากต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของดินเบา สำหรับในประเทศไทยมีแหล่งดินเบาที่สำคัญอยู่ที่จังหวัดลำปาง โดยมีกำลังสำรองถึงประมาณร้อยล้านตัน ซึ่งคาดว่าจะเป็แหล่งวัตถุดิบที่สำคัญอีกหนึ่งสำหรับอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง ในการศึกษาขั้นต้นจากการได้งบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากโครงการ IPUS พบว่าดินเบาที่พบในลำปางมาจากการสะสมทับถมในทะเลน้ำจืด มีสิ่งเจือปนค่อนข้างมากทั้งสารอินทรีย์ และแร่ดิน แต่อย่างไรก็ตามดินเบาแหล่งลำปางมีองค์ประกอบของซิลิกามากกว่า 65% [1] ในปัจจุบันนี้การใช้ประโยชน์ของดินเบาในต่างประเทศ ใช้เป็นตัวช่วยกรอง (Filter aid) ตัวดูดซับ (Absorbent) และวัสดุฉนวนความร้อน (Thermal insulator) เนื่องมาจากการมีรูพรุนมากในดินเบา ใช้เป็นผงขัดละเอียด (Mild abrasive) เนื่องมาจากการมีความแข็งมาก โดยมีราคาขายอยู่ที่ประมาณตันละหนึ่งหมื่นบาทในประเทศอเมริกา ส่วนการใช้งานในประเทศไทยใช้ในทางเกษตรกรรมโดยใช้ดูดซับของเสียในฟาร์มกัก โดยมีราคาขายอยู่ที่ตันละสองพันบาทในประเทศไทย

เนื่องมาจากดินเบา มีลักษณะเฉพาะที่ไม่เหมือนแร่ดินโดยทั่วไปในแง่การมีรูพรุนสูง มีความถ่วงจำเพาะต่ำมากประมาณ 1 [2] ทำให้ดินเบาได้รับความสนใจที่จะนำมาพัฒนาให้สามารถทำวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำในงานวิจัยนี้ โดยคาดว่าวัสดุที่ได้จะมีค่าการนำความร้อนต่ำและสามารถที่จะพัฒนาให้เป็นวัสดุสำหรับงานก่อสร้าง เช่น อิฐและกระเบื้องที่มีสมบัติฉนวนความร้อนที่มีราคาถูกลงได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในแง่การช่วยประหยัดพลังงานในการก่อสร้างและ

ในชีวิตประจำวัน และพัฒนาให้ใช้งานด้านการดูดซับ (Absorption) สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

การทำวัสดุก่อสร้างดังกล่าวสามารถทำได้โดยวิธีการเผาผนึกแบบดั้งเดิม (Conventional solidification หรือ Sintering) ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานค่อนข้างมาก เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิเผาสูงถึง 1200 องศาเซลเซียส ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการทำวัสดุก่อสร้างโดยใช้วิธีใหม่ที่ ใช้พลังงานในการ Solidification ต่ำกว่าวิธีการเผา นั่นคือในช่วงอุณหภูมิประมาณ 80 – 200 องศาเซลเซียส การใช้อุณหภูมิต่ำลงในการทำวัสดุก่อสร้างจะใช้หลักการละลายของสารตั้งต้น (Dissolution) และการตกตะกอนใหม่ (Reprecipitation) กลายเป็นสารประกอบที่สามารถเชื่อมประสานหรือวัสดุซีเมนต์ (Cementitious materials) ได้ โดยปฏิกิริยาเคมีที่ควบคุมการเกิดวัสดุซีเมนต์ที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้มี 2 ประเภท คือ 1) ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) และ 2) ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) โดยวัตถุดิบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีเหล่านี้ได้ง่ายต้องมีความเป็นผลึกน้อยเพื่อให้เกิดการละลายได้ดี จากงานวิจัย [3, 4] พบว่าดินเบามีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยากับโลม์ทำให้ได้สารประกอบใหม่ที่มีสมบัติในการเชื่อมประสานได้ เนื่องจากองค์ประกอบหลักที่มีในดินเบาคือซิลิกา จึงสามารถถูกชะละลายได้ง่ายจากสารจำพวกอัลคาไลต์ และอัลคาไลต์เอรทีที่มีสมบัติเป็นด่าง โดยมีปัจจัยมากมาย ได้แก่ ความเข้มข้นของชนิดของต่างอุณหภูมิและความดัน และการปรับสภาพวัตถุดิบทางกลและความร้อน ที่คาดว่าจะส่งผลเป็นอย่างมากต่อการชะละลาย และจะส่งผลต่อเนื่องต่อขั้นตอนการเกิดวัสดุซีเมนต์ โดยคาดว่าในงานวิจัยนี้จะสามารถสังเคราะห์วัสดุซีเมนต์ได้หลายชนิดและมีสมบัติที่สามารถประยุกต์ใช้งานหลากหลาย เช่น ทำหน้าที่เป็นวัสดุฉนวนความร้อน และทำหน้าที่ในการยึดจับ (Encapsulation) ของเสียที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ดังนั้นการทราบถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของดินเบาจะทำให้สามารถผลิตวัสดุที่มีสมบัติทางกลและทางความร้อนที่ดีได้ และองค์ความรู้ใหม่ที่จะได้จากงานวิจัยนี้คือ การทราบและเข้าใจถึงขอบเขต (Boundary) และขีดจำกัดระหว่างความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของดินเบา และความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งในปัจจุบันนี้ยังไม่มียานวิจัยใดได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาทั้งสอง

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและโพลิเมอร์ไรเซชันของดินเบาในสภาวะที่ถูกกระตุ้นด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ และ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้การปรับสภาพด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 80 – 200 องศาเซลเซียส

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

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

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของการกระจายขนาดอนุภาคของดินเบา และการปรับสภาพด้วยความร้อนของดินเบา (Thermal treatment) ที่มีต่อความสามารถในการละลายของดินเบา โดยใช้ค่าการนำไฟฟ้าและการวัดปริมาณไฮดรอกไซด์เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการละลาย

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของชนิดและความเข้มข้นของต่างที่มีต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของดินเบา โดยการใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้

1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในช่วง 80-200 องศาเซลเซียสที่มีต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของดินเบา โดยการใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้

1.3.5 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ที่มีต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของดินเบา โดยการใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้

1.3.6 ศึกษาอิทธิพลของความดันที่มีต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเบา โดยการใช้การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาเคมี และสมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้

1.3.7 ศึกษาลักษณะเฉพาะของสารประกอบใหม่ที่ได้ในเชิงลึก เพื่ออธิบายกลไกของการเกิดสารประกอบใหม่ และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติวัสดุที่ได้กับลักษณะเฉพาะของสารประกอบใหม่

1.3.8 เขียนเฟสไดอะแกรมของการเกิดสารประกอบใหม่ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของดินเบาแหล่งลำปาง

2. วัตถุประสงค์

2.1 ศึกษาอิทธิพลของความละเอียดและการปรับสภาพด้วยความร้อนของดินเาต่อความสามารถในการละลายของดินเา

2.2 ศึกษาอิทธิพลของความละเอียดและการปรับสภาพด้วยความร้อนของดินเาต่อชนิดและความเข้มข้นของต่าง, อุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มร้อน, อัตราส่วนระหว่างไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินา และอัตราส่วนระหว่างดินเาต่อผสมแก้วกลบ ที่มีผลต่อสมบัติ

ทางกลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอีพอกซีโพลิเมอร์จากดินไคอะตอมล่ำปาง

2.3 ศึกษาอิทธิพลของความละเอียด, ปริมาณไลม์หรืออัตราส่วนของ CaO/SiO_2 , ความเข้มข้นของด่าง, อุณหภูมิและเวลาในการบ่ม ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุก่อสร้างที่ทำจากดินไคอะตอมล่ำปาง

3. วิธีการทดลอง

3.1 การศึกษาปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของดินเบาแหล่งล่ำปาง

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย

1. ดินไคอะตอมล่ำปางจากอำเภอมะเข่ จังหวัดล่ำปาง
2. ถ้ำแกลบได้จากการเผาแกลบข้าวที่อุณหภูมิ 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. เครื่องชั่งแบบดิจิตอลอ่านละเอียด 0.01 กรัม รุ่น ES-1000HA บริษัท ZEPPER
3. เตาเผาไฟฟ้า บริษัท Lenton Thermal Design Limited
4. ตู้อบไฟฟ้า บริษัท Memmert
5. เครื่องผสมอีพอกซีโพลิเมอร์เพลสต์
6. เครื่องสั่น
7. เครื่องบดชนิด Ball Mill
8. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี (Atomic Absorption Spectrometer (AAS)) Model-670
9. เครื่องทดสอบกำลังอัด (Universal Compressive Strength)
10. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Laser Particle Size Analyzer Malvern Instrument) รุ่น Mastersizer S
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-ray Micro Analysis) รุ่น

JSM-6335F

12. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (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. เครื่องฟูริเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

(Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR))

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

3.1.3 การทดสอบอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางกลของเพสต์

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ขนาด 5×5×5 เซนติเมตร จะถูกทดสอบหาค่าความหนาแน่น วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค กลไกปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นของจีโอพอลิเมอร์ และทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยมีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่

1. ความละเอียดของดินไคอะตอมที่ทำการศึกษาคือ ดินไคอะตอมที่ไม่คัดขนาด, ช่วงขนาดใหญ่ (ค้ำตะแกรง 80 เมช), ขนาดกลาง (ผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และค้ำตะแกรง 200 เมช) และขนาดเล็ก (ผ่านตะแกรง 325 เมช)

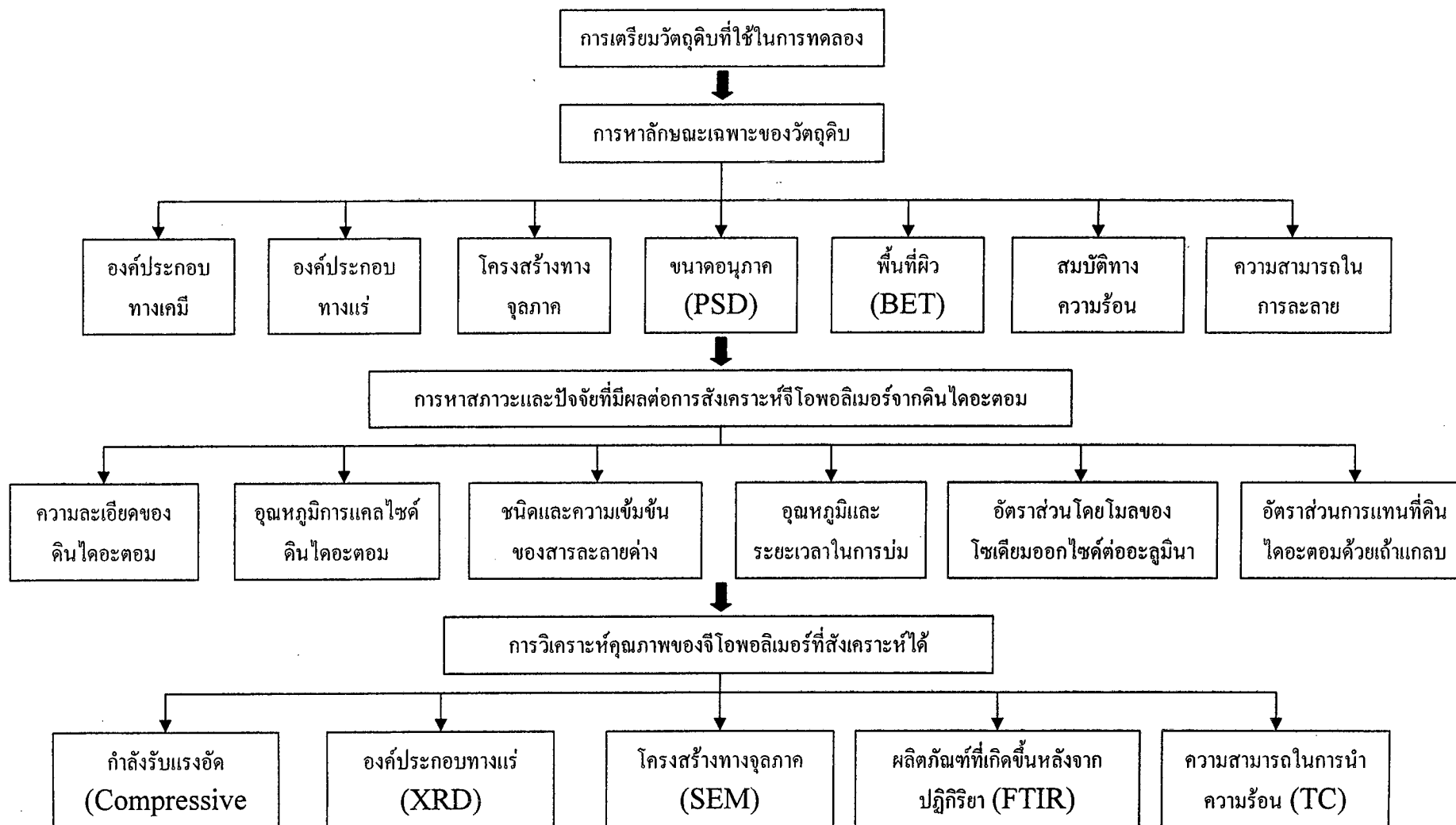
2. อุณหภูมิการปรับสภาพดินไคอะตอมด้วยความร้อนที่ใช้ในการศึกษาคือ 400, 600, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส

3. ชนิดของด่างที่ใช้ศึกษาคือ 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. ผลของการแทนที่ดินไคอะตอมลำปางด้วยเถ้าแกลบโดยมีอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบที่ศึกษาคือ 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 1 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.1.4 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

3.1.4.1 ดินไดอะตอม

ดินไดอะตอม (Diatomaceous Earth) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จาก อ.แม่ทะ จ.ลำปาง ซึ่งเป็นพื้นที่ศักยภาพของดินไดอะตอม เนื่องจากมีองค์ประกอบเป็นซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลัก อีกทั้งยังมีปริมาณสำรองเหลืออยู่มากถึง 200 ล้านตัน จึงเหมาะสมต่อการพัฒนาและนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนได้ ในการทดลองได้ทำการคัดขนาดดินไดอะตอมที่ไม่ผ่านการแคลไซต์โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 80, 140, 200 และ 325 เมช เพื่อใช้สำหรับศึกษาอิทธิพลของความละเอียดที่มีต่อความสามารถในการละลายและกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เฟสส์ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม คือ

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

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

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถในการชะละลายเอาไอออนของซิลิกอนและอลูมิเนียมออกจากวัตถุดิบ โดยหากปริมาณของซิลิกอนและอลูมิเนียมมีค่ามาก แสดงว่าวัตถุดิบดังกล่าวมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างได้ดี ซึ่งส่งผลให้ได้มอนอเมอร์เพื่อเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันในปริมาณมาก ซึ่งวิธีการเตรียมตัวอย่างได้อ้างอิงจากสภาวะที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์ โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

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

3.1.4.2 ถ้ำแกลบ

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

บดแห้งโดยใช้เครื่องบดชนิด Ball Mill เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แก้วกลบที่ได้จากการเตรียมจะถูกใช้
ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยแก้วกลบต่อไป

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 โดยมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของโซเดียมซิลิเกต

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
Silica (SiO_2)	32.39
Sodium oxide (Na_2O)	13.44
Water (H_2O)	54.17
Mole ratio ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$)	1:2.45

3.1.5 ระบบสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

ในการทดลองจะมีตัวแปรสำหรับการหาปฏิภาคของของส่วนผสมทั้งหมด 5 ตัวแปร ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์คือ

XXDEXX XXM(Na, K) (XX)

สัญลักษณ์จะมีความหมายดังนี้

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

ตัวเลข “XX” หลัง DE หมายถึง อัตราส่วนการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยเถ้ากลบ 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 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ 1, 2 และ 3

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ เช่น “80DE20 10M(Na) (1)” หมายถึง จีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ดินไดอะตอมและเถ้ากลบเป็นสารตั้งต้นในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ เป็นตัวกระตุ้นและมีอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 1

3.1.6 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

3.1.6.1 การศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพดินไดอะตอมที่มีต่อการกำลักรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

ในส่วนนี้จะทำการศึกษามลของความละเอียดของดินไดอะตอมและอุณหภูมิการแคลไซต์ดินไดอะตอมที่มีต่อการกำลักรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ โดยรายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1.5 การผสมจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) เท่ากับ 1.23 หลังจากการผสมและเทแบบทั้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน เมื่อครบกำหนดเวลา นำตัวอย่างออกจากตู้อบและถอดแบบในวันถัดไป โดยทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่อายุ 7 วัน ก่อนทำการทดสอบกำลักรับแรงอัด ความละเอียดและอุณหภูมิการแคลไซต์ดินไดอะตอมที่เหมาะสม จะถูกนำมาใช้ในการเตรียมวัตถุดิบเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ต่อไป

3.1.6.2 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการกำลักรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

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

3.1.6.3 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มร้อนที่มีต่อการกำลักรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

การศึกษาส่วนนี้ได้ใช้ส่วนผสม 100DE0 10M (Na) (1) ดังตารางที่ 3.4 ในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์เพสต์ 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 โดยมีองค์ประกอบทางเคมีโดยโมลของส่วนผสม แสดงดังตารางที่ 3.4 ตั้งแต่ตัวอย่างที่ 4, 11 และ 12 อัตราส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเพิ่มปริมาณของสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ในส่วนผสม

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

3.1.6.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยเถ้าแกลบ

ในการทดลองจะทำการศึกษาผลของปริมาณการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยเถ้าแกลบ ในอัตราส่วนร้อยละ 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 และ 0:100 โดยน้ำหนัก เพื่อให้อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาแตกต่างกัน ในการผสมจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.23 หลังการหล่อแบบทำการบ่มที่ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน โดยมีองค์ประกอบทางเคมีโดยโมลของส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 4 ตัวอย่างที่ 4 และ 13 ถึง 17

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของส่วนผสมซีโอพอลิเมอร์เฟสดี

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

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ ประกอบด้วย

1. เครื่องอัดอิฐไฮดรอลิก
2. ตู้อบแห้งชนิดไฟฟ้า

3. ชุดตะแกรงร่อนขนาดมาตรฐาน 80 Mesh บริษัท Bunsekifurul รุ่น JIS Style wire screen
4. เครื่องร่อนตะแกรงร่อนมาตรฐาน บริษัท Retsch
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. ชุดอุปกรณ์บ่มอิฐ
10. ถังมือ
11. ผ้าปิดจมูก
12. กระบอกตวง
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

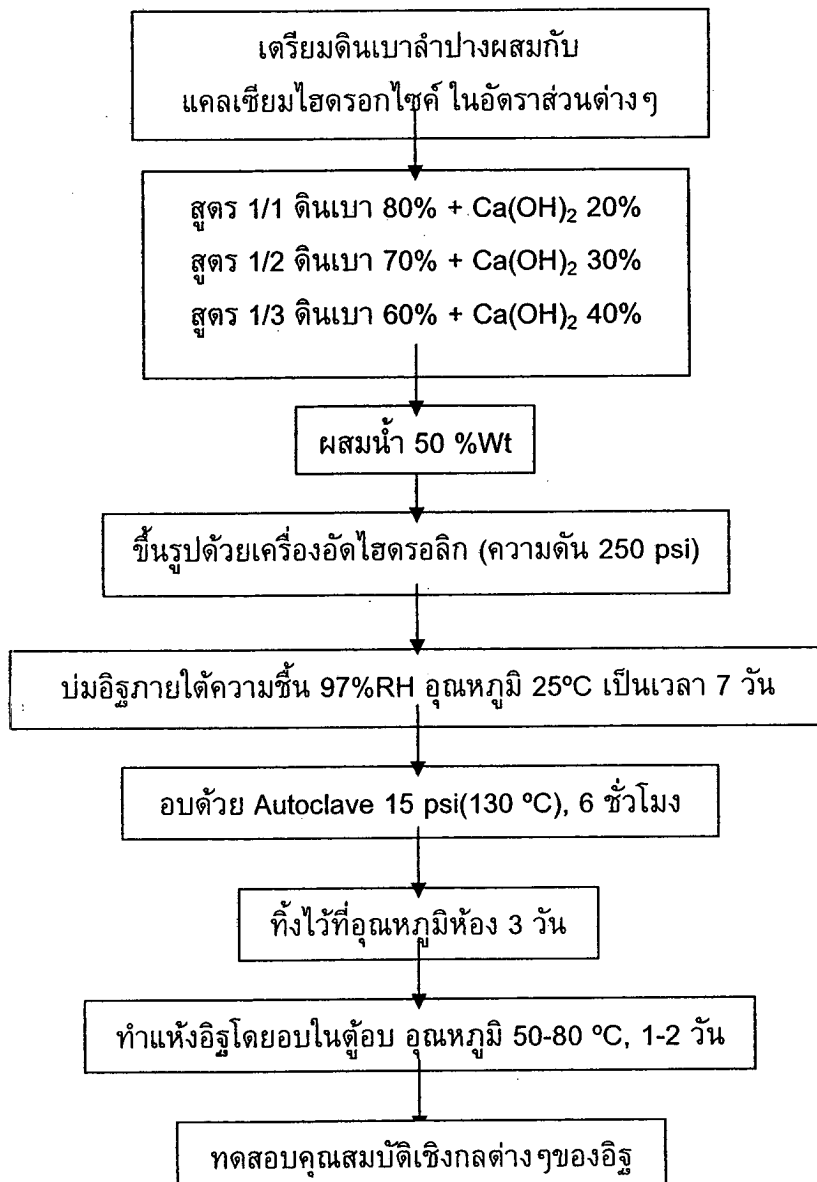
3.2.3.1 การหาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ

- 1) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินเบา
- 2) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินเบาที่ผ่านการเผาแล้ว

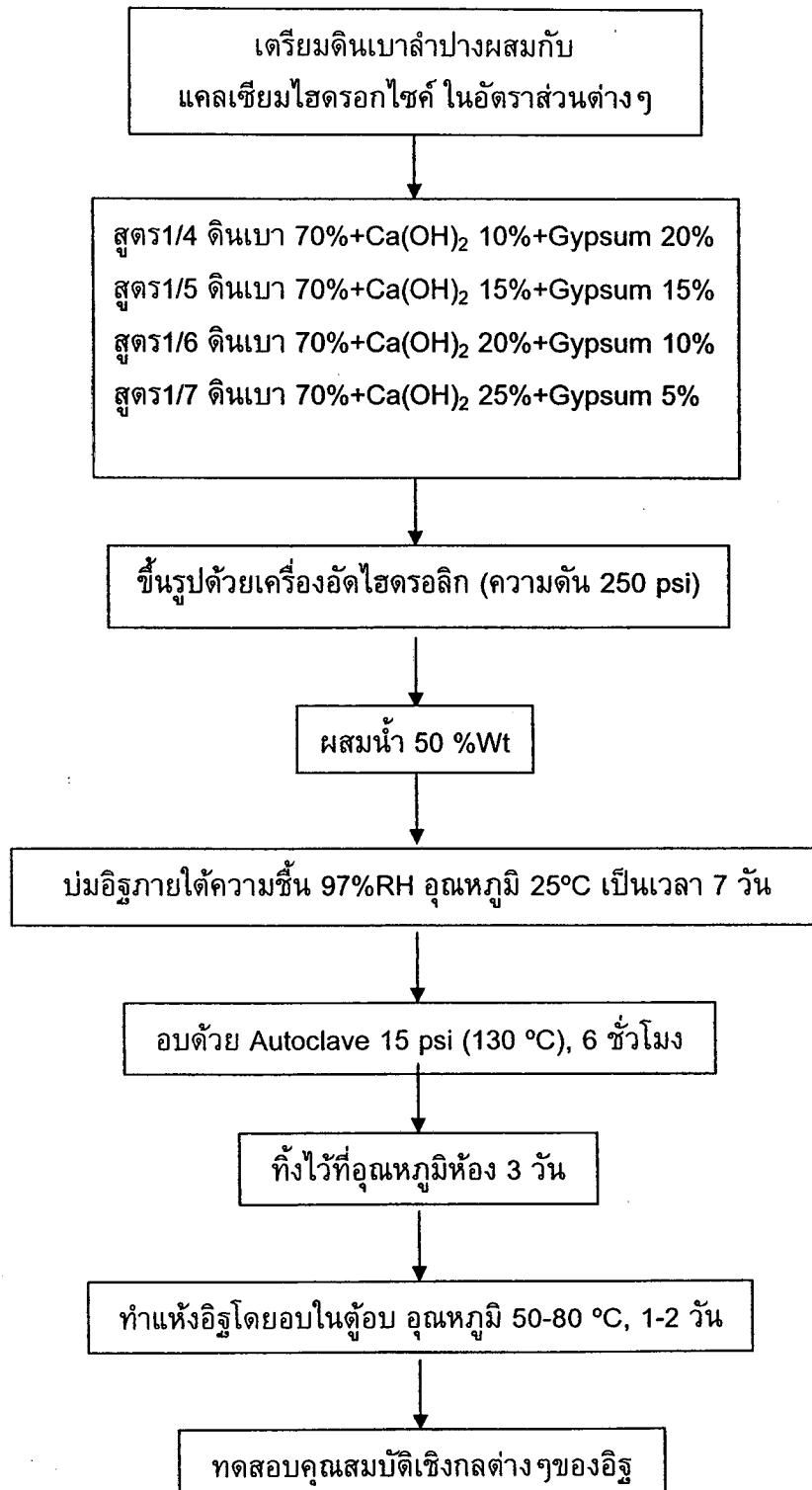
3.2.3.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่เหมาะสมในการลดความหนาแน่นของอิฐมวลเบาไดอะตอมไมท์

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

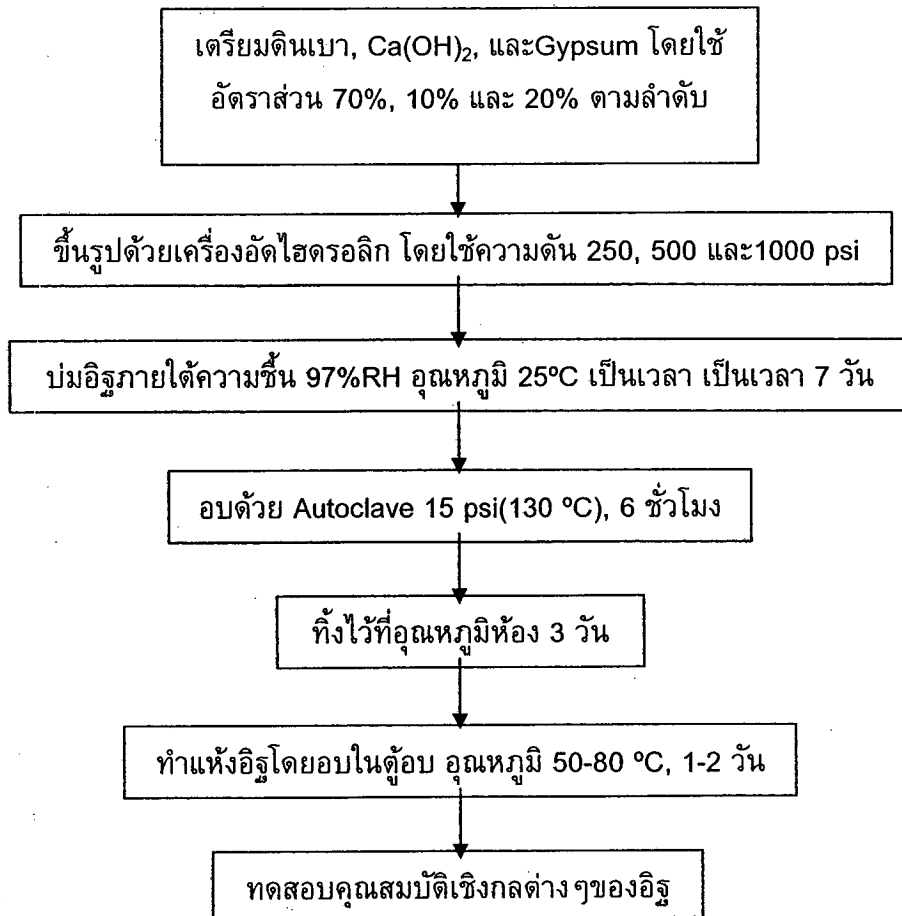
1) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรืออัตราส่วนของ
CaO/SiO₂



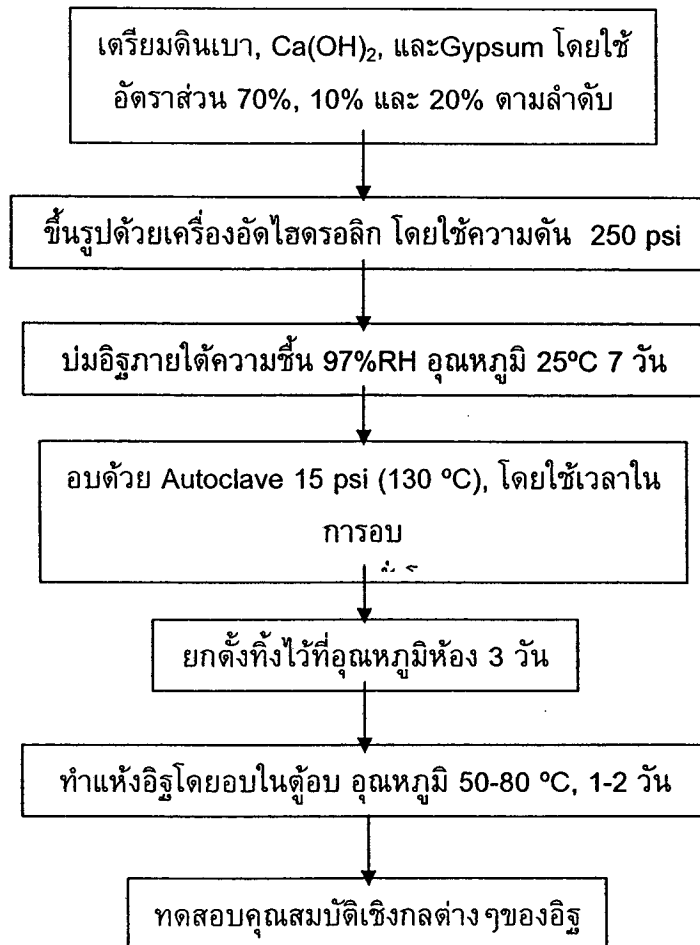
2) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณยิปซัม



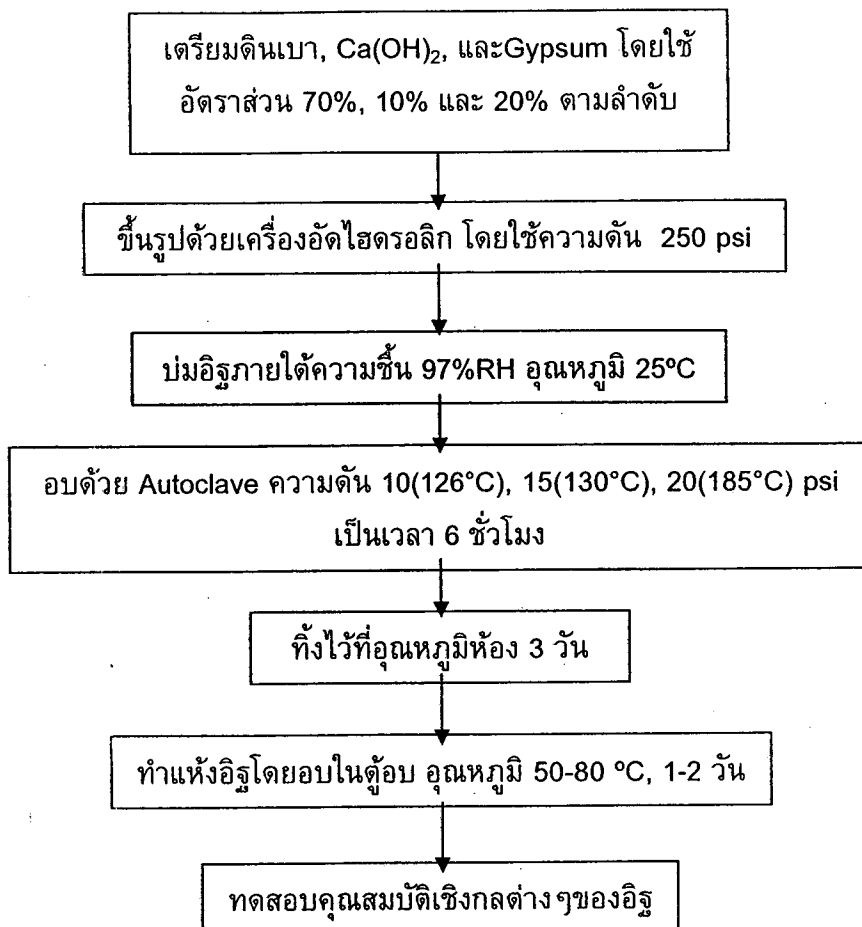
3) ศึกษาอิทธิพลของแรงอัดในการขึ้นรูปอิฐมวลเบา



4) ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการ Autoclave



5) ศึกษาอิทธิพลของความดันหรืออุณหภูมิในการ Autoclave



3.2.3.3 วิธีการทดลองอย่างละเอียด

1) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรืออัตราส่วนของ CaO/SiO_2

- 1) นำดินเบามาใส่ถาด calcine
- 2) จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 °C และร่อนผ่านตะแกรงที่ 80 เมช
- 3) นำดินเบา, Ca(OH)_2 และยิปซัมมาผสมให้เข้ากัน โดยเขย่าเป็นเวลา 5 นาที
- 4) นำวัตถุดิบที่ทำการผสมเรียบร้อยแล้วมาใส่ในถาด
- 5) ตวงน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเท่ากับ 60 % โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ
- 6) ทำการผสมวัตถุดิบกับน้ำให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยสังเกตได้จากสีของเนื้อวัตถุดิบ โดยควรจะเป็นสีเดียวกันทั้งหมด
- 7) จากนั้นนำวัตถุดิบที่ได้ไปทำการกดอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก 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) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณยิปซัม

ทำการทดลองตามรายละเอียดข้างต้น และทำการเพิ่มปริมาณยิปซัม โดยใช้ยิปซัมที่อบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

3) ศึกษาอิทธิพลของแรงอัดในการขึ้นรูปอิฐมวลเบา

ทำการทดลองตามรายละเอียดข้างต้น โดยเปลี่ยนความดันในการกดอัดของเครื่องอัดไฮดรอลิกเป็น 500 psi และ 1000 psi

4) ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการ Autoclave

ทำการทดลองตามรายละเอียดข้างต้น โดยเปลี่ยนระยะเวลาในการ Autoclave เป็น 3 ชั่วโมง และ 9 ชั่วโมง

5) ศึกษาอิทธิพลของความดันหรืออุณหภูมิในการ Autoclave

ทำการทดลองตามรายละเอียดข้างต้น โดยเปลี่ยนความดันในการ Autoclave เป็น 10 psi และ 20 psi

4. ผลการทดลอง

ผลการศึกษาปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของดินเบาแหล่งลำปาง

4.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะของดินไคอะตอมลำปางและเถ้าแกลบที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมลำปางที่ยังไม่ผ่านการแคลไซต์และคัตขนาด (ODE), ดินไคอะตอมที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช (R80DE), ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และค้ำตะแกรงขนาด 200 เมช (R200DE), ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช (P325DE) และเถ้าแกลบที่ผ่านการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (RHA) ซึ่งพบว่าดินไคอะตอมที่ไม่คัตขนาดมีองค์ประกอบเป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นหลัก โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา (Si/Al) เท่ากับ 11.98 นอกจากนี้ยังพบเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ในปริมาณที่ใกล้เคียงกับอะลูมินาอีกด้วย และเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมที่มีทั้งซิลิกาและอะลูมินาจึงทำให้ดินไคอะตอมมีคุณสมบัติการเป็นสารพอสโซลาน (pozzolanic material) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างความเข้มข้นสูงในปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้ ส่วนเถ้าแกลบจะมีองค์ประกอบเป็นซิลิกาส่วนใหญ่และมีอะลูมินาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่งผลให้อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาสูงถึง 1,317.5

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมที่ผ่านการคัตขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนพบว่า ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช มีปริมาณซิลิกามากกว่าดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และค้ำตะแกรงขนาด 200 เมช และดินไคอะตอมที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช ($\text{SiO}_{2\text{P}325\text{DE}} > \text{SiO}_{2\text{R}200\text{DE}} > \text{SiO}_{2\text{R}80\text{DE}}$) ตามลำดับ ในทางกลับกัน ดินไคอะตอมที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช มีปริมาณอะลูมินามากกว่าดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และค้ำตะแกรงขนาด 200 เมช และดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช ($\text{Al}_{2\text{O}_{3\text{R}80\text{DE}}} > \text{Al}_{2\text{O}_{3\text{R}200\text{DE}}} > \text{Al}_{2\text{O}_{3\text{P}325\text{DE}}}$) ทั้งนี้เนื่องจากดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช ประกอบด้วยเปลือกของไคอะตอมที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช จึงมีปริมาณซิลิกาสีสูงกว่าดินไคอะตอมขนาดอื่น โดยดินไคอะตอมที่ค้ำตะแกรง 80 เมช ประกอบด้วยแร่ดินซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคของไคอะตอมจึงทำให้ดินไคอะตอมที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช มีปริมาณอะลูมินาซึ่งเป็นองค์ประกอบของแร่ดินในปริมาณที่มากกว่าดินไคอะตอมขนาดละเอียด

ตารางที่ 4.1 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมที่ยังไม่ผ่านการแคลไซต์และถ้า
 แกลบที่ผ่านการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 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

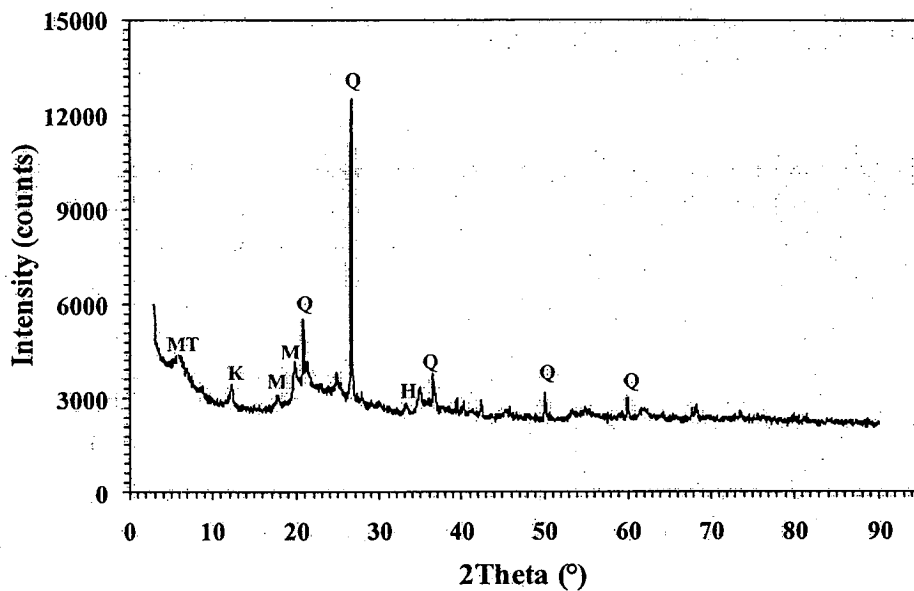
4.1.2 องค์ประกอบทางแร่

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินไคอะตอมและถ้าแกลบ ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าดินไคอะตอมและถ้าแกลบมีองค์ประกอบทางแร่ที่เหมือนกัน คือ ควอตซ์ (Quartz; SiO₂) ซึ่งจะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26 องศา เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางแร่ของดินไคอะตอมยังพบว่ายังมีแร่ดินชนิดมัสโคไวท์ (Muscovite: M), เคโอลิไนท์ (Kaolinite: K) และมอนท์โมริโลไนท์ (Montmorillonite: MT) เจือปนอยู่เพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมที่พบว่ามีอะลูมิเนียมอยู่เพียงร้อยละ 10.97 โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของแร่ (XRD Quantitative) พบว่าดินไคอะตอมมีองค์ประกอบของแร่มัสโคไวท์, ควอตซ์และเฮมาไทท์ (Hematite: H) ร้อยละ 69.9, 25.1 และ 5 โดยน้ำหนัก

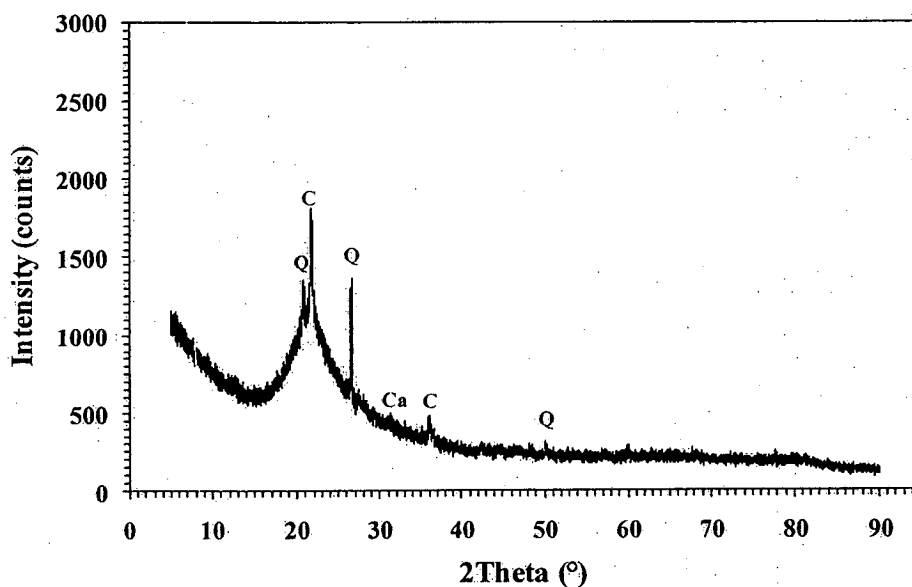
ถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.2 จะแสดงถึงส่วนที่เป็นผลึก คือ ควอตซ์ และคริสโตบาไลท์ (Cristobalite: C) ซึ่งอาจเกิดจากอุณหภูมิในการ

เผาสูงเกินไป และใช้เวลาในการเผานาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของซิลิกาอสัณฐานเป็นผลึก [5] นอกจากนี้ยังพบส่วนที่เป็นอสัณฐานของซิลิกาในถ้ำแกลบอีกด้วย

พีคที่ปรากฏในช่วง 2θ เท่ากับ $20 - 30$ องศา จะแสดงถึงลักษณะความเป็นอสัณฐาน (amorphous) และกึ่งผลึก (semi-crystalline) ของซิลิกาที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาจากรูปถ้ำแกลบจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าดินไคอะตอม เนื่องจากมีความเป็นอสัณฐานมากกว่าดินไคอะตอม



รูปที่ 4.1 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของดินไคอะตอม



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 $(\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2)$

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

Q = Quartz (SiO_2)

H = Hematite (Fe_2O_3)

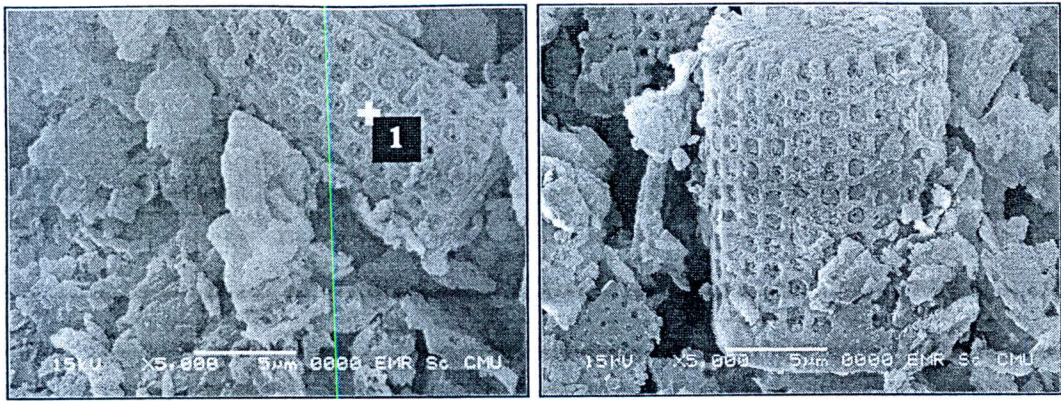
C = Cristobalite (SiO_2)

Ca= Calcite (CaCO_3)

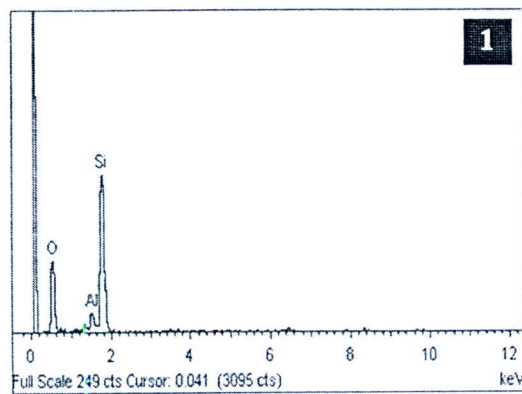
4.1.3 รูปร่างอนุภาค

ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของดินไคอะตอมและถ้ำเกลือที่ผ่านการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยรูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของดินไคอะตอมซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของดินที่มีลักษณะเป็นแผ่นอยู่รวมกับอนุภาคของสารหยาบเซลล์เดี่ยวจำพวกไคอะตอมที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกและมีรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งเป็นเหตุผลทำให้ดินไคอะตอมมีค่าความหนาแน่นมวลรวมน้อยเมื่อเทียบกับดินชนิดอื่นๆ และเมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy dispersive x-ray spectrometry; EDS) ดังรูปที่ 4.3 (ข) และตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละโดยน้ำหนัก (weight%) และร้อยละโดยอะตอม (atomic%) ของธาตุในตำแหน่งที่วิเคราะห์ โดยจะเห็นได้ว่า พื้นผิวของไคอะตอมบริเวณหมายเลข 1 มีองค์ประกอบเป็นซิลิกอนและอะลูมิเนียม โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 8.9 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเคมีของดินไคอะตอม

รูปที่ 4.4 (ก) แสดงรูปร่างอนุภาคของถ้ำเกลือ โดยพบว่าลักษณะภายนอกมีพื้นผิวที่ขรุขระ ส่วนภายในดังรูป (ข) มีลักษณะเป็นโครงร่างแหที่สานและซ้อนทับกันอยู่เป็นจำนวนมาก จึงทำให้ถ้ำเกลือมีพื้นที่ผิวและความพรุนตัวสูง ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 (ค) และตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละโดยน้ำหนัก (weight%) และร้อยละโดยอะตอม (atomic%) ของธาตุในตำแหน่งที่วิเคราะห์ โดยพบว่า มีองค์ประกอบเป็นซิลิกอนเพียงอย่างเดียว ซึ่งต่างกับผลการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเคมีที่มีทั้งซิลิกาและอะลูมินา ทั้งนี้เนื่องจากอะลูมินาที่มีในถ้ำเกลือมีปริมาณเพียงร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก จึงทำให้มีโอกาสน้อยมากที่จะตรวจพบ

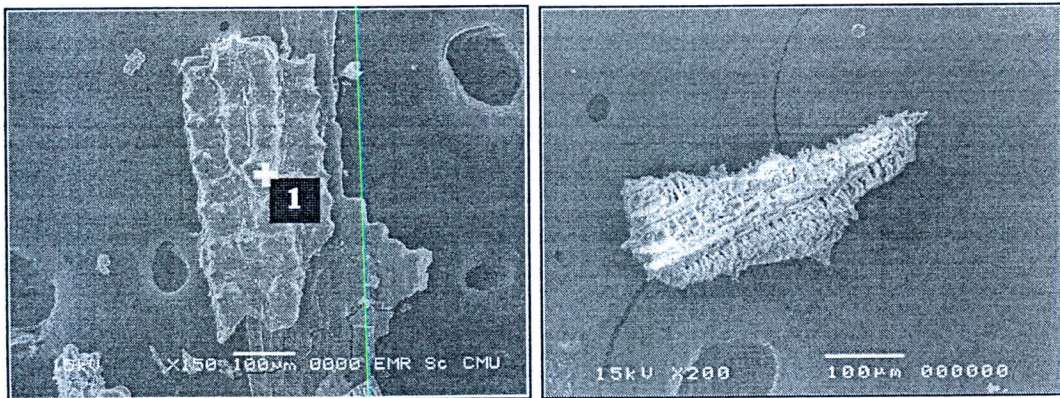


ก. อนุภาคของไคอะตอมที่มีรูปพรุนจำนวนมากอยู่รวมกับอนุภาคของดิน



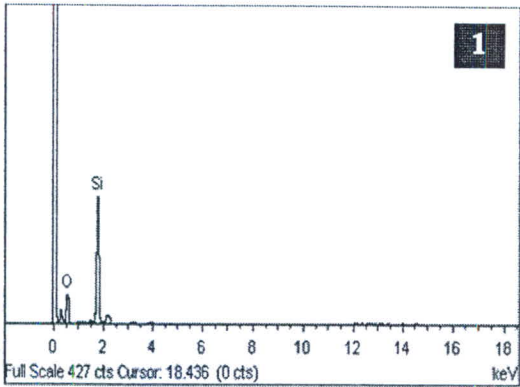
ข. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของดินไคอะตอมที่ไม่ผ่านการแคลไซด์



ก. พื้นผิวของถ้ำแคลบที่ขรุขระ

ข. โครงร่างแหที่สานกันอยู่ภายใน



ค. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

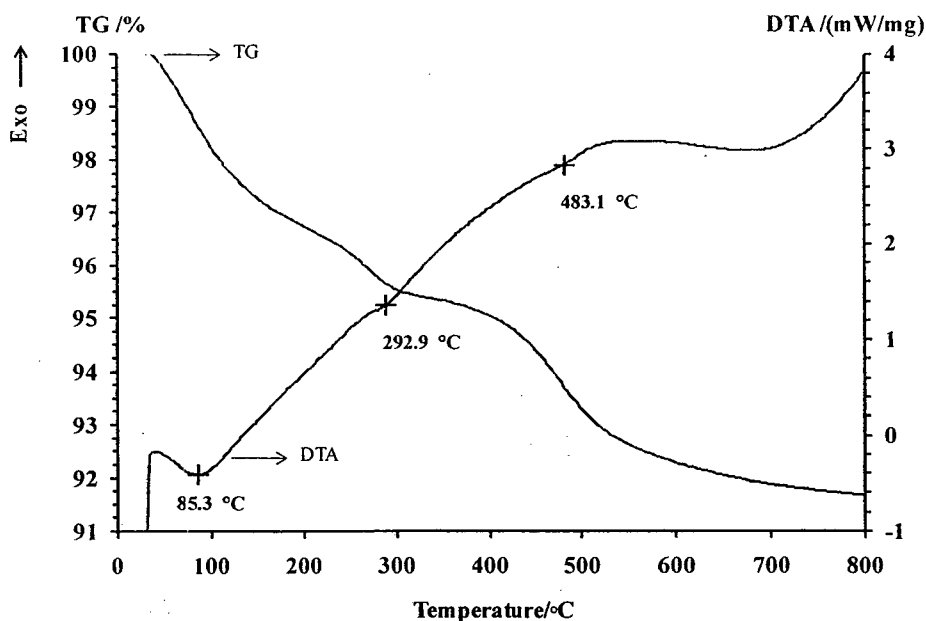
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคของเก้าแกลบที่ผ่านการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 700 °C

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินไคอะตอมและเก้าแกลบเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค 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

ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของดินไคอะตอมและเก้าแกลบแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยพบว่า ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของดินไคอะตอมที่ไม่ทำการคัดขนาด, ดินไคอะตอมที่คัดตะแกรงขนาด 80 เมช, ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และคัดตะแกรงขนาด 200 เมช, ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 และเก้าแกลบที่ผ่านการบดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 73, 350, 89, 19 และ 62 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของดินไคอะตอมที่คัดตะแกรงขนาด 80 เมช มีค่ามากเนื่องจากอนุภาคที่คัดตะแกรงส่วนใหญ่เป็นอนุภาคของทรายซึ่งมีขนาดใหญ่ โดยการร่อนดินไคอะตอมผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช จะได้ดินไคอะตอมที่มีขนาดเล็กถึง 19 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นผลดีต่อการทำปฏิกิริยาซีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเนื่องจากวัตถุดิบที่มีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวสัมผัสมีค่าสูงกว่าวัตถุดิบขนาดหยาบดังนั้นจึงถูกชะละลายด้วยสารละลายต่างได้ดี และเกิดเป็นมอนอเมอร์ปริมาณมากเพื่อใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาพอลิ-เมอร์ไรเซชันต่อไป



รูปที่ 4.5 TG - DTA เทอร์โมแกรมของดินไดอะตอม

4.1.8 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมาจากดินไดอะตอมที่ยังไม่ผ่านการแคลไซต์และคัดขนาด (ODE) และเถ้าแกลบที่ผ่านการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง (RHA) แสดงดังตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบมีความสามารถในการละลายซิลิกอนออกมาได้มากกว่าดินไดอะตอม เนื่องจากเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางแร่ดังหัวข้อที่ 4.1.2 พบว่าเถ้าแกลบมีความเป็นออสซิลิกมากกว่าดินไดอะตอมจึงทำให้สารประกอบต่างๆ ถูกชะละลายออกมาได้ง่ายขึ้น ในทางตรงข้ามดินไดอะตอมจะถูกชะละลายอะลูมิเนียมออกมาในปริมาณที่มากกว่าเถ้าแกลบ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี กล่าวคือ ดินไดอะตอมและเถ้าแกลบมีปริมาณซิลิกาและอะลูมิเนียมร้อยละ 77.46, 10.97 และ 85.25, 0.11 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งดินไดอะตอมมีปริมาณซิลิกาน้อยกว่าเถ้าแกลบและมีอะลูมิเนียมในปริมาณที่มากกว่า จึงทำให้ดินไดอะตอมมีความเข้มข้นของซิลิกอนที่ถูกชะละลายออกมาน้อยกว่าเถ้าแกลบและมีค่าความเข้มข้นของอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมามากกว่าเถ้าแกลบ

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของดินไดอะตอมที่มีความละเอียดแตกต่างกัน พบว่าปริมาณซิลิกอน (Si) ที่ถูกชะละลายด้วยตัวของดินไดอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช (P325DE) มีค่ามากที่สุด เนื่องจากดินไดอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช มีความละเอียดสูงกว่าดินไดอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และค้ำตะแกรงขนาด 200 เมช (R200DE) และดินไดอะตอมที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช (R80DE) ตามลำดับ จึงทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างได้มากกว่า ปริมาณซิลิกอนที่ถูกชะละลายออกมาจึงมีค่าสูง ในทางตรงข้ามปริมาณอะลูมิเนียม (Al) ที่ถูกชะละลายออกมาจาก

วัตถุที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช มีค่าสูงที่สุด ซึ่งเป็นไปตามผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินไโดอะตอมที่ผ่านการคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาดต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

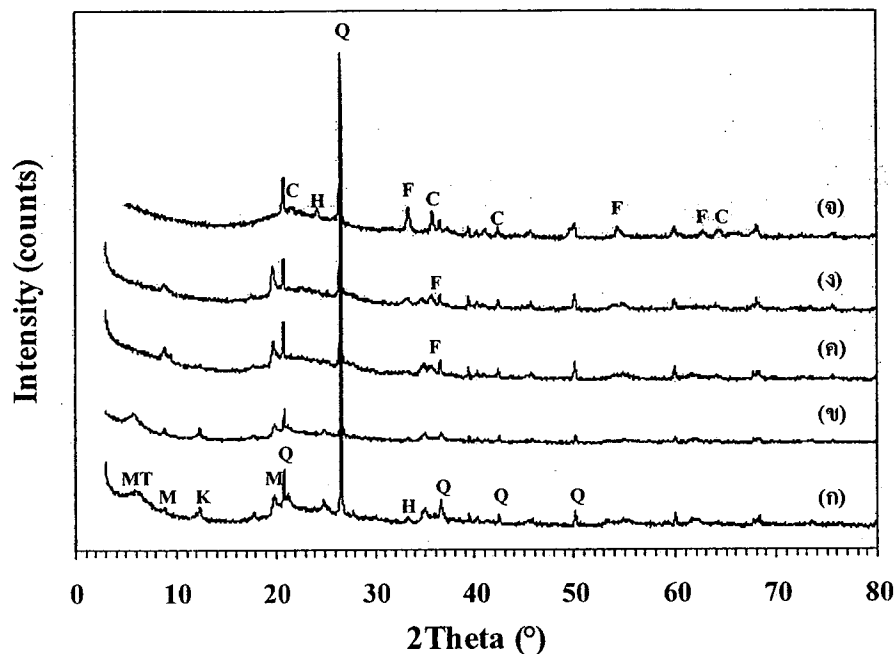
ตารางที่ 4.5 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมาจากดินไโดอะตอมและถ้ำเกลือ

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

ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการแคลไซน์ดินไโดอะตอมที่มีต่อความสามารถในการละลาย แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการแคลไซน์เพิ่มขึ้นเป็น 800 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณซิลิกอนและอะลูมิเนียมถูกชะละลายออกมามากกว่าการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600, 1000 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งตรงข้ามกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่กล่าวว่า อุณหภูมิในการแคลไซน์เพิ่มขึ้น ทำให้วัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นผลึกซึ่งไม่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยา [6] ทั้งนี้หากพิจารณาแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของดินไโดอะตอมที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างกัน ดังรูปที่ 4.6 พบว่าการแคลไซน์ดินไโดอะตอมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของแร่มอนท์โมริลโลไนท์ (Montmorillonite) สังเกตได้จากพีค ณ ตำแหน่ง 2 θ เท่ากับ 6.5 องศา หายไป ทำให้พื้นผิวของอนุภาคมีประจุลบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส โครงสร้างของแร่เคโอลินไนท์ (Kaolinite) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเมตะเกอลิน (Metakaolin) ซึ่งมีความเอื้อต่อการทำปฏิกิริยาสูงกว่าเคโอลินไนท์จึงทำให้ดินไโดอะตอมมีความเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ส่งผลให้ดินไโดอะตอมที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิดังกล่าวมีปริมาณซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมามากกว่าที่อุณหภูมิอื่น แต่เมื่อทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 1,000 องศาเซลเซียส ปริมาณของซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมามีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแร่ควอตซ์ (Quartz) เป็นคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) และแร่เฮมาไทต์ (Hematite) เป็นแร่แมกนีไทต์ (Magnetite; Fe_3O_4) ที่ไม่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกชะละลายออกมาจากดินไดอะตอมเมื่อแคลไซต์ที่อุณหภูมิต่างกัน

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 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของดินไดอะตอม (ก) ไม่แคลไซน์ (ข) แคลไซน์ 400 °C (ค) แคลไซน์ 600 °C (ง) แคลไซน์ 800 °C และ (จ) แคลไซน์ 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 $(\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2)$

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 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

4.2.1 ผลของการปรับสภาพดินไคอะตอม

การปรับสภาพดินไคอะตอมที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 2 ปัจจัยคือ

4.2.1.1 ความละเอียดของดินไคอะตอม

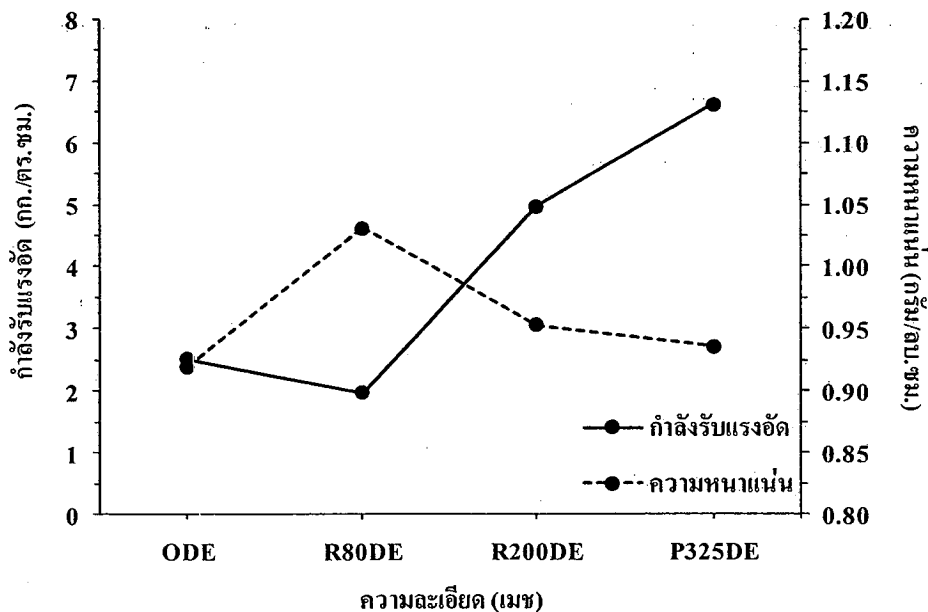
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ดินไคอะตอมที่ยังไม่ผ่านการแคลไซด์และความละเอียดแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน ของจีโอพอลิเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับค่าความละเอียดของดินไคอะตอม โดยดินไคอะตอม P325DE ให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงกว่าดินไคอะตอม R200DE, ODE และ R80DE ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายของดินไคอะตอมดังตารางที่ 4.5 เนื่องจากดินไคอะตอมละเอียดมีพื้นที่ผิวสูงและมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่าดินไคอะตอมขนาดหยาบ สารประกอบซิลิกอนและอะลูมิเนียมจึงถูกชะละลายออกมาเพื่อทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมากขึ้น [7-9] ทำให้โมเลกุลมีการเชื่อมต่อนะหว่างพันธะและสามารถรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมโดยใช้ดินไคอะตอม R80DE ให้ความหนาแน่นมากที่สุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดอนุภาคของดินไคอะตอมมีขนาดเล็ก เนื่องจากอนุภาคที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช เป็นอนุภาคของทรายซึ่งมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก ทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่ามากกว่าดินไคอะตอมขนาดละเอียดที่มีน้ำหนักเบา

4.2.1.2 อุณหภูมิการแคลไซด์ดินไคอะตอม

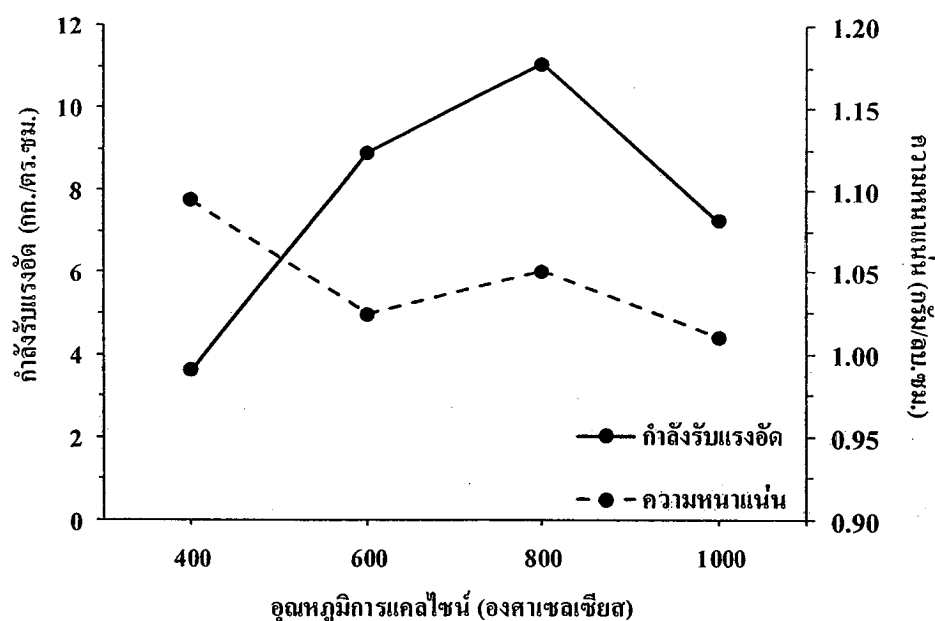
รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากดินไคอะตอมที่ผ่านการแคลไซด์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยพบว่ากำลังรับแรงอัดจะพัฒนาตามอุณหภูมิการแคลไซด์ที่เพิ่มขึ้นในช่วง 400 - 800 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการแคลไซด์ดินไคอะตอมเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ คือ 800 องศาเซลเซียส จากแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 4.6 พบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างของแร่มอนท์โมริไลต์และเคโอลิไนต์ ทำให้พื้นผิวของอนุภาคมีประจุลบเพิ่มขึ้นจากการที่พันธะถูกทำลาย ส่งผลให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของดินไคอะตอมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สูงกว่าอุณหภูมิการแคลไซด์อื่น นอกจากนี้ยังพบว่าการแคลไซด์ดินไคอะตอมที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแร่ควอตซ์ไปเป็นคริสโตบาไลต์ และแร่เฮมาไทต์ (Fe_2O_3) เป็นแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ซึ่งเป็นแร่ที่มีความเสถียรสูง ดังนั้นดินไคอะตอมจึงมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ดังเช่นผลการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายในตารางที่ 4.6

ผลการคำนวณค่าความหนาแน่นของชั้นงานพบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมโดยใช้ดินไคอะตอมที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นสูงที่สุดเนื่อง จากชั้นงานมีการหดตัวหลังจากการบ่มมาก ปริมาตรของชั้นงานมีค่าน้อย ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรของชั้นงานจึงมีค่าสูง โดยชั้นงานที่เตรียมได้จากดินไคอะตอมที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นเพียง 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จากผลการศึกษาอิทธิพลของความละเอียดและอุณหภูมิการแคลไซน์ดินไคอะตอมที่มีต่อความสามารถในการละลายและกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัตถุดิบเพื่อใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์คือ แคลไซน์ดินไคอะตอมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์กับความละเอียดของดินไคอะตอม

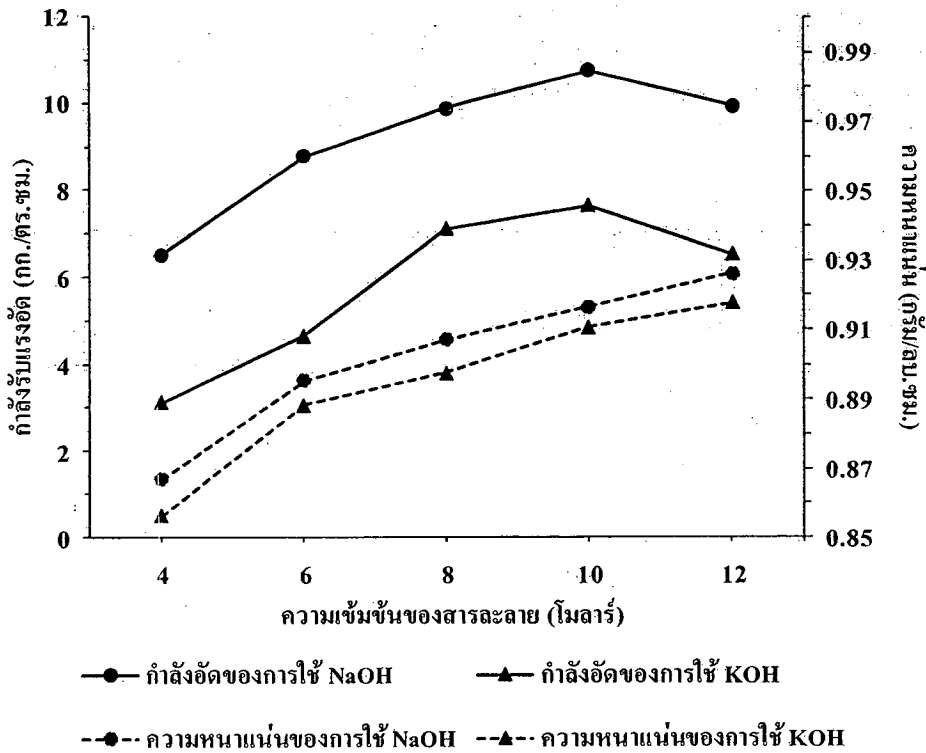


รูปที่.4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์กับอุณหภูมิการแคลไซน์ดินไดอะตอม

4.2.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

การทดลองส่วนนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยคาดว่าความเข้มข้นของสารละลายจะมีผลต่อความสามารถในการชะละลายอนุภาคของวัสดุดิบ จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 พบว่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากดินไดอะตอมคือ 10 โมลาร์ เนื่องจากมีความเข้มข้นของโซเดียม (Na) ในปริมาณที่เพียงพอสำหรับกลไกการดูลประจุ ณ ตำแหน่งของ $[AlO_4]^{5-}$ ในสายโซ่ของพอลิเมอร์ เมื่อใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (12 โมลาร์) จีโอพอลิเมอร์ให้กำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากความรุนแรงของสารละลายทำให้ส่วนผสมผสมมีลักษณะหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของความสามารถในการชะละลายซิลิกาและอะลูมินาออกมาจากวัสดุดิบ ทำให้จีโอพอลิเมอร์ที่ได้จากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 12 โมลาร์ มีกำลังรับแรงอัดลดลง [10] ทั้งนี้การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเดียวกัน เป็นผลมาจากโซเดียมไอออน (Na^+) มีขนาดเล็กกว่าโพแทสเซียมไอออน (K^+) ดังนั้นโซเดียมจึงมีค่าความแข็งแรงจากการเกิดพันธะ (bond strength = valence/cation radius) สูงกว่าโพแทสเซียม ทำให้การดูลประจุ ณ ตำแหน่งของ $[AlO_4]^{5-}$ ในสายโซ่ของพอลิเมอร์ให้พันธะที่มีความแข็งแรงมากกว่าการใช้โพแทสเซียมไอออนในการดูลประจุ ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้แตกต่างจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ Phair และ Van Deventer [11] ที่กล่าวว่า การใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ส่วนผสมมีการก่อตัวที่เร็วกว่า

และให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงกว่าการใช้สารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น ทั้งนี้ชนิดของวัตถุบดที่แตกต่างกันมีผลอย่างมากต่อการเลือกใช้ชนิดของสารละลายอัลคาไลน์ที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ดังเช่นงานวิจัยของ Van Jaarsveld และ Van Deventer ที่กล่าวว่าการเลือกชนิดไอออนบวกของสารอัลคาไลน์เพื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายข้อ ซึ่งที่มีความสำคัญที่สุดคือ ชนิดของวัตถุบดตั้งต้นและการประยุกต์ใช้งาน [12]

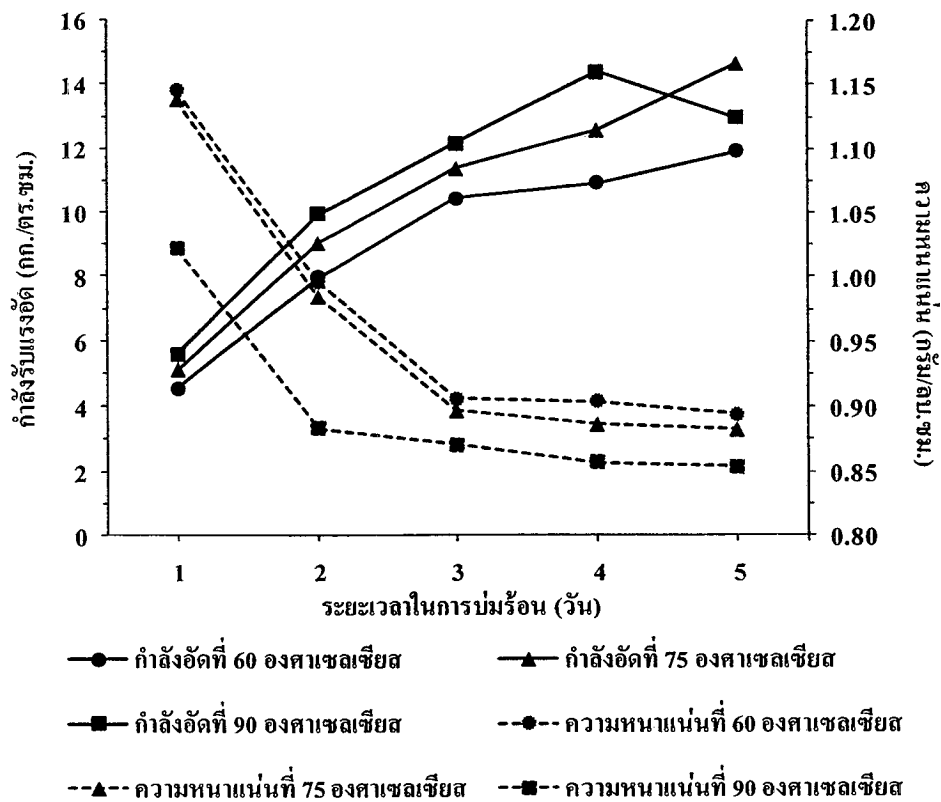


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์กับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

4.2.3 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มร้อน

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

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



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์กับอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มร้อน

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ และถ้ากลับ

วัตถุติบ	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

พื้นที่ผิวของดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาดแตกต่างกันและถ้ากลับที่ผ่านการบดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าพื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาค กล่าวคือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ โดย P325DE มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19 ไมโครเมตร ซึ่งเล็กกว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ R200DE และ R80DE ที่มีค่าเท่ากับ 89 และ 350 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่งผลให้พื้นที่ผิวของ P325DE มีค่าสูงที่สุดถึง 61.28 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ถ้ากลับ (RHA) ยังมีพื้นที่ผิวสูงกว่าดินไคอะตอมที่ไม่ผ่านการคัดขนาด (ODE) เนื่องจากถ้ากลับมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเมื่อเทียบกับดินไคอะตอมที่มีทั้งซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลักอีกทั้งยังพบมวลรวมขนาดเล็กเช่น ทราย รวมอยู่กับดินไคอะตอม จึงทำให้ถ้ากลับมีพื้นที่ผิวสูงกว่าดินไคอะตอม

4.1.6 ความถ่วงจำเพาะ

ผลการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของวัตถุติบตามมาตรฐาน ASTM D854-92 ดังตารางที่ 4.4 พบว่าค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะของดินไคอะตอมมีค่าลดลงเมื่อความละเอียดของดินไคอะตอมเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช จะไม่มีมวลรวมขนาดเล็กเช่น ทราย หลงเหลืออยู่ อีกทั้งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกาซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็กและมีมวลโมเลกุลต่ำ จึงทำให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดินไคอะตอมขนาดอื่น โดยดินไคอะตอม ODE มีค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.25 และถ้ากลับมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.08

ตารางที่ 4.4 ความถ่วงจำเพาะและพื้นที่ผิวของดินไคอะตอมที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาดแตกต่างกันและถั่วแกลบ

ชนิดของวัตถุดิบ	สัญลักษณ์	ความถ่วงจำเพาะ	พื้นที่ผิว (m ² /g)
ดินไคอะตอมที่ไม่ผ่านการคัดขนาด	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
ถั่วแกลบที่ผ่านการบด 2 ชั่วโมง	RHA	2.08	46.82

4.1.7 สมบัติทางความร้อน

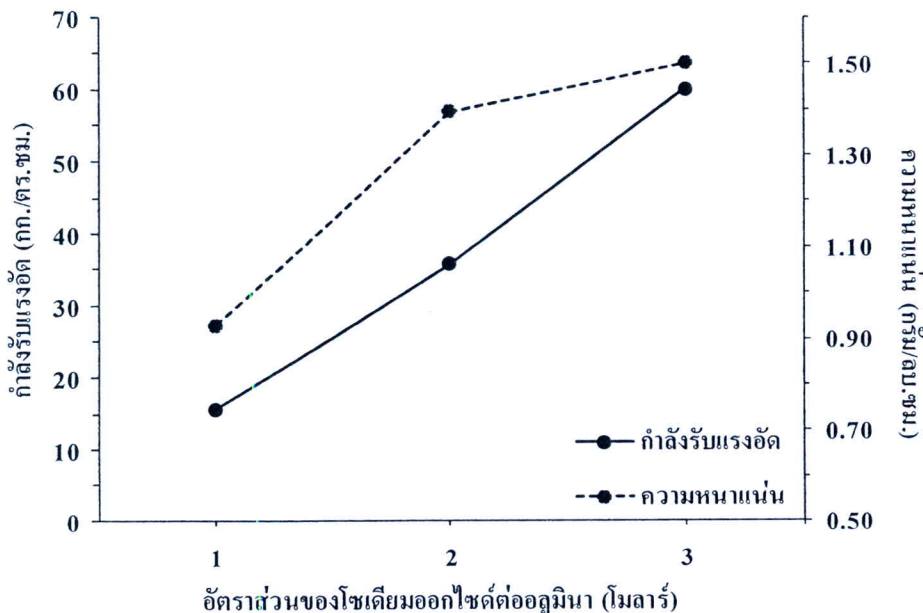
สมบัติเชิงความร้อนของวัตถุดิบถูกวิเคราะห์ออกมาในรูปของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง ในระหว่างการให้ความร้อนอุณหภูมิของตัวอย่างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ 2 ลักษณะ คือ ดูดความร้อน (endothermic) และคายความร้อน (exothermic) ซึ่งกราฟที่ได้บ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ทำให้ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งอาจพิจารณาได้จากน้ำหนักที่สูญเสียไป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

ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของดินไคอะตอม ดังรูปที่ 4.5 พบว่า ปรากฏพีคการดูดความร้อน (endothermic) ที่อุณหภูมิ 85.3 และ 292.9 องศาเซลเซียส ซึ่งสัมพันธ์กับพีคการสูญเสียน้ำหนักที่มีค่าร้อยละ 3.32 และ 1.35 โดยการเปลี่ยนแปลงของพีคที่อุณหภูมิดังกล่าวเกิดขึ้นจากน้ำที่พื้นผิวของอนุภาค (adsorbed water) ระเหยออกไป นอกจากนี้ยังพบพีคดูดความร้อนที่อุณหภูมิ 483.1 องศาเซลเซียส อันเป็นผลมาจากการระเหยน้ำออกไปจากโครงสร้างของแร่ (dehydroxylation) ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 3.72

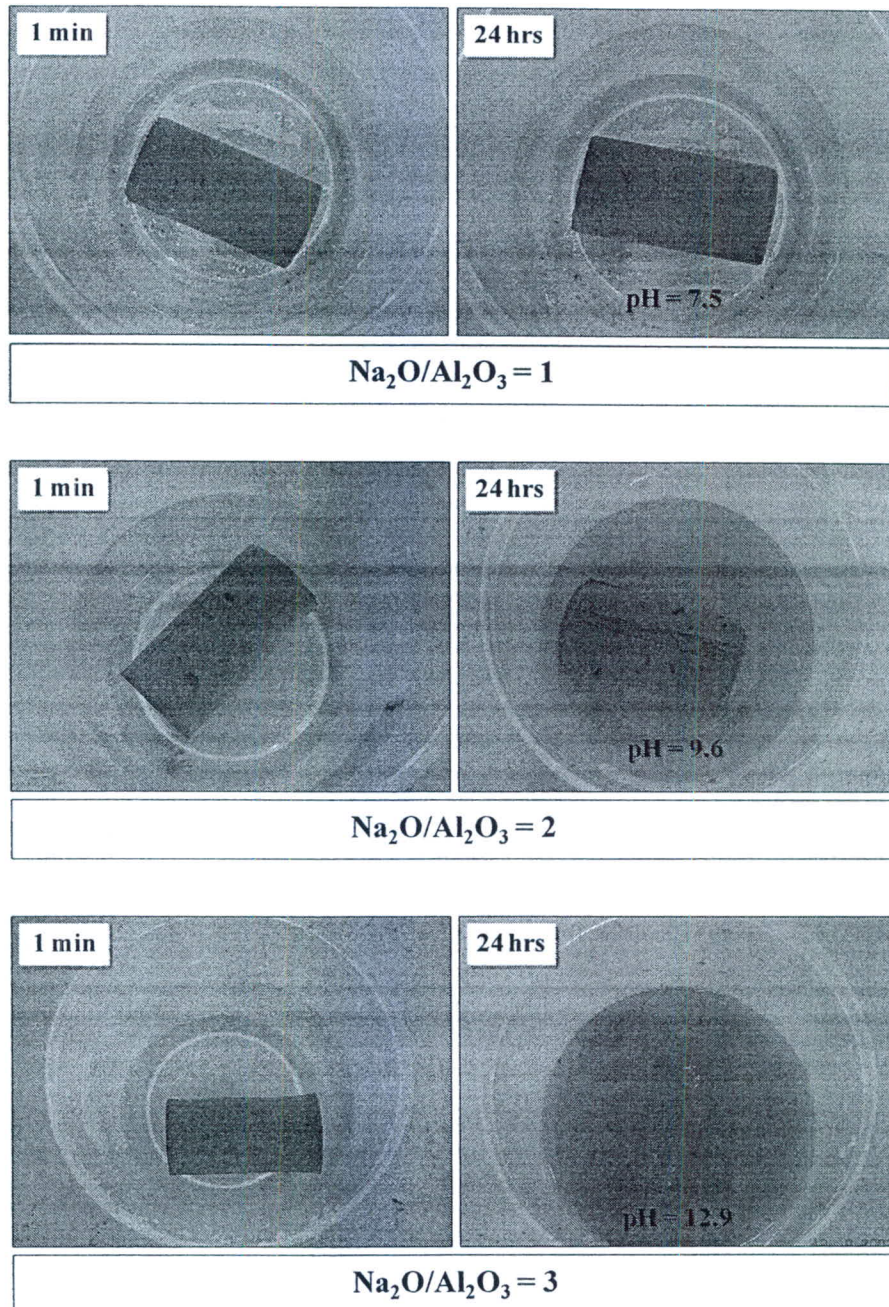
4.2.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$)

การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาที่มีต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของวัสดุจีโอพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยอัตราส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาที่เพิ่มขึ้น ได้จากการเพิ่มปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสม จากผลการทดลองพบว่า กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาสูงขึ้น โดยจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 3 ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดถึง 60 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งที่อัตราส่วนดังกล่าวมีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณมากทำให้ความเป็นด่างหรือค่าพีเอชของระบบสูงขึ้น [14] ส่งผลให้ความสามารถในการชะละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมออกมาจากดินไคอะตอมมีค่าเพิ่มขึ้นและเกิดเป็นหน่วยของซิลิเกต ($\text{Si}(\text{OH})_4$) และอะลูมิเนต ($\text{Al}(\text{OH})_4^-$) มอนอเมอร์ในปริมาณมากเพื่อใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เชนต่อไป

อย่างไรก็ตามอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 และ 3 ส่งผลให้โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ไม่เสถียรเมื่อสัมผัสกับน้ำ ดังรูปที่ 4.12 อันเป็นผลมาจากโซเดียมไอออน (Na^+) ที่หลงเหลือจากการตุลประจุ ณ ตำแหน่งของ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ สามารถละลายออกมาได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับน้ำ โดยโซเดียมไอออนที่ละลายออกมาเกิดการรวมตัวกับน้ำกลายเป็นสารละลายที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง ซึ่งทำให้สามารถชะละลายสารประกอบของซิลิกาและอะลูมินาที่อยู่ในสายโซ่ของพอลิเมอร์ออกมาได้ โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์จึงละลายน้ำได้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์กับอัตราส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา

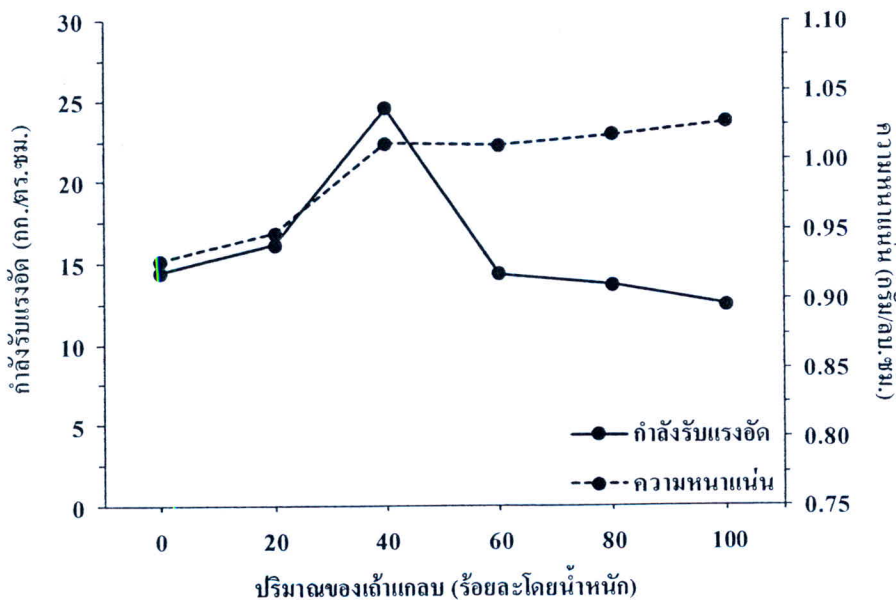


รูปที่ 4.12 จีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาแตกต่างกันเมื่อแช่ในน้ำ

4.2.5 ผลของอัตราส่วนการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยเถ้าแกลบ

รูปที่ 4.13 แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่า การแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนทางเคมีโดยโมลของส่วนผสมเปลี่ยนแปลงไป 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 ดังตารางที่ 3.4 ตัวอย่างที่ 4 และ 13 ถึง 17 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบจนถึงที่อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 22.6$) ซึ่งทำให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเป็น 24 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีความหนาแน่น 1.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบต่อไปกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ทำให้ในระบบมีหน่วยของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_4^-$) และซิลิกาเกต ($\text{Si}(\text{OH})_4$) เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง แต่เมื่อปริมาณเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นมากเกินไป (ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก) ทำให้ระบบมีซิลิกาหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาอยู่มากและส่งผลในด้านลบต่อกำลังรับแรงอัด นอกจากนี้ปริมาณน้ำ (W/B) ที่ใช้ในส่วนผสมอาจส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดที่ลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเพิ่มขึ้น กล่าวคือปริมาณน้ำที่ใช้ในทุกส่วนผสมมีค่าเท่ากัน โดยจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบมีความต้องการน้ำในปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดินไคอะตอม ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบมีปริมาณน้ำส่วนเกินมาก ซึ่งงานจึงมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นหลังจากการบ่มร้อน ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง



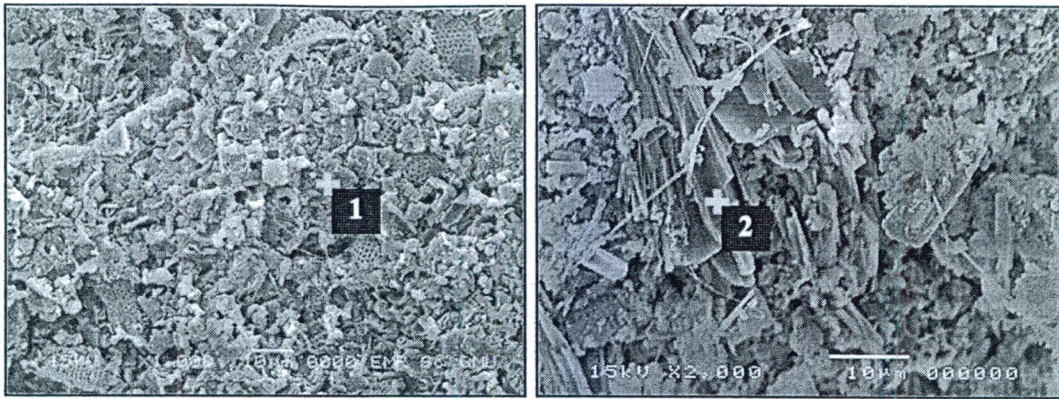
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์กับร้อยละการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบ

4.3 ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค SEM-EDS

4.3.1 ผลของความละเอียดของดินไคอะตอม

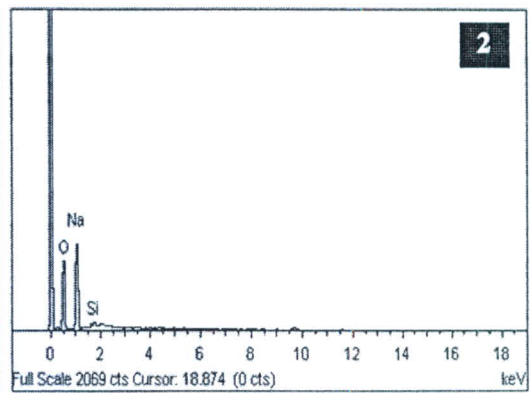
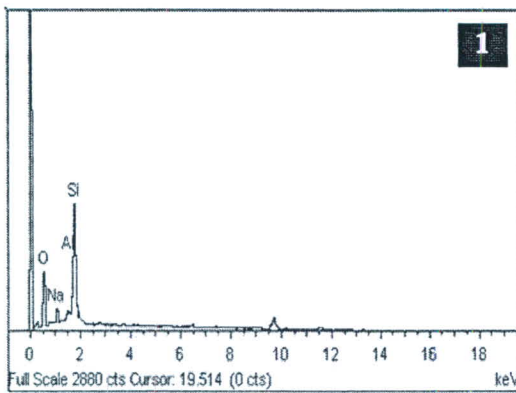
ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ดินไคอะตอมที่ไม่ผ่านการแคลไซด์และความละเอียดแตกต่างกัน ดัง

รูปที่ 4.14 - 4.16 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของดินไดอะตอมและผลึกของโซเดียมซิลิเกตหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาอยู่ภายในเฟสจำนวนมาก เมื่อใช้ดินไดอะตอมที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มีความสามารถในการถูกชะละลายด้วยต่างได้น้อยและเกิดปฏิกิริยาได้ไม่ดีเท่ากับอนุภาคขนาดเล็ก ดังนั้นโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์จึงไม่มีความแน่นตัวหรือเป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างทางจุลภาคของวัตถุเริ่มต้นที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา จากผลการวิเคราะห์ด้วย EDS ดังรูปที่ 4.14 (ง) พบว่ามีองค์ประกอบเป็นโซเดียม, ซิลิกอน และออกซิเจนเป็นหลัก ซึ่งใกล้เคียงกับโครงสร้างทางเคมีของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ดังนั้นการใช้ดินไดอะตอม R80DE ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ทำให้สารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกตหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งแสดงถึงการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เชชันที่ไม่สมบูรณ์ ในกรณีที่ดินไดอะตอมมีความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น R200DE และ P325DE อนุภาคของดินไดอะตอมจำนวนมากได้ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยา โดยขั้นตอนเป็นปฏิกิริยาการชะละลายของซิลิกอนและอะลูมิเนียม ซึ่งเกิดที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคจากนั้นจะจับตัวกันเป็นอนุกรมของโมเลกุลขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นในขั้นตอนของปฏิกิริยาพอลิเมอร์เชชัน ทำให้โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์มีความแน่นตัวมากกว่าดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ดินไดอะตอม R80DE ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDS) ดังตารางที่ 4.7 พบว่าอัตราส่วนโดยโมลของ Si/Al ที่พบจากเนื้อวัสดุจีโอพอลิเมอร์ R80DE, R200DE และ P325DE มีค่าเท่ากับ 9.77, 10.15 และ 10.69 ตามลำดับ และมีอัตราส่วนโดยโมลของ Na/Al เท่ากับ 2.46, 1.69 และ 1.38 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากดินไดอะตอมที่มีขนาดละเอียดมีความสามารถในการถูกชะละลายได้มากกว่าทำให้เนื้อของจีโอพอลิเมอร์มีอัตราส่วนโดยโมลของ Si/Al สูงกว่าดินไดอะตอมขนาดหยาบ อย่างไรก็ตามอัตราส่วนโดยโมลของ Na/Al มีค่าลดลงเมื่อดินไดอะตอมมีความละเอียดเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยามีการใช้โซเดียมอะตอมเพื่อดุลประจุ ณ ตำแหน่งอะลูมิเนียมเนตแอนไอออน ($\text{Al}(\text{OH})_4^-$) มากขึ้น ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์จึงมีโครงสร้างที่แน่นตัวและมีแข็งแรง ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด กล่าวคือกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ดินไดอะตอม P325DE มีค่ามากที่สุด อันเป็นผลมาจากการมีโครงสร้างที่แน่นตัวกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ดินไดอะตอม R200DE และ R80DE ตามลำดับ



ก. อนุภาคไคอะตอมที่หลงเหลือจำนวนมาก

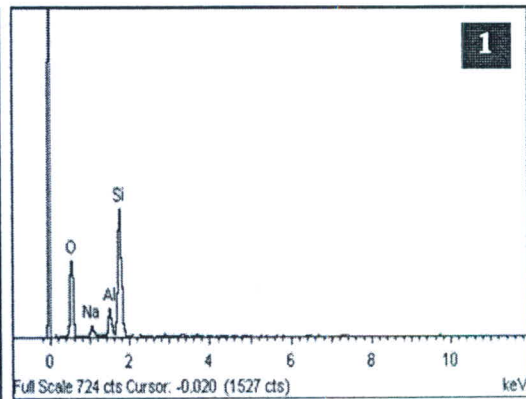
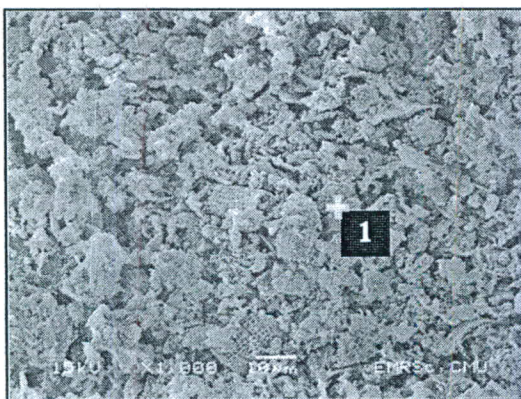
ข. โซเดียมซิลิเกตที่หลงเหลือจากปฏิกิริยา



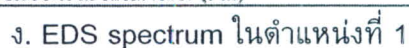
ค. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

ง. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 2

รูปที่ 4.14 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ดินไคอะตอมที่ค้ำตะแกรงขนาด 80 เมช (R80DE)



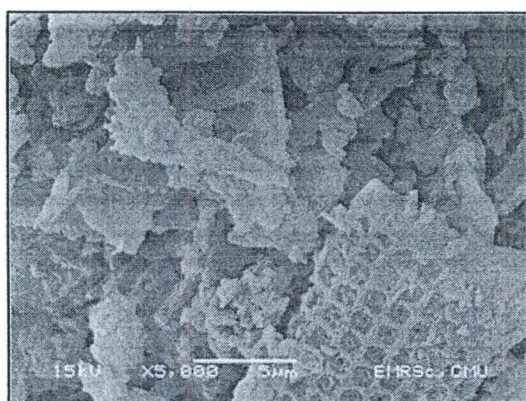
รูปที่ 4.15 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ดินไคอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 140 เมช และค้ำตะแกรงขนาด 200 เมช (R200DE)



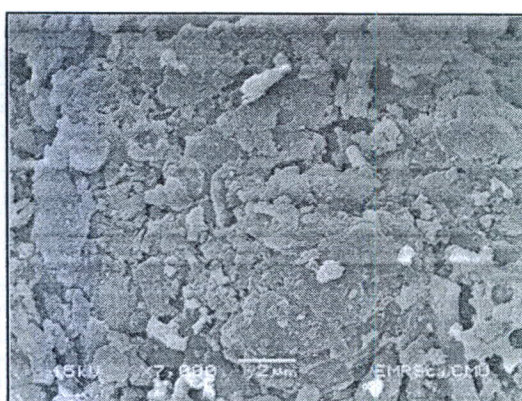
รูปที่ 4.16 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ดินไดอะตอมที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช (P325DE)

4.3.2 จีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะที่เหมาะสม

รูปที่ 4.17 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของดินไคอะตอมที่ใช้เป็นวัตถุดิบและจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากส่วนผสม 100DE0 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

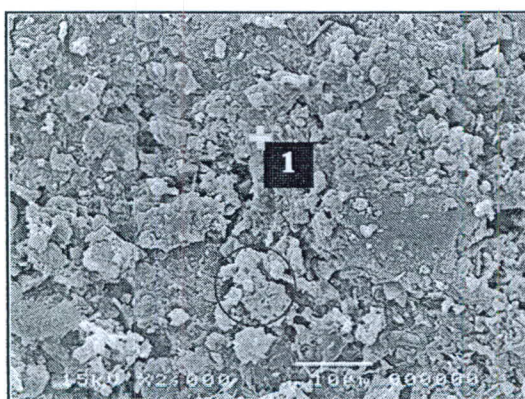


ก. ดินไคอะตอมที่ใช้เป็นวัตถุดิบ

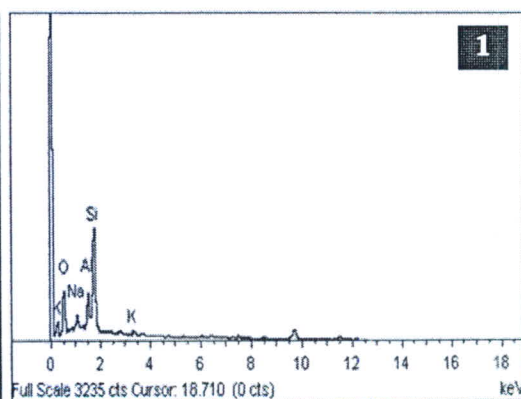


ข. เมตริกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีความ

แน่นตัว



ค. อนุภาคของดินไคอะตอมที่หลงเหลือ



ง. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

รูปที่ 4.17 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่เตรียมจากสภาวะที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์จากดินไต่ตะตอมที่สภาวะเหมาะสม 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

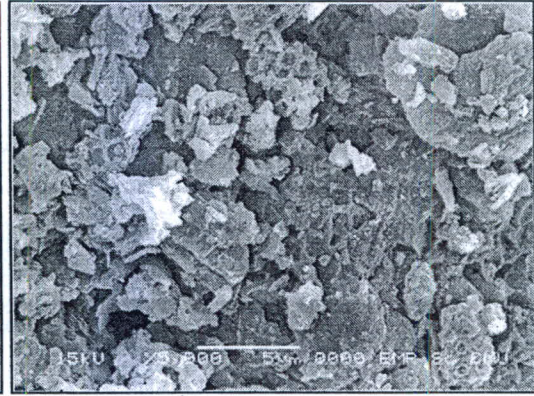
4.3.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินา

โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากดินไต่ตะตอมที่มีอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.18 - 4.20 พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1 มีความแน่นตัวของจีโอพอลิเมอร์น้อยกว่าที่อัตราส่วนเท่ากับ 2 และ 3 โดยสังเกตพบรูพรุนบางส่วนที่กระจายตัวอยู่ภายในเฟสซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของดินไต่ตะตอมที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.18 ส่วนจีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2 และ 3 แสดงให้เห็นถึงเฟสของแก้ว (glassy phase) ที่มีความเรียบและมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง โดยไม่พบอนุภาคของดินไต่ตะตอมหลงเหลืออยู่ภายในเมตริกซ์ ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 เนื่องจากปริมาณสารอัลคาไลน์ที่เพิ่มขึ้นสามารถชะละลายสารประกอบของซิลิกอนและอะลูมิเนียมออกมาได้มากขึ้นและเกิดเป็นโครงสร้างของแก้วอะลูมิโนซิลิเกตที่มีความต่อเนื่องและแน่นตัวสูง (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 ซึ่งเห็นได้ว่าอัตราส่วนโดยโมลของ 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 ซึ่งที่อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1 ความสามารถในการชะละลายอะลูมิเนียม (Al^{3+}) ออกมาจากแร่ดินมีค่ามากกว่าเนื่องจากอะลูมิเนียมมีความสามารถในการละลายง่ายกว่าซิลิกอน และเมื่ออัตราส่วน

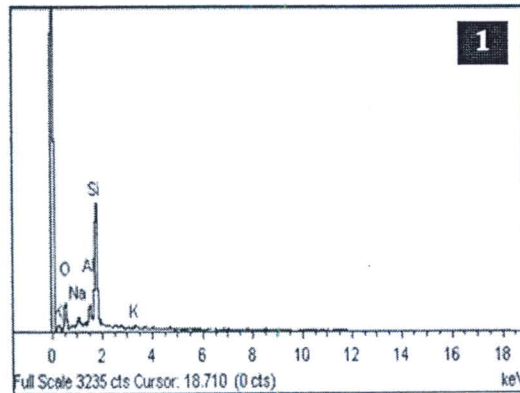
โดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เพิ่มขึ้น ซิลิกอน (Si^{4+}) จึงสามารถถูกชะละลายออกมาได้มากขึ้นทำให้อัตราส่วนของ Si/Al สูงขึ้น



ก. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 2000 เท่า

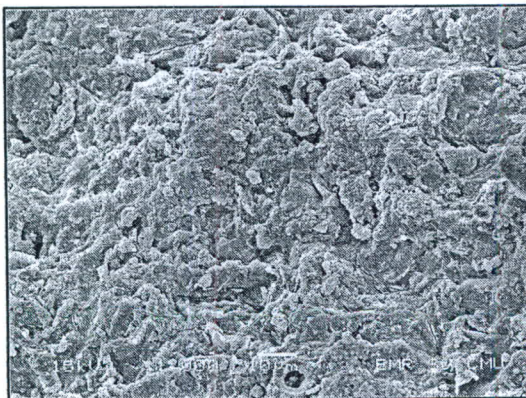


ข. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า



ค. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1

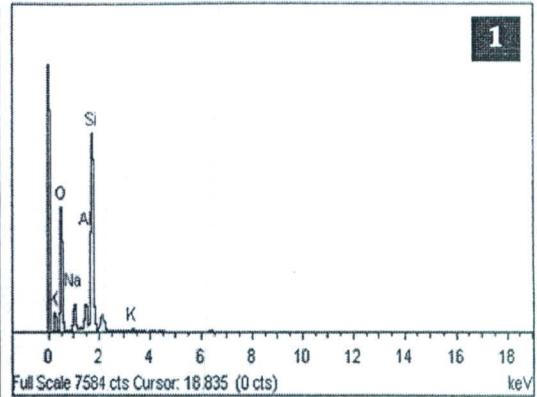
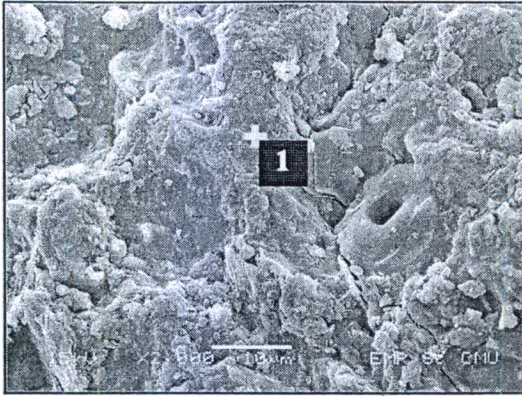
รูปที่ 4.18 โครงสร้างทางจุลภาคและของจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่มี $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1$



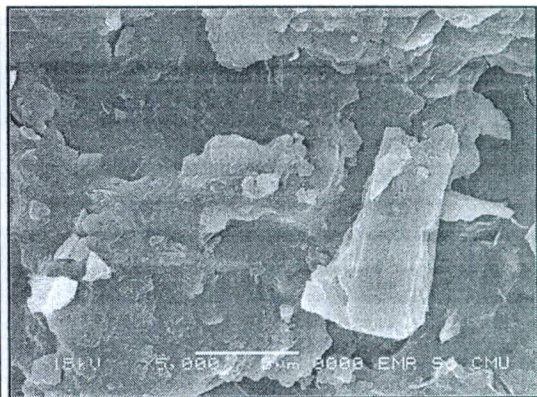
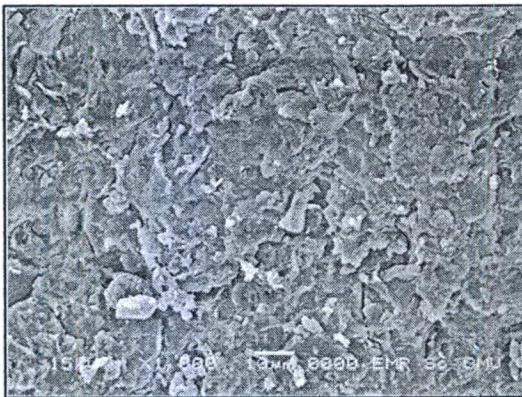
ก. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า



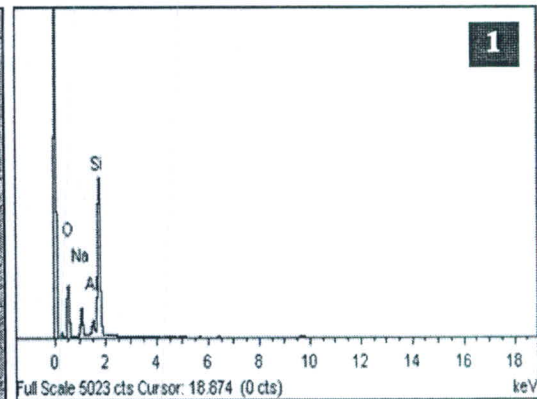
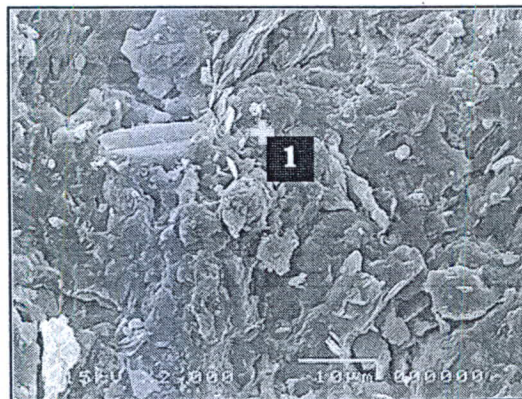
ข. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า



ค. จีโอพอลิเมอร์ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ง. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1
รูปที่ 4.19 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากดินไดอะตอมที่มี $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$



ก. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 1000 เท่า ข. ภาพถ่ายที่กำลังขยาย 5000 เท่า



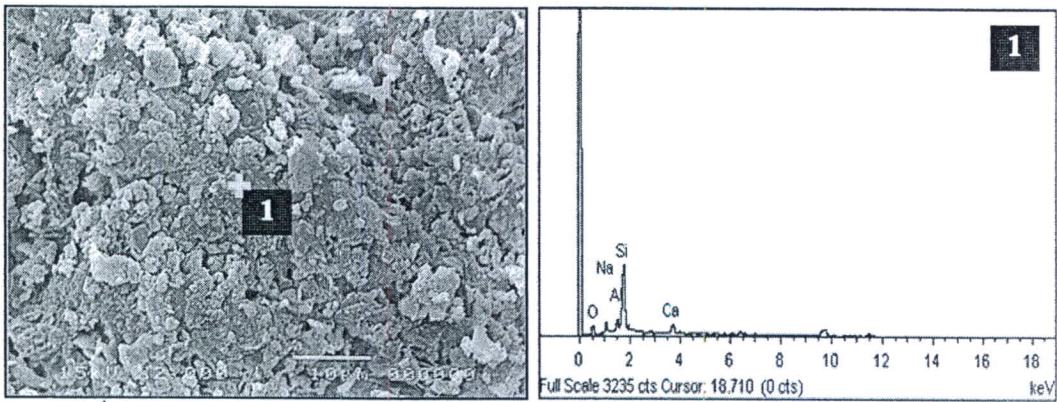
ค. เนื้อวัสดุมีความเรียบมาก ง. EDS spectrum ในตำแหน่งที่ 1
รูปที่ 4.20 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากดินไดอะตอมที่มี $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3$

ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ โซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาแตกต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วย EDS

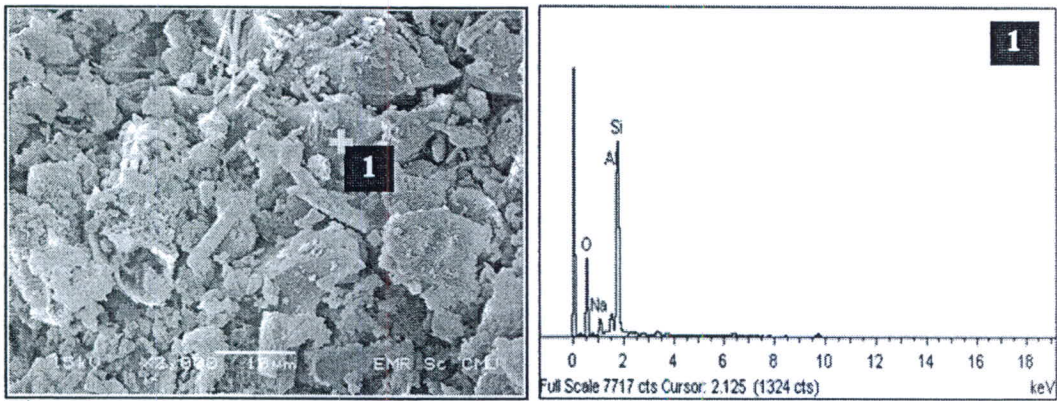
Element	Na ₂ O/Al ₂ O ₃ = 1		Na ₂ O/Al ₂ O ₃ = 2		Na ₂ O/Al ₂ O ₃ = 3	
	weight%	atomic%	weight%	atomic%	weight%	atomic%
Si	44.20	33.43	31.95	22.10	41.39	30.31
Al	7.65	6.03	3.86	2.78	3.54	2.70
Na	4.82	4.46	6.50	5.49	9.76	8.73
K	1.83	1.00	0.59	0.29	-	-
O	41.49	55.09	57.11	69.34	45.31	58.26
Si/Al	5.64	5.41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

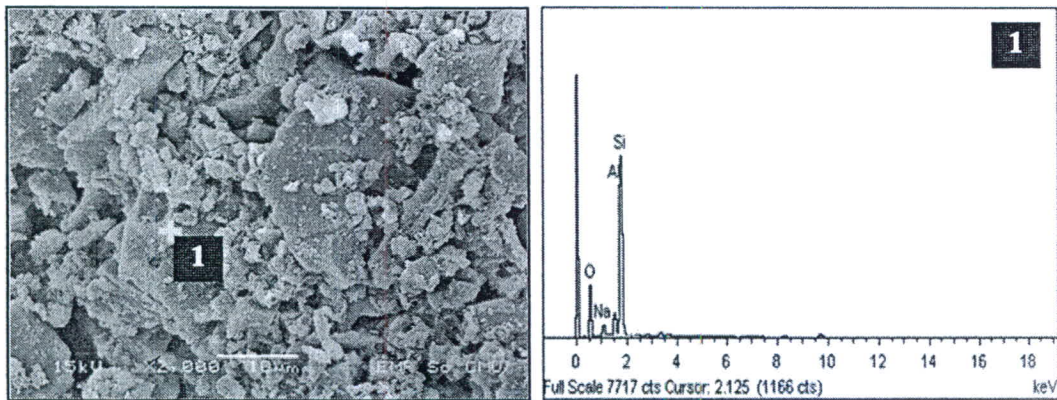
รูปที่ 4.21 - 4.26 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน รูปที่ 4.21 แสดงเมตริกซ์ของจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่ค่อนข้างหนาแน่น และยังพบอนุภาคของดินไคอะตอมบางส่วน (partially unreacted DE particles) ที่ไม่ทำปฏิกิริยาอยู่ในเฟส เมื่อทำการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ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



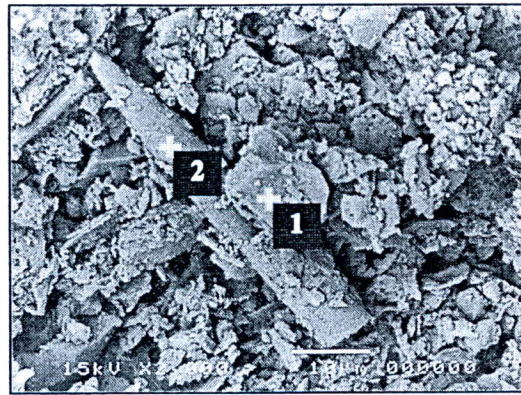
รูปที่ 4.21 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมล้วน (100DE0)



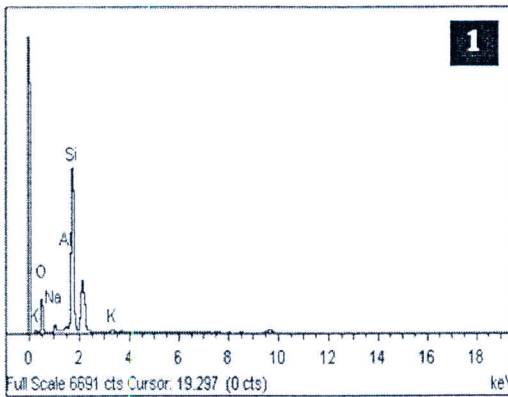
รูปที่ 4.22 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (80DE20)



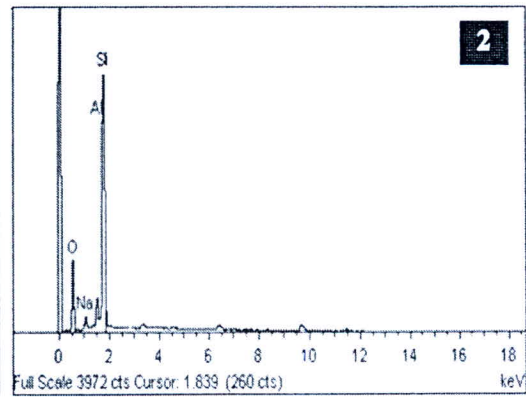
รูปที่ 4.23 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (60DE40)



ก. อนุภาคของไคอะตอมและเถ้าแกลบที่เหลือ

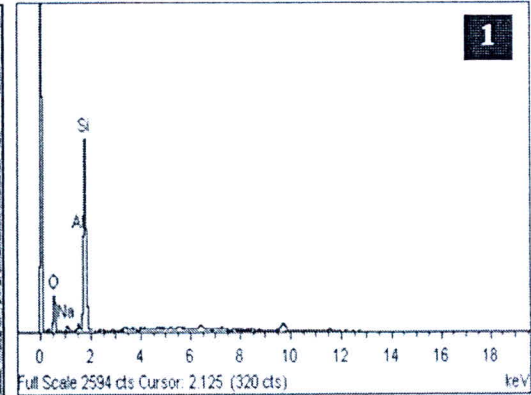
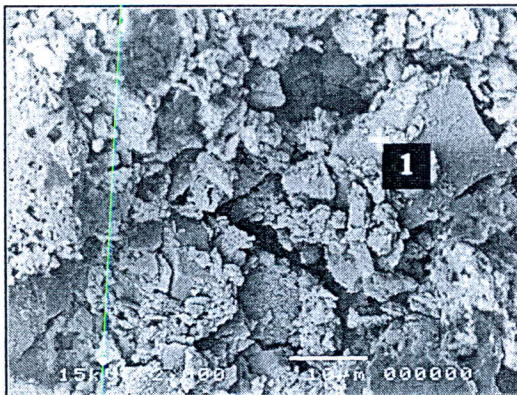


ข. EDS spectrum ตำแหน่งของเถ้าแกลบ



ค. EDS spectrum ตำแหน่งของไคอะตอม

รูปที่ 4.24 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (40DE60)



รูปที่ 4.25 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก (20DE80)

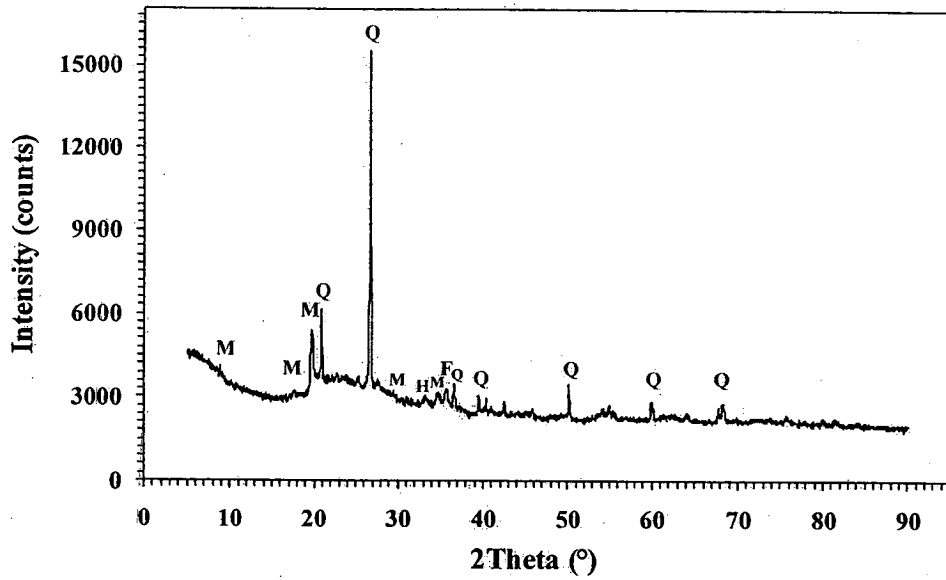
ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

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	-	-

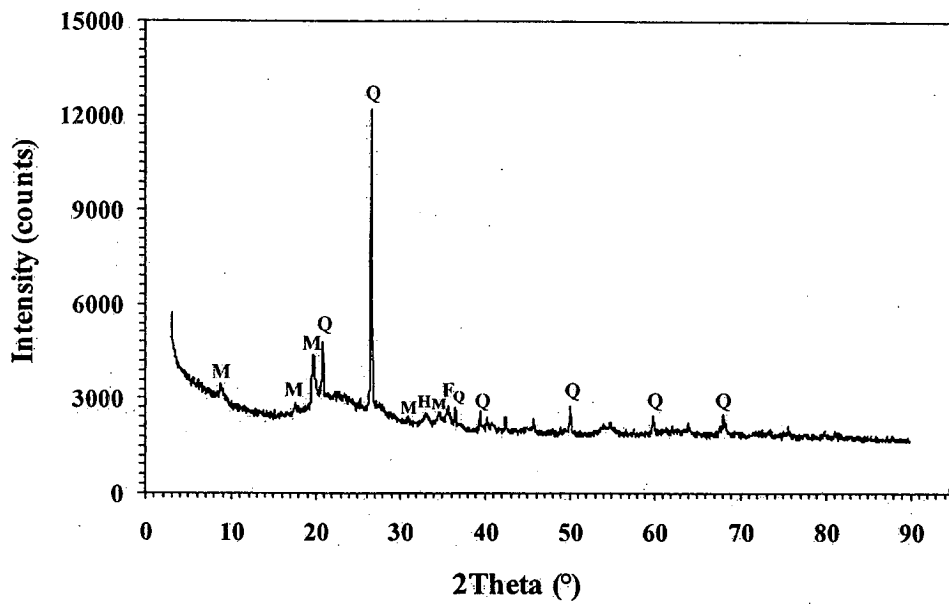
4.4 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

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

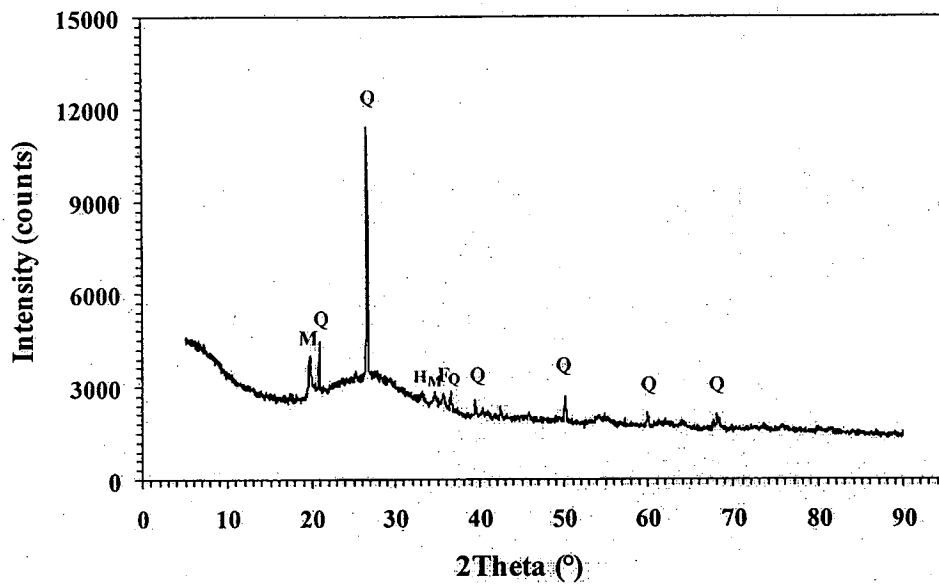
รูปที่ 4.27 - 4.30 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของดินไคอะตอมที่ใช้เป็นวัตถุดิบและวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่มีอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาแตกต่างกัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์ในทุกอัตราส่วนประกอบด้วยเฟสที่เป็นผลึก (crystalline phase) ได้แก่ มัสโคไวท์ (Muscovite), ควอตซ์ (Quartz), เฮมาไทท์ (Hematite) และแมกนีไทท์ (Magnetite) คล้ายกับสารประกอบที่พบในวัตถุดิบตั้งต้นดังรูปที่ 4.27 นอกจากนี้ยังพบส่วนที่เป็น Board peak ในช่วงมุม 2θ เท่ากับ 20 - 30 องศา ที่แสดงถึงเฟสอสัณฐาน (amorphous phase) หรือกึ่งผลึก (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



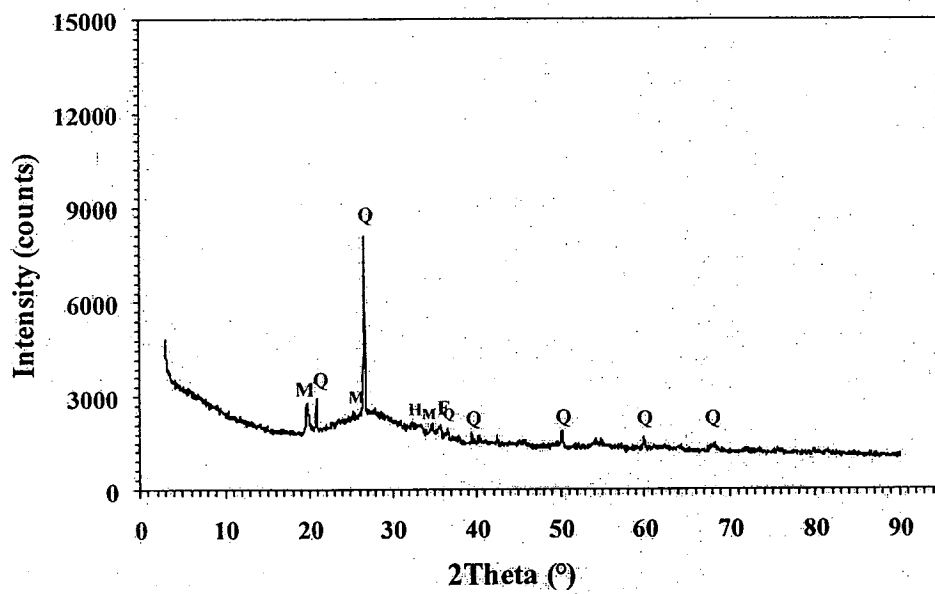
รูปที่ 4.27 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของดินไคอะดอมที่ผ่านการแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 800 °C



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



รูปที่ 4.29 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่มี $\text{Na}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$



รูปที่ 4.30 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมที่มี $\text{Na}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3$

เมื่อ M = Muscovite ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$)

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

Q = Quartz (SiO_2)

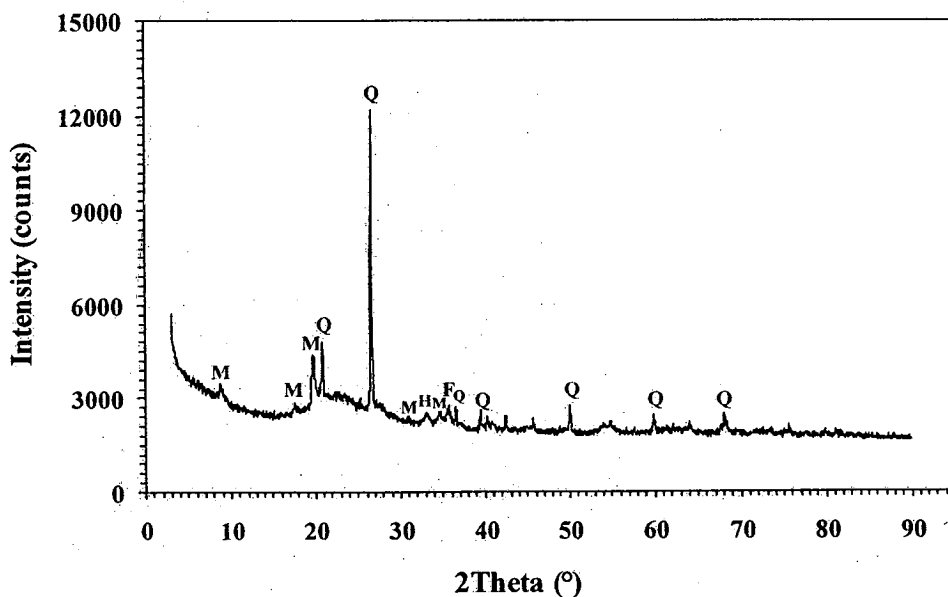
H = Hematite (Fe_2O_3)

C = Cristobalite (SiO_2)

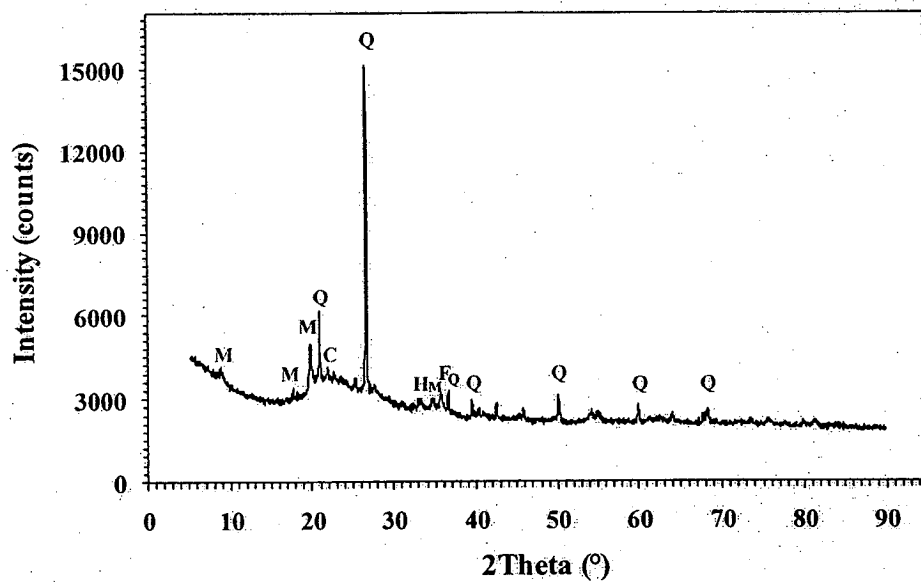
F = Magnetite (Fe_3O_4)

4.4.2 ผลของอัตราส่วนการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยแก้วกลบ

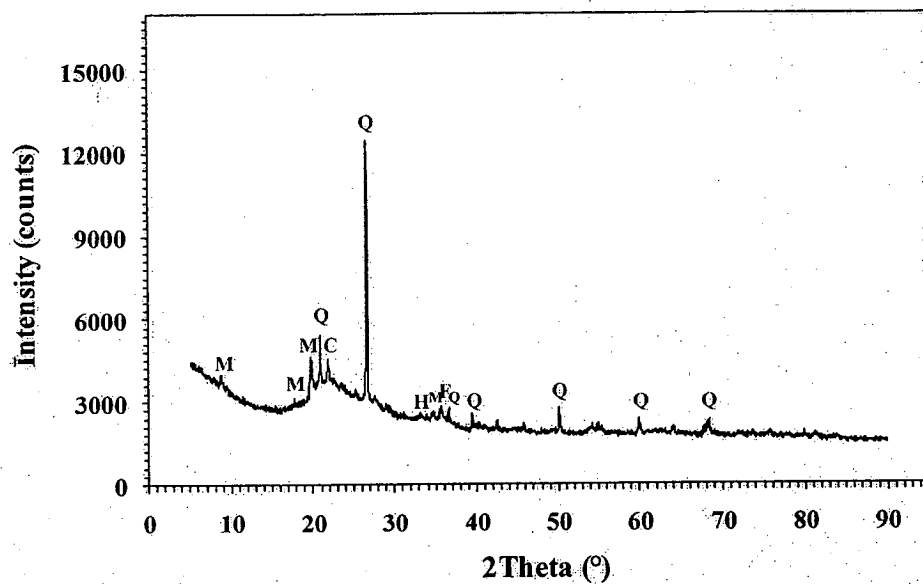
การศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยแก้วกลบในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.31 - 4.36 จะเห็นว่า ความเข้มของสารประกอบมัสโคไวท์ (Muscovite) ลดลงเมื่อมีการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยแก้วกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วยเฟสที่เป็นผลึกซึ่งส่วนใหญ่เป็นชนิดเดียวกับที่พบในดินไดอะตอมและแก้วกลบที่ใช้เป็นวัตถุดิบได้แก่ มัสโคไวท์, ควอตซ์ (Quartz), เฮมาไทท์ (Hematite), แมกนีไทท์ (Magnetite) และคริสโตบาไลท์ (Cristobalite) และพบว่ามีสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่จากการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินไดอะตอมผสมแก้วกลบคือ อะเคอร์มานไนท์ (Akermanite) ปริมาณเล็กน้อย ซึ่งพบในตัวอย่างที่มีการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยแก้วกลบในอัตราส่วนร้อยละ 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่แก้วกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้นปรากฏเป็นลักษณะของวัสดุที่มีโครงสร้างของความเป็นผลึกน้อย (low degree of crystalline) เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากดินไดอะตอมล้วน เนื่องจากการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยแก้วกลบเป็นการเพิ่มซิลิกาอสัณฐานให้กับระบบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัด ของจีโอพอลิเมอร์ พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยแก้วกลบในอัตราส่วนร้อยละ 60 โดยน้ำหนักขึ้นไปให้กำลังรับแรงอัดน้อยกว่าที่อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากแก้วกลบมีความต้องการน้ำในปริมาณที่น้อยกว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินไดอะตอม ซึ่งในทางปฏิบัติได้ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อของแข็ง (W/B) เท่ากันทุกส่วนผสม ดังนั้นน้ำจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง



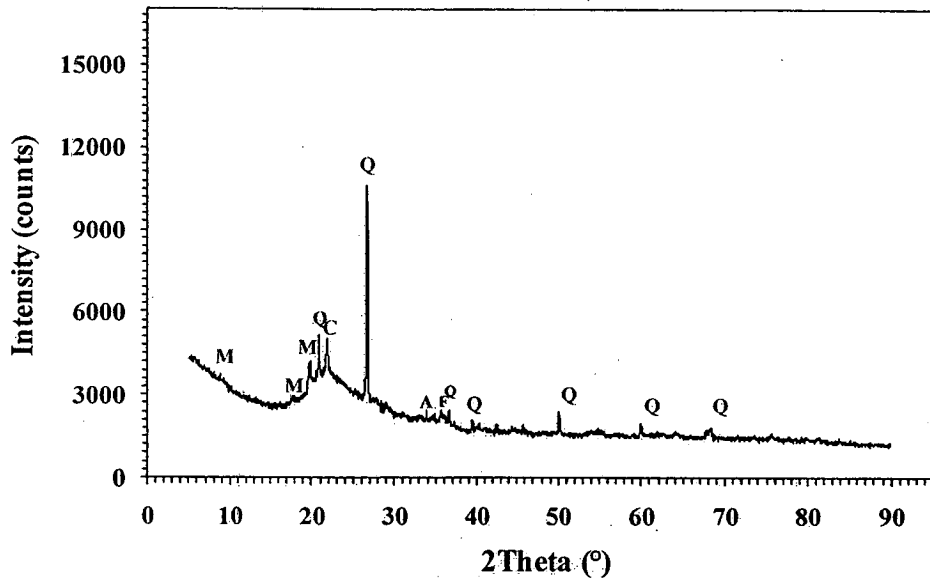
รูปที่ 4.31 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์จากดินไดอะตอมล้วน



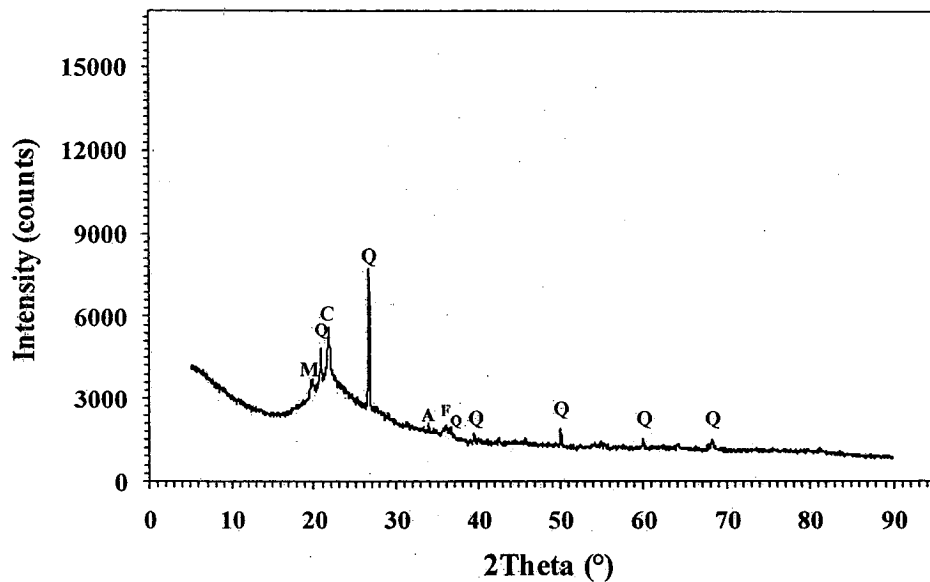
รูปที่ 4.32 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยแก้ว
แคลบ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



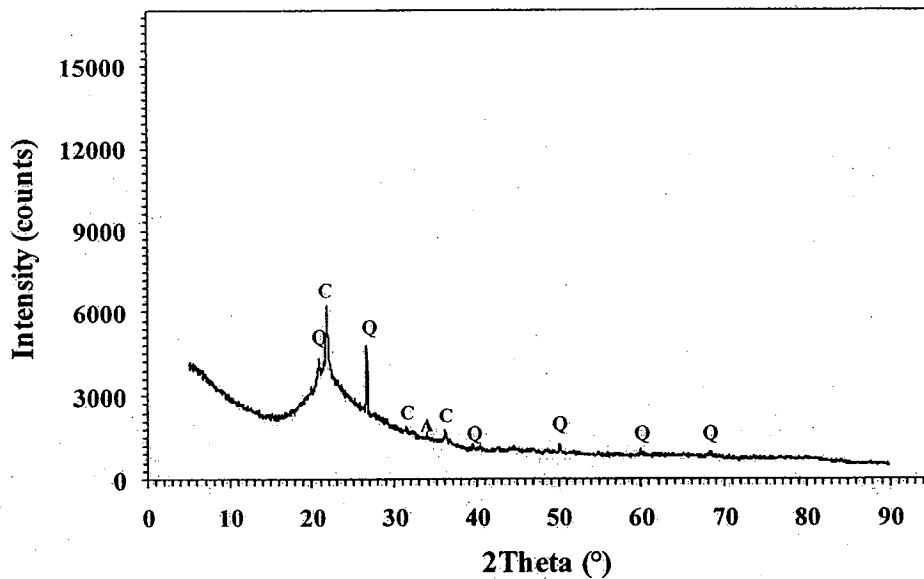
รูปที่ 4.33 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไคอะตอมด้วยแก้ว
แคลบ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.34 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยเถ้า
แกลบร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.35 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยเถ้า
แกลบร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.36 แบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์จากถ้ำเกลบล้วน

เมื่อ M = Muscovite ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$)

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)

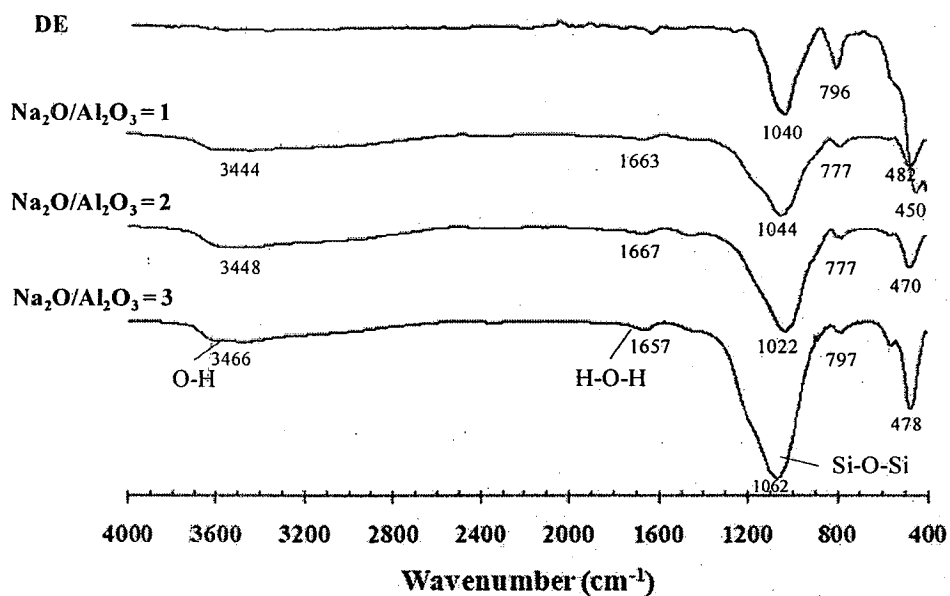
F = Magnetite (Fe_3O_4)

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 แสดงให้เห็นถึงการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไฮโดรไลซิสที่มีการใช้น้ำในโครงสร้างของโมเลกุลโดยการดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคหรือถูกกักไว้ในรูพรุนขนาดใหญ่ของเฟส

การเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบซิลิกา (Si-O-Si) ของตัวอย่างเพื่อบ่งชี้ดีกรีการควบแน่นแบบลูกโซ่ (degree of polycondensation) ของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ได้จากการคำนวณหาพื้นที่พีคในช่วงคลื่นอินฟราเรด 1200-900 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคที่มีลักษณะเด่นกว่าตำแหน่งอื่น อัตราส่วนพื้นที่พีคของจีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาแตกต่างกัน แสดงผลดังตารางที่ 4.11 พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 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 ซึ่งแสดงว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 3 ให้ดีกรีการควบแน่นแบบลูกโซ่สูงที่สุดซึ่งทำให้หน่วยของซิลิเกตและอะลูมิเนตเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างพันธะมากขึ้น ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์อะลูมิโนซิลิเกตจึงสูงขึ้น [15] ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์สามารถรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นเป็น 60 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.37 อินฟราเรดสเปกตรัม (IR spectrum) ของจีโอพอลิเมอร์จากดินไโดอะตอมที่มีอัตราส่วน โดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.11 พื้นที่พีคของซิลิกาที่ทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ของจีโอพอลิเมอร์จากดินไโดอะตอมที่มีอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาแตกต่างกัน

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

4.6 ผลการศึกษาความสามารถในการนำความร้อนของจีโอพอลิเมอร์

ในชุดทดสอบนี้ได้ทำการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวกระตุ้น หลังจากการผสมและหล่อแบบตัวอย่างถูกต้องทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนทำการบ่มร้อนตามอุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดสอบที่ผ่านมาดังหัวข้อ 4.2.3 คือการบ่มที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 วัน ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นและการนำความร้อนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์แสดงดังตารางที่ 4.12 โดยพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (100DE0 10M(Na) (1)) มีค่าการนำความร้อนสูงกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เล็กน้อย (100DE0 10M(K) (1)) เนื่องจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้จีโอพอลิเมอร์ที่มีความแน่นตัวมากกว่า น้ำหนักรวมของวัสดุมีค่ามากส่งผลให้ค่าความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนสูงกว่า และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยการนำความร้อนของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ดินไดอะตอมด้วยแก้วกลบในปริมาณต่างๆ พบว่าค่าการนำความร้อนของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณแก้วกลบที่เพิ่มขึ้น กล่าวโดยสรุป จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากดินไดอะตอมมีค่าเฉลี่ยการนำความร้อนเท่ากับ 0.30 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน โดยลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีรูพรุนจำนวนมากทำให้มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุฉนวนความร้อนได้

ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นและการนำความร้อนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

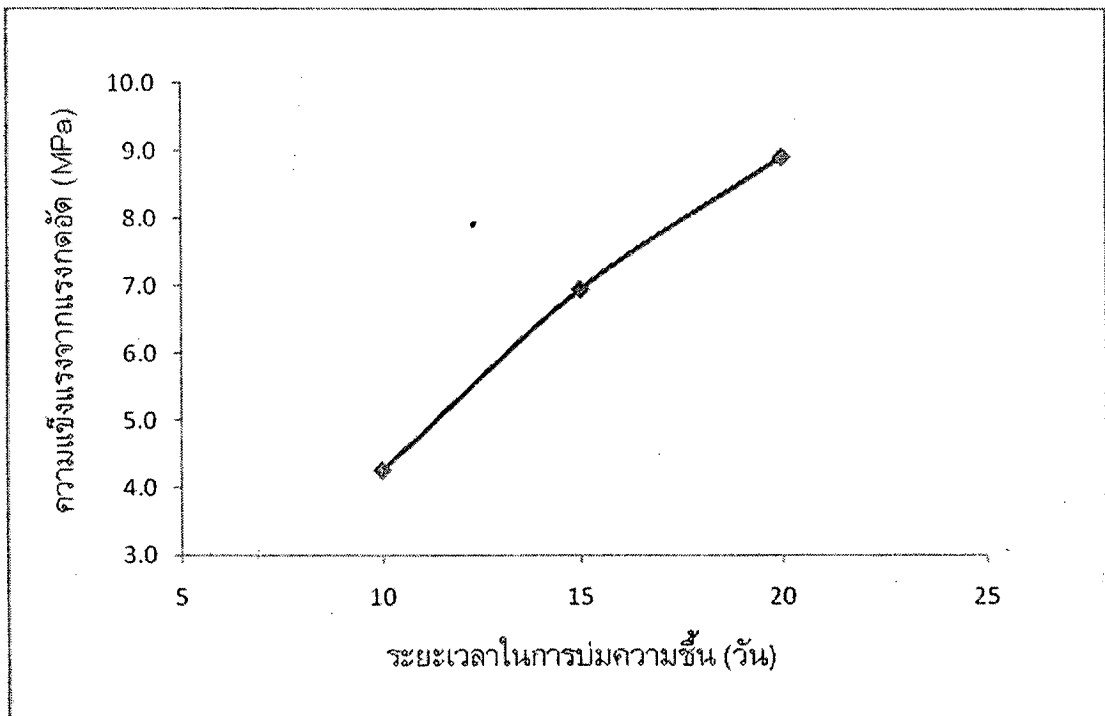
Sample	Density (g/cm^3)	Thermal conductivity (W/m.K)
100DE0 10M(Na) (1)	0.89	0.30
100DE0 10M(K) (1)	0.87	0.29
80DE20 10M(Na) (1)	0.95	0.31
60DE40 10M(Na) (1)	1.01	0.32
40DE60 10M(Na) (1)	1.01	0.32
20DE80 10M(Na) (1)	1.02	0.33
0DE100 10M(Na) (1)	1.03	0.35

ผลการศึกษาปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของดินเบาแห้งลำปาง

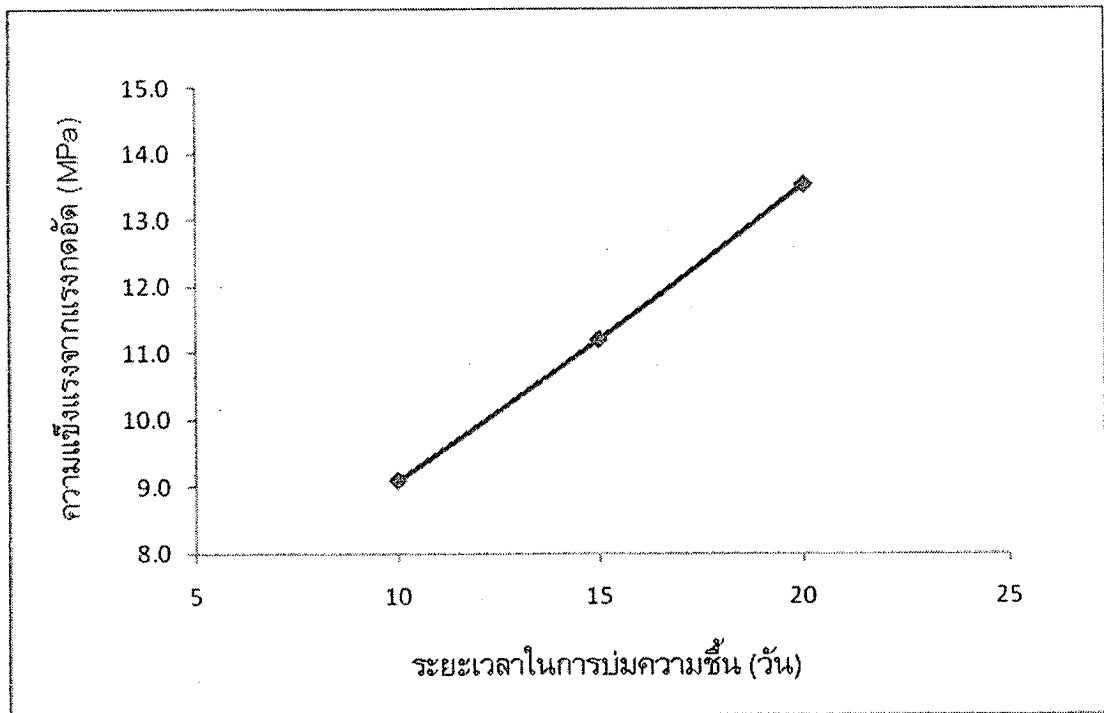
4.7 ผลการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการบ่มความชื้นที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.13 ระยะเวลาในการบ่มความชื้นของอิฐในการทดลองและสมบัติเชิงกลของอิฐ

ระยะเวลาในการ บ่มความชื้น	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล	
	ดินเบา (%)	Ca(OH) ₂ (%)	ยิปซัม (%)	ความแข็งแรง จากแรงกดอัด หลังบ่มความชื้น (MPa)	ความแข็งแรง จากแรงกดอัด หลัง Autoclave (MPa)
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 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงจากแรงกดอัด (Compressive strength) ของอิฐหลังการบ่ม Autoclave กับระยะเวลาในการบ่มความชื้น

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

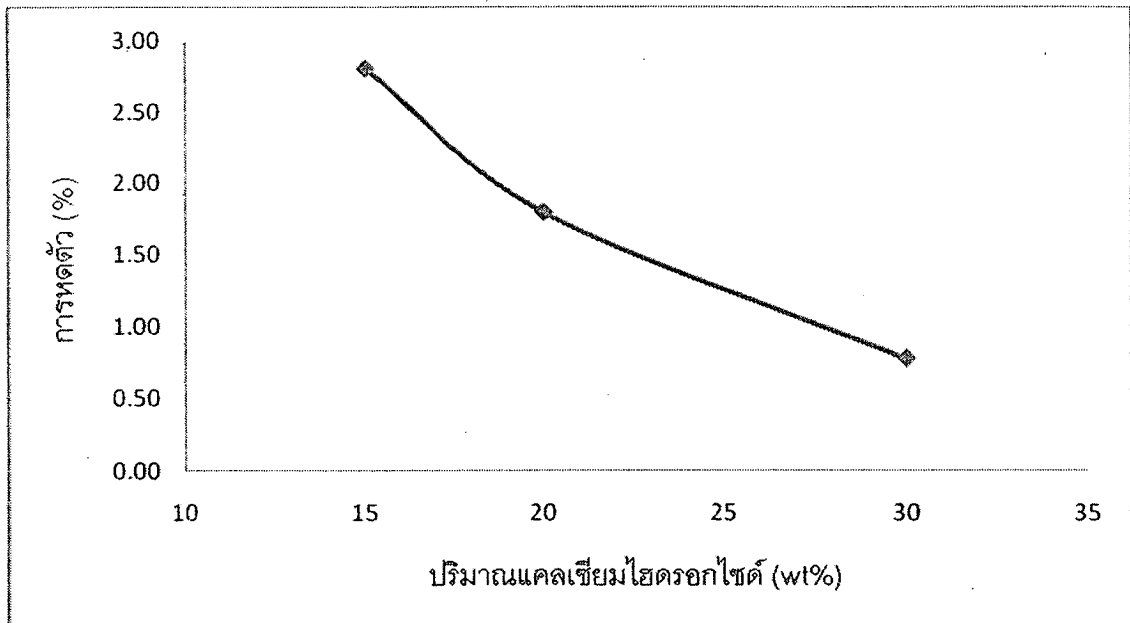
จากการทดลองพบว่า การใช้เวลาในการบ่มความชื้นมากขึ้น จะทำให้อิฐมีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆต่อเนื่องเป็นเวลานานทำให้กำลังอัดช่วงต้นไม่ค่อยดี แต่ยิ่งใช้เวลาในการบ่มความชื้นนานขึ้น น้ำก็จะสามารถเข้าไปแทรกอยู่ในเนื้อของอิฐได้มากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดได้มาก ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงจากแรงกดอัดมากตามขึ้นด้วย แต่เมื่อนำไปบ่มด้วย Autoclave จะทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นอีก เนื่องจากการบ่มด้วย Autoclave มีไอน้ำอัดตัวที่มีพลังงานพื้นผิวสูงมีศักยภาพที่จะเดินทางทะลุชั้นของ CSH ที่มีลักษณะเป็นเจลและ CSH ที่มีลักษณะเป็นผลึก เข้าไปชะลิกอนและอลูมิเนียมที่เหลือจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่อุณหภูมิห้องได้เร็วขึ้น จึงเหมือนเป็น

การเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานิกให้เกิดได้มากขึ้นส่งผลทำให้เกิดโครงสร้าง CSH และ CAH ทำให้มีค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น จากผลการทดลองจะทำการเลือกวันบ่มที่ 10 วันไปทำการทดลองในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอื่น ๆ ต่อไป เนื่องจากการบ่มความชื้นเป็นเวลา 10 วันเมื่อนำไปบ่มด้วย Autoclave ที่อุณหภูมิสูงถึง 180 °C อิฐสามารถทนได้ ไม่เกิดการแตกร้าวเสียหาย

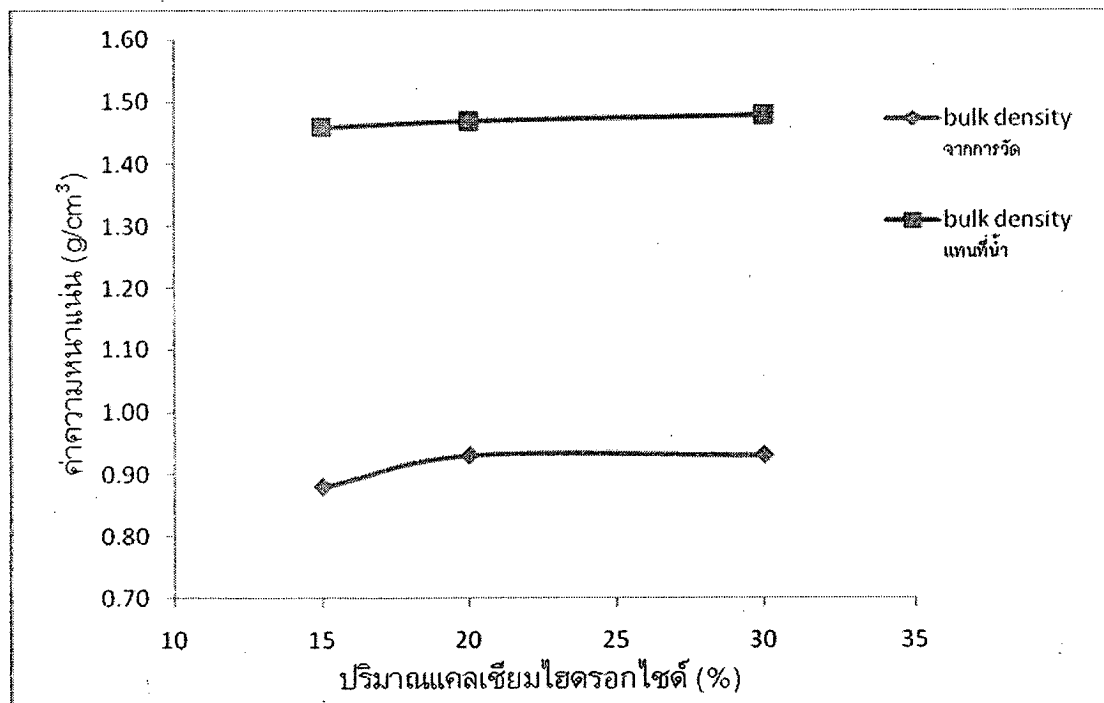
4.8 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรืออัตราส่วนระหว่าง CaO/SiO_2 โดยโมลที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.14 ส่วนผสมต่างๆของอิฐในการทดลองและสมบัติเชิงกลของอิฐ

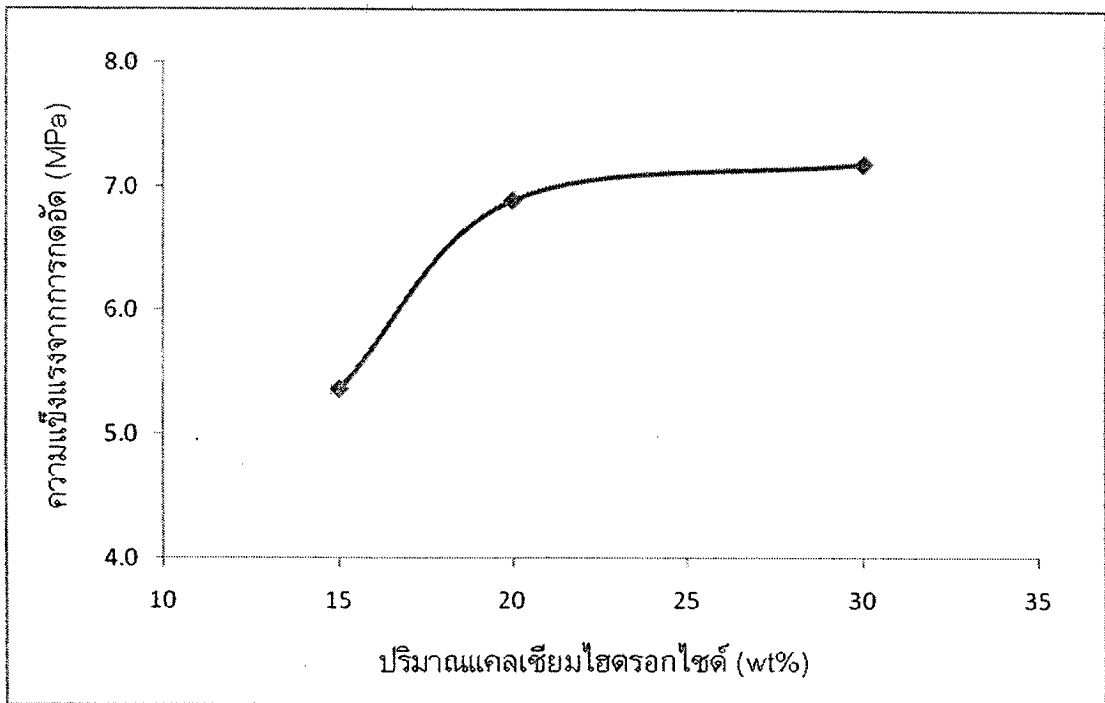
ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล				
ดินเบา (%)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)	CaO/SiO_2	%การหดตัว	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความแข็งแรงจากแรงกดอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
85	15	0.25	2.81	0.88	1.46	5.4	62.4
80	20	0.35	1.80	0.93	1.47	6.9	58.4
70	30	0.60	0.78	0.93	1.48	7.2	57.2



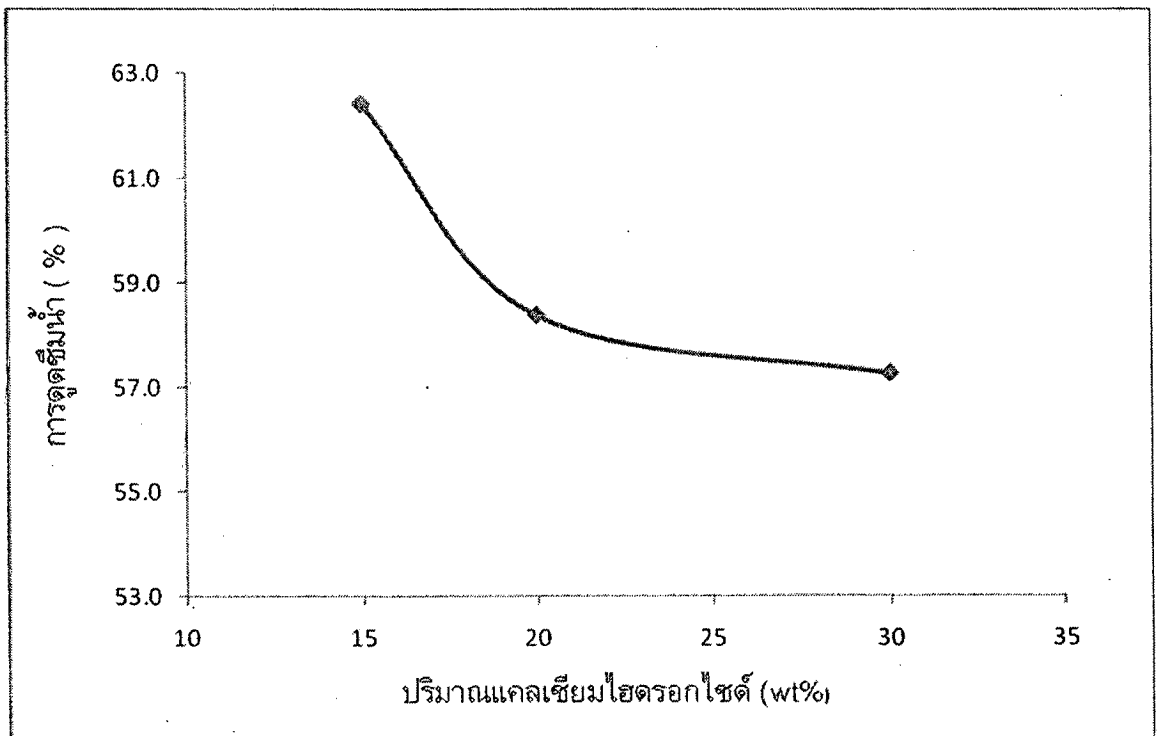
รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%การหดตัว (%Shrinkage) กับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (Bulk density) กับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากแรงกดอัด (Compressive strength) กับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์



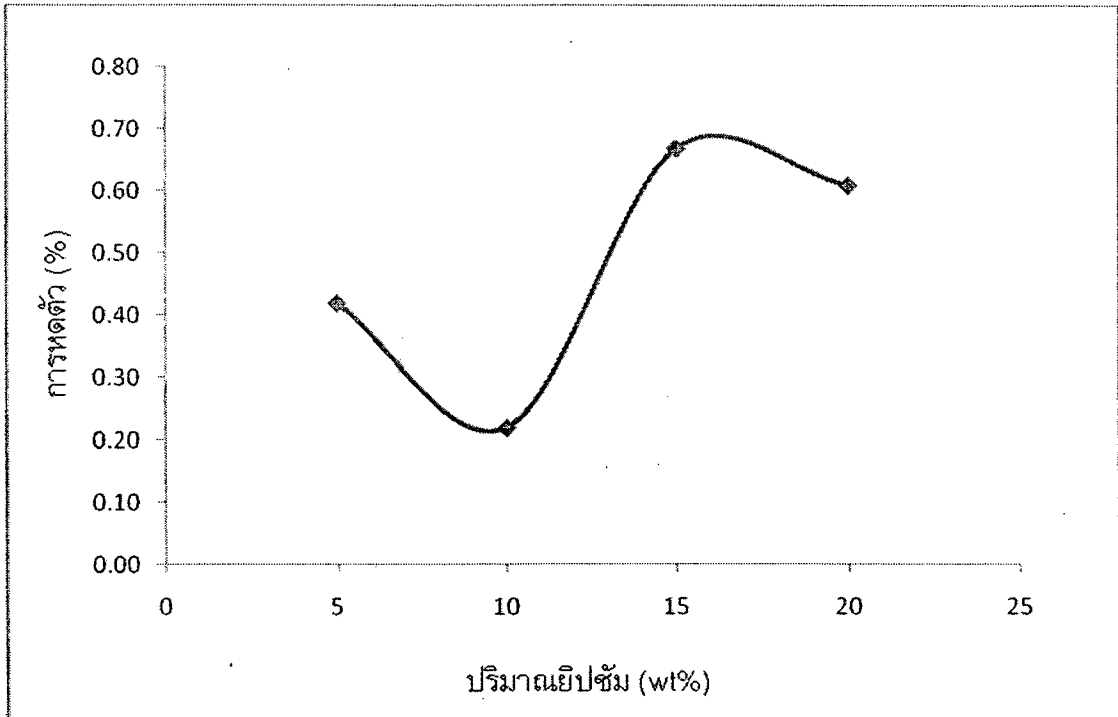
รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) กับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์

จากการทดลองพบว่า เมื่อมีการเติมปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้อิฐมีความแข็งแรงมากขึ้น สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นและมีค่าการดูดซึมน้ำลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นจะทำให้ในระบบมีปริมาณของ Ca^{2+} สูงขึ้น จึงสามารถเกิดเป็นโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ได้ โดยอัตราส่วนของ CaO/SiO_2 ที่เหมาะสมคือ 0.35 และ 0.60 โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตนี้จะเป็นตัวที่ช่วยรับผิวดูดความแข็งแรงในอิฐ จึงทำให้ได้สมบัติดังกล่าวและจะเห็นว่าการเติมปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 30 wt% การพัฒนาความแข็งแรงของอิฐเริ่มคงที่และมีความแข็งแรงมากที่สุด ผู้ทำการทดลองจึงได้เลือกสูตรที่มีการใช้ปริมาณดินเบา : แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 70 : 30 ไปทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่อไป เนื่องจากการเติมยิปซัมมีงานวิจัยอื่นๆกล่าวไว้ว่ายิปซัมสามารถช่วยในการละลายอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นอะลูมิเนียมซิลิเกตได้เพิ่มขึ้น จึงต้องการศึกษาการเติมยิปซัมที่มีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่อไป

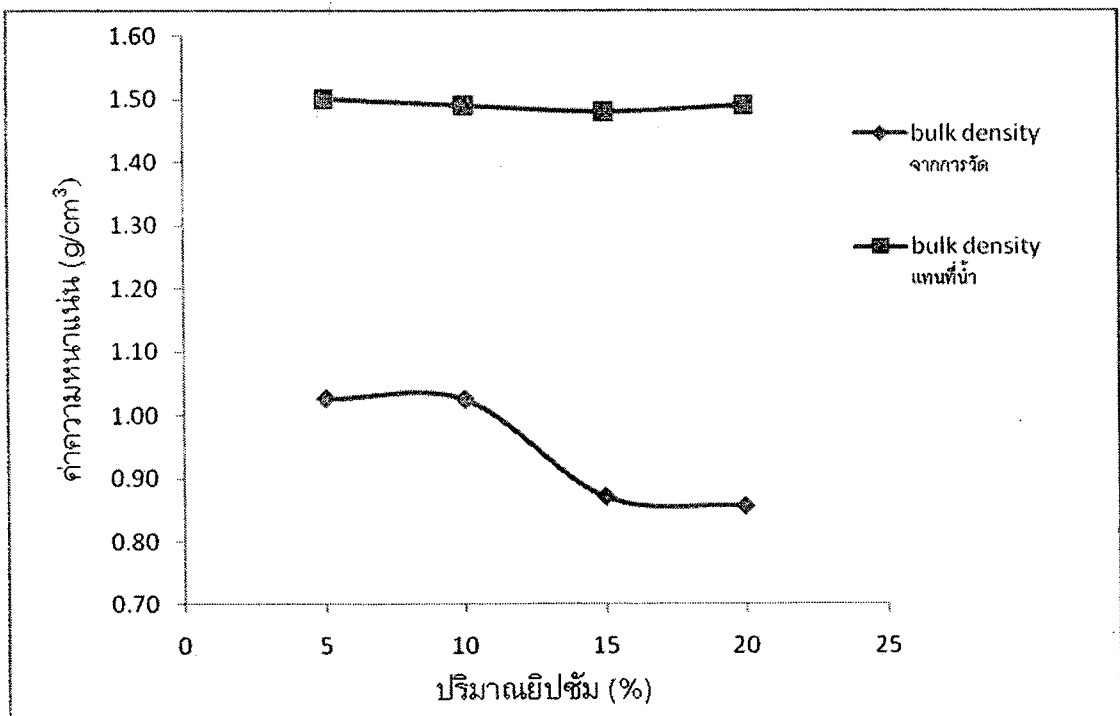
4.9 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณยิปซัมที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.15 ส่วนผสมต่างๆของอิฐในการทดลองและสมบัติเชิงกลของอิฐ

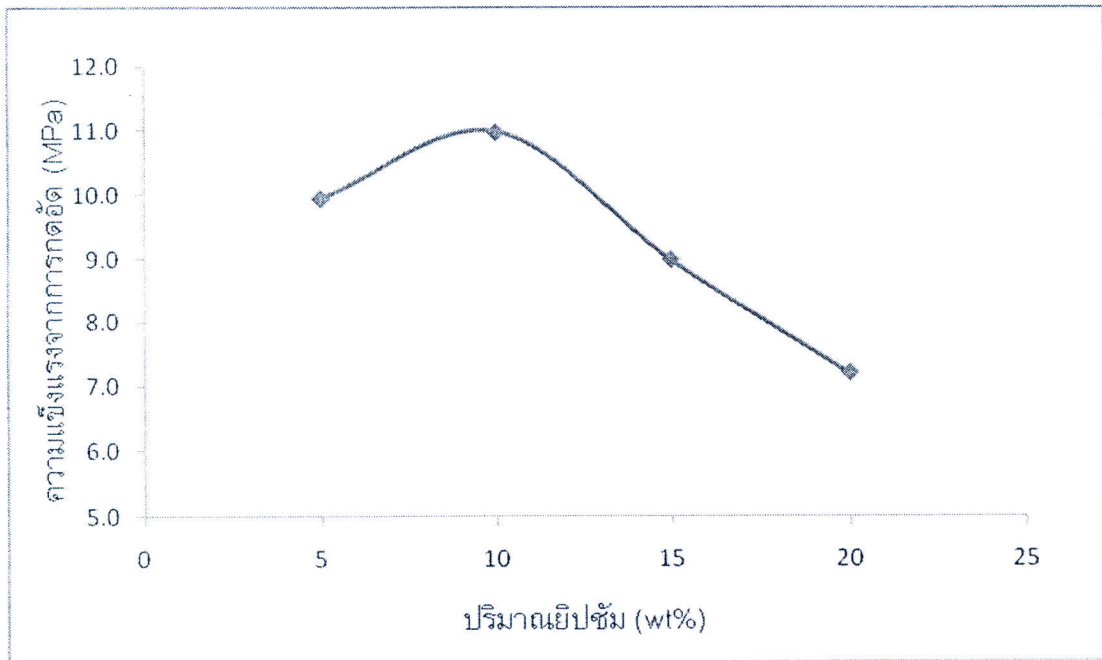
ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล				
ดินเบา (%)	Ca(OH) ₂ (%)	ยิปซัม (%)	%การหดตัว	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความแข็งแรงจากแรงกดอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
70	10	20	0.61	0.86	1.49	7.2	71.0
70	15	15	0.67	0.87	1.48	8.9	70.1
70	20	10	0.22	1.02	1.49	10.9	42.9
70	25	5	0.42	1.02	1.50	9.9	43.7



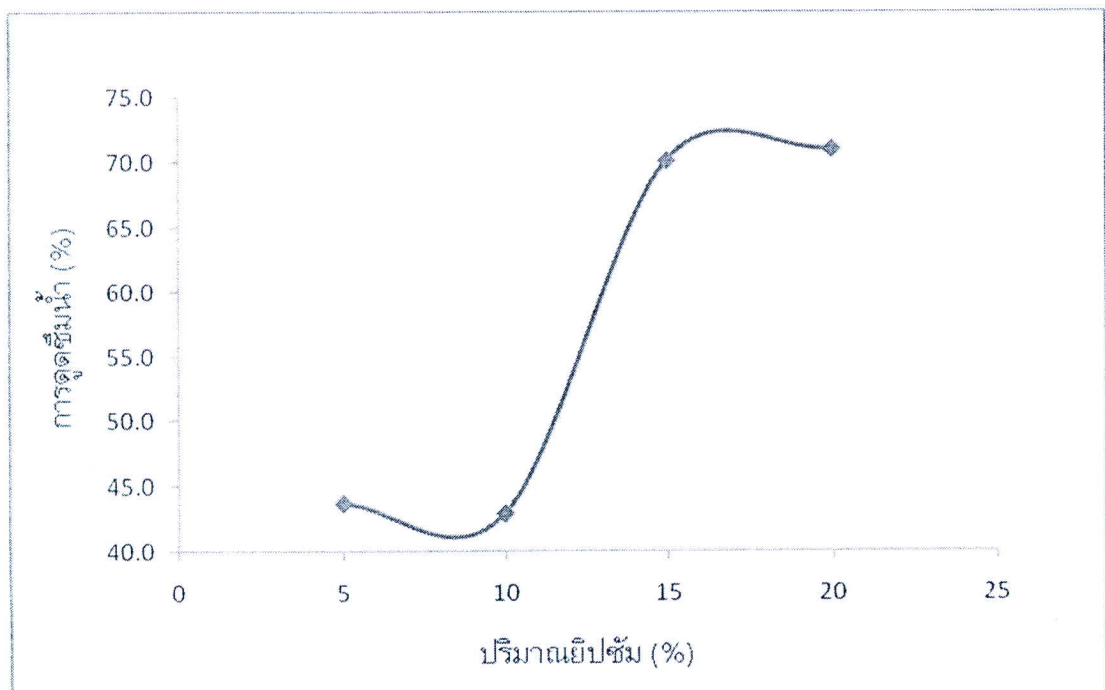
รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%การหดตัว (%Shrinkage) กับปริมาณยิปซั่ม



รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (Bulk density) กับปริมาณยิปซั่ม

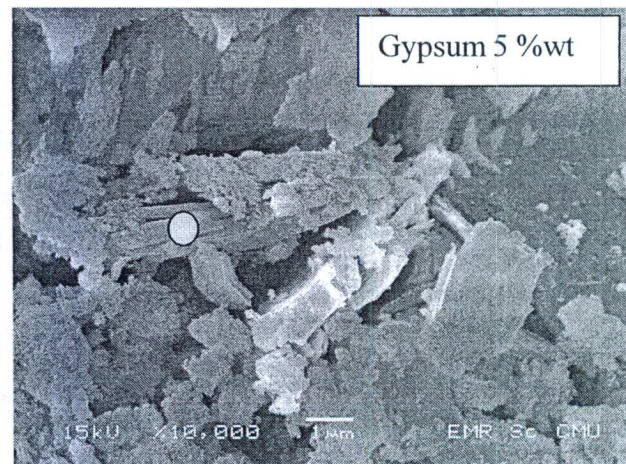
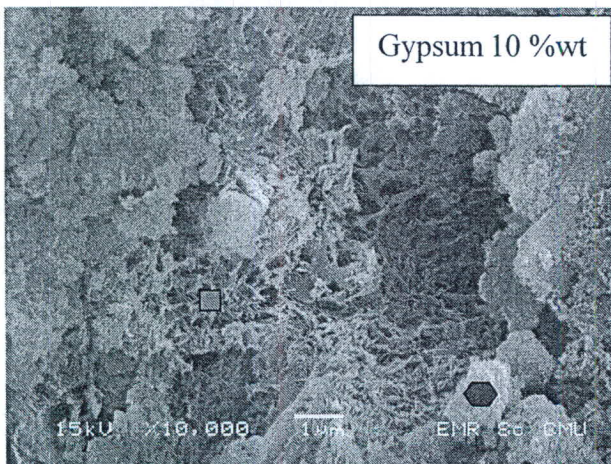
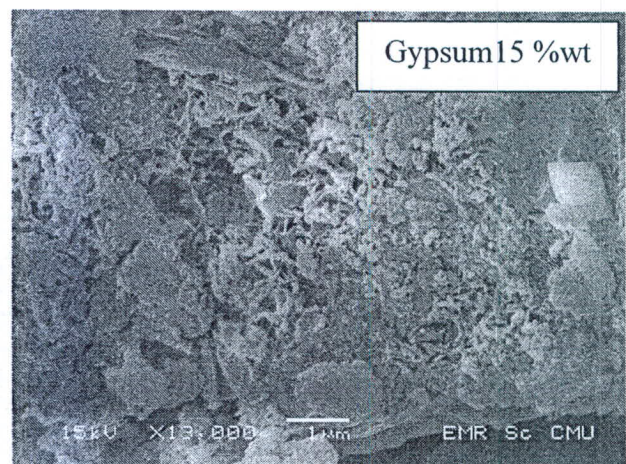
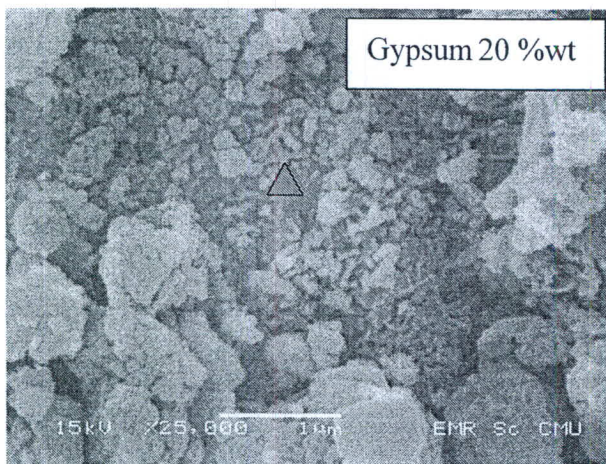


รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากการกดอัด (Compressive strength) กับปริมาณของยิปซัม



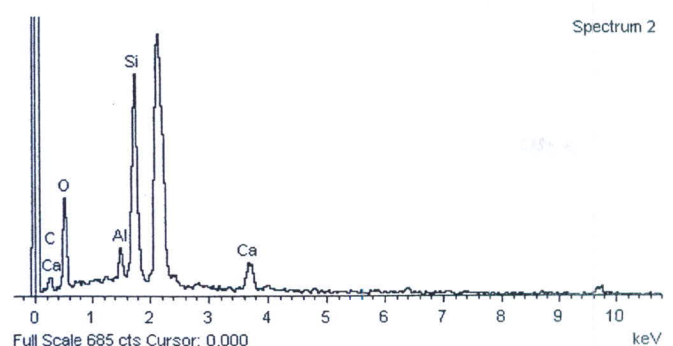
รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) กับปริมาณของยิปซัม

จากการทดลองพบว่า การเติมยิปซัมทำให้อิฐมีความแข็งแรงมากกว่าอิฐที่ไม่ได้เติมยิปซัม และเมื่อทำการเติมยิปซัมในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้อิฐมีความแข็งแรงลดลง และสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นที่ลดลงและค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาค โดยการเติมยิปซัมทำให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ละลายออกมาได้มากขึ้น คาดว่าเกิดเป็นสารประกอบชนิดแคลเซียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (CASH) สารประกอบบางอย่างที่มีเมื่อเติมยิปซัม แต่ไม่เกิดโครงสร้างนี้เมื่อไม่มีการเติมยิปซัมเป็นส่วนผสม ซึ่งจะศึกษาต่อไปในการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค



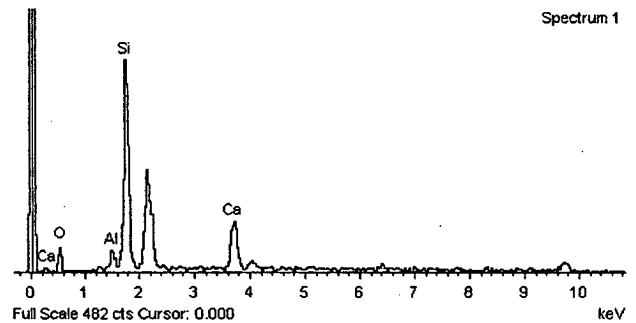
สัญลักษณ์ ▲

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	



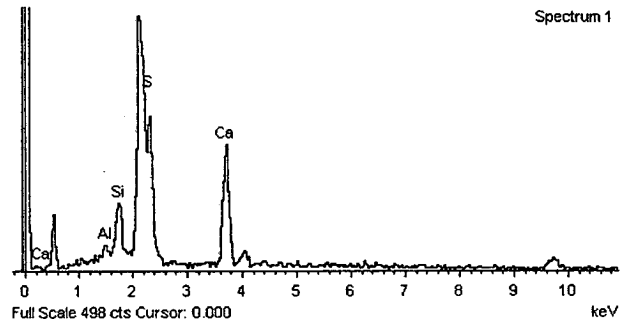
สัญลักษณ์ ■

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	



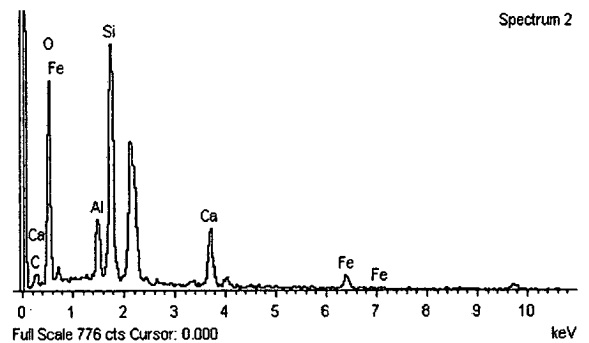
สัญลักษณ์ ●

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	



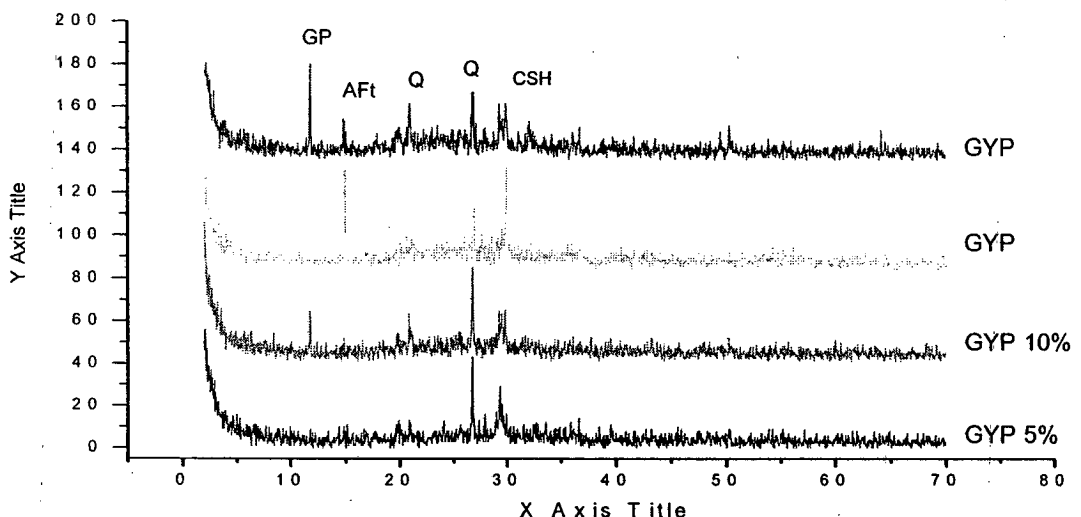
รูปที่ 4.48 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของอิฐเมื่อเติมปริมาณยิปซัม 20, 15, 10 และ 5 %wt และการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS

จากผล EDS ของอิฐเมื่อเติมปริมาณยิปซัม 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 ทั้งหมดจะพบว่า การเติมยิปซัมจะช่วยให้อิฐมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าที่ไม่ได้เติมยิปซัมแต่การเติมต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสม เพราะเมื่อเติมมากเกินไปจะทำให้เกิดโครงสร้างของ Ettringite ซึ่งโครงสร้างนี้จะไปทำลายการผนึกตัวกันของโครงสร้าง CSH จึงทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง และจากการเติมยิปซัมปริมาณ 10% จะพบว่ามีโครงสร้างเส้นใยขนาดเล็กๆ จำนวนมากกว่าที่ปริมาณการเติมยิปซัมอื่นๆ 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 ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อิฐที่เติมยิปซัมมีความแข็งแรงมากกว่าอิฐที่ไม่ได้เติมยิปซัม



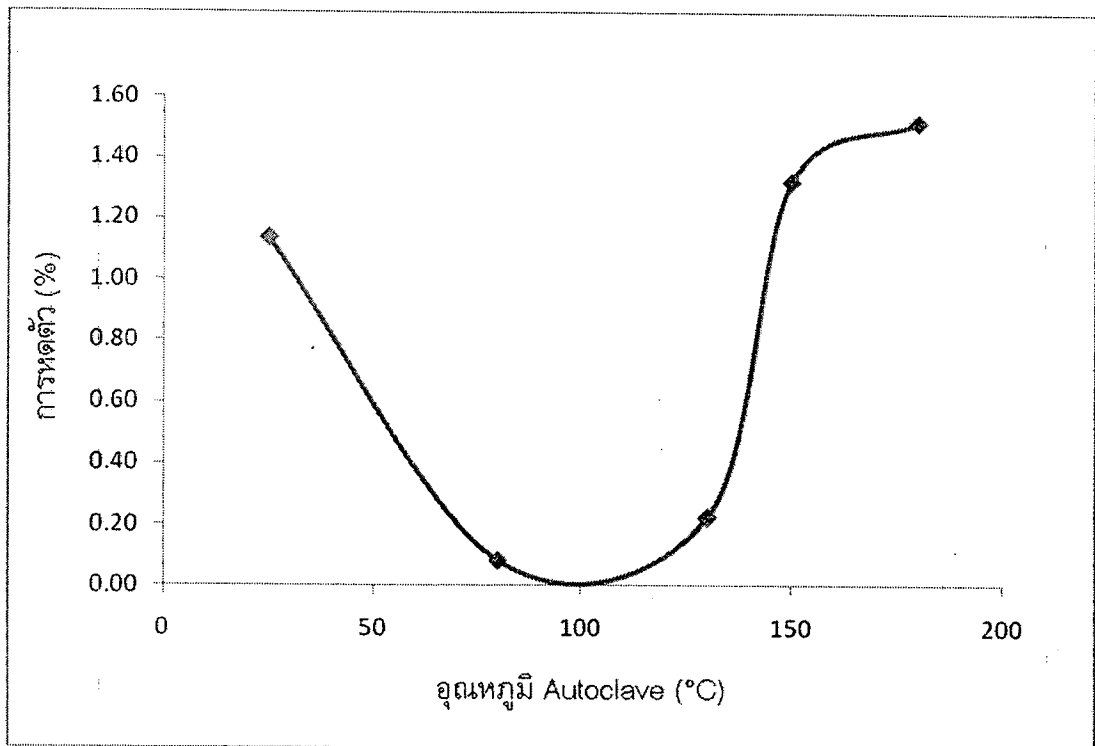
รูป 4.49 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของอิฐเมื่อเติมปริมาณยิปซัม 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของอิฐเมื่อเติมปริมาณยิปซัมพบว่าเกิดเฟสของCSH ที่ยืนยันว่าค่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นกับอิฐ มาจากโครงสร้างของ CSH จริง และ พบเฟสของ Quartz และGypsum ซึ่งเป็นQuartzและGypsumที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาหรือยังเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ และยังพบเฟสของ Ettringite (หรือ AFt) ที่เกิดขึ้นเมื่อเติมปริมาณยิปซัมเกิน 10 wt% โดยการเกิด AFt ยืนยันให้เห็นถึงการมีอะลูมิเนียมเฟสละลายออกมาจากวัตถุดิบตั้งต้นเป็นจำนวนมากขึ้น เกิดเป็นสารประกอบใหม่ชนิด AFt และเนื่องจาก AFt เป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า CSH มาก ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการยึดกันระหว่างอนุภาค CSH ทำให้ความแข็งแรงของอิฐลดลง

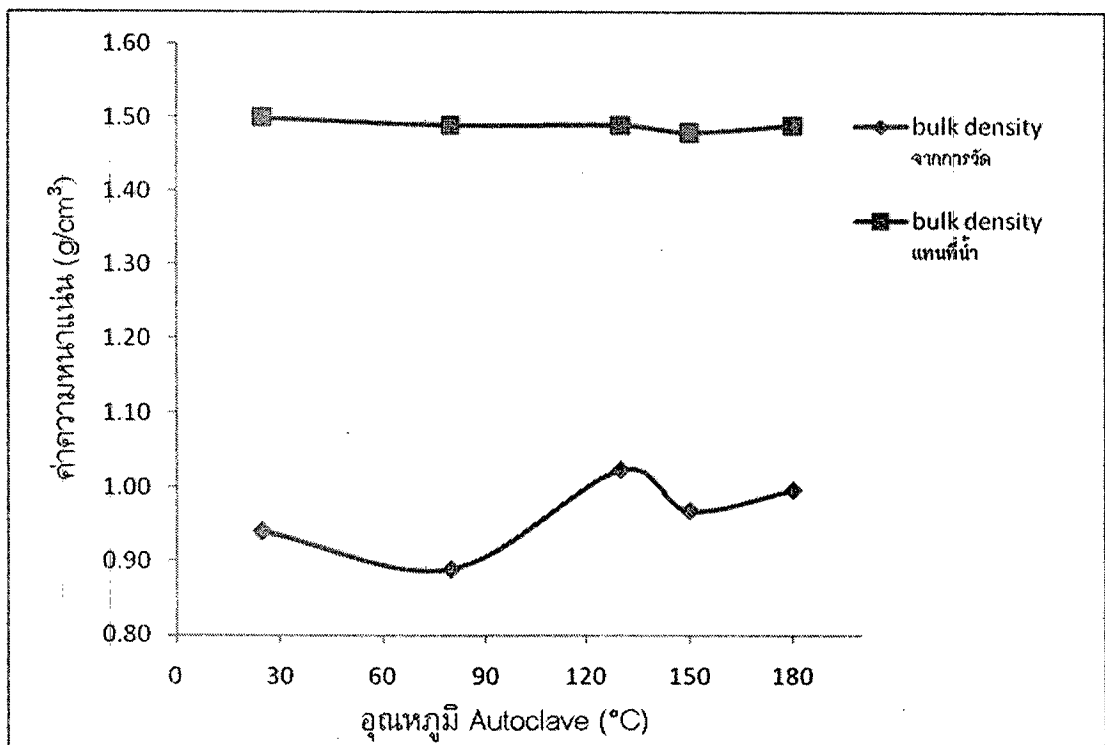
4.10 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการ Autoclave ที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.16 อุณหภูมิที่ใช้ในการ Autoclave ของอิฐในการทดลองและสมบัติเชิงกลของอิฐ

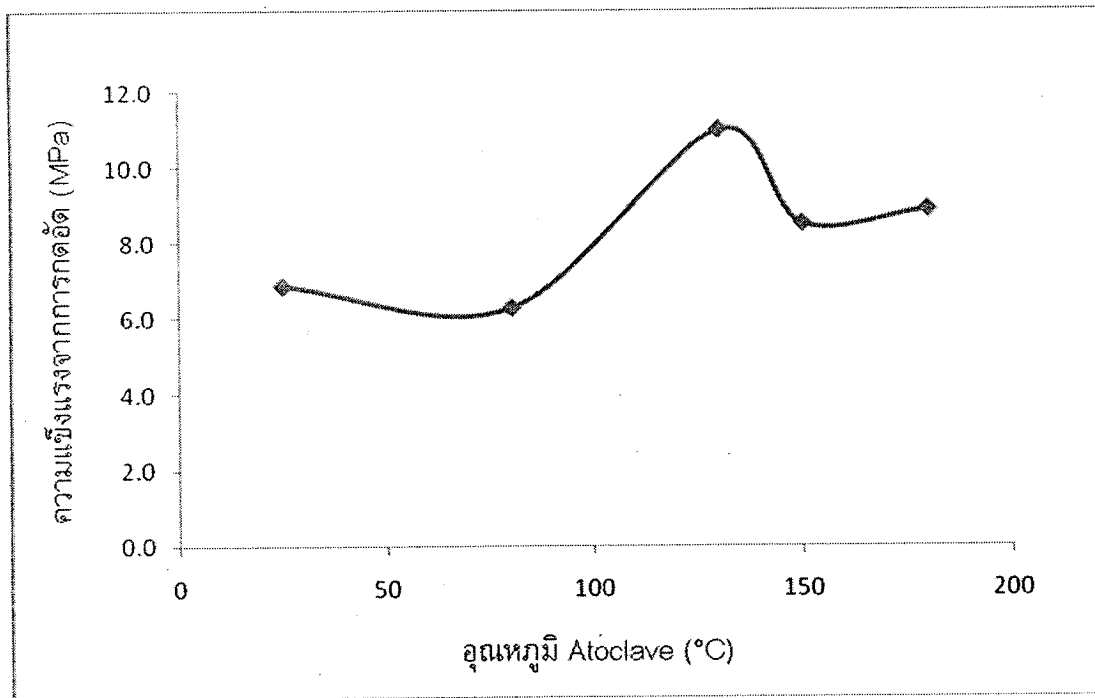
อุณหภูมิ ที่ใช้ ในการ Autoclave (°C)	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล				
	ดินเบา (%)	Ca(OH) ₂ (%)	ยิป ซัม (%)	%การ หดตัว	ความ หนา แน่น (g/cm ³)	ความ หนา แน่น (g/cm ³)	ความ แข็งแรง จากแรง กดอัด (MPa)	การ ดูดซึม น้ำ (%)
25	70	20	10	1.14	0.94	1.50	6.9	54.3
80	70	20	10	0.08	0.89	1.49	6.3	61.6
130	70	20	10	0.22	1.02	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



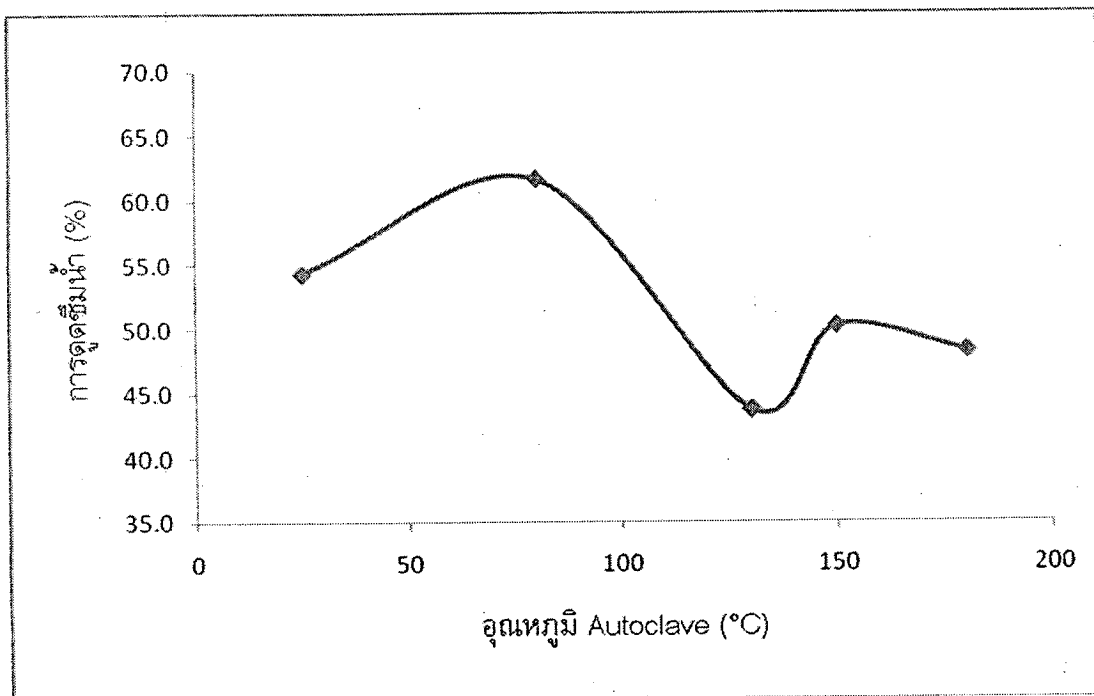
รูปที่ 4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%การหดตัว (%Shrinkage) กับอุณหภูมิในการ Autoclave



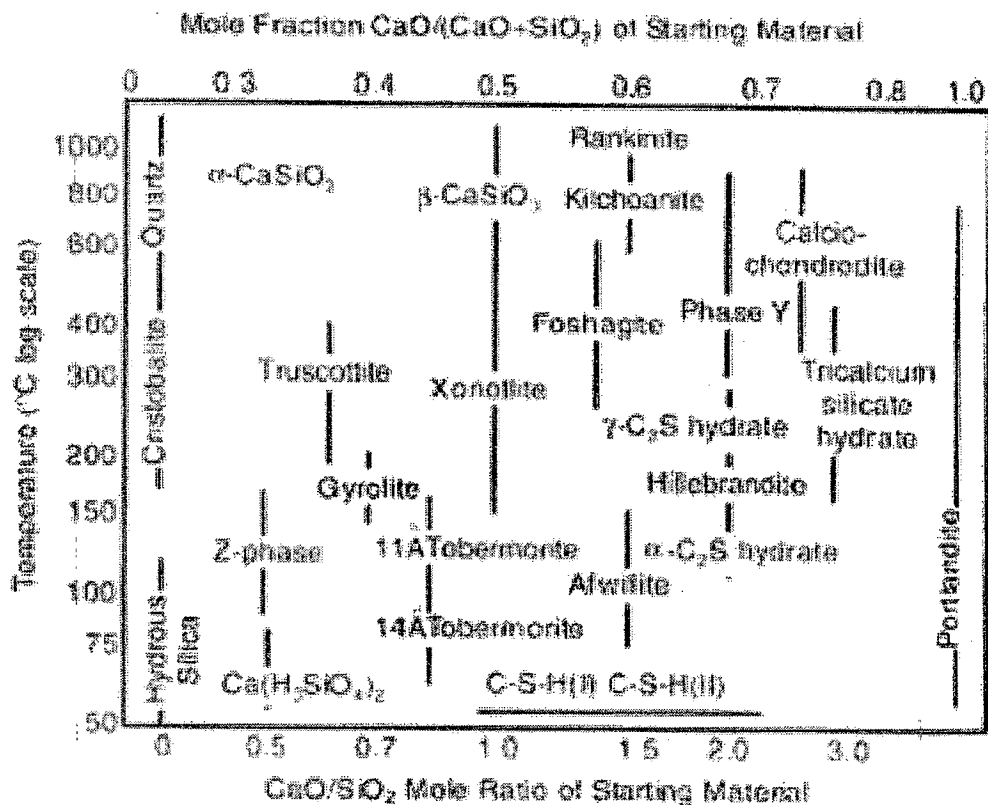
รูปที่ 4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (Bulk density) กับอุณหภูมิในการ Autoclave



รูปที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากการกดอัด (Compressive strength) กับอุณหภูมิในการ Autoclave



รูปที่ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) กับ อุณหภูมิในการ Autoclave



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

จากผลการทดลองพบว่า การใช้อุณหภูมิในการ Autoclave [17] อีฐที่ 25°C และ 80°C จะให้ค่าความแข็งแรงที่ต่ำคือประมาณ 7 MPa แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการ Autoclave ไปจนถึง 130°C ซึ่งเป็นช่วงของ Steam pressure ทำให้ได้เฟสของ CSH ที่เป็น Tobermorite ซึ่งเป็นผลึกรูปเข็ม มีความเสถียร จึงให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าการ Autoclave ที่อุณหภูมิอื่นๆ และจะพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการ Autoclave สูงขึ้นคือ 150°C และ 180°C ค่าความแข็งแรงจะลดลงสัมพันธ์ถึงค่าความหนาแน่นที่ลดลงและค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเกิดเฟสของ CSH อีกชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างทางแร่แตกต่างจาก Tobermorite จึงทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง ดังนั้นการใช้อุณหภูมิในการ Autoclave จะมีจุดที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดโครงสร้างของ CSH ที่ให้ค่าความแข็งแรงสูง นั่นคือการใช้อุณหภูมิในการ Autoclave ที่ 130°C

4.11 ผลการศึกษาอิทธิพลขนาดอนุภาคของดินเบาลำปางที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

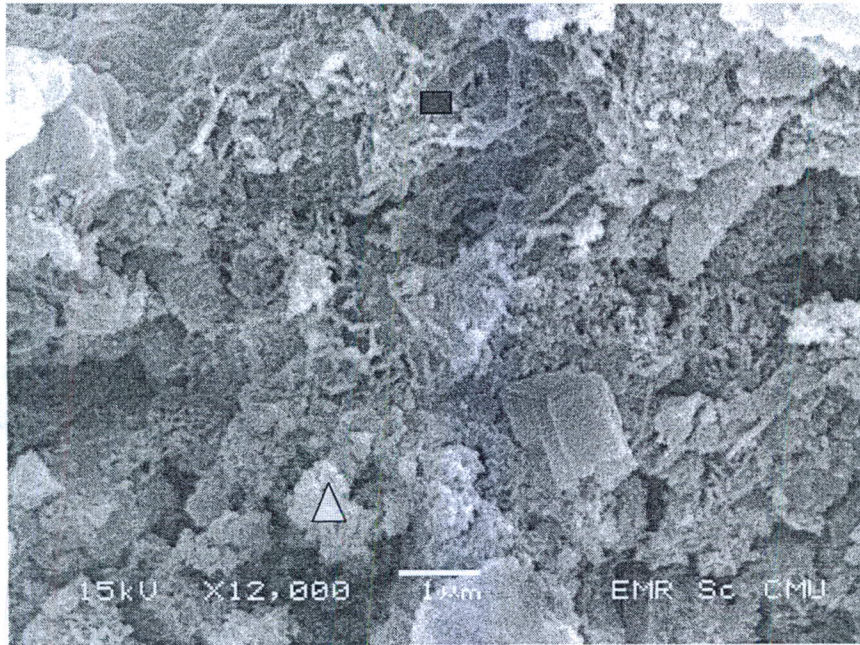
ตาราง 4.17 ขนาดดินเบาลำปางที่ใช้ทำอิฐในการทดลองและสมบัติเชิงกลของอิฐ

ขนาด ดินเบา	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล				
	ดินเบา (%)	Ca(OH) ₂ (%)	ยิป ซัม (%)	%การ หดตัว	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ความ แข็งแรง จากแรง กดอัด (MPa)	การ ดูดซึมน้ำ(%)
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 = ค้างตะแกรง 80 เมช (หรือ180 μm)

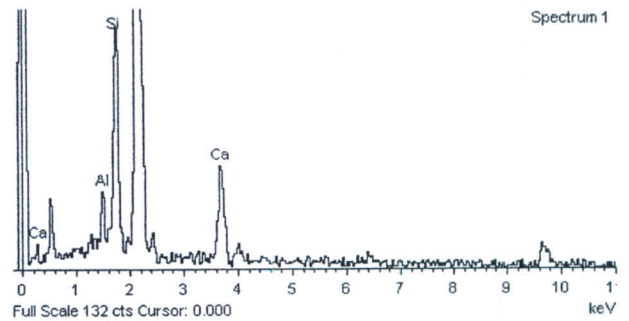
จากผลการทดลองพบว่าการใช้ดินเบาลำปางขนาดเล็กซึ่งมีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ 2 ขนาด คือ 0.33 และ 13 μm ให้ค่าความแข็งแรงของอิฐมากกว่าการใช้ดินเบาขนาดหยาบ เนื่องจากขนาดอนุภาคเล็กมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสมากและมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาปอซโซจึงเกิดขึ้นได้มากกว่า เกิดโครงสร้างของ CSH มาก ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงมากตามด้วย แต่จะเห็นว่าการใช้ดินเบาที่ค้างตะแกรง 80 mesh ให้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าซึ่งไม่สัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงที่ต่ำของอิฐ เนื่องจากส่วนที่ค้างตะแกรงมีขนาดอนุภาคที่หลากหลายจึงทำให้เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นอิฐเกิดการ Pack ตัวที่ดีกว่าจึงทำให้ค่าความหนาแน่นมากกว่าการใช้ดินเบาลำปางขนาดเล็ก โดยจะสัมพันธ์ถึงค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำลงด้วย

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค



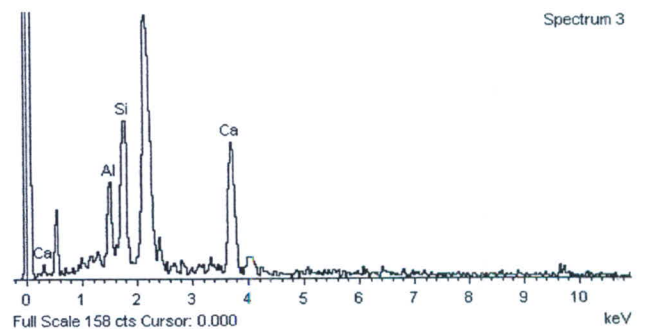
สัญลักษณ์ ■

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	



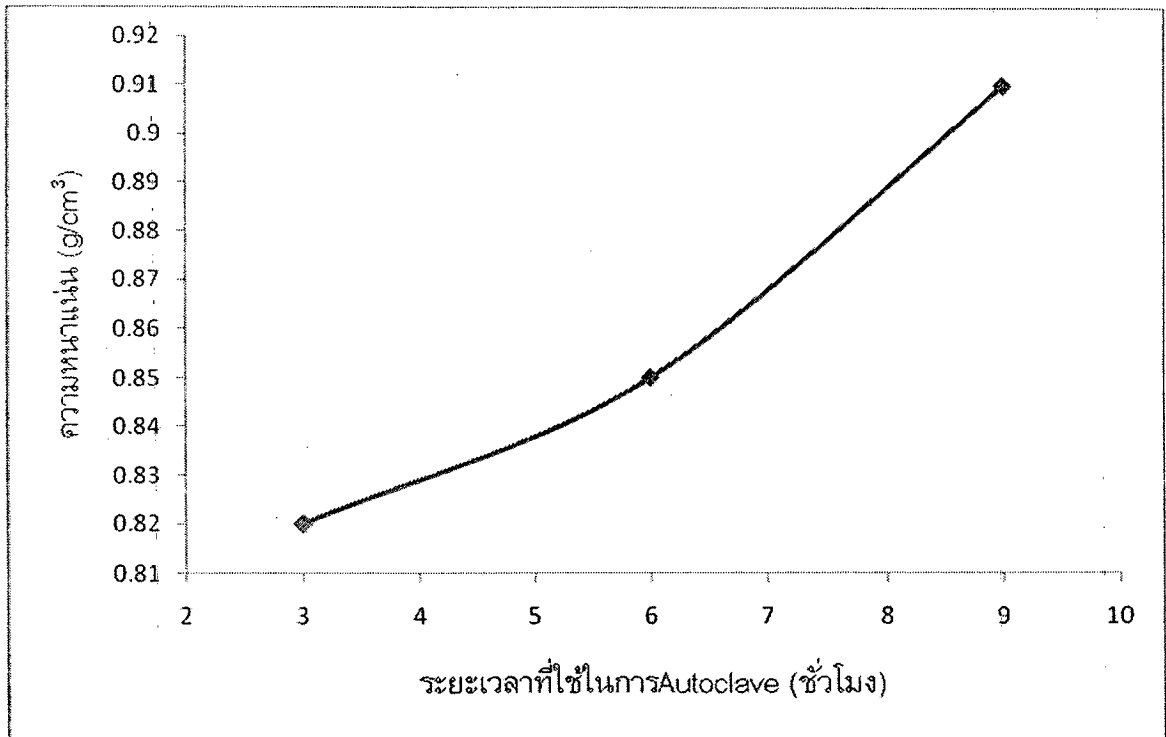
รูป 4.55 แสดงโครงสร้างทางจุลภาค และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอิฐที่ทำจากดิน
เบาขนาดหยาบ (อนุภาคค้ำตะแกรง 80 เมช (หรือ 180µm))

จากผล EDS ของอิฐเมื่อใช้ดินเบาขนาดอนุภาคคัดแรง 80 mesh (หรือ 180µm) ที่บริเวณสัญลักษณ์ ■ พบว่ามีปริมาณของธาตุ Ca และ Si ค่อนข้างสูง จึงคาดว่าน่าจะเป็นโครงสร้างของ CSH และบริเวณสัญลักษณ์ ▲ พบว่ามีปริมาณของธาตุ Ca ค่อนข้างสูง แต่พบปริมาณของธาตุ Si และ Al ที่ต่ำกว่ามาก ดังนั้นโครงสร้างที่พบนี้น่าจะเป็นโครงสร้างของ Ca(OH)_2 ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา หรือการเกิดปฏิกิริยายังไม่สมบูรณ์

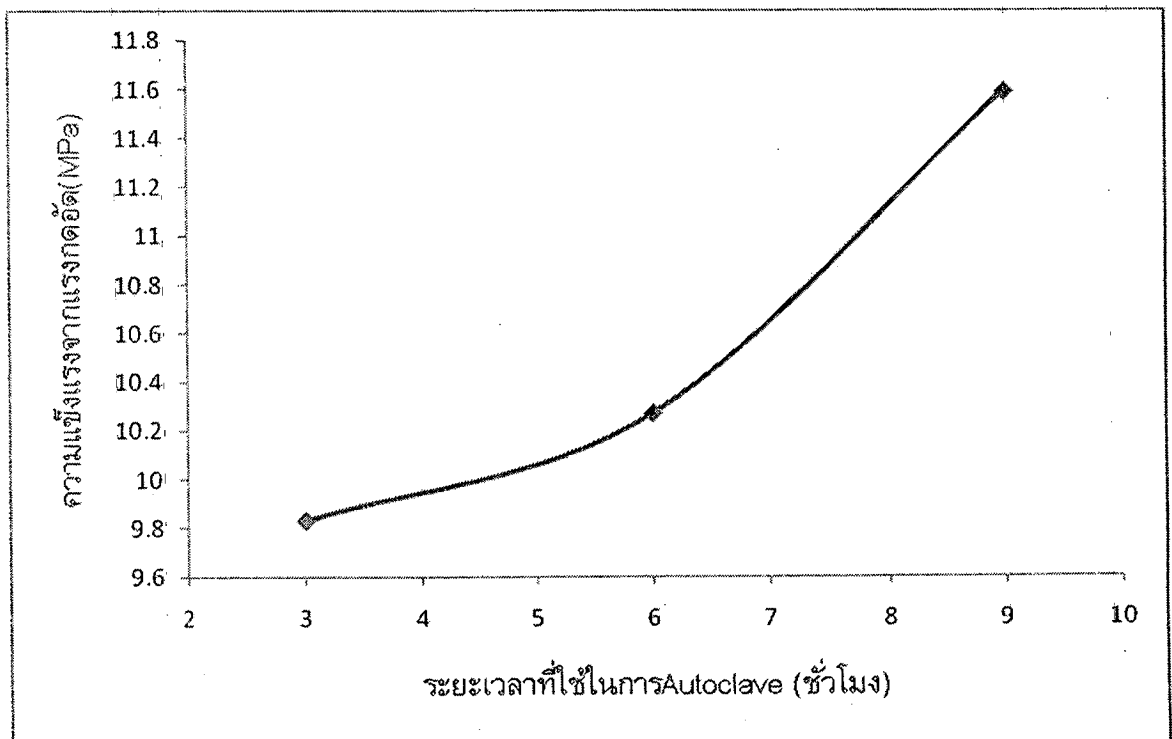
4.12 ผลการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการ Autoclave ที่มีต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.18 ระยะเวลาที่ใช้ในการ Autoclave อิฐในการทดลอง และสมบัติเชิงกลของอิฐ

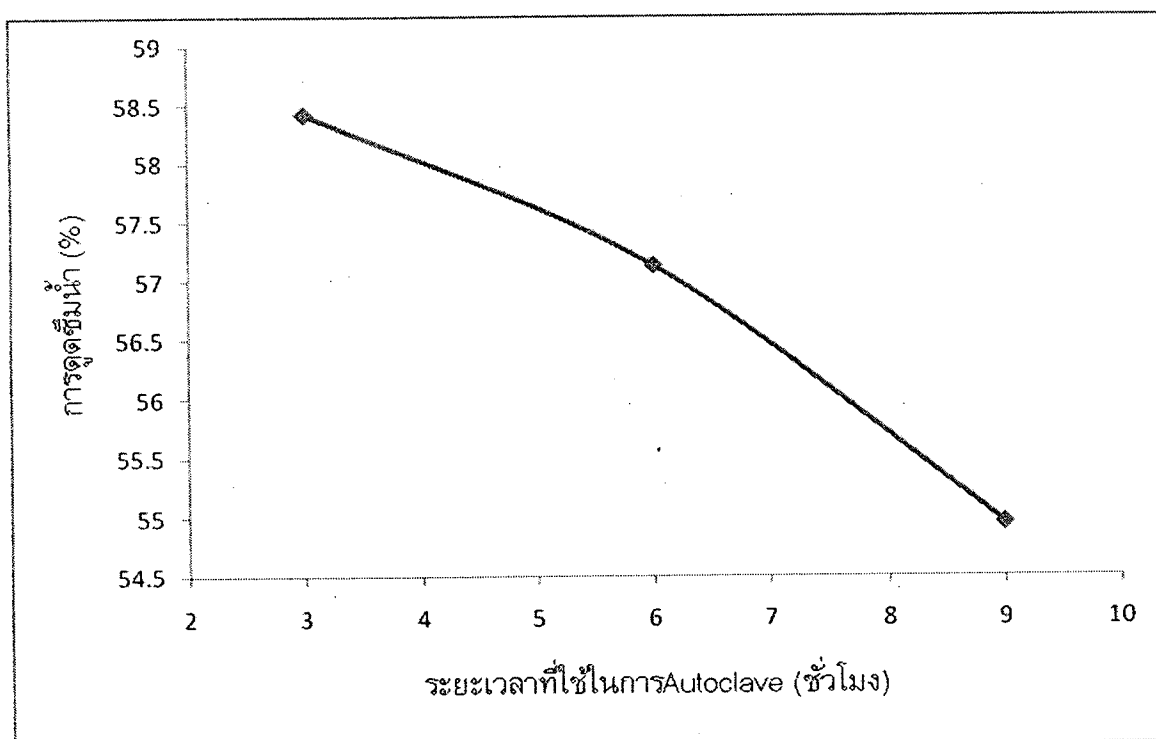
ระยะเวลา ที่ใช้ในการ Autoclave (ชั่วโมง)	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล		
	ดินเบา (%)	Ca(OH)_2 (%)	ยิปซัม(%)	ความ หนาแน่น (g/cm^3)	ความ แข็งแรงจาก แรงกดอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
3	70	10	20	0.82	9.83	54.95
6	70	10	20	0.85	10.27	57.13
9	70	10	20	0.91	11.59	58.42



รูปที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (Bulk density) กับระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มด้วย Autoclave



รูปที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากการกดอัด (Compressive strength) กับระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มด้วย Autoclave



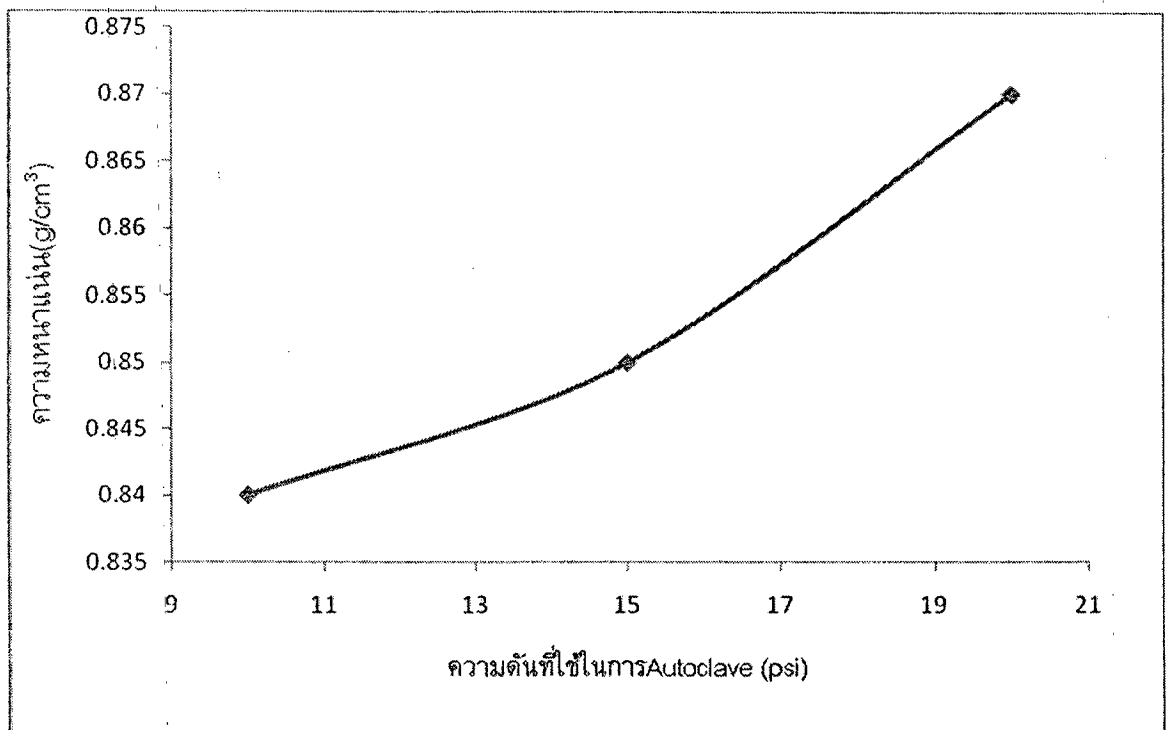
รูปที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) กับระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มด้วย Autoclave

จากการทดลองพบว่า การใช้เวลาในการ Autoclave อีฐมากขึ้น จะทำให้อีฐมีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจาก ยิ่งใช้เวลาในการ Autoclave มากขึ้น จะทำให้อนุภาคมีเวลาในการจัดเรียงตัวชิดกันมากขึ้น ซึ่งจะเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และเกิดโครงสร้างของ CSH มากขึ้น รวมทั้งการใช้ระยะเวลาในการ Autoclave มากขึ้น ทำให้อิฐที่อยู่ในรูปของอีฐมีความอึดตัวมากขึ้น ไอฐที่อึดตัวจะใช้เวลาในการชะเอา Al และ Si ออกมามากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้น ดังนั้นโครงสร้างของ CSH จึงมากขึ้นด้วย แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการอีฐที่มีความพรุนตัวสูงๆ และมีค่าความแข็งแรงที่เหมาะสม ดังนั้นจึงพิจารณาที่แรงกดอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปอีฐที่ทำให้ได้ความแข็งแรงที่สามารถใช้ในการก่อสร้างได้จริง และให้ความพรุนตัวสูงด้วย

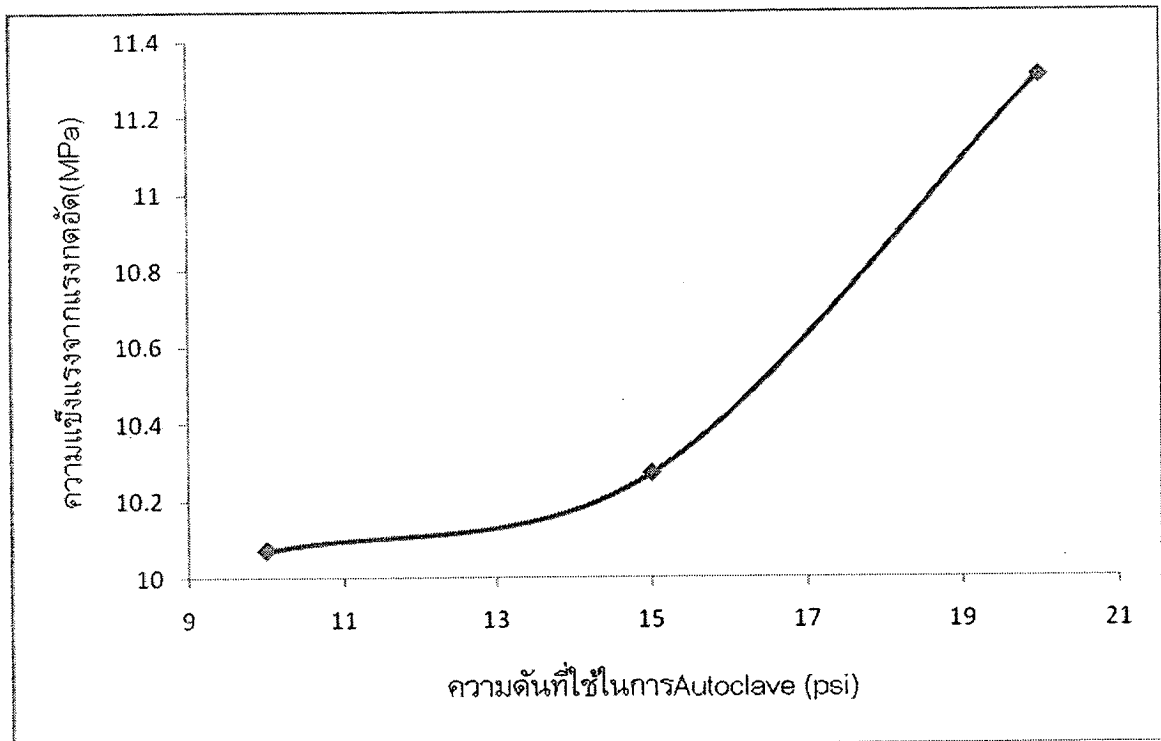
4.13 ผลการศึกษาอิทธิพลของความดันที่ใช้ในการ Autoclave

ตาราง 4.19 ความดันที่ใช้ในการ Autoclave อิฐในการทดลอง และสมบัติเชิงกลของอิฐ

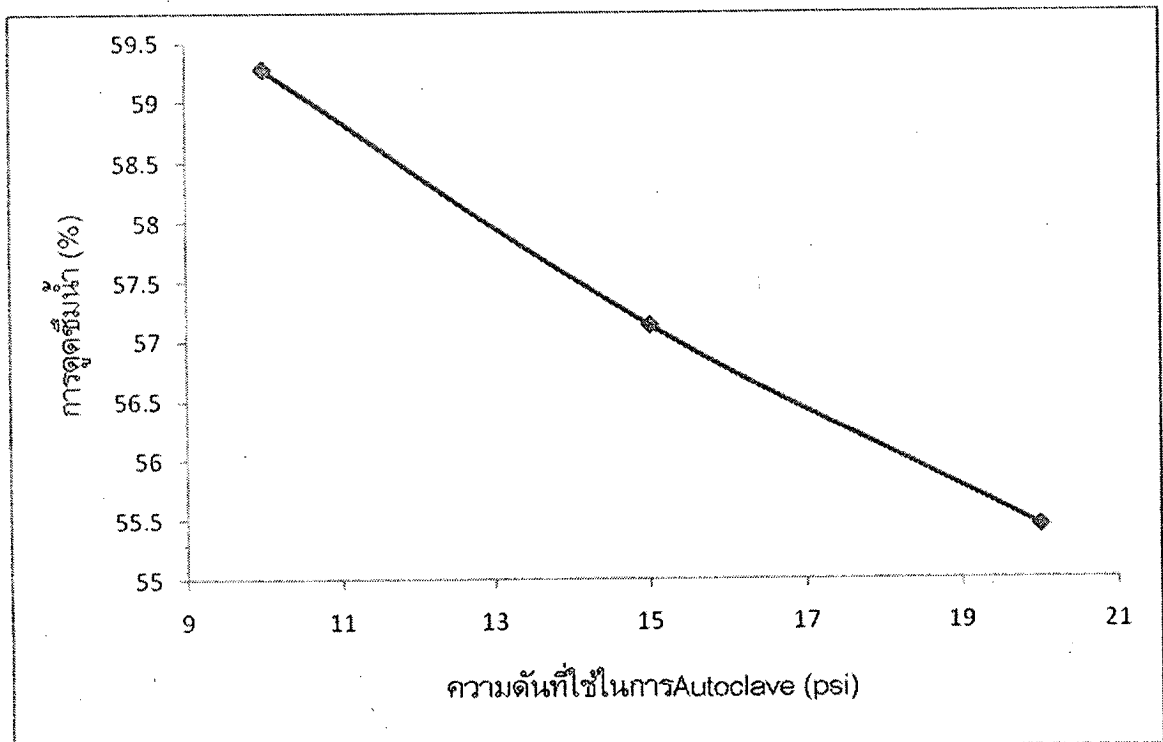
ความดันที่ใช้ในการ Autoclave (psi)	ส่วนผสม			สมบัติเชิงกล		
	ดินเบา (%)	Ca(OH) ₂ (%)	ยิปซัม(%)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความแข็งแรงจากแรงกดอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)
10	70	10	20	0.83	10.07	59.28
15	70	10	20	0.85	10.27	57.13
20	70	10	20	0.90	11.31	55.44



รูปที่ 4.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (Bulk density) กับความดันที่ใช้ในการบ่มด้วย Autoclave



รูปที่ 4.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจากการกดอัด (Compressive strength) กับความดันที่ใช้ในการ Autoclave อีฐ



รูปที่ 4.61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) กับความดันที่ใช้ในการ Autoclave อีฐ

จากการทดลองพบว่า การใช้ความดันที่ใช้ในการ Autoclave อีฐมากขึ้น จะทำให้อีฐมีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจาก ความดันในหม้อ Autoclave จะทำการบีบอัดให้อนุภาคเข้าเรียงชิดกันมากขึ้น ยิ่งใช้ความดันสูงจะทำให้อนุภาคบีบอัดกันมากขึ้น ซึ่งจะเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และเกิดโครงสร้างของ CSH มากขึ้น รวมทั้งการใช้ความดันในการ Autoclave มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นด้วย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อิฐที่อยู่ในรูปของอีฐมีความอึดตัวมากขึ้น ไอ้ที่อึดตัวจะไปทำการชะเอา Al และ Si ออกมามากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้น ดังนั้นโครงสร้างของ CSH จึงมากขึ้นด้วย แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการอีฐที่มีความพรุนตัวสูงๆ และมีค่าความแข็งแรงที่เหมาะสม ดังนั้นจึงพิจารณาที่แรงกดอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปอีฐที่ทำให้ได้ความแข็งแรงที่สามารถใช้ในการก่อสร้างได้จริง และให้ความพรุนตัวสูงด้วย

4.14 ผลการศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพด้วยความร้อนต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ตาราง 4.20 สภาวะดินเบาลำปางที่ใช้ทำอิฐในการทดลองและสมบัติเชิงกลของอิฐ

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

จากผลการทดลอง การใช้ดินเบาลำปางที่ไม่ได้ Calcine พบว่าค่าความแข็งแรงที่ได้จะสูงกว่าค่าความแข็งแรงที่ได้จากการใช้ดินเบาลำปางที่ Calcine ดังนั้นการทำอิฐชนิดไม่เผาสามารถนำดินเบาที่ไม่ผ่านการ Calcine มาใช้ทำอิฐที่จะให้ค่าความแข็งแรงที่ได้มาตรฐานที่สามารถนำอิฐไปใช้งานได้ แต่เห็นว่าจะให้ค่าความหนาแน่นที่ค่อนข้างสูงด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการอิฐที่มีค่าความหนาแน่นที่ต่ำๆ เนื่องจากต้องการทำอิฐมวลเบาที่มีคุณสมบัติในการเป็น

ฉนวนความร้อน ดังนั้นจึงเลือกสภาวะที่ใช้ดินเผาที่ Calcine เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นที่ต่ำ และให้ค่าความแข็งแรงที่เหมาะสมที่จะสามารถนำอิฐไปใช้งานได้

จากการทดลองนี้ทำให้ทราบว่า การใช้ดินเผาที่ผ่านการ Calcine เมื่อเทียบกับดินเผาที่ไม่ได้ผ่านการ Calcine น่าจะทำให้การละลายของไอออนต่างๆในดินเผาทั้งสองสภาวะมีความแตกต่างกัน ซึ่งความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดจะส่งผลต่อชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่ในอิฐ โดยสารประกอบเหล่านี้จะเป็นตัวรับผิดชอบความแข็งแรงของอิฐ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าดินเผาที่ไม่ผ่านการแคลไซต์ทำให้ระบบมีอัตราส่วนระหว่าง CaO/SiO_2 ที่เหมาะสมสามารถเกิดเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานได้มากกว่าหรือมีขนาดเล็กกว่าอิฐที่ให้ดินเผาที่ผ่านการแคลไซต์

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายในการศึกษาปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเบาลำปาง โดยศึกษาถึงอิทธิพลที่ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาเคมีทั้งสองดังกล่าวเกิดขึ้นได้ดี โดยปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันจะบ่งชี้จากการที่วัสดุเกิดเป็นเนื้อแก้ว (Glassy phase) ที่มีความต่อเนื่องกันของพันธะระหว่างโมเลกุลสูง ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงมาก และจะบ่งชี้จากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) และ/หรือ แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) ที่เพิ่มมากขึ้น

โดยงานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยขึ้นรูปวัสดุตัวอย่างเป็นอิฐ และได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพในด้านต่างๆ กล่าวคือ เบอร์เซนต์การหดตัว, ความหนาแน่น, ความแข็งแรง และการดูดซึมน้ำซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของอิฐ อีกทั้งยังพิจารณาได้จากโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางแร่ของอิฐ ที่สามารถยืนยันโครงสร้างของ Glassy phase ที่ได้จากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน และ CSH และ/หรือ CAH และ/หรือ CASH ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก

สำหรับการสังเคราะห์วัสดุอิฐโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักเบา ได้ใช้วัตถุดิบตั้งต้นสองชนิดคือ ดินเผาแหล่งลำปางและเถ้าแกลบ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาในช่วง 13.0-33.5 และของโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาในช่วง 0.7-3.0 ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยของความละเอียดของดินเผา อุณหภูมิในการเผาแคลไซต์ดินเผา ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างดินเผาและเถ้าแกลบ อุณหภูมิและเวลาในการบ่มวัสดุ โดยศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงความร้อนและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอิฐโพลิเมอร์ จากผลการทดลองพบว่าวัสดุอิฐโพลิเมอร์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าความแข็งแรงทนต่อการกดอัดมากกว่าวัสดุที่กระตุ้นด้วยสารละลายโปแตสเซียม

ไฮดรอกไซด์ โดยอุณหภูมิและเวลาบ่มวัสดุที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสและ 5 วันตามลำดับ และมีอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 13 และมีอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 1 ซึ่งจะทำให้ได้วัสดุอีโพลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นโดยรวมเท่ากับ 880 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความแข็งแรงทนต่อการกดอัดเท่ากับ 1.5 เมกะปาสคาล และเมื่อผสมเข้าเคลือบกับดินเบาในอัตราส่วน 40ต่อ60 ซึ่งจะทำให้ได้อัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาเปลี่ยนไปเป็น 22.5 และอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่ออะลูมินาเป็น 1.7 จะทำให้ค่าความแข็งแรงทนต่อการกดอัดเพิ่มขึ้นเป็น 2.4 เมกะปาสคาล และมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 1,010 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งแรงและความแน่นตัวของวัสดุอีโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างโซเดียมต่ออะลูมินา โดยความแน่นตัวจะมีลดลงเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวลดลง และจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอีโพลิเมอร์ พบว่าความต่อเนื่องของเฟสจะมีเพิ่มขึ้น หรือความเป็น Glassy phase จะมีเพิ่มขึ้น โดยพบว่าองค์ประกอบทางแร่ที่เหลืออยู่โดยไม่รวมเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันคือ คอรัซ นอกจากนี้ยังพบว่าดินเบาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพไม่สามารถพัฒนาให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันได้

สำหรับการสังเคราะห์วัสดุที่มาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์คืออุณหภูมิในการเผาแคลไซด์ดินเบา ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิและเวลาในบ่ม และการปรับสภาพด้วยความร้อน จากผลการทดลองพบว่าวัสดุที่มีน้ำหนักเบาที่มีคุณภาพดีได้จากการใช้ดินเบาที่ผ่านการเผาแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 0.3 โดยใช้อุณหภูมิในการบ่มที่ 130 องศาเซลเซียส ทำให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงทนต่อการกดอัดเท่ากับ 10 เมกะปาสคาล และมีความหนาแน่นโดยรวมเท่ากับ 870 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อใช้อุณหภูมิการบ่มสูงขึ้นเป็น 180 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณ 10% เท่านั้น และพบว่าอิฐที่ทำจากดินเบาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนมีความแข็งแรง 13.6 เมกะปาสคาล โดยมีค่ามากกว่าอิฐที่ทำจากดินเบาที่ผ่านการปรับสภาพ ที่มีความแข็งแรงถึง 10.9 เมกะปาสคาล

จากการพิจารณาจากสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ทั้งสองวิธีดังกล่าว พบว่าวัตถุดิบตั้งต้นชนิดดินเบาเหมาะกับการเตรียมวัสดุที่มีน้ำหนักเบาโดยใช้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากกว่าปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันในทุกกรณี