

ผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยา โพลีเมอไรเซชันของดินขาว*

สันติ ศิริพันธ์¹⁾ และ วิชัย สังวรปทานสกุล²⁾

¹⁾ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 10140

²⁾ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 10140

Email: san_si64@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของดินขาวจากแหล่งต่างๆภายในประเทศ 13 แหล่งโดยการผสมกับสารละลายต่างๆกัน เช่น $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH แล้วกระตุ้นปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันภายใต้อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อวัดปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้วิธีแคลอริเมตรี ร่วมกับพิจารณาองค์ประกอบทางเคมี ผลการทดสอบพบว่าเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกกลุ่มตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียสโดยดินขาวที่ผสมด้วยสาร KOH มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมสูงกว่าดินขาวที่ผสมด้วยสาร NaOH ในเกือบทุกตัวอย่างยกเว้น ดินขาวระยอง ดินขาวระนอง ดินขาวสุราษฎร์ธานี ดินขาวนราธิวาส ที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 และ 60 องศาเซลเซียส ดินขาวที่ผสมด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมใกล้เคียงกันกับสารผสมเพิ่มชนิดอื่น และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา ไม่มีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของดินขาว

คำสำคัญ : ดินขาว, โพลีเมอไรเซชัน, แคลอริเมตรี, ปริมาณความร้อน, การปรับปรุงคุณภาพดินขาว

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2550 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 24 เมษายน 2550

Effect of Activated Temperature on Polymerization Reaction of Kaolin *

Santi Siriphan ¹⁾ and Wichai Sungworaphathansakul ²⁾

¹⁾ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi 10140

²⁾ Graduate Students, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi 10140

Email: san_si64@yahoo.com

ABSTRACT

This paper presents of Effect of Activated Temperature on Polymerization Reaction of Kaolin from 13 locations in Thailand by mixing different alkali solution such as $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH and NaOH. Polymerization reaction of the specimens were activated under temperature of 40°C, 60°C and 80°C for 24 hours. Heat development and heat evolution rate during stabilization along with chemical composition were determined by calorimetric study. From the experiment, it was found that when increase activated temperature than total heat development and total heat evolution rate increase all specimens. Furthermore, it was found that almost all of specimens with KOH have heat development and heat evolution rate more than those with NaOH at 80°C activated temperature except Rayong Kaolin, Ranong Kaolin, Suratthani Kaolin and Naratiwat Kaolin which provide similar total heat development and total heat evolution at 40°C and 60°C activated temperature. $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ ratio had no effect on polymerization reaction.

Keywords : Kaolin, polymerization, calorimetric, heat development, stabilization of kaolin

* Original manuscript submitted: February 2, 2007 and Final manuscript received: April 24, 2007

บทนำ

ดินเป็นทรัพยากรที่มีอยู่ทั่วไปทุกท้องถิ่นบนผิวโลก มนุษย์รู้จักนำทรัพยากรดินขึ้นมาใช้งานในด้านต่างๆเป็นเวลานาน ดินขาวจัดเป็นวัตถุดิบที่มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในเชิงอุตสาหกรรม เช่น วัสดุก่อสร้าง กระดาษ สี ยาง และอื่น ๆ ซึ่งล้วนแต่ต้องการใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพดีอันมีอยู่อย่างจำกัด ประเทศไทยเองมีแหล่งดินขาวเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในงานก่อสร้างเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของดินขาว

การปรับปรุงคุณภาพของดินขาวโดยกลวิธีโพลิเมอไรเซชันเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มคุณลักษณะของดินขาวในท้องถิ่นให้มีคุณสมบัติทางกลเหมาะสมตามความต้องการ โพลิเมอร์(Polymer) เป็นโมเลกุลใหญ่ที่สร้างขึ้นโดยการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลเล็ก ๆ จำนวนมาก โมเลกุลเล็ก ๆ จะรวมกันโดยเชื่อมต่อนี้ขึ้นเป็นโมเลกุลของโพลิเมอร์ อยู่ในรูปของโมโนเมอร์(Monomer) และปฏิกิริยาระหว่างการรวมตัวนี้เรียกว่า โพลิเมอไรเซชัน(Polymerization)

(Ingles, *et al.*, 1970) ได้ศึกษาเรื่องกลไกของการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้กรดและด่างพบว่า อีออนลบ 1 และ 2 Valent ของไฮดรอกไซด์ และกรดรุนแรงที่จะกระทำต่อแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้าง 2 และ 3 ชั้น (คาโอลิไนท์และมอนท์มอริลโลไนท์) ภายใต้สภาวะที่จำลองขึ้นสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน ที่ปริมาณความชื้นและความหนาแน่นเท่ากับค่าความหนาแน่นสูงสุด ปฏิบัติการดำเนินไปเป็นระยะเวลามากกว่า 2 ปี การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงและปริมาตรมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของแร่ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถบอกได้ว่ากลไกสำคัญในการส่งเสริมให้เกิดการปรับปรุงคุณภาพทาง อนินทรีย์ (Inorganic Soil Stabilization) ก็คือแรงยึดเหนี่ยว สำหรับสารเคมีที่เพิ่มเข้าไปนั้นจะใช้ 10 เปอร์เซ็นต์ของดินแห้ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นการปรับปรุงคุณภาพอย่างชัดเจน

(Ingles O.G. *et al.*, 1972) ได้ปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวคาโอลิไนต์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า ความแข็งแรงของดินที่ปรับปรุงคุณภาพในช่วง 7 – 14 วันแรกจะมีความแข็งแรงต่ำกว่าดินที่ไม่ได้ทำการปรับปรุง พฤติกรรมนี้เกิดขึ้นจากในช่วงแรกนั้นแร่ดินเหนียวยังมีช่องโพรงอยู่ ต่อมาอลูมินาจะค่อยก่อตัวเป็นผลึกขึ้น ในสภาพที่อัตราส่วน Si / Al สูง ๆ และรอยแตกที่ไม่แน่นอนในแร่ดินเหนียวนั้นทำให้เม็ดดินเปลี่ยนเป็นวัสดุที่แข็งแรงและเม็ดดินที่ถูกเคลือบนั้นก็ไม่สามารถที่จะมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มักเกิดจากการที่พื้นผิวเปิด (ช่องว่างขนาดใหญ่ สามารถมองเห็นได้จากกรณีของกรวด) ความแข็งแรงนั้นเกิดขึ้นจากการเคลือบที่โครงสร้างของดิน ปริมาตรที่ขยายขึ้นเนื่องจาก โซเดียมไฮดรอกไซด์เนื่องมาจากการก่อตัวของโซเดียมอลูมิโนซิลิเกต ที่ไม่ละลายในสารละลาย

(Lee S.R., *et al.*, 2002) ได้ศึกษาเรื่องการเปลี่ยนรูปของชั้นของอลูมิโนซิลิเกต จาก 2 มิติไปเป็น 3 มิติ ได้เสนอถึงแนวทางใหม่ของโซดาไลต์ (Sodalite) จากอลูมิโนซิลิเกต เช่น คาโอลิไนท์ และมอนท์มอริลโลไนท์ ที่มีสารประกอบ Al_2O_3 เป็นหลัก ให้ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศล้อมรอบ ผลที่ได้คือ ได้วัสดุแข็งที่เป็นผลึกของโซดาไลต์ เป็นรูปทรงลูกบาศก์ ($a = 8.92 \pm 0.05 \text{ \AA}$) ประกอบไปด้วยโครงข่ายของ ซีโอไลติก (Zeolitic) Al – O – Si สลับที่กันระหว่างอลูมิเนียม และ ซิลิกาเทรตเตอฮีดรอน จากภาพถ่าย

ขยาย SEM แสดงให้เห็นว่า โซดาไลต์ ได้มาจากอลูมิเนียมซิลิเกต 2 มิติ ที่ประกอบไปด้วยโซดาไลต์ ขนาดใหญ่ (30 – 50 มิลลิเมตร) ซึ่งจะยังคงรักษาลักษณะดั้งเดิมของชั้นซิลิเกตไว้

(อมลวรรณ พิเศษวานิช, 2549) ได้ศึกษากลไกของการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกลวิธี โพลีเมอไรเซชัน โดยการนำตัวอย่างดินขาวจากแหล่งต่างๆในประเทศไทยผสมสารละลายต่างชนิดต่างๆ แล้วกระตุ้นปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน ภายใต้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดแบบทิศทางเดียวจนถึงอายุบ่ม 56 วัน ร่วมกับวิธีแคลอริเมตรี เพื่อวัดปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของดินขาวและสารผสมเพิ่ม ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ พบว่าในระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพจะเกิดปฏิกิริยาเริ่มแรกหลายรูปแบบ อีกทั้งปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมของดินขาวและสารผสมเพิ่มมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดแบบทิศทางเดียว

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอุณหภูมิกระตุ้นในช่วง 24 ชั่วโมงแรก ชนิดของสารละลายต่าง และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินาของดินขาวจากแหล่งต่างๆในประเทศไทย เป็นตัวแปรควบคุมที่จะทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของดินขาวและสารผสมเพิ่ม โดยการนำดินขาวจากแหล่งต่างๆในประเทศไทยจำนวน 13 แหล่งมาผสมกับสารผสมเพิ่ม 6 ชนิดและใช้อุณหภูมิกระตุ้น 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแสดงในรูปของปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมของปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันโดยใช้วิธีแคลอริเมตรี

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ดินขาว

ดินขาวที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นดินขาวที่ได้จากเหมืองดินขาวแหล่งต่างๆ ภายในประเทศ ได้แก่ ตำบลบุญนาคนพัฒนา อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง, ตำบลสันดอนแก้ว อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง, ตำบลทุ่งฝาย อำเภอเมือง-แจ้ห่ม จังหวัดลำปาง, ตำบลบ้านสา อำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง, ตำบลผาจุก อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี, ตำบลโนนทอง อำเภอนายูง จังหวัดอุดรธานี, ตำบลโคกไม้ลาย อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี, ตำบลด่านทับตะโก อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี, ตำบลวังจันทร์ อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี, ตำบลห้วยยาง อำเภอแกลง จังหวัดระยอง, ตำบลหาดส้มแป้น อำเภอเมือง จังหวัดระนอง, ตำบลขุนทะเล อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี และ ตำบลจวบ อำเภอเจาะไอร้อง จังหวัดนราธิวาส

สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มที่นำมาใช้ผสมกับตัวอย่างดินขาวใช้เกรดพาณิชย์มีจำหน่ายในท้องตลาด ซึ่งมีความแตกต่างกันจำนวน 6 สาร คือ โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), ไดโซเดียมคาร์บอเนต (Disodium Carbonate, Na_2CO_3), ไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Disodium

Hydrogen Orthophosphate, Na_2HPO_4), ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Trisodium phosphate, Na_3PO_4), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH)

ระเบียบวิธีการศึกษา

การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน

3.1.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินตามมาตรฐานของ ASTM D854 ซึ่งตัวอย่างที่ใช้มีสภาพความชื้นตามธรรมชาติ และแสดงค่าที่ได้ออกมาจากการเฉลี่ยค่าที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง

3.1.2 การทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตระแกรงแบบล้าง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2487

3.1.3 การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กโดยใช้ Hydrometer ซึ่งทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D422

3.1.4 Liquid Limit (LL) ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D4318 ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นส่วนใหญ่ผ่านตระแกรงเบอร์ 40 (ขนาด 0.425 มม.)

3.1.5 Plastic Limit (PL) ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D4318 ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นส่วนใหญ่ผ่านตระแกรงเบอร์ 40 (ขนาด 0.425 มม.)

การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

การทดสอบการหาค่าการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1557 เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม สำหรับใช้เป็นเกณฑ์ในการควบคุมคุณภาพและปริมาณความชื้นของตัวอย่างเพื่อทดสอบแคลอริเมตรี โดยใช้แบบหล่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 116.8 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) ค้อนหนัก 10 ปอนด์ ระยะตกกระทบของค้อน 18 นิ้ว ใช้จำนวนครั้งการบดอัด 25 ครั้งต่อชั้นและบดอัด 5 ชั้น และมีค่าพลังงานในการบดอัดต่อปริมาตรเท่ากับ $56,250 \text{ ft} \cdot \text{lb} / \text{ft}^3$ ($2693.3 \text{ kJ} / \text{m}^3$) โดยทดสอบกับตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารผสมเพิ่ม ซึ่งจะแสดงให้เห็นผลการปรับปรุงคุณภาพที่ชัดเจน และค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมนี้ จะนำไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มเพื่อทดสอบแคลอริเมตรี

การทดสอบเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวโดยวิธี X-Ray Fluorescence ซึ่งตัวอย่างดินขาวมีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม.ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง การทดสอบดำเนินการโดยภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

การทดสอบแคลอริเมตรี

ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อวัดอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวผสมสารผสมเพิ่มซึ่งแตกต่างกัน 6 ชนิดและน้ำ ปริมาณดินขาวที่ใช้ในการทดสอบ 25 กรัม ปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้แต่ละชนิดในการทดสอบ 2.5 กรัมและใช้น้ำที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) ของดินขาวและสารผสมเพิ่มแต่ละชนิด ตามการทดสอบการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน การทดสอบใช้สายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K เนื่องจากให้อัตราการเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่นๆ (ความชื้นเกือบเป็น 1) เพื่ออ่านค่าอุณหภูมิของตัวอย่างดินขาวที่ผสมสารผสมเพิ่มและน้ำที่ได้จากการอ่านการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า แล้วนำตัวอย่างใส่ลงไปในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) เพื่อสร้างอุณหภูมิกระตุ้นแก่ตัวอย่างโดยอุปกรณ์อ่านและบันทึกข้อมูล (Data logger) รุ่น 34970A จะทำหน้าที่อ่านการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า จากเทอร์โมคัปเปิลแบบ K แล้วส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ความถี่ในการจัดเก็บข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้คือจัดเก็บทุก 1 นาทีเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 1 อุณหภูมิกระตุ้นที่ใช้ในการทดสอบ คือ 40 ,60 และ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการทดสอบแคลอริเมตรี

ในการประเมินผลการจะแสดงค่าปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง อีกทั้งหาขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิ ปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนในรูปของปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวม จำนวนตัวอย่างใช้ในการทดลองรวมทั้งสิ้น 234 ตัวอย่าง

ผลการศึกษา

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน

ผลการทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของตัวอย่างดินขาวจากแหล่งต่างๆ จะสามารถจำแนกประเภทดินตามระบบ Unified Soil Classification (USC) ดังแสดงในตารางที่ 1

ชนิดของดิน	แหล่งที่มา	Soil Properties				
		Physical Properties				Classification
		Specific Gravity	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index (%)	
ดิน 1	ต.บุญนาพัฒนา จ.ลำปาง	2.65	54.64	32.51	22.13	MH
ดิน 2	ต.สันดอนแก้ว จ.ลำปาง	2.63	53.43	25.40	28.03	CH
ดิน 3	ต.ทุ่งฝาย จ.ลำปาง	2.66	40.00	29.16	10.84	ML
ดิน 4	ต.บ้านสา จ.ลำปาง	2.69	33.38	23.33	10.05	CL
ดิน 5	ต.วังจันทร์ จ.เพชรบุรี	2.70	Non Plastic			ML
ดิน 6	ต.โนนทอง จ.อุดรธานี	2.69	Non Plastic			ML
ดิน 7	ต.ด่านทับตะโก จ.ราชบุรี	2.69	Non Plastic			ML
ดิน 8	ต.ห้วยยาง จ.ระยอง	2.69	65.34	38.25	27.09	MH
ดิน 9	ต.ขุนทะเล จ.สุราษฎร์ธานี	2.65	50.00	23.22	26.78	CH
ดิน 10	ต.หาดส้มแป้น จ.ระนอง	2.64	43.40	22.89	20.51	CL
ดิน 11	ต.จวบ จ.นราธิวาส	2.66	86.00	52.67	33.33	MH
ดิน 12	ต.โคกไม้ลาย จ.ปราจีนบุรี	2.64	37.20	15.48	21.72	CL
ดิน 13	ต.ผาจุก จ.อุดรดิตถ์	2.70	30.48	25.54	4.94	ML

ตารางที่ 1 ตารางแสดงคุณสมบัติทั่วไปของตัวอย่างดินขาวที่ใช้ในการศึกษา

ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

ผลการทดสอบการบดอัดตัวอย่างดินแหล่งต่างๆ ผสมสารผสมเพิ่มแต่ละสารดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2 พบว่าผลการบดอัดดินแต่ละสารในตัวอย่างดินมีแนวโน้ม ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็นไปในแนวเดียวกัน เนื่องจากสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, KOH และ NaOH มีค่าหน่วยน้ำหนักมากกว่าตัวอย่างดินขาว และจะทำให้ได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมลดน้อยลง ซึ่งเนื่องจาก

สารผสมดังกล่าวสามารถละลายน้ำค่อนข้างดี ตัวอย่างดินขาวมีการดูดซึมสารละลายในปริมาณที่มากกว่าสาร Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 และ Na_3PO_4 จึงกล่าวได้ว่าสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, KOH และ NaOH มีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดสำหรับดินตัวอย่าง และส่งผลกระทบต่อค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของตัวอย่างดินขาว

แหล่งที่มา	สารผสมที่ 10 %	ค่าความหนาแน่นแห้ง สูงสุด (KN/m^3)	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (%)
ต.บุญนาคพัฒนา จ.ลำปาง	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	19.59	17.25
	Na_2CO_3	15.59	17.25
	Na_2HPO_4	16.05	19.50
	Na_3PO_4	16.84	16.25
	KOH	20.48	16.25
	NaOH	20.48	16.25
ต.สันดอนแก้ว จ.ลำปาง	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	19.78	14.65
	Na_2CO_3	16.93	14.65
	Na_2HPO_4	15.49	19.25
	Na_3PO_4	16.78	14.65
	KOH	19.78	14.65
	NaOH	19.78	14.65
ต.ทุ่งฝาย จ.ลำปาง	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	18.83	15.00
	Na_2CO_3	14.94	16.50
	Na_2HPO_4	15.48	17.50
	Na_3PO_4	14.94	16.50
	KOH	18.97	16.50
	NaOH	18.92	16.00
ต.ทุ่งฝาย จ.ลำปาง	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	18.83	15.00
	Na_2CO_3	14.94	16.50
	Na_2HPO_4	15.48	17.50
	Na_3PO_4	14.94	16.50
	KOH	18.97	16.50
	NaOH	18.92	16.00

ตารางที่ 2 ตัวอย่างผลการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวโดยวิธี X – Ray Fluorescence และ อัตราส่วนซิลิกาและอลูมินาของตัวอย่างดินขาวแต่ละแหล่ง ดังแสดงในตารางที่ 3

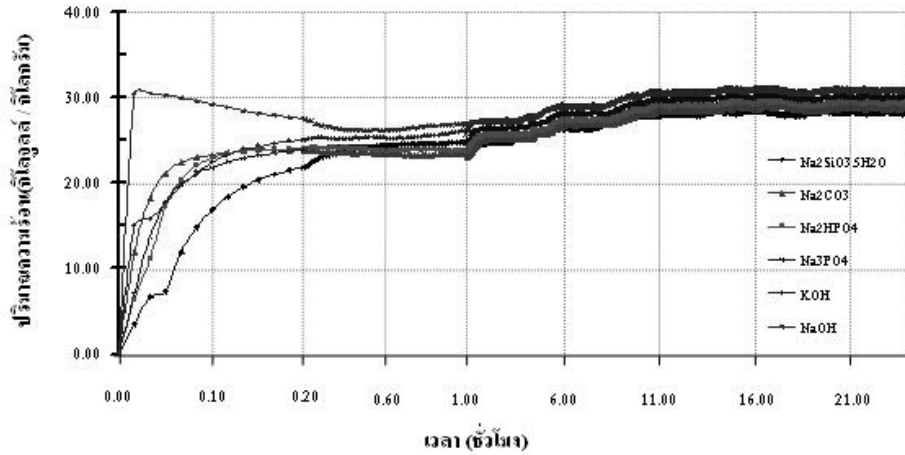
ชนิด ของดิน	X-Ray Fluorescence (XRF)								SiO ₂ /Al ₂ O ₃
	SiO ₂ ,%	Al ₂ O ₃ ,%	K ₂ O,%	Fe ₂ O ₃ ,%	Na ₂ O,%	MgO,%	CaO,%	TiO ₂ ,%	
ดิน 1	61.96	27.14	7.09	1.61	0.48	0.85	0.5	0.11	2.28
ดิน 2	66.97	24.10	3.60	2.35	0.30	1.10	0.46	0.83	2.78
ดิน 3	66.48	25.11	5.76	0.99	0.66	0.49	0.12	0.05	2.65
ดิน 4	68.75	23.34	5.43	1.10	0.72	0.21	0.12	0.05	2.95
ดิน 5	70.23	17.59	5.49	3.34	0.13	1.46	0.06	1.04	3.99
ดิน 6	75.79	14.21	5.44	2.78	0.82	0.47	0.03	0.18	5.33
ดิน 7	73.00	15.72	6.25	2.38	0.06	1.33	0.04	0.95	4.64
ดิน 8	50.98	32.17	0.29	14.25	-	1.19	0.34	0.43	1.58
ดิน 9	64.46	30.83	1.14	1.51	-	0.42	0.09	1.30	2.09
ดิน 10	57.45	36.57	2.80	2.29	0.09	0.20	0.03	0.12	1.57
ดิน 11	58.85	36.82	1.81	0.83	-	0.38	0.03	1.14	1.60
ดิน 12	75.90	20.60	0.78	0.87	0.19	0.24	0.09	0.88	3.68
ดิน 13	74.92	13.73	6.77	2.92	0.50	0.64	0.12	0.23	5.46

ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินขาวโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence

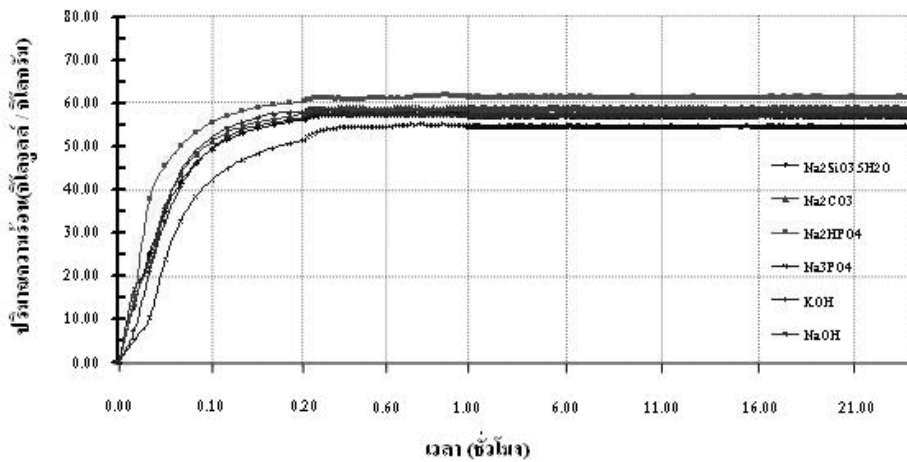
ผลการทดสอบแคลอริเมตรี

ผลการทดสอบแคลอริเมตรีของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มแสดงรูปแบบและปริมาณของการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของตัวอย่างที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 - 7 จะเห็นได้ถึงความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มแต่ละสารซึ่งแสดงในรูปของปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวม

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิภายในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้นความร้อนที่คายออกมาจะลดลงทำให้รูปแบบและปริมาณของ เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2

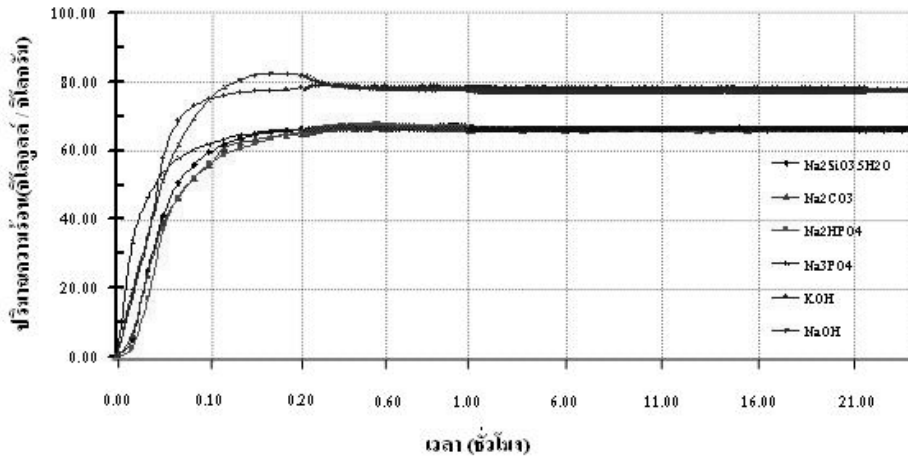


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลงูขนาดพัฒนา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส



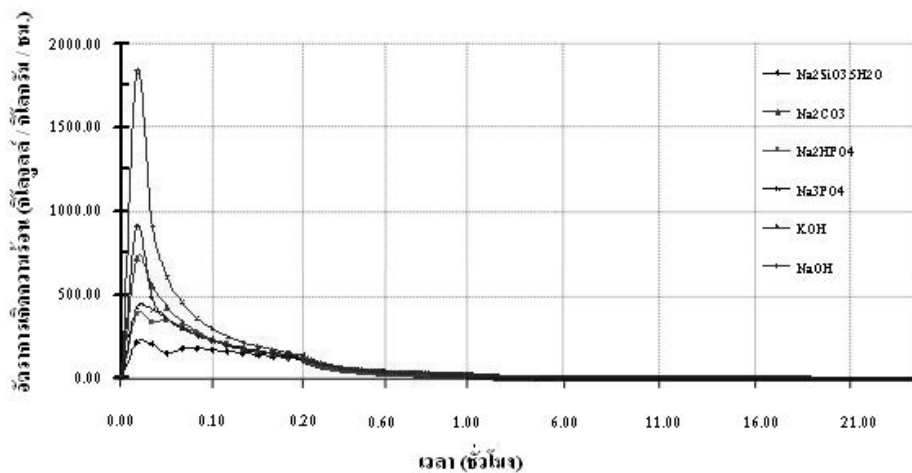
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลงูขนาดพัฒนา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3



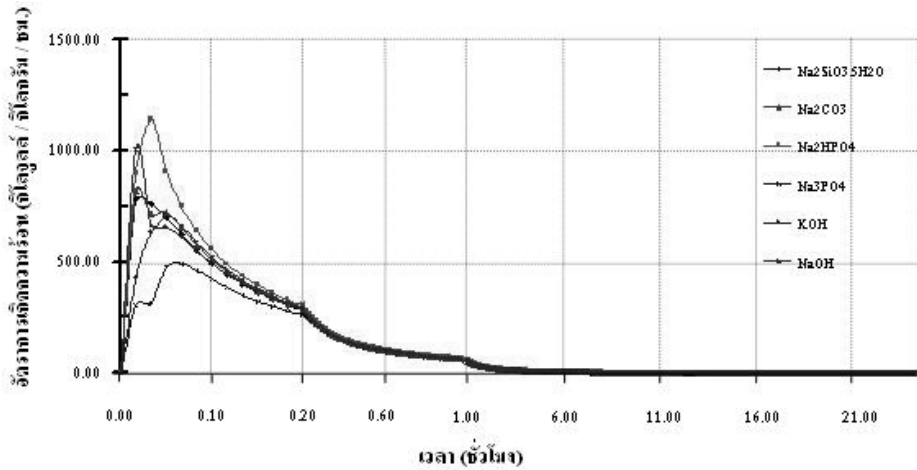
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำลบุญนาพัฒนา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4



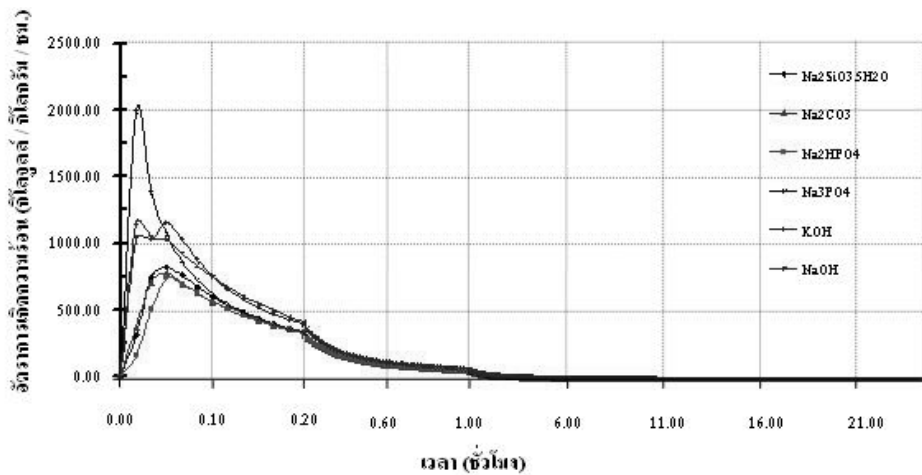
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำลบุญนาพัฒนา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลบุญนาพัฒนา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกันโดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลบุญนาพัฒนา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกันโดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_3PO_4 มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 7

แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนข้างต้น เป็นตัวอย่างหนึ่งของดินขาวจากแหล่งต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ รูปแบบและปริมาณของปริมาณความร้อนของดินขาวและสารผสมเพิ่มในแหล่งอื่นๆ มีความใกล้เคียงกันแต่เมื่อนำมาหาขนาดพื้นที่ได้ เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนในรูปของปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมแล้วสรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส ตัวอย่างดินขาวตำบลบุญนาพัฒนา จังหวัดลำปาง ผสมด้วย KOH มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมสูงที่สุดคือ 1,883.311 kJ/kg·h และ 522.079 kJ/kg ตามลำดับ ตัวอย่างดินขาวดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานีผสมด้วย Na_3PO_4 มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมต่ำที่สุดคือ 1,591.501 kJ/kg·h และ 383.849 kJ/kg ตามลำดับ ที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส ตัวอย่างดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานี ผสมด้วย Na_2HPO_4 มีปริมาณความร้อนรวมสูงที่สุดคือ 1,639.135 kJ/kg·h และตัวอย่างดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานี ผสมด้วย NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนรวมสูงที่สุดคือ 467.054 kJ/kg ดินขาวตำบลห้วยยาง จังหวัดระยองผสมด้วย KOH มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมต่ำที่สุดคือ 965.012 kJ/kg·h และ 259.877 kJ/kg ตามลำดับ ที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส ตัวอย่างดินขาวตำบลสันดอนแก้ว จังหวัดลำปาง ผสมด้วย NaOH มีปริมาณความร้อนรวมสูงที่สุดคือ 746.898 kJ/kg·h และดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานีผสมด้วย NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนรวมสูงที่สุดคือ 243.513 kJ/kg ตัวอย่างดินขาวดินขาวตำบลทับตะโก จังหวัดราชบุรี ผสมด้วย $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ มีปริมาณความร้อนรวมต่ำที่สุดคือ 325.826 kJ/kg·h และตัวอย่างดินขาวตำบลห้วยยาง จังหวัดระยอง ผสมด้วย KOH มีอัตราการเกิดความร้อนรวมต่ำที่สุดคือ 118.732 kJ/kg

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินขาว 13 แหล่งและสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน 6 ชนิด ได้แก่ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , NaOH และ KOH ที่อัตราส่วนผสม 10 เปอร์เซ็นต์ และกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Baths) ที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มและศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาวโดยวิธีแคลอริเมตรีสามารถสรุปผลของการศึกษาได้ดังนี้

ผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของตัวอย่างดินขาว ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆ เมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง

อัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของตัวอย่างดินขาวที่อุณหภูมิกระตุ้นต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4

ปริมาณความร้อนของดินขาวและสารผสมเพิ่มมีรูปแบบและปริมาณใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิกระตุ้นเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกกลุ่มตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้น กลุ่มตัวอย่างดินขาวมีค่าอัตราการเกิดความร้อนในช่วงแรกมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจน หลังจากนั้นไม่เกิดอัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นอีกในทุกกลุ่มตัวอย่าง

สารผสมเพิ่ม ที่ 10 %	40 องศาเซลเซียส		60 องศาเซลเซียส		80 องศาเซลเซียส	
	ปริมาณ ความร้อน รวม kJ/kg·h	อัตราการ เกิดความร้อน รวม kJ/kg	ปริมาณ ความร้อน รวม kJ/kg·h	อัตราการ เกิดความร้อน รวม kJ/kg	ปริมาณ ความร้อน รวม kJ/kg·h	อัตรา การเกิด ความร้อน รวม kJ/kg
Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	653.753	152.335	1,369.146	371.734	1,603.366	424.64
Na ₂ CO ₃	662.194	178.710	1,406.396	381.734	1,603.486	420.89
Na ₂ HPO ₄	674.235	169.872	1,467.968	410.195	1,603.125	413.31
Na ₃ PO ₄	693.423	174.748	1,307.180	331.001	1,606.696	471.13
KOH	713.512	188.499	1,364.759	361.979	1,883.311	522.08
NaOH	712.935	225.307	1,369.394	378.077	1,869.047	520.25

ตารางที่ 4 ตัวอย่างผลการทดสอบแคลอริเมตรีของตัวอย่างดินขาวของดินขาว
ตำบลบุญนาพัฒนา จังหวัดลำปาง

ผลกระทบของสารผสมเพิ่มแต่ละชนิดต่อปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของดินขาว

กลุ่มตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมสูงกว่าสารผสมเพิ่มชนิดอื่นอย่างชัดเจน ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส โดยดินขาวที่ผสมด้วยสาร KOH มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมสูงกว่าดินขาวที่ผสมด้วยสาร NaOH ในเกือบทุกตัวอย่างยกเว้น ดินขาวตำบลห้วยยาง จังหวัดระยอง ดินขาวตำบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนอง ดินขาวตำบลขุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานี ดินขาวตำบลจวบ จังหวัดนราธิวาส ที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 และ 60 องศาเซลเซียส ดินขาวที่ผสมด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมใกล้เคียงกันกับสารผสมเพิ่มชนิดอื่น ถึงแม้ว่าสารผสมเพิ่ม NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วย NaOH สูงกว่าอุณหภูมิของตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่น มีผลให้ปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนสูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ เมื่อเวลาผ่านไปความร้อนที่คายออกมาจะลดลงปริมาณความร้อน

และอัตราการเกิดความร้อนใกล้เคียงกับตัวอย่างอื่นๆ และเมื่อนำมาหาปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมก็จะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 – 7 และตารางที่ 4

ผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา ต่อปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของดินขาว

ตัวอย่างดินขาวตำบลผาจุก อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี มีอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินาสูงที่สุด คือ 5.46 มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมสูงที่สุดคือดินขาวผสมด้วย KOH ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส มีปริมาณ 1633.088 kJ/kg·h และ 419.184 kJ/kg ตามลำดับ แต่ในตัวอย่างดินขาวตำบลหาดส้มแป้น อำเภอเมือง จังหวัดระนองมีอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินาต่ำที่สุด คือ 1.57 มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมของดินขาวผสมด้วย KOH ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส มีปริมาณ 1610.968 kJ/kg·h และ 466.888 kJ/kg ตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา ไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของดินขาว

เอกสารอ้างอิง

- อมลวรรณ พิเศษวานิช. 2549. กลไกของการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกลวิธีโพลีเมอไรเซชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- American Society for Testing Materials. 2000. **Annual Book of ASTM Standard**. Vol. 04.08. Philadelphia: ASTM
- Ingles O.G. 1970. "Mechanisms of Clay Stabilization with Inorganic Acids and Alkalis." **Australia Journal of Soil Research**. Vol.8.: 81 – 95
- Ingles O.G. & Metcalf, J.B. 1972. **Soil Stabilization Principles and Practice**. Butterworths Pty. Limited., Australia.: 169 – 185
- Lee, Sung-Reol, Han, Yang-Su, & Choy, Jin-Ho, 2002. **2D → 3D Transformation of Layered Aluminosilicate Upon Base Treatment**, Vol. 151, pp. 343 – 346, Available from: www.scindirect.com