



ผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว

ว่าที่ ร.ต.สันติ ศิริพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

ผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว

ว่าที่ ร.ต.สันติ ศิริพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(รศ.วิชัย สัมพรปทานสกุล)

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์

.....
(ผศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์)

กรรมการ

.....
(ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว)

กรรมการ

.....
(รศ.ดร.พานิช วุฒิปุณย์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว

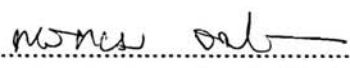
ว่าที่ ร.ค.สันติ ศิริพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

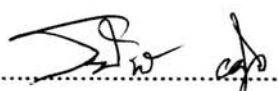
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....
(รศ.วิชัย สังวรปทานสกุล)

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์


.....
(ผศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์)

กรรมการ


.....
(ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว)

กรรมการ


.....
(รศ.ดร.พานิช วุฒิพุก)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สำนักหอสมุด
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน ของดินขาว
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	ว่าที่ ร.ต.สันติ ศิริพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.วิชัย สังวรปทานสกุล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาวจากแหล่งต่างๆภายในประเทศ 13 แหล่งโดยการผสมกับสารละลายต่างๆกัน เช่น Na_2SiO_3 , Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH แล้วกระตุ้นปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันภายใต้อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อวัดปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้วิธีแคลอริเมตรี ร่วมกับพิจารณาองค์ประกอบทางเคมี ผลการทดสอบพบว่าเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกกลุ่มตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส โดยดินขาวที่ผสมด้วยสาร KOH มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมสูงกว่าดินขาวที่ผสมด้วยสาร NaOH ในเกือบทุกตัวอย่างยกเว้น ดินขาวระยอง ดินขาวระนอง ดินขาวสุราษฎร์ธานี ดินขาวนราธิวาส ที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 และ 60 องศาเซลเซียส ดินขาวที่ผสมด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมใกล้เคียงกันกับสารผสมเพิ่มชนิดอื่น และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา ไม่มีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว

คำสำคัญ : ดินขาว / โพลิเมอไรเซชัน / แคลอริเมตรี / ปริมาณความร้อน / การปรับปรุงคุณภาพดินขาว

Thesis Title	Effect of Activated Temperature on Polymerization Reaction of Kaolin
Thesis Credits	12
Candidate	Act.sub.lt. Santi Siriphan
Thesis Advisor	Asso. Prof. Wichai Sungworapatansakul
Program	Master of Engineering
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2549

Abstract

This is a study of Effect of Activated Temperature on Polymerization Reaction of Kaolin from 13 locations in Thailand by mixing different alkali solution such as Na_2SiO_3 , Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH and NaOH. Polymerization reaction of the specimens were activated at 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 increases activated temperature the total heat development and total heat evolution rate increase. 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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รศ.วิชัย สังวรปทานสกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำที่มีคุณค่าและแนวความคิดที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งการแก้ไขปัญหาและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จและขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์ ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไ้ว และ รศ.ดร.พานิช วุฒิปุณย์ ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และช่วยกรุณาแก้ไขเพิ่มเติมให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ซ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ระบบโครงสร้างผลึกและแรงยึดเหนี่ยว	5
2.2 แร่ดินเหนียว	8
2.3 โครงสร้างแร่ดินเหนียว	13
2.4 กลุ่มแร่ดินเหนียว	16
2.5 แร่คาโอลิไนท์	18
2.6 ดินขาว	22
2.7 แหล่งดินขาวในประเทศไทย	25
2.8 การปรับปรุงคุณภาพดิน	27
2.9 โพลีเมอร์ไเรเซชัน และ โพลีเมอร์	31
2.10 สารผสมเพิ่มเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพโดยกลวิธีโพลีเมอร์ไเรเซชัน	33
2.11 แคลอริเมตรี	34

3. วิธีการศึกษา	45
3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	45
3.2 วิธีการทดสอบที่ใช้ในการศึกษา	56
4. ผลการศึกษา	68
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินขาว	68
4.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน	71
4.3 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของดินขาว	72
4.4 ผลการทดสอบแคลอรีเมตรีของตัวอย่างดินขาว	79
4.5 ผลการทดสอบค่าความจุความร้อนจำเพาะของตัวอย่างดินขาว	136
5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	137
5.1 สรุปผลการศึกษา	137
5.2 ข้อเสนอแนะ	139
เอกสารอ้างอิง	140
ภาคผนวก	142
ก ตารางแสดงคุณสมบัติทั่วไปของตัวอย่างดินแหล่งต่างๆ	142
ข ตารางแสดงผลการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ	144
ค ตารางแสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะของดินขาว, สารผสม และมวลผสม	149
ประวัติผู้วิจัย	155

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบของแร่ดินเหนียวในมิลลิอีควิวเลนซ์ต่อ 100 กรัม	11
2.2 การจำแนกประเภทของแร่ในกลุ่มซิลิเกต	14
2.3 การจำแนกกลุ่มแร่ดินเหนียว	17
2.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาวจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย กับมาตรฐานอังกฤษ	26
2.5 รายละเอียดผู้ได้รับประทานบัตรเหมืองผลิตแร่ดินขาว	26
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลบุญนาพัฒนา จังหวัดลำปาง	72
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลสันดอนแก้ว จังหวัดลำปาง	73
4.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลทุ่งฝาย จังหวัดลำปาง	73
4.4 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลบ้านสา จังหวัดลำปาง	74
4.5 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลผาจุ จังหวัดอุดรธานี	74
4.6 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานี	75
4.7 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลโคกไม้ลาย จังหวัดปราจีนบุรี	75
4.8 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลด่านทับตะโก จังหวัดราชบุรี	76
4.9 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลวังจันทร์ จังหวัดเพชรบุรี	76
4.10 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลห้วยยาง จังหวัดระยอง	77
4.11 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนอง	77
4.12 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลขุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานี	78
4.13 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลจวบ จังหวัดนครราชสีมา	78

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1	แกนของระบบผลึก 6
2.2	ลักษณะโครงข่ายผลึก 14 แบบ 7
2.3	ลักษณะโครงสร้างของแผ่นผลึกซิลิกา 13
2.4	ลักษณะโครงสร้างของแผ่นผลึกอลูมินา 16
2.5	โครงสร้างของแร่คาโอลิไนต์ 19
2.6	พันธะของแร่คาโอลิไนต์ 19
2.7	รูปขยายของโครงสร้างผลึกของแร่คาโอลิไนต์ 20
2.8	กำลังอัดของคาโอลิไนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์ 29
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียด สำหรับ Elastomer, Flexible, Plastic, Rigid Plastic และ Fiber 32
2.10	ผลแรงเคลื่อนไฟฟ้าของซีแบ็ก 37
2.11	ผลแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเพลเทียร์ 39
3.1	สถานที่ตั้งเหมืองดินขาวแหล่งต่างๆภายในประเทศ 45
3.2	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลบุญนาพัฒนา อำเภอมือง จังหวัดลำปาง 46
3.3	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลสันดอนแก้ว อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง 46
3.4	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลทุ่งฝาย อำเภอมือง-แจ้ห่ม จังหวัดลำปาง 47
3.5	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลบ้านสา อำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง 47
3.6	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลผาจุ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 48
3.7	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลโนนทอง อำเภอนาเยีย จังหวัดอุตรธานี 48
3.8	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลโคกไม้ลาย อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี 49

3.9	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลด่านทับตะโก อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี	49
3.10	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลวังจันทร์ อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี	50
3.11	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลห้วยยาง อำเภอแกลง จังหวัดระยอง	50
3.12	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลหาดส้มแป้น อำเภอเมือง จังหวัดระนอง	51
3.13	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลขุนทะเล อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี	51
3.14	ลักษณะดินขาวที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลจวบ อำเภอเกาะไอร่อง จังหวัดนราธิวาส	52
3.15	ลักษณะของสารโซเดียมซิลิเกต (Sodiumsiligate , Na_2SiO_3)	53
3.16	ลักษณะของสารไดโซเดียมคาร์บอเนต (Disodium Carbonate , Na_2CO_3)	53
3.17	ลักษณะของสารไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Disodium Hydrogen Orthophosphate , Na_2HPO_4)	54
3.18	ลักษณะของสารไตรโซเดียมฟอสเฟต (Trisodiums phosphate , Na_3PO_4)	54
3.19	ลักษณะของสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide , KOH)	55
3.20	ลักษณะของสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide , NaOH)	55
3.21	แผนผังการวิเคราะห์ธาตุโดย X-Ray Fluorescence(XRF)	57
3.22	อิเล็กทรอนิกส์ในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น	58
3.23	รังสีเอกซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร และอิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่ โดยคายรังสีเอกซ์ ที่มีพลังงานจำเพาะออกมา	59
3.24	สเปกตรัมรังสีเอกซ์	59
3.25	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลแบบ K	60
3.26	อุปกรณ์อ่านและบันทึกข้อมูล (Data logger)รุ่น 34970A	61
3.27	อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)	61
3.28	แสดงตัวอย่างสารประกอบเพื่อทดสอบแคลอรีเมตรี	62
3.29	แสดงตัวอย่างการทดสอบแคลอรีเมตรี	63
3.30	แคลอรีมิเตอร์และภาชนะป้องกันความร้อน	64

[illegible]

[illegible]

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ดินเป็นทรัพยากรที่มีอยู่ทั่วไปทุกท้องถิ่นบนผิวโลก มนุษย์รู้จักนำทรัพยากรดินขึ้นมาใช้งานในด้านต่างๆเป็นเวลานาน ดินขาวจัดเป็นวัตถุดิบที่มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในเชิงอุตสาหกรรมเช่น วัสดุก่อสร้าง กระจก สี ยาง ขาฆ่าแมลง และอื่น ๆ ซึ่งล้วนแต่ต้องการใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพดีอันมีอยู่อย่างจำกัด ประเทศไทยเองมีแหล่งดินขาวเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในงานก่อสร้างเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของดินขาว

การปรับปรุงคุณภาพของดินขาวโดยกลวิธีโพลิเมอไรเซชัน เป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มคุณลักษณะของดินขาวในท้องถิ่นให้มีคุณสมบัติทางกลเหมาะสมตามความต้องการ โพลิเมอร์ (Polymer) เป็นโมเลกุลใหญ่ที่สร้างขึ้นโดยการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลเล็ก ๆ จำนวนมาก โมเลกุลเล็ก ๆ จะรวมกันโดยเชื่อมต่อซึ่งกันและกัน และก่อตัวขึ้นเป็นโมเลกุลของโพลิเมอร์ อยู่ในรูปของโมโนเมอร์ (Monomer) และปฏิกิริยาระหว่างการรวมตัวนี้เรียกว่า โพลิเมอไรเซชัน (Polymerization)

อมลวรรณ พิษฐานิช [1] ได้ศึกษากลไกของการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวโดยกลวิธีโพลิเมอไรเซชัน โดยการนำตัวอย่างดินขาวจากแหล่งต่างๆในประเทศไทยผสมสารละลายต่างชนิดต่างๆ แล้วกระตุ้นปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน ภายใต้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบทิศทางเดียวจนถึงอายุบ่ม 56 วัน ร่วมกับวิธีแคลอริเมตรี เพื่อวัดปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของดินขาวและสารผสมเพิ่ม ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ พบว่าในระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพจะเกิดปฏิกิริยาเริ่มแรกหลายรูปแบบ อีกทั้งปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมของดินขาวและสารผสมเพิ่มมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดแบบทิศทางเดียว

อุณหภูมิกระตุ้นในช่วง 24 ชั่วโมงแรก ชนิดของสารละลายต่าง และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินาของดินขาวจากแหล่งต่างๆในประเทศไทย เป็นตัวแปรควบคุมที่จะทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาวและสารผสมเพิ่ม ซึ่งแสดงในรูปของปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมของปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันโดยใช้วิธีแคลอริเมตรี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยเรื่อง “ผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว” ซึ่งมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อศึกษาปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของดินขาวจากแหล่งต่างๆในประเทศไทยและสารผสมเพิ่มโดยใช้วิธีแคลอริเมตริ
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของสารผสมเพิ่มแต่ละชนิดต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว
4. เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา ต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว
5. เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา ต่อค่าความจุความร้อนจำเพาะของดินขาว

1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

การศึกษา “ผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว” มีขอบเขตของการศึกษาวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.3.1 ตัวอย่างดินขาวที่นำมาใช้ในการทดสอบ ใช้ดินขาวจากแหล่งต่างๆในประเทศไทยดังต่อไปนี้

1. ตำบลบุญนาควพัฒนา อำเภอมะนัง จังหวัดลำปาง
2. ตำบลสันดอนแก้ว อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง
3. ตำบลทุ่งฝาย อำเภอมือง-แจ้ห่ม จังหวัดลำปาง
4. ตำบลบ้านสา อำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง
5. ตำบลผาจุ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี

6. ตำบลโนนทอง อำเภอนาเยีย จังหวัดอุครธานี
7. ตำบลโคกไม้ลาย อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี
8. ตำบลด่านทับตะโก อำเภोजอมบึง จังหวัดราชบุรี
9. ตำบลวังจันทร์ อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี
10. ตำบลห้วยยาง อำเภอแกลง จังหวัดระยอง
11. ตำบลหาดส้มแป้น อำเภอเมือง จังหวัดระนอง
12. ตำบลขุนทะเล อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี
13. ตำบลจวบ อำเภอเกาะไอร่อง จังหวัดนครราชสีมา

1.3.2 สารผสมเพิ่มที่นำมาใช้ผสมกับตัวอย่างดินขาว ที่อัตราส่วนผสม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังต่อไปนี้

1. โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate , Na_2SiO_3)
2. ไดโซเดียมคาร์บอเนต (Disodium Carbonate , Na_2CO_3)
3. ไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Disodium Hydrogen Orthophosphate , Na_2HPO_4)
4. ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Trisodiums phosphate , Na_3PO_4)
5. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH)
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide , NaOH)

1.3.3 อุณหภูมิกระตุ้นในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการปรับปรุงคุณภาพโดยกลวิธีโพลิเมอไรเซชันคือ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ

1.3.4 ศึกษาปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวจากแหล่งต่างๆในประเทศไทยด้วยกลวิธีโพลิเมอไรเซชัน ทดสอบโดยวิธีแคลอริเมตริแสดงในหน่วย กิโลจูล/กิโลกรัม/ชั่วโมง

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

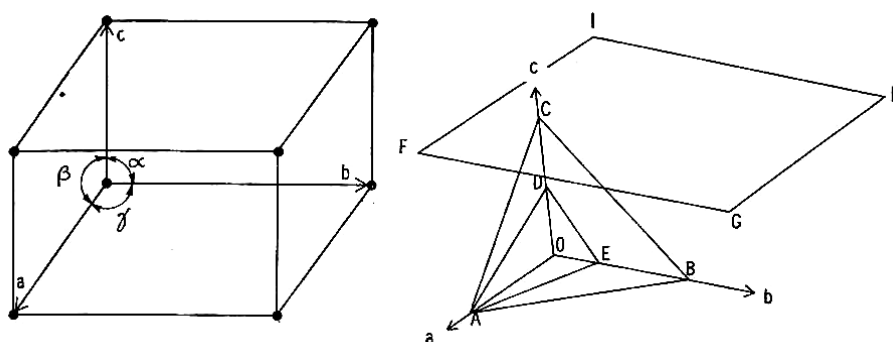
2.1 ระบบโครงสร้างผลึกและแรงยึดเหนี่ยว [2]

ดินประกอบด้วยอนุภาคแข็ง ของเหลว และก๊าซ มีสภาพแปรผันจากตะกอนอินทรีย์อ่อนมากจนถึงดินเหนียวอัดตัวได้ต่ำ และจากทรายจนถึงหินเนื้ออ่อน อนุภาคแข็งจะมีขนาดแปรผันจากหินก้อนขนาดใหญ่จนถึงอนุภาคขนาดเล็กมากซึ่งจะมองเห็นได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเท่านั้น มีรูปร่างแปรผันจากค่อนข้างกลม เป็นก้อนเหลี่ยม เป็นแผ่นหนา เป็นเกล็ด จนถึงเป็นเส้นรูปเข็ม และมีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ไม่เป็นผลึกปนอยู่ในดินเนื้อละเอียดส่วนใหญ่ ดินอาจเป็นธาตุที่ประกอบด้วยธาตุที่เป็นส่วนประกอบของเปลือกโลก อนุภาคแข็งส่วนใหญ่จะเป็นออกซิเจน ซิลิกอน ไฮโดรเจน อลูมิเนียม แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และคาร์บอน ในปริมาณกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ อะตอมของธาตุดังกล่าวจะรวมตัวกันอย่างเป็นระบบในรูปของผลึกแร่ในดิน

2.1.1 ระบบโครงสร้างผลึก

ระนาบของผิวหน้าและแกนสมมาตรภายนอกของผลึกจะทำให้เกิดแรงดึงดูด ตามหลักวิทยาศาสตร์ คุณสมบัติภายนอกเป็นผลเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวจากภายใน ผลึกจะประกอบไปด้วยอะตอมที่รวมตัวกันอย่างเป็นระเบียบแบบ 3 มิติ ผลลัพธ์แสดงออกมาในรูปของจุดที่ถูกกำหนดและช่องว่างระหว่างจุด การรวมตัวกันเป็นผลึกอาจขยายไปถึงอะตอมข้างเคียง โครงสร้างย่อยหน่วยเล็ก ๆ ของผลึกจะมีคุณสมบัติเหมือนกันทั้งผลึกที่อยู่ในหน่วยเซลล์เดียวกัน โดยถูกกำหนดให้อ้างอิงจากแกนของจุดที่เลือกให้เป็นจุดเริ่มต้นในเทอมของแกนมุมภายในและเทอมของระยะทางระหว่างจุด ระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเป็นระบบของผู้ศึกษาเรื่องผลึกของประเทศอังกฤษเป็นที่รู้จักกันว่า Miller Indices โดยความยาวของหน่วยเซลล์เรียกว่า a , b และ c ทุก ๆ ระนาบ ซึ่งตัดแต่ละอะตอมที่ติดกันของ a/h , b/k และ c/l เมื่อ a , b และ c เป็นหน่วยความยาวของแต่ละแกนบนระนาบ ทำให้เกิดส่วนตัดย่อย ๆ บนแต่ละแกนของ $1/h$, $1/k$ และ $1/l$ และระนาบของ Miller Indices คือ (hkl) ถ้าระนาบขนานกันไปกับแกนจะถูกกำหนดสัญลักษณ์ที่สัมพันธ์กับแกนนั้นเป็นศูนย์

ระนาบที่อยู่บนแกน a จะขนานกับแกน b และ c มีชื่อว่า (100) เช่นเดียวกันระนาบที่ขนานกับแกน a และ c เรียกว่าระนาบ (010) และเปรียบเทียบกับระนาบของฐานซึ่งตัดกับแกน c ถูกกำหนดสัญลักษณ์ว่า (001) ช่องว่างระหว่างระนาบที่ฐานของโครงสร้างแร่ดินเหนียวนี้มีความสำคัญมากในการจำแนกชนิดของแร่ดินเหนียว และในการจำแนกโดยวิธี X-Ray Diffraction



รูปที่ 2.1 แกนของระบบผลึก [3]

โดยทั่วไปผลึกของวัสดุต่าง ๆ ในธรรมชาติมีโครงสร้างที่แน่นอน ถ้ามองลึกเข้าไปถึงระดับอะตอม ผลึกประกอบด้วยอะตอม และกลุ่มอะตอมที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมีมุมและระยะห่างระหว่างอะตอมที่แน่นอนและซ้ำกันในทิศทาง ในการศึกษาโครงสร้างผลึกจะศึกษารูปแบบของโครงข่าย (Lattice) ที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตแน่นอน ซึ่งต้องอาศัยหลักความสมมาตรกัน โครงข่ายของผลึกแบ่งออกเป็น 7 ระบบ และมีลักษณะการจัดเรียงอะตอมในโครงสร้างได้ 14 แบบด้วยกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2

2.1.1.1 ระบบไตรคลินิก (Triclinic system) มีรูปแบบโครงข่ายเพียงแบบเดียว ขนาดความยาวของแกนและมุมทั้ง 3 ไม่เท่ากัน

2.1.1.2 ระบบโมโนคลินิก (Monoclinic system) มีรูปแบบโครงข่าย 2 แบบ

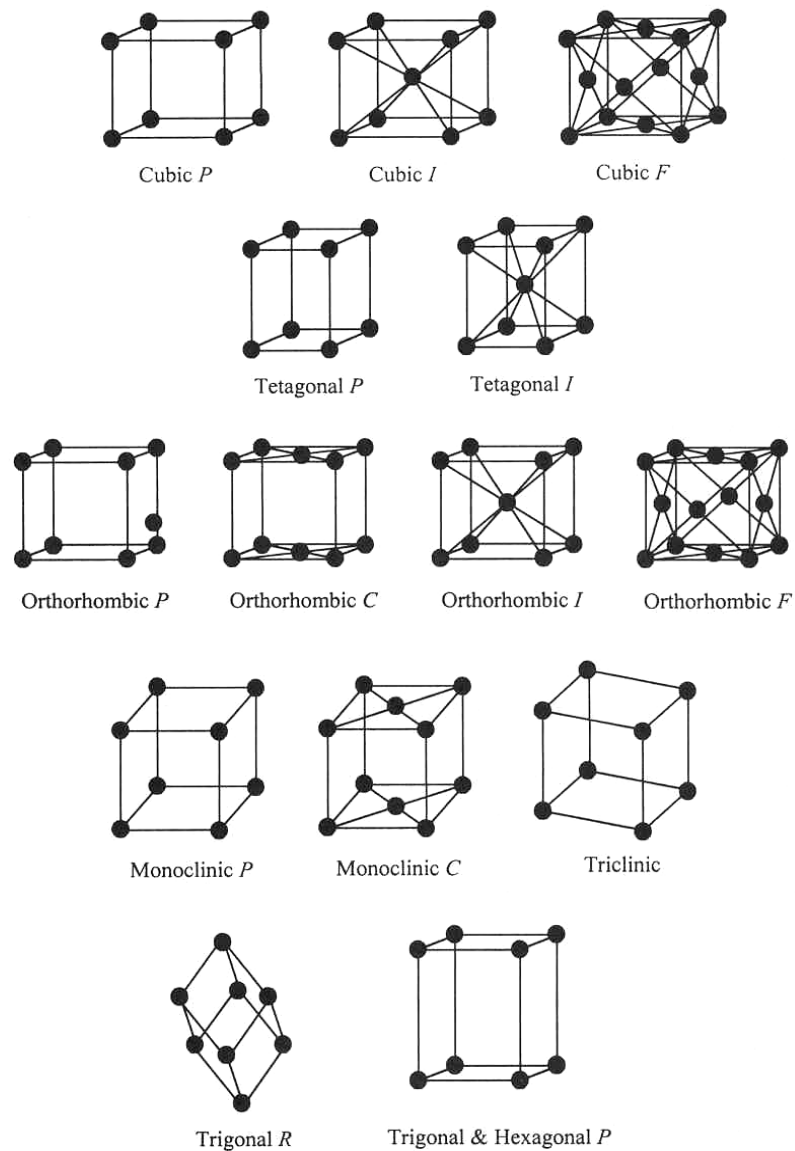
2.1.1.3 ระบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic system) มีรูปแบบโครงข่าย 4 แบบ

2.1.1.4 ระบบเตตระโกนอล (Tetragonal system) มีรูปแบบโครงข่าย 2 แบบ

2.1.1.5 ระบบลูกบาศก์ (Cubic system) มีรูปแบบโครงข่าย 3 แบบ

2.1.1.6 ระบบไตรโกนอล (Trigonal system) มีรูปแบบโครงข่ายเพียงแบบเดียวเรียกว่า Rhombohedral

2.1.1.7 ระบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal system) มีรูปแบบโครงข่ายแบบเดียว



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงข่ายผลึก 14 แบบ [2]

2.1.2 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค [2]

อนุภาคแต่ละอนุภาคที่รวมตัวกันเกิดขึ้นเป็นผลึกอาจจะประกอบด้วยโมเลกุล อะตอมหรือไอออน จะยึดเกาะกันด้วยแรงดึงดูดจากกระแสไฟฟ้าตามธรรมชาติ โดยแรงดึงดูดจะมีมากกว่าแรงผลัก และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออนุภาคเคลื่อนมาติดกัน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม สามารถจำแนกตามลักษณะการยึดเหนี่ยวกันระหว่างอิเล็กตรอนได้ 3 อย่างคือ

2.1.2.1 พันธะไอออนิก (Ionic Bonds) เป็นแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของประจุลบและประจุบวก

2.1.2.2 พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bonds) เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมซึ่งเกิดจากแรงระหว่างประจุที่ตรงกันข้ามกันของไอออนบวกและไอออนลบและการเปลี่ยนแปลงของแรงซึ่งมีผลมาจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างอะตอมข้างเคียง เมื่ออะตอมมาอยู่รวมกัน จะไม่มีการสูญเสียอิเล็กตรอน

2.1.2.3 พันธะโลหะ (Metallic Bonds) เป็นการยึดเหนี่ยวกันอย่างหลวม ๆ ของวาเลนซ์อิเล็กตรอน พันธะชนิดนี้ไม่มีความสำคัญมากนักสำหรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของแร่ดินเหนียว

โดยส่วนใหญ่แล้วผลึกของดินเหนียวจะยึดเกาะกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวพันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์ แต่นอกจากพันธะแบบไอออนิกและแบบโควาเลนต์แล้ว ยังมีพันธะกำลังต่ำอีก 2 ชนิด คือ พันธะของไฮโดรเจน (The Hydrogen Bond) และพันธะแวนเดอร์วาล (van der Waals Bonds) แต่ก็มีผลเพียงพอที่จะเป็นตัวกำหนดลักษณะการเรียงตัวชั้นสุดท้ายของอะตอมในของแข็ง

2.2 แร่ดินเหนียว [2]

ดินเหนียวเป็นดินที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก โดยส่วนใหญ่แล้วหมายถึง ดินที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน แต่บางครั้งดินเหนียวอาจมีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 2 - 5 ไมครอน และในขณะเดียวกันดินชนิดอื่นก็อาจมีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน ได้เช่นกัน ฉะนั้นในการพิจารณาถึงแร่ดินเหนียวจึงควรพิจารณาถึงแร่ที่เป็นองค์ประกอบในดินด้วย แต่ถ้ากล่าวถึงส่วนประกอบของแร่ในดินแล้ว แร่ดินเหนียวประกอบด้วยกลุ่มของแร่ตั้งแต่ 1 กลุ่มขึ้นไป ส่วนใหญ่มักประกอบด้วยแร่ในกลุ่มอลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminium Silicate Minerals) ซึ่งอาจจะมีแมกนีเซียมหรือเหล็กเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอลูมิเนียม โดยแร่ดินเหนียวจะมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

2.2.1 รูปร่างและขนาดของแร่ดินเหนียว

รูปร่างอนุภาคของแร่ดินเหนียวมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ ประกบซ้อนกันอยู่เป็นจำนวนมาก อนุภาคของแร่ดินเหนียวทุกชนิดส่วนใหญ่จะคงไว้ในลักษณะผลึก บางชนิดจะมีรูปร่างเป็นแผ่นหกเหลี่ยม ซึ่งสามารถมองเห็นเหลี่ยมและมุมของแผ่นหกเหลี่ยมได้อย่างชัดเจน บางชนิดเป็นแผ่นบาง ๆ ส่วนขนาดอนุภาคของแร่ดินเหนียวนั้นแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิด

2.2.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ

เนื่องจากอนุภาคของแร่ดินเหนียวมีขนาดเล็กมากและโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มที่เป็นแผ่นแบนบาง จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักสูงมากกว่าอนุภาคที่มีรูปร่างอื่นๆ เช่น ทรงกลม ลูกบาศก์ หรือเกล็ด โดยมีพื้นที่ผิวแตกต่างกันอย่างมาก อนุภาคทรงกลมจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุด ส่วนอนุภาคที่เป็นรูปเกล็ดจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด จะเห็นได้ว่าแร่ดินเหนียวมีรูปร่างที่ส่งเสริมให้พื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด ที่กล่าวมานั้นเป็นพื้นที่ผิวภายนอก แต่บางชนิดยังมีพื้นที่ผิวภายในอีกด้วย โดยเป็นพื้นที่ผิวที่อยู่ระหว่างแผ่นผลึกของแร่ดินเหนียวที่ซ้อนทับกันอยู่เป็นอนุภาค ดังนั้นแร่ดินเหนียวพวกนี้จะมีพื้นที่ผิวทั้งหมดสูงมาก

2.2.3 ความแข็งแรงและสภาพความเหนียว

แร่ดินเหนียวแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเกี่ยวกับความแข็งแรงและสภาพความเหนียวแตกต่างกันมาก โดยขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียว ความแข็งแรงหมายความว่า ความสามารถในการยึดเกาะกันได้ระหว่างอนุภาคดินเหนียว การที่ดินเหนียวชนิดหนึ่งมีความแข็งแรงสูงก็เนื่องจากอนุภาคของดินเหนียวมีพื้นที่ผิวให้น้ำเกาะยึดอยู่ได้มากจึงทำให้อนุภาคของดินเหนียวนั้นยึดเกาะกันได้ดีด้วย ดังนั้นดินที่มีความเหนียวซึ่งมีความแข็งแรงสูงจะมีสภาพเหนียวและเกาะติดมือ เมื่อมีความชื้นจะมีความอ่อนนุ่มขึ้นให้เป็นรูปต่าง ๆ และคงสภาพเช่นนั้นอยู่ได้ คุณสมบัตินี้เราเรียกว่าความเหนียว (plasticity) แร่ดินเหนียวบางชนิดที่มีความแข็งแรงต่ำก็มีพื้นที่ผิวน้อยจึงมีน้ำเกาะยึดอยู่ที่ผิวน้อยที่จะช่วยยึดอนุภาคของดินเหนียวอื่นๆ ที่อยู่ติดไป ดังนั้นจึงมีผลทำให้การยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคดินเหนียวต่ำถึงแม้ว่าดินนั้นจะมีความชื้นอยู่มากก็ตาม จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติด้านความเหนียวของดินนี้จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวเป็นอย่างมาก ดินเหนียวที่มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงจะเป็นดินเหนียวพวกที่มีพื้นที่ผิวมากจึงมีโอกาสดูดยึดอนุภาคของน้ำไว้ที่ผิวได้มาก การเกาะกันระหว่างอนุภาคของดินก็จะเกิดขึ้นมากตามไปด้วย

2.2.4 การขยายตัวและการหดตัว

ดินเหนียวบางชนิดมีคุณสมบัติด้านการขยายตัวได้สูงมาก บางชนิดจะขยายตัวได้น้อย ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้างของดินเหนียว โดยเฉพาะแร่ดินเหนียวบางชนิดที่แผ่นผลึกซ้อนทับกันเป็นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างชั้นค่อนข้างกว้างไม่เกาะยึดกันเหนียวแน่นนัก โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย และเมื่อน้ำสามารถเข้าไปยึดเกาะอยู่กับพื้นที่ผิวภายในระหว่างชั้น (Interlayer) ของดินเหนียวเหล่านี้จะเป็นผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นก็จะเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงมีผลให้ดินเหนียวกลุ่มนี้จะพองหรือขยายตัวได้ และถ้าทำให้ดินเหนียวแห้งลงน้ำที่เกาะอยู่ในระหว่างชั้นของดินเหนียวก็จะหลุดโดยการระเหยออก จะเป็นผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นดินเหนียวนั้นลดลง

2.2.5 การแทนที่แบบไอโซมอร์ฟัส(Isomorphous Substitution)

การแทนที่แบบไอโซมอร์ฟัส (Isomorphous Substitution) เป็นปัจจัยสำคัญต่อโครงสร้างและพฤติกรรมของแร่ดินเหนียวในโครงสร้างของแผ่น gibbsite วาเลนซ์จำนวน 2 ใน 3 ของแผ่นผลึก 8 หน้า (octahedral) เท่านั้นที่จะถูกเติมเต็มและออลอนบวกทั้งหมดเป็นอลูมิเนียม สำหรับโครงสร้างของแผ่น brucite วาเลนซ์ทั้งหมดของแผ่นผลึก 8 หน้า (octahedral) ทั้งหมดจะถูกเติมเต็มด้วยแมกนีเซียม สำหรับโครงสร้างของ ซิลิกาที่ว่างทั้งหมดของแผ่นผลึก 4 หน้า (tetrahedral) ทั้งหมดก็จะถูกเติมเต็มด้วยซิลิกอน อย่างไรก็ตามในแร่ดินเหนียวโดยธรรมชาติตำแหน่งของแผ่นผลึก 4 หน้า (tetrahedral) และแผ่นผลึก 8 หน้า (octahedral) จะถูกจับยึดด้วยออลอนบวกอื่นที่แตกต่างไปจากโครงสร้างพื้นฐาน ตัวอย่างง่ายๆ ที่เห็นได้ชัดคืออลูมิเนียมจะไปแทนที่ซิลิกอนบางตัว แมกนีเซียมแทนที่อลูมิเนียม เหล็กแทนที่แมกนีเซียม การที่ตำแหน่งของแผ่นผลึก 4 หน้า (tetrahedral) และแผ่นผลึก 8 หน้า (octahedral) ถูกแทนที่ด้วยออลอนบวกอื่นนอกเหนือจากอลูมิเนียมแล้วไม่ทำให้โครงสร้างของผลึกเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเรียกว่าการแทนที่แบบไอโซมอร์ฟัส (Isomorphous Substitution)

การแทนที่แบบไอโซมอร์ฟัส (Isomorphous Substitution) ในแร่ดินเหนียวทั้งหมดทำให้อนุภาคดินเหนียวมีประจุลบ เพื่อให้อนุภาคเป็นกลางออลอนบวกจะถูกดูดซับไว้ตามผิวและขอบในดินเหนียว บางชนิดออลอนบวกจะถูกดูดซับไว้ระหว่างหน่วยเซลล์ ออลอนบวกเหล่านี้เรียกว่าออลอนบวกที่แลกเปลี่ยนได้ ปริมาณออลอนที่แลกเปลี่ยนได้เพื่อทำให้อนุภาคดินเหนียวมีความเป็นกลาง เรียกว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนออลอนบวก (Cation Exchange Capacity, CEC)

2.2.6 การแลกเปลี่ยนออลอน (Ion Exchange)

แร่ดินเหนียวมีคุณสมบัติในการดูดซับออลอนลบ (Anions) และออลอนบวก (Cation) และเก็บรักษาไว้ใช้ในการแลกเปลี่ยน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนออลอนบวกและออลอนลบนี้จะเกิดจากการทำปฏิกิริยา เช่น กับออลอนของน้ำ การแลกเปลี่ยนออลอนนี้จะเกิดรอบ ๆ ด้านนอกของ ซิลิกา – อลูมินา (Silica – Alumina) ของโครงสร้างแร่ดินเหนียว และโดยปกติปฏิกิริยาจะไม่ส่งผลกับโครงสร้างของซิลิกา – อลูมินา คุณสมบัติของความสามารถในการแลกเปลี่ยนนั้น สามารถวัดได้ในเทอมของ มิลลิอีควิวาเลนซ์ต่อกรัม (Milliequivalent per gram) หรือมากกว่าความถี่ต่อ 100 กรัม 1 อีควิวาเลนซ์ของ Na^+ แสดงเป็น Na_2O จะรวมน้ำหนักได้ 31 และ 1 meq./100 g. จะเท่ากับ 0.031 เปอร์เซ็นต์ Na_2O ความสามารถในการแลกเปลี่ยนจะหาได้ที่สภาวะเป็นกลางคือมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 7

2.2.7 การแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange)

อนุภาคของดินเหนียวจะมีประจุลบอยู่ที่ผิวหน้าเป็นจำนวนมาก และเมื่ออยู่ในดินตามธรรมชาติก็จะมี การดูดซับประจุบวกไว้เป็นจำนวนมากเท่ากับประจุลบที่มีอยู่ จึงทำให้เกิดสภาพที่มีประจุอยู่สองชั้น ขึ้นใน ได้แก่ชั้นประจุลบที่ผิวหน้าของดินเหนียวและชั้นนอกได้แก่ประจุบวกที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของ ดินเหนียว ดังนั้นจะเห็นว่าอนุภาคของดินเหนียวนี้มีลักษณะคล้าย ๆ กันกับประจุลบนั้นเองและ สามารถที่จะเคลื่อนตัวไปยังขั้วบวกได้เช่นเดียว ช่วงของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน บวกของแร่ดินเหนียวดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบของแร่ดินเหนียวในมิลลิอีควิวาเลนซ์ ต่อ 100 กรัม [4]

แร่ดินเหนียว	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (มิลลิอีควิวาเลนซ์ / 100 กรัม)
Kaolinite	3 – 15
Halloysite 2H ₂ O	5 – 10
Halloysite 4H ₂ O	40 – 50
Smectite	80 – 150
Illite	10 – 40
Vermiculite	100 – 150
Chlorite	10 – 40
Sepiolite – Attapulgit – Palygorskite	3 – 15

ที่มาของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของแร่ดินเหนียวแบ่งได้เป็น 3 ประการคือ

ก. การแตกสลายของพันธะ (Broken Bond) รอบ ๆ ขอบของหน่วยซิลิกา – อลูมินา ซึ่งเกิดขึ้นโดย ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขซึ่งเกิดความไม่สมดุลในการดูดซึมไอออนลบ แรงยึดเหนี่ยวที่เสียหายจะไม่ แสดงแนวเกาะที่ผิวหน้า ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวเกาะในแนวตั้งขนานกับแนวแกน c ของชั้น แร่ดินเหนียว และระนาบแนวนอนตั้งฉากกับแกน c ในแร่ Sepiolite – Palygorskite – Attapulgit ปริมาณของแรงยึดเหนี่ยวที่แตกหักเนื่องจากความสามารถในการแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นนั้นมักจะเพิ่ม สูงขึ้นเมื่อขนาดของเม็ดเล็กลง และทำให้เกิดการเสียรูปไปเมื่อสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว และกล่าว ว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเป็นผลึกลดลง

ข. การแทนที่ในช่องว่างของโครงสร้าง (Substitutions within The Lattice Structure) การแทนที่ในช่องว่างของอลูมินัมที่มีวาเลนซ์สามไปยังซิลิกอนที่มีวาเลนซ์สี่ในแผ่นผลึก 4 หน้า (tetrahedral) และออลอนที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่าโดยเฉพาะแมกนีเซียมไปยังอลูมินัมวาเลนซ์สามในแผ่นผลึก 8 หน้า (octahedral) ผลที่ได้จะทำให้ประจุในโครงสร้างของแร่ดินเหนียวบางชนิดไม่สมดุล แต่จะสามารถทำให้สมดุลได้โดยการดูดซับออลอนบวก

ผลจากการแลกเปลี่ยนออลอนบวกที่ได้จากการแทนที่ในช่องว่างนั้น ส่วนมากแล้วจะเกิดแนวกะเทาะที่ผิวหน้าของแร่ดินเหนียว ผลของประจุจากการแทนที่ในแผ่นผลึก 8 หน้า (octahedral) จะเกิดมากกว่าการแทนที่ในช่องว่างของแผ่นผลึก 4 หน้า (tetrahedral) เพราะการแทนที่ในช่องว่างจะเป็นแรงยึดเหนี่ยวโดยแรงที่แข็งแกร่งกว่า นั่นคือ ผลที่ได้จากการแทนที่ในแผ่นผลึก 8 หน้า (octahedral) ในบางกรณี ออลอนบวกอยู่ได้ด้วยแรงที่เกิดจากการแทนที่ของอลูมินัมในซิลิกอนคล้ายกับการเกิดการแทนที่โดยไม่ให้เกิดการแลกเปลี่ยน สำหรับในแร่ดินเหนียวการแทนที่ในชั้นแผ่นผลึก 8 หน้า (octahedral) เป็นเหตุผลหลักของการเกิดความสามารถในการแลกเปลี่ยนออลอน

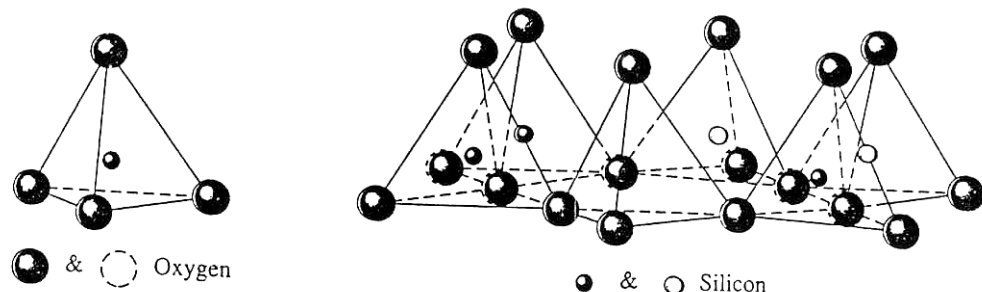
ค. ไฮโดรเจนที่หลุดออกจากไฮดรอกซิล (The Hydrogen of The Hydroxyls) ซึ่งเป็นการรวมส่วนของโครงสร้างที่สูญเสียพันธะ ซึ่งสามารถที่จะแทนที่ได้ด้วยออลอนบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ อย่างไรก็ตาม เหมือนว่าไฮโดรเจนนั้นจะยึดกันแน่นเมื่อเปรียบเทียบกับพันธะที่เสียหาย ซึ่งนั่นมีส่วนทำให้เกิดการเสียหายของแรงยึดเหนี่ยว และด้วยเหตุนี้โดยหลักการแล้วไม่สามารถจะเกิดการแทนที่ได้

2.3 โครงสร้างแร่ดินเหนียว [4]

ดินเหนียวบนผิวโลกโดยส่วนใหญ่คือประมาณ 95% โดยปริมาตรและ 75% โดยน้ำหนักจะเป็นแร่ดินเหนียวซิลิเกต ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของธาตุซิลิกอนและอะตอมของออกซิเจนซึ่งรวมตัวกันเป็นหน่วยโครงสร้างพื้นฐานที่อยู่ในรูปของ Tetrahedral ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิดด้วยกัน คือ Silica Tetrahedral และ Alumina-Magnesium Octahedral

2.3.1 แผ่นผลึก 4 หน้าของซิลิกา (Silica Tetrahedral Sheet)

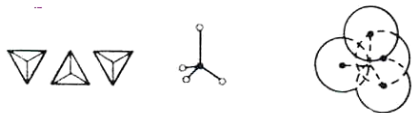
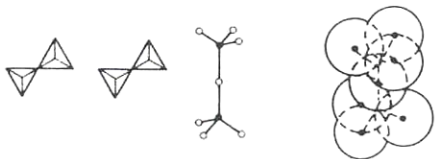
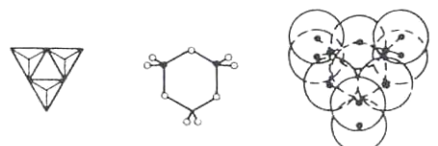
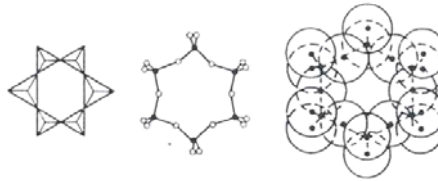
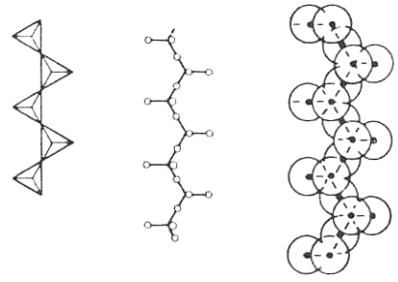
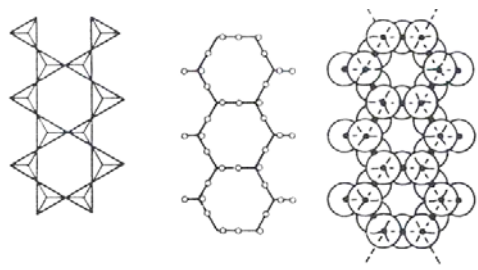
หน่วยโครงสร้างพื้นฐานที่ประกอบด้วยไอออนของธาตุซิลิกอน 1 อะตอมล้อมรอบด้วยธาตุนอกซิเจน 4 อะตอม อัดตัวรวมกันโดยมีซิลิกอนอยู่ตรงกลางเกิดเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมถูกเรียกว่าหน่วยผลึก 4 หน้า (Silica Tetrahedral Unit) ได้เป็นสูตรทางเคมีคือ $(\text{SiO}_4)^{4-}$ หน่วยโครงสร้างพื้นฐานเหล่านี้จะยึดเกาะเชื่อมกันต่อเนื่องรวมแล้วเรียกว่า แผ่นซิลิกาหรือ Silica Tetrahedral Sheet $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ โดยออกซิเจน 3 อะตอมที่ฐานของ Silica Tetrahedral Unit แต่ละหน่วยจะถูกใช้ร่วมกันเกิดเป็นโครงข่ายรูปหกเหลี่ยม คล้ายรวงผึ้งตรงกลางเป็นโพรง ฐานของ Silica Tetrahedral Sheet จะอยู่ในระนาบเดียวกัน ส่วนยอดจะชี้ไปในทิศทางเดียวกัน โครงสร้างจะมีรูปแบบซ้ำ ๆ ไม่สิ้นสุด



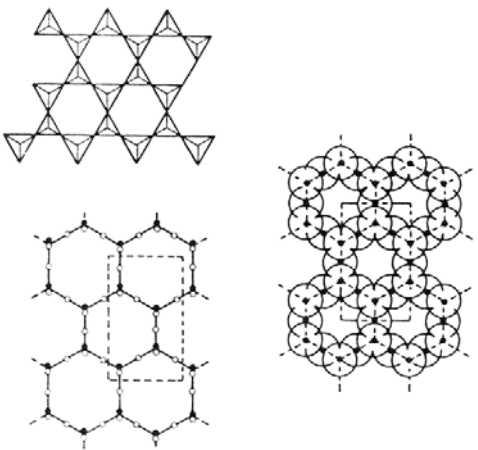
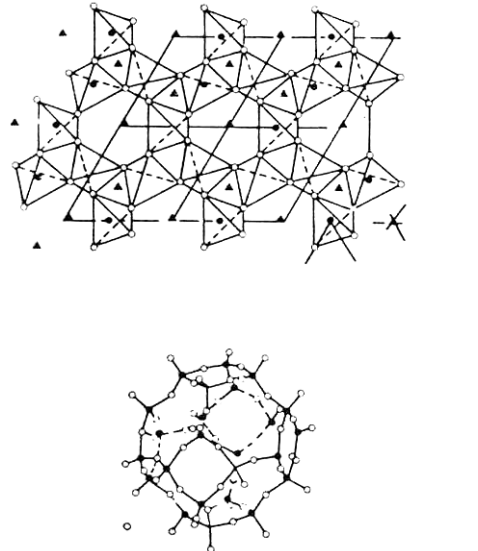
รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของแผ่นผลึกซิลิกา[4]

การรวมตัวกันของออกซิเจนและซิลิกอน โดยแรงยึดเหนี่ยวพันธะโควาเลนต์และพันธะไอออนิกทั้งสอง ด้วยสัดส่วนออกซิเจนต่อซิลิกอนอัตราส่วนต่าง ๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบ (Polymerization) ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับการจำแนกประเภทของสารประกอบซิลิเกตซึ่งสามารถจำแนกได้ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจำแนกประเภทของแร่ในกลุ่มซิลิเกต [3]

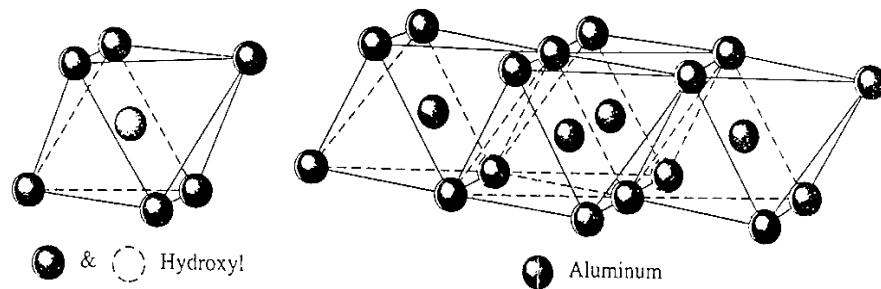
กลุ่มแร่ซิลิเกต	ไดอะแกรมของโครงสร้าง	สมการเคมี	อัตราส่วน ออกซิเจน:ซิลิกอน
Nesosilicates หรือ Independent		$(\text{SiO}_4)^{4-}$	4:1
Sorosilicates หรือ Double		$(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$	7:2
Cyclosilicates หรือ Ring		$(\text{Si}_3\text{O}_9)^{6-}$	3:1
		$(\text{Si}_6\text{O}_{18})^{12-}$	3:1
Inosilicates หรือ Chains		$(\text{Si}_x\text{O}_{3x})$	3:1
Inosilicates หรือ Bands		$(\text{Si}_4\text{O}_{11})$	11:4

ตารางที่ 2.2 การจำแนกประเภทของแร่ในกลุ่มซิลิเกต (ต่อ)

กลุ่มแร่ซิลิเกต	ไดอะแกรมของโครงสร้าง	สมการเคมี	อัตราส่วน ออกซิเจน:ซิลิกอน
Phyllosilicates หรือ Sheet		(Si_2O_5)	5:2
Tectosilicates หรือ Framework		(SiO_2)	2:1

2.3.2 แผ่นผลึก 8 หน้าของอลูมินา (Alumina octahedral sheet)

สำหรับ Alumina octahedral sheet โครงสร้างแผ่นแบบนี้ประกอบด้วยการรวมตัวกันของหน่วยผลึก 8 หน้าของอลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม (alumina or magnesium octahedral unit) หลาย ๆ หน่วยจะได้ octahedral sheet โดยแต่ละ octahedral unit จะประกอบด้วยไฮดรอกซิลหรือออกซิเจนจำนวน 6 อะตอมล้อมรอบอลูมิเนียม 1 อะตอมอัดรวมตัวกันเกิดเป็นรูปทรงหกเหลี่ยมที่มีด้านแปดด้าน ถ้าอ็อกซิเจนมีวาเลนซ์เท่ากับ 3 เช่น อลูมิเนียม อ็อกซิเจนจำนวน 2 ใน 3 อ็อกซิเจนเท่านั้นที่จะถูกจับคู่ โครงสร้างเหล่านี้เรียกว่า dioctahedral ในกรณีของอลูมิเนียมจะได้ส่วนประกอบเป็น $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ จะถูกเรียกว่า aluminum octahedral sheet หรือบางครั้งถูกเรียกว่า gibbsite sheet แต่ในบางครั้งแมกนีเซียมจะเข้าไปแทนที่อลูมิเนียมในหน่วยของ octahedral unit แมกนีเซียมมีวาเลนซ์เท่ากับ 2 อ็อกซิเจนทั้งหมดก็ จะถูกจับคู่ โครงสร้างเหล่านี้เรียกว่า trioctahedral จะได้ส่วนประกอบเป็น $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ ในกรณีนี้จะเรียกว่า magnesium octahedral sheet หรือ brucite sheet



รูปที่ 2.4 ลักษณะ โครงสร้างของแผ่นผลึกอลูมินา [4]

2.4 กลุ่มแร่ดินเหนียว

จากหน่วยโครงสร้างพื้นฐานของแร่ดินเหนียวที่มีการจับยึดตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ ทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างของแร่ดินเหนียวออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ กลุ่มไร้ระบบผลึกและกลุ่มมีระบบผลึก กลุ่มไร้ระบบผลึกหรืออสัณฐาน (Amorphous) ส่วนใหญ่ที่พบคือแร่แอลโลเฟน (Allophane group) สำหรับแร่ดินเหนียวที่มีระบบผลึก (Crystalline) ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดคือ

2.4.1 กลุ่มแร่คาโอลิไนท์ (Kaolinite Group)

แร่กลุ่มนี้เป็นแร่ที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 1:1 คือมีแผ่นอลูมินาสลับกับแผ่นซิลิกาอย่างละหนึ่งแผ่น ประกอบเป็นหนึ่งหน่วย แร่กลุ่มนี้ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวจำพวก kaolinite, dickite, nacrite, chrysotile, lizardite, halloysite

2.4.2 กลุ่มแร่สเมกไทต์ (Smectite Group)

แร่กลุ่มนี้มีการจัดเรียงตัวแบบ 2:1 เช่นเดียวกับแร่ในกลุ่มไมก้า ตัวอย่างแร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้ได้แก่ montmorillonite, beidellite, nontronite, saponite, hectorite, sauconite

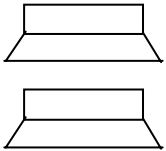
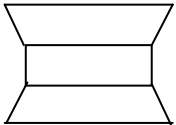
2.4.3 กลุ่มแร่เหมือนไมก้า (Micalike Group)

แร่กลุ่มนี้เป็นแร่ที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 2:1 คือ ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่นประกบแผ่นอลูมินา 1 แผ่นในหนึ่งหน่วย แร่กลุ่มนี้ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวจำพวก illite, vermiculite

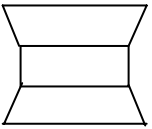
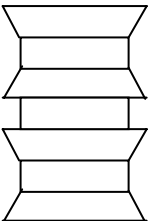
2.4.4 กลุ่มคลอไรต์ (Chlorite Group)

แร่ที่มีการจัดเรียงตัวแบบชั้นผสม 2:1:1 คือ ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่นประกบแผ่นอลูมินา 1 แผ่นในหนึ่งหน่วยและระหว่างหน่วยจะมีชั้น brucite แทรกอยู่

ตารางที่ 2.3 การจำแนกกลุ่มแร่ดินเหนียว [2]

ชนิด	กลุ่ม (x = ประจุต่อหน่วย)	กลุ่มย่อย	ตัวอย่างแร่ในกลุ่ม	โครงสร้าง พื้นฐาน
1:1	Kaolinite – Serpentine x ~ 0	Kaolinites Serpentines	Kaolinite, Halloysite Chrysotile, lizardite, antigorite	
2:1	Pyrophyllite – Talc x ~ 0 Smectite – or Montmorillonite – Saponite x ~ 0.25 – 0.6	Pyrophyllites Talc Diocahedral Smectite or Montmorillonites Triocahedral Smectites or Saponites	Pyrophyllite Talc Montmorillonite, beidellite, nontronite Saponite, hectorite, sauconite	

ตารางที่ 2.3 การจำแนกกลุ่มแร่ดินเหนียว (ต่อ)

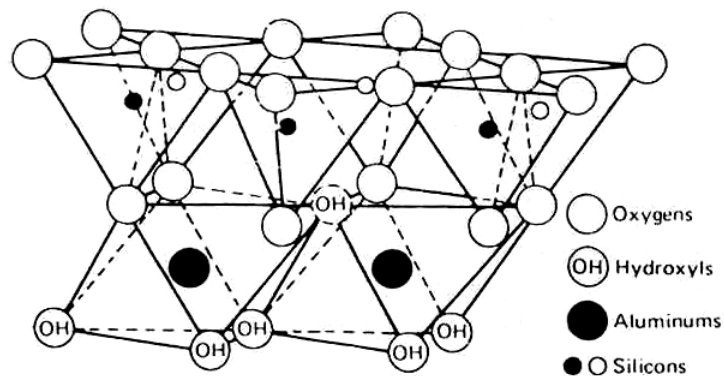
ชนิด	กลุ่ม (x = ประจุต่อหน่วย)	กลุ่มย่อย	ตัวอย่างแร่ในกลุ่ม	โครงสร้าง พื้นฐาน
2:1	Vermiculite $x \sim 0.6 - 0.9$ Mica $x \sim 1$ Brittle mica $x \sim 2$	Diocahedral vermiculites Trioctahedral vermiculites Diocahedral micas Trioctahedral micas Diocahedral brittle micas Trioctahedral brittle micas	Diocahedral vermiculite Trioctahedral vermiculites Muscovite, paragonite Biotite, phlogopite Margarite Clintonite	
2:1:1	Chlorite x variable	Diocahedral Chlorites Di,Trioctahedral Chlorites Trioctahedral Chlorites	Donbassite Cookeite, sudoite Pennite, clinochlore, Prochlorite	

2.5 แร่กาโอลินท์ [2]

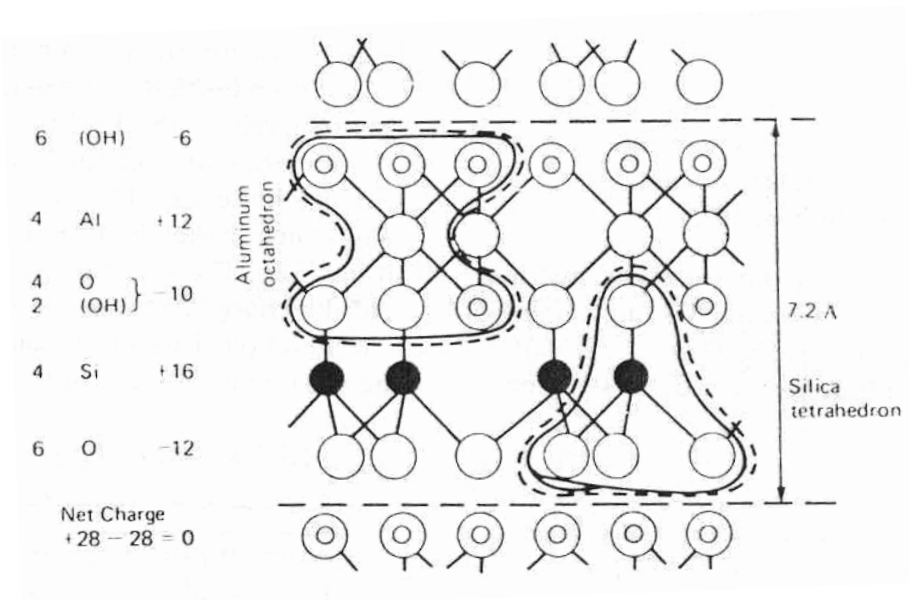
2.5.1 โครงสร้างแร่กาโอลินท์

แร่ดินเหนียวชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มพวกที่มีสัดส่วน 1:1 คือโครงสร้างแร่กาโอลินท์ประกอบด้วยแผ่นผลึกซิลิกาหนึ่งแผ่นประกบสลับแผ่นผลึกอะลูมินาอีกแผ่นหนึ่ง (gibbsite sheet) เรียงตัวกันไปในแกน c ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่ซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะรวมเกาะออกซิเจนตัวเดียวกันในด้านที่ประกอบเข้าหากัน ออกซิเจนที่ยอดของ silica tetrahedral sheet มีทิศทางเดียวกันเข้าสู่ศูนย์กลางของหน่วยเซลล์ octahedral sheet จึงทำให้แผ่นทั้งสองประสานกันรวมกันเข้าเป็นผลึก สองในสามอะตอม

ของออกซิเจนจะถูกใช้ร่วมกับอ็อกซิเจนของซิลิกอนและ octahedral ทำให้เหลืออะตอมในระนาบนี้คือ (OH) รูปที่ 2.6 แสดงแผนภาพของโครงสร้างแร่คาโอลิไนท์ ซึ่งมีสูตรทางเคมีคือ $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ และประกอบไปด้วย SiO_2 46.5% , Al_2O_3 39.5% และ H_2O 13.96% นอกจากนี้ยังอาจจะพบออกไซด์ของธาตุเหล่านี้ Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO และ CaO



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของแร่คาโอลิไนท์ [2]



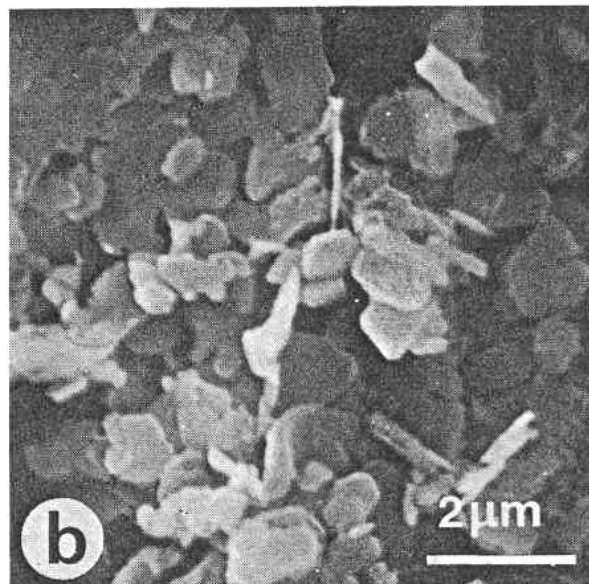
รูปที่ 2.6 พันธะของแร่คาโอลิไนท์ [2]

2.5.2 รูปร่างและขนาด

รูปร่างของแผ่นคาโอลิไนต์จะมีลักษณะเป็นผลึกหกเหลี่ยมผิวเรียบที่มีขอบชัดเจน แตกร้าวและหักพังได้ง่าย เรียงตัวกันของแผ่นในแนว a และ b และก่อตัวสูงขึ้นทางแกน c โดยทั่วไปแร่ดินเหนียวชนิดนี้มักจะมีขนาดโตกว่าดินเหนียวพวกอื่นทั้งหมด ขนาดอนุภาคจะอยู่ระหว่าง 0.1 – 5 ไมครอน และส่วนใหญ่จะมีความหนาขนาดอยู่ระหว่าง 0.05 – 2 ไมครอน เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง Si-O มีทิศทางเอียงขึ้นเล็กน้อยเพื่อรับกับ octahedral ที่ซ้อนทับอยู่พอดี ทำให้แร่คาโอลิไนต์โดยทั่วไปมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ triclinic มีมิติของหน่วยเซลล์คือ $a = 5.06 \text{ \AA}$, $b = 8.94 \text{ \AA}$, $c = 7.37 \text{ \AA}$ และ $\alpha = 91.8^\circ$, $\beta = 104.5^\circ$, $\gamma = 90^\circ$

2.5.3 พื้นที่ผิว

อนุภาคผลึกที่สมบูรณ์ของแร่คาโอลิไนต์แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 พื้นที่ผิวภายในหีบของผลึกแร่คาโอลิไนต์ไม่มีประโยชน์เนื่องจากคูดยึดอะไรไม่ได้ เพราะน้ำและไอออนต่าง ๆ เข้าไปไม่ได้ ดังนั้นจึงถือว่าพื้นที่ผิวภายในของแร่คาโอลิไนต์ไม่มี จะมีแต่พื้นที่ผิวภายนอกเท่านั้น โดยพื้นที่ผิวจำเพาะของคาโอลิไนต์มีค่าอยู่ในช่วง 10 – 20 ตารางเมตรต่อกรัมของดินแห้ง



รูปที่ 2.7 รูปขยายของโครงสร้างผลึกของแร่คาโอลิไนต์ [5]

2.5.4 ความเชื่อมั่นและความเหนียว

แผ่นผลึกของแร่คาโอลิไนท์จะเรียงซ้อนทับกันและเชื่อมยึดติดกันระหว่างชั้นด้วยพันธะ van der waal และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างอะตอมออกซิเจนของแผ่นซิลิกาและอะตอมไฮโดรเจนของแผ่นอลูมินาระหว่างแผ่นโครงสร้างที่อยู่ติดกัน การที่อลูมินามีไฮโดรเจนอะตอมอยู่ด้วยนั้นความจริงไฮโดรเจนอะตอมนี้เป็นของหมู่ไฮดรอกซิล(OH) ซึ่งเกิดขึ้นที่ออกซิเจนอะตอมที่อยู่ด้านนอกของแผ่นอลูมินา

จากการคำนวณและการสำรวจ อีออนของออกซิเจนและไฮดรอกซิลจะจับคู่กันและทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแบบแรงยึดเหนี่ยวของไฮโดรเจนหรือไฮดรอกซิล มีเหตุผลที่เชื่อถือได้ว่าระยะทางระหว่างชั้นที่ต่อเนื่องกันไปในนั้นเกี่ยวข้องกับ O – OH ที่อยู่ติดกัน ซึ่งอาจจะเท่ากันหรือน้อยกว่าค่าที่ประมาณไว้ ด้วยเหตุที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของแต่ละชั้นของโครงสร้างมีความสำคัญและแข็งแรงกว่า O – OH ของแต่ละชั้น ซึ่งเป็นเหตุผลที่สามารถอธิบายได้ถึงสมมูลฐานของโครงสร้างที่เหมือนกับแร่คาโอลิน (Kaolin Minerals)

2.5.5 การขยายตัวและการหดตัว

แผ่นผลึกของคาโอลิไนท์ที่เรียงซ้อนกันอยู่นั้นมีพันธะไฮโดรเจนช่วยเกาะยึดด้วยก็ทำให้หลักระหว่างแผ่นผลึกนั้นแคบลงและขยายออกไม่ได้จึงมีผลทำให้คาโอลิไนท์ไม่ขยายตัวและหดตัวเมื่อเปียกและแห้ง ดังนั้นจึงเป็นผลให้แร่ดินเหนียวพวกคาโอลิไนท์นี้มีการขยายตัวหรือหดตัวเมื่อเปียกและแห้งมีน้อยมาก

2.5.6 การแทนที่แบบไอโซมอร์ฟัส(Isomorphous Substitution) และความสามารถในการแลกเปลี่ยนอออนบวก

อาจจะกล่าวได้ว่าการแทนที่แบบไอโซมอร์ฟัส (Isomorphous Substitution) ไม่มีในแร่คาโอลิไนท์และมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนอออนบวกอยู่ในช่วง 3 –15 meq/100 กรัม จึงเห็นได้ว่าอาจเกิดอนุภาคแสดงประจุลบเนื่องจากสาเหตุต่อไปนี้

2.5.6.1 การที่ Al^{3+} แทนที่ Si^{4+} ในแผ่นซิลิกา หรืออออนที่มีวาเลนซ์ 2 ไปแทนที่ Al^{3+} ในแผ่น Octahedral

2.5.6.2 ไฮโดรเจนของไฮดรอกซิลอาจถูกแทนที่ด้วยอออนบวกที่แลกเปลี่ยนได้

2.5.6.3 การแตกบิ่นโดยรอบของอนุภาคทำให้เกิดประจุลบ ซึ่งจะถูกยึดจับด้วยประจุบวก

จากหลักฐานปรากฏพบว่าอนุภาคคาโอลินในดินนั้น จะแสดงประจุลบบริเวณขอบถ้าอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด (ค่า pH ต่ำ) และจะแสดงประจุลบบริเวณขอบถ้าอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นด่าง (ค่า pH สูง) และพบว่ามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุต่ำภายใต้สภาพแวดล้อมที่เป็นกรด และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนสูงภายใต้สภาพแวดล้อมที่เป็นด่าง และพบว่าการแลกเปลี่ยนแบบ isomorphous สามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาพที่เป็นกรดเมื่อขอบของอนุภาคที่แตกบิ่นแสดงประจุบวก ในแร่คาโอลินในดินนั้นจะไม่เกิดรอยแยกระหว่างชั้น อีออนบวกที่มาปรับสมดุลจะถูกคูดอยู่บริเวณผิวภายนอกของอนุภาคเท่านั้น

2.6 ดินขาว [6]

ดินขาวหรือคาโอลิน (kaolin) คือดินที่มีสีขาวเป็นแร่ตามธรรมชาติที่เกิดจากการผุพังและการสลายตัวทางเคมีของหินบางชนิด ประกอบด้วยแร่ดินในกลุ่มแร่ คาโอลิไนท์ (kaolinite group) เป็นส่วนสำคัญเมื่อบริสุทธิ์จะมีสีขาวแต่อาจมีสีอื่นเมื่อมีมลทิน เช่น ถ้าเกิดปนกับเหล็กออกไซด์ตามขั้นตอนต่าง ๆ ของการออกซิเดชัน (oxidation)

จากการสำรวจแหล่งดินขาวในประเทศไทย พบว่ามีแหล่งดินขาวอยู่ในพื้นที่หลายจังหวัด ได้แก่ เชียงราย เชียงใหม่ ลำปาง แพร่ ตาก สุโขทัย อุตรดิตถ์ ตพบุรี ปราจีนบุรี ระยอง ระนอง สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช และนราธิวาส ปรากฏว่าดินขาวแต่ละแหล่งมีคุณสมบัติแตกต่างกัน

2.6.1 ประวัติการค้นพบ

ดินขาวถูกค้นพบครั้งแรกที่ประเทศจีน จึงถูกเรียกชื่อตามแหล่งที่พบครั้งแรก คือ kaoling หรือ kaolin การค้นพบดินขาวในจีนนำไปสู่การค้นหาดินขาวในยุโรป โดยชาวฝรั่งเศส และอังกฤษ ตามลำดับ ดินขาวในอังกฤษเป็นดินขาวแหล่งใหญ่และลึกที่สุด และมีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งเป็นดินขาวจากแหล่ง “cornwall” โดยเกิดในกรวยขนาดใหญ่ภายในหินแกรนิต และมีเหล็กล็กน้อยเพราะไม่ได้เกิดจากการผุพังเป็นดินขาวร่วน มีสีขาวผ่อง มีความเหนียว และมีเนื้อละเอียดมาก

สำหรับประเทศไทยดินขาวหาดส้มแป้นจังหวัดระนองเป็นดินขาวเคโอลินแห่งแรกที่ถูกค้นพบ มีคุณลักษณะเช่นเดียวกันดินขาวจากแหล่ง cornwall ของประเทศอังกฤษ เป็นดินขาวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของหินแกรนิตด้วยก๊าซร้อนภายในโลก หรือเกิดจากกรรมวิธีของก๊าซต่างๆ (pneumatolytic process) โดยดินขาวชนิดนี้จะพบได้โดยทั่วไปตามเทือกเขาแกรนิตต่าง ๆ

2.6.2 แหล่งกำเนิด

หินที่เป็นแหล่งกำเนิดของดินขาว เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมซิลิเกต (Complex Aluminium Silicate) ในระหว่างเกิดการผุพัง หินพวกนี้จะถูกไฮโดรไลซ์ (Hydrolyze) ธาตุพวก alkali และ alkaline earth จะรวมตัวกันเป็นเกลือที่ละลายน้ำได้ ส่วนสารที่เหลืออยู่จะประกอบไปด้วยสารเชิงซ้อนของอลูมิเนียมซิลิเกตที่มีน้ำผลึก (hydrated aluminium silicate) ที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างต่าง ๆ กัน หินที่เป็นแหล่งกำเนิดของดินขาวได้แก่แร่หินฟีนมา

การกำเนิดดินขาว แบ่งออกได้เป็น 3 แบบ

2.6.2.1 แบบเกิดผุพังอยู่กับที่ (residual deposit) เกิดจากการผุพังหรือการแปรสภาพของแร่และหิน มักพบในลักษณะเป็นภูเขาหรือที่ราบ ซึ่งเดิมเป็นแหล่งแร่หินฟีนมา (feldspar) เมื่อเกิดการผุพังตามธรรมชาติหรือแปรสภาพโดยน้ำฝน น้ำบาดาล สารละลายร้อน ก๊าซร้อนภายในโลก ผลสุดท้ายจะได้ดินขาว ดินขาวจากแหล่งนี้มักพบว่ามีซิลิกา แร่หินฟีนมา และอื่น ๆ เกิดปนอยู่ด้วย แหล่งดินชนิดนี้พบในประเทศไทยหลายแห่ง เช่น อำเภोज้ำหม จังหวัดลำปาง และอำเภอบางละอูน จังหวัดระนอง

2.6.2.2 แบบพัดพาไปสะสมตัว (sedimentary deposit) เกิดจากอนุภาคของดินขาวจากแหล่งต้นกำเนิดถูกพัดพาออกไปจากแหล่งเดิมโดยกระแสน้ำ ธารน้ำแข็ง หรือลม แล้วไปสะสมในบริเวณที่ลุ่ม โดยตกตะกอนทับถมเป็นชั้น ๆ ตามขนาดอนุภาคของดิน ดินขาวที่เกิดแบบนี้จึงมีความบริสุทธิ์กว่าดินขาวที่เกิดแบบผุพังอยู่กับที่ แหล่งดินชนิดนี้ในประเทศไทยพบที่จังหวัดนครศรีธรรมราชและสุราษฎร์ธานี

2.6.2.3 แบบที่เกิดจากน้ำแร่เข้าไปแทนที่ในหิน (hydrothermal replacement) เกิดจากการที่หินอัคนีเย็นตัว น้ำแร่จะไหลซึมเข้าไปในรอยแตกหรือช่องว่างที่มีอยู่ในหิน น้ำแร่จะละลายธาตุบางส่วนที่มีอยู่ในหินเดิมออกไป ธาตุและสารประกอบใหม่ที่มีอยู่ในน้ำแร่จะเกิดการตกผลึกเป็นแร่ชนิดใหม่ การกำเนิดแบบนี้จะขึ้นกับองค์ประกอบที่เหมาะสมหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความดัน และความเป็นกรดหรือด่าง ของน้ำแร่

ดินขาวที่เกิดขึ้นในแต่ละแหล่ง จะมีความบริสุทธิ์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้คือ

- 1) ความบริสุทธิ์ของหินต้นกำเนิดเดิม (parent rock) ถ้าหินต้นกำเนิดมีความบริสุทธิ์สูงดินขาวก็จะมี ความบริสุทธิ์สูงด้วย
- 2) ความสมบูรณ์ของการผุสลายของหินที่เป็นขั้นตอนอย่างสมบูรณ์
- 3) ปริมาณของมลทิน (impurity) ถ้าหากมลทินถูกละลายออกไปได้มาก ดินขาวที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง
- 4) ปริมาณของมลทินจากบริเวณอื่นที่ถูกพัดพามาสะสม หากมีมากก็ทำให้ดินขาวมีความบริสุทธิ์น้อย

2.6.3 คุณสมบัติทางเคมี

ดินขาวเมื่อบริสุทธิ์จะมีสีขาว ประกอบด้วยสารประกอบผลึกเล็ก ๆ ของแร่คาโอลิไนต์มีสูตรทางเคมีคือ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ โดยมีส่วนประกอบทางเคมีคือ

ซิลิกา (SiO_2) 46%

อะลูมินา (Al_2O_3) 40%

น้ำ (H_2O) 14%

ดินขาวมีโครงสร้างแบบ Phyllosilicate คือเป็นแผ่น ๆ 1:1 แต่ละแผ่นวางตัวแบบอสสมมาตรกัน (unsymmetry) โดยมีแผ่นซิลิกาเททระฮีดรอลอยู่ด้านหนึ่งและแผ่นอะลูมินาออกทะฮีดรอลอยู่อีกด้านหนึ่ง เมื่อนำมาประกบกันเป็นแผ่นคาโอลิไนต์ จะมีรูปผลึกแบบ Triclinic ตรงกลางของแผ่นออกทะฮีดรอลจะมีไอออนบวกอยู่ เช่น Al^{3+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}

ดินขาวจากแหล่งต่าง ๆ มักมีส่วนประกอบต่างกันออกไป เพราะโครงสร้างของดินขาวมีการแทนที่ของธาตุซึ่งเป็นอนุมูลบวกต่างกัน ดินขาวที่มีคุณภาพสูงจะพบแต่ Al^{3+} เท่านั้น นอกจากนี้ยังมีสารประกอบของแร่อื่น ๆ ปนอยู่ด้วย เช่น ควอตซ์ (quartz) เฟลด์สปาร์ (feldspar) ฮีมาไทต์ (hematite) ฟลูออไรต์ (fluorite) แมกนีไทต์ (magnetite) ไพไรต์ (pyrite) รูไทล์ (rutile) เป็นต้น

2.6.4 คุณสมบัติทางกายภาพ

2.6.4.1 ดินขาวมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1,785 องศาเซลเซียส ความแข็ง 2.0 – 2.5 ความถ่วงจำเพาะ 2.6 มีความเหนียวต่ำ เมื่อผสมน้ำมีความเหนียว ประมาณ 25 – 40% นอกจากนี้คุณสมบัติของดินขาวที่ควรศึกษาก่อนนำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ มีดังนี้ คือ

2.6.4.2 ขนาดของอนุภาค (Particle size) ขนาดของอนุภาคดินจะมีผลต่อความเหนียวและการหดตัวของเนื้อดินเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) ดินเม็ดละเอียดจะให้ความเหนียวและการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าเม็ดหยาบ ดินเม็ดหยาบจะมีความเหนียวต่ำ

2.6.4.3 รูปร่างของอนุภาค (Particle Shape) รูปร่างของแร่คาโอลิไนต์โดยทั่ว ๆ ไปอนุภาคจะมีรูปร่างเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal Plates) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.05 – 10.0 ไมครอน โดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.5 ไมครอน

2.6.4.4 คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก คุณสมบัติข้อนี้สำหรับแร่พวกคาโอลิไนต์มีน้อยมาก เพราะว่าในแร่พวกนี้มีการแทนที่กันของพวกไอออนบวกในโครงสร้างน้อยมาก โดยปกติดินขาวที่

บริสุทธิ์จะไม่สามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเลยแต่ถ้าไม่บริสุทธิ์จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน หรือจะดูดเอาฟลักขนาดเล็กของแร่พวก three layer ที่มีขนาดเล็กเข้าไปที่ผิว

2.6.4.5 คุณสมบัติเมื่อแห้ง (Drying Property) ดินขาวที่บริสุทธิ์จะมีการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) ไม่สูงนัก ดินขาวที่มีเม็ดละเอียดจะมีค่าการหดตัวมากกว่าดินเม็ดหยาบ

2.6.4.6 คุณสมบัติหลังจากการเผา (Firing Properties) แร่ดินขาวมีการหดตัวสูงหลังจากการเผา ประมาณ 20% และเนื้อดินจะมีความแข็งแรงและผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการแตกหักและแข็งแรงทนทาน

2.7 แหล่งดินขาวในประเทศไทย [6]

ดินขาวจัดแบ่งตามคุณภาพได้ 4 กลุ่มด้วยกันได้แก่ ดินขาวดิบ, ดินขาวเซรามิก (Ceramics Grade) ซึ่งเป็นดินขาวคุณภาพต่ำที่สุดในดินขาวที่ใช้ในอุตสาหกรรม, ดินขาวระดับฟิลเลอร์ (Filler Grade), และระดับเคลือบ (Coating Grade) ซึ่งเป็นดินขาวคุณภาพและราคาสูงกว่าดินขาวเซรามิก ทั้งนี้ดินขาวระดับฟิลเลอร์และระดับเคลือบนั้นใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ สี ยาง ยางมะยม เป็นต้นสำหรับดินขาวเซรามิกเอง ก็มีคุณภาพแตกต่างกันหลายระดับซึ่งให้คุณสมบัติหลังการเผาต่างกันไปในการผลิตเซรามิกประเภทต่างๆต้องการใช้ดินขาวที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันอาทิเช่นดินขาวที่มีความบริสุทธิ์สูง ให้เนื้อดินหลังเผาเป็นสีขาวบริสุทธิ์ นิยมนำมาผลิตผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนและโบนไชน่า ส่วนในการผลิตกระเบื้องปูพื้นนั้น นิยมใช้ดินที่มีราคาต่ำ โดยเลือกดินที่หดตัวน้อยและมีปริมาณคาร์บอนต่ำเพื่อให้อัดเป็นแผ่นได้ง่ายโดยไม่แตกบิ่น โดยไม่จำเป็นที่จะต้องทำให้สีของดินหลังเผาเป็นสีขาวเพราะในการผลิตจะมีการตกแต่งลวดลายและสีบนผิวหน้าของกระเบื้องทำให้ไม่เห็นสีของเนื้อกระเบื้องในการนำมาใช้งาน

ปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตดินขาวได้สำหรับเซรามิกจนถึงระดับฟิลเลอร์คุณภาพกลางเท่านั้น โดยส่วนใหญ่เป็นดินขาวจากแหล่งกำเนิดที่เกิดจากการผุพังตามธรรมชาติของหินต่างๆ จึงมักมีเม็ดหยาบมีความเหนียวน้อยกว่าดินเม็ดละเอียด แหล่งดินขาวในประเทศไทยมีหลายแห่งได้แก่ ที่จังหวัดระนอง ลำปาง ปราจีนบุรี นครราชสีมา อุตรดิตถ์ เชียงราย และชุมพร ดินขาวมีหลายคุณภาพบางแหล่งไม่สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้ ปัจจุบันดินขาวที่ใช้ในอุตสาหกรรมได้แก่ ดินขาวระนอง ในเขตจังหวัดชุมพรและ จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นดินขาวคุณภาพปานกลาง และดินขาวลำปางซึ่งเป็นดินขาวคุณภาพต่ำ

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาวจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทยกับ
มาตรฐานอังกฤษ [7]

ผลวิเคราะห์เคมี	สูตรเคมี ดินขาว บริสุทธิ์	มาตรฐาน ดินขาว อังกฤษ	ดินขาว ระนอง	ดินขาว นราธิวาส	โคกไม้ลาย ปราจีนบุรี	บ้านไร่ อุทัยธานี	บ้านวังยาง อุตรดิตถ์	เวียงป่าเป้า เชียงราย	ปางค่า ลำปาง	ดินขาว ระยอง
ซิลิกา (SiO_2)	46	46 – 47	48.75	47.30	48.10	65.93	68.56	44.50	59.70	51.85
อะลูมินา (Al_2O_3)	39	37 – 39	34.58	35.72	36.10	24.85	19.32	38.20	27.60	32.77
เหล็ก (Fe_2O_3)		0.4 – 1.0	0.71	0.38	1.47	1.28	2.21	0.80	0.85	2.12
ไทเทเนียม (TiO_2)		1	0.02	0.20	0.79	0.05	0.21	0.20	0.07	0.53
แคลเซียม (CaO)			0.07	0.11	0.20	0.15	0.05	0.10	0.13	0.02
แมกนีเซียม (MgO)			0.34	1.01	0.14	0.45	0.53	-	0.25	0.18
โปแตสเซียม (K_2O)		1.0 – 2.0	2.52	1.76	0.16	1.73	4.99	0.80	5.85	3.58
โซเดียม (Na_2O)			0.48	0.39	0.13	0.12	0.22	-	0.15	0.41
น้ำหนักที่หายไป หลังการเผา (LOI)	14	12.5	10.66	12.99	12.95	5.45	3.01	14.20	5.39	14.12

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดผู้ได้รับประทานบัตรเหมืองผลิตแร่ดินขาว [7]

จังหวัด	จำนวนประทานบัตร (แปลง)	เนื้อที่ (ไร่)	ปริมาณแร่สำรอง (ตัน)
กาญจนบุรี	7	900	800,000
เชียงราย	1	95	40,000
เชียงใหม่	2	283	250,000
นครนายก	1	26	50,000
นครศรีธรรมราช	1	50	150,000
นราธิวาส	2	40	200,000
ปราจีนบุรี	2	75	300,000
เพชรบุรี	3	600	1,000,000
แพร่	1	8	20,000
ระนอง	11	1,400	3,000,000
ระยอง	1	28	50,000
ลพบุรี	2	200	100,000
ลำพูน	1	170	100,000
ลำปาง	37	2,250	9,500,000
สุโขทัย	1	90	150,000
อุตรดิตถ์	12	550	1,500,000
อุทัยธานี	1	242	500,000
รวม	86	7,007	17,710,000

2.8 การปรับปรุงคุณภาพดิน [6]

การปรับปรุงคุณภาพดินเป็นการแก้ไขเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินโดยอาจจะด้านเดียวหรือหลายด้าน โดยอาจจะใช้วิธีการกล วิธีทางเคมี การให้ความร้อน หรืออื่น ๆ เพื่อให้ดินนั้นมีคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเป็นไปตามต้องการ โดยวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพดินอาจจะทำให้ดินมีกำลังรับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น ทำให้ดินมีความสามารถในการซึมน้ำต่ำ และวัตถุประสงค์เพื่อให้ดินมีความทนทาน ทนต่อสภาพอากาศและการกัดเซาะ วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ การปรับปรุงคุณภาพของดินทางกล (Mechanical Stabilizer) การปรับปรุงคุณภาพของดินทางฟิสิกส์ (Physical Stabilizer) และการปรับปรุงคุณภาพของดินทางเคมี (Chemical Stabilizer)

2.8.1 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้วิธีทางกล

การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้วิธีทางกลนี้เป็นการปรับปรุงคุณภาพดินโดยการบดอัดทำให้เกิด interlocking กันระหว่างอนุภาคดิน วิธีการนี้สามารถทำได้โดยการบดอัดอนุภาคดิน อากาศก็จะถูกไล่ออกจากช่องว่าง วิธีการนี้มีผลสำคัญทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงเฉือนก็จะเพิ่มขึ้น เป็นการลดการทรุดตัวและลดความสามารถในการซึมผ่านสิ่งที่มีผลกับการบดอัดคือปริมาณความชื้นในดิน ความพยายามในการบดอัดและชนิดของดิน (ขนาดเม็ดดิน รูปร่าง ค่าความถ่วงจำเพาะของดิน และชนิดของแร่ดินเหนียว) ดินที่ให้ผลการบดอัดไม่ดีคือทรายที่มีขนาดเท่า ๆ กัน ดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูง และดินจำพวกอินทรีย์จะต้องใช้พลังงานในการบดอัดสูง ปริมาณความชื้นเป็นตัวแปรสำคัญมากในการบดอัด ฉะนั้นจึงจำเป็นจะต้องทราบปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดก่อนการบดอัด

2.8.2 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้วิธีการทางฟิสิกส์

การปรับปรุงคุณภาพของดินทางฟิสิกส์ (Physical Stabilizer) เป็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินโดยใช้ความร้อน, ไฟฟ้า และ Osmotic Stabilizer ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินเช่น การใช้ความร้อนจะไปเปลี่ยนแปลงขีดจำกัดเหลวของดินหรือกลายเป็นวัสดุใหม่ ทำให้เป็นวัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ส่วนการใช้ไฟฟ้าหรือเรียกว่า Electro – Osmosis และ Electrohardening นั้นเป็นการกำจัดน้ำออกจากดิน แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อเสียเพราะน้ำสามารถที่จะไหลกลับเข้ามาได้ เป็นต้น

2.8.3 การปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี

การปรับปรุงคุณภาพดินทางเคมี (Chemical Stabilizer) วิธีนี้เป็นการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินด้วยการเพิ่มของแข็งหรือของเหลวเข้าไปในดิน การใช้สารเคมีที่เป็นกรด กลาง และด่าง นั้นเป็นที่รู้จักกันดี มันจะเกิดผลได้โดยการแทรกซึมเข้าไปในองค์ประกอบของ

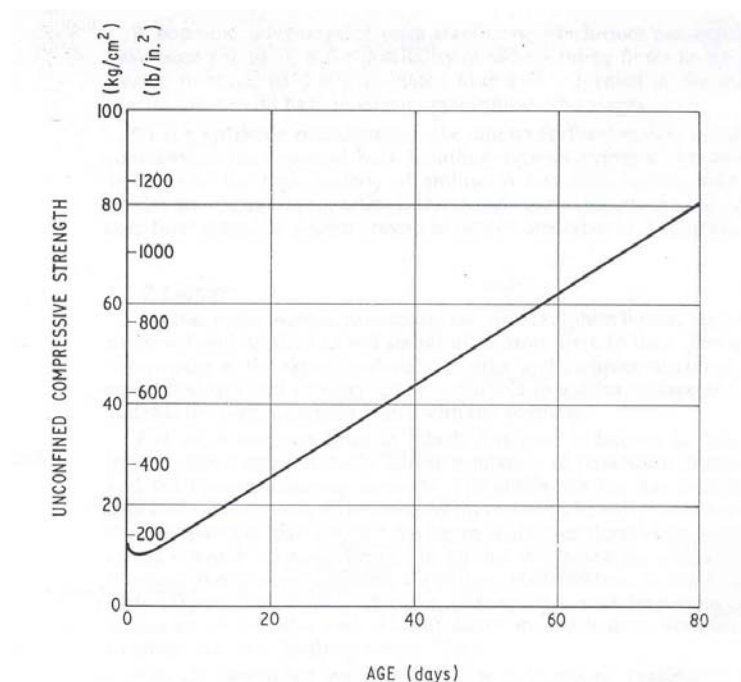
ดิน (มักใช้กับแร่ดินเหนียว) ต่อมาจะเกิดการตกตะกอนของแร่ใหม่และแร่ที่ละลายไม่ได้ซึ่งมีอยู่ในดิน ปฏิกิริยาของตัวกระทำที่เป็นกลางที่สุดจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินเช่นความหนาแน่น ส่วนจำพวกกรดและด่างนั้นจะทำให้การจัดเรียงตัวของดินเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบฟุ้งกระจายและแบบระกระกระตามลำดับ สารเคมีที่ใช้ในกลุ่มนี้มีหลายประเภท ได้แก่ กรดฟอสฟอริกและฟอสเฟต (Phosphoric acid and Phosphates), เกลือแกง (Sodium Chloride), เกลือแคลเซียม (Calcium Salt, Sulphate (Gypsum), or Chloride), โซดาไฟ (Sodium Hydroxide), เรซินและโพลิเมอร์ (Resins and Polymers), ลิกนิน (Lignins) การปรับปรุงคุณภาพของดินโดยวิธีนี้นั้นมีข้อจำกัดอยู่ที่องค์ประกอบทางเคมีของดินแต่ละชนิดว่าเหมาะสมกับสารเคมีตัวใด และต้องระวังเรื่องการชะล้างสารเคมีออกจากเนื้อดินเมื่อเวลาฝนตกด้วย

Ingles [9] ได้ศึกษาเรื่องกลไกของการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้กรดและด่าง พบว่าไอออนลบ 1 และ 2 Valent ของไฮดรอกไซด์ และกรดรุนแรงที่จะกระทำต่อแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้าง 2 และ 3 ชั้น (คาโอลินไนท์และมอนทอร์มิลโลไนท์) ภายใต้สภาวะที่จำลองขึ้นสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินในสนาม เป็นต้นว่า การผสม การทดสอบซ้ำ และการบ่มความชื้น ที่ปริมาณความชื้นและความหนาแน่นเท่ากับค่าความหนาแน่นสูงสุด ปฏิกิริยาดำเนินไปเป็นระยะเวลามากกว่า 2 ปี การเปลี่ยนแปลงในความแข็งแรงและปริมาตรมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของแร่ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถบอกได้ว่ากลไกสำคัญในการส่งเสริมให้เกิดการปรับปรุงคุณภาพทางอนินทรีย์ (Inorganic Soil Stabilization) ก็คือแรงยึดเหนี่ยว สำหรับสารเคมีที่เพิ่มเข้าไปนั้นจะใช้ 10 เปอร์เซ็นต์ของดินแห้ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นการปรับปรุงคุณภาพอย่างชัดเจน โดยหลักการคือการเคลือบผิวหน้าของโครงร่างของดิน และเพิ่มความแข็งแรงให้ดินโดยการก่อตัวขึ้นบริเวณรอยแยก เหลี่ยมมุม ช่องโพรง และจุดที่บกพร่องในดิน ซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลของตัวอย่าง ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญต่อการกระทำการปรับปรุงคุณภาพของดิน

Ingles [9] ได้ปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวคาโอลินด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าความแข็งแรงของดินที่ปรับปรุงคุณภาพในช่วง 7 – 14 วันแรกจะมีความแข็งแรงต่ำกว่าดินที่ไม่ได้ทำการปรับปรุง พฤติกรรมนี้เป็นที่น่าสนใจ เกิดขึ้นจากในช่วงแรกนั้นแร่ดินเหนียวยังมีช่องโพรงอยู่ ต่อมาลูมินาจะค่อยก่อตัวเป็นผลึกขึ้น ในสภาพที่อัตราส่วน Al / Si สูง ๆ และรอยแตกที่ไม่แน่นอนในแร่ดินเหนียวนั้นทำให้เม็ดดินเปลี่ยนเป็นวัสดุที่แข็งแรงและเม็ดดินที่ถูกเคลือบนั้นก็ไม่สามารถที่จะมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มักเกิดจากการที่พื้นผิวเปิด (ช่องว่างขนาดใหญ่ สามารถมองเห็นได้จากกรณีของกรวด) ความแข็งแรงนั้นเกิดขึ้นจากการเคลือบที่โครงร่างของดิน ปริมาตรที่ขยายขึ้นเนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องมาจากการก่อตัวของโซเดียมอลูมิโนซิลิเกต ที่ไม่ละลายในสารละลาย

ในความเป็นจริงในของเหลวที่มีซิลิกา อลูมินาและประจุลบมาก ๆ นั้น การก่อตัวของอลูมิโนซิลิเกตจะดีมาก สามารถสังเกตได้จากการเอ็กซเรย์ และการถ่ายภาพขยาย อย่างไรก็ตามความแข็งแรงที่ได้มานั้นไม่ได้มีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของไอออนลบ เนื่องจากโครงสร้างของผลึกนั้นมีความซับซ้อน

Lee , Han และ Choy [10] ศึกษาเรื่องการเปลี่ยนรูปของชั้นของอลูมิโนซิลิเกต จาก 2 มิติไปเป็น 3 มิติ ได้เสนอถึงแนวทางใหม่ของโซดาไลต์ (Sodalite) จากอลูมิโนซิลิเกต เช่น คาโอลิไนต์ และมอนทอร์โรไนต์ ที่มีสารประกอบ Al_2O_3 เป็นหลัก ให้ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศล้อมรอบ ผลที่ได้คือ ได้วัสดุแข็งที่เป็นผลึกของโซดาไลต์เป็นรูปทรงลูกบาศก์ ($a = 8.92 \pm 0.05 \text{ \AA}$) ประกอบไปด้วยโครงข่ายของซีโอลิติก (Zeolitic) Al – O – Si สลับที่กันระหว่างอลูมิเนียม และ ซิลิกาเทรตเตอไซด์รอน จากภาพถ่ายขยาย SEM แสดงให้เห็นว่า โซดาไลต์ ได้มาจากอลูมิโนซิลิเกต 2 มิติ ที่ประกอบไปด้วยโซดาไลต์ ขนาดใหญ่ (30 – 50 ไมครอน) ซึ่งจะยังคงรักษาลักษณะดั้งเดิมของชั้นซิลิเกตไว้



รูปที่ 2.8 กำลังอัดของคาโอลิไนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์ [9]

ปริญญา จินดาประเสริฐ [15] ได้ศึกษาเบื้องต้นในการทำสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ สารจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานใหม่ที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์ สังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มี ส่วนประกอบของซิลิกาและอลูมินา ในรูปอสัณฐานโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง จากการ ทดสอบพบว่าสามารถสังเคราะห์สารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะได้ โดยใช้สารละลายโซเดียม ซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในการบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่า ความละเอียดของเถ้าลอย ชนิดและความเข้มข้นของต่าง ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ และเวลาในการบ่มมีผลต่อกำลังของสารจีโอโพลิเมอร์

อมลวรรณ พิษัญวานิช [1] ได้ศึกษาศักยภาพในการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวจากแหล่งต่างๆ ภายในประเทศ 13 แหล่ง คือ ลำปาง 4 แหล่ง อุตรดิตถ์ ระนอง สุราษฎร์ธานี นราธิวาส อุรธานี ปราจีนบุรี ระยอง ราชบุรี และเพชรบุรี ด้วยกลวิธีโพลิเมอร์ไรเซชัน โดยการผสมกับสาร ผสมเพิ่มชนิดต่างๆ 6 สาร 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 ที่ อัตราส่วนผสม 10 เปอร์เซ็นต์ แล้วกระตุ้นปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ภายใต้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบทิศทางเดียวจนถึงอายุบ่ม 56 วัน ร่วมกับวิธีแคลอริเมตรี เพื่อวัดปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของดินขาว และสารผสมเพิ่มที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ร่วมกับพิจารณาองค์ประกอบทาง เคมี องค์ประกอบด้านแร่ดินเหนียว ความสมบูรณ์ของฟลักแร่ดินเหนียวและความสามารถในการ แลกเปลี่ยนประจุบวก ผลการทดสอบพบว่าดินขาวที่ผ่านการปรับปรุง คุณภาพแล้วจะเกิดปฏิกิริยา เริ่มแรกหลายรูปแบบ ผลของการวัดปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมของดิน ขาวและสารผสมเพิ่มโดยใช้วิธีแคลอริเมตรีจะแปรผันตรงกับค่ากำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนรวมของดินขาวและสารผสมเพิ่มโดยใช้วิธีแคลอริเม ตรีและค่ากำลังรับแรงอัดแบบทิศทางเดียวที่อายุบ่ม 3 วันแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด(R -squared)เท่ากับ 0.9001 นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างดินส่วนใหญ่มีแนวโน้มในการปรับปรุงคุณภาพ ด้วย KOH และ NaOH ได้แก่ตัวอย่างดินตำบลบุญนาพัฒนา ตำบลสันดอนแก้ว ตำบลบ้านสาตำบล ห่งฝาย จังหวัดลำปาง ตำบลวังจันทร์ จังหวัดเพชรบุรี ตำบลห้วยยาง จังหวัดระยอง ตำบลจวบ จังหวัด นราธิวาส ตำบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนอง ตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานี และตำบลขุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานี แสดงแนวโน้มในการปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH , KOH และ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ได้และตำบลโคกไม้ลาย จังหวัดปราจีนบุรี ตำบลด่านทับตะโก จังหวัดราชบุรี แสดงแนวโน้มในการ ปรับปรุงคุณภาพด้วย Na_2HPO_4 และ KOH ได้ดียกเว้นตัวอย่างดินขาวตำบลผาจุ จังหวัดอุดรดิตถ์ แสดง แนวโน้มในการปรับปรุงคุณภาพด้วย $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ได้ดี

2.9 โพลีเมอร์ไரசะชั้น และ โพลีเมอร์

2.9.1 หลักการของโพลีเมอร์ไரசะชั้น (Principles of Polymerization) [12]

โพลีเมอร์ (Polymer) เป็นโมเลกุลใหญ่ที่สร้างขึ้นโดยการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลเล็ก ๆ จำนวนมาก โมเลกุลเล็ก ๆ จะรวมกันโดยเชื่อมต่อซึ่งกันและกัน และก่อตัวขึ้นเป็นโมเลกุลของโพลีเมอร์ อยู่ในรูปของโมโนเมอร์ (Monomer) และปฏิกิริยาระหว่างการรวมตัวนี้เรียกว่า โพลีเมอร์ไரசะชั้น (Polymerization) โมเลกุลของโมโนเมอร์นั้นสามารถที่จะมีได้เป็นร้อย, พัน, หมื่น หรือมากกว่านั้นที่เชื่อมต่อกันเป็นโมเลกุลของโพลีเมอร์ เมื่อกล่าวถึงโพลีเมอร์ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุก็สามารถที่จะมีโมเลกุลจำนวนเป็นล้านโมเลกุลได้

2.9.2 โพลีเมอร์อนินทรีย์ (Inorganic Polymer) [13]

Inorganic คือ อนินทรีย์ หรือสารที่ไม่มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอน (Nonhydrocarbon) และโพลีเมอร์ (Polymer) คือ โมโนเมอร์ (Monomer) หลาย ๆ กลุ่มมารวมกัน คำจำกัดความที่ชัดเจนของโพลีเมอร์อนินทรีย์ (Inorganic Polymer) คือ โพลีเมอร์ที่มีส่วนประกอบของอนินทรีย์เป็นหลัก

มีความพยายามที่จะทำการสังเคราะห์ Inorganic Polymer เพื่อจะให้นำมาใช้แทน Organic Polymer ได้โดยตรงแต่ยังไม่เป็นที่นิยมนัก เนื่องจากก่อนที่จะนำมาใช้เป็นโพลีเมอร์ได้นั้นจะต้องผ่านกระบวนการที่ยุ่ยาก Inorganic Polymer นั้นจะมีความทนทานจากการรวมตัวกันหลาย ๆ ชนิด ข้อบกพร่องข้อใหญ่ของโพลีเมอร์ก็คือ เทคนิคการผลิตในปัจจุบันนั้นยุ่งยากกว่าจะได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ เช่น ฟิล์ม ไฟเบอร์ ท่อ และวัสดุอื่น ๆ จึงเป็นเหตุให้ Inorganic Polymer นั้นใช้กันน้อย ส่วนใหญ่จะใช้ในบ้าน โรงงานอุตสาหกรรม และอื่น ๆ

ซิลิกา $[(SiO_2)_n]$ ที่หาได้ตามธรรมชาติจะมีรูปร่างผลึกที่แตกต่างกันไป ประกอบด้วยทราย ควอตซ์ และหิน ความแปรปรวนของรูปร่างผลึกในซิลิกาเกิดขึ้นใน 3 ทิศทาง การเชื่อมต่อของห่วงโซ่ของโพลีเมอร์ที่ประกอบขึ้นจาก Silica Tetrahedral ที่ออกซิเจนแต่ละอะตอมจับยึดกับซิลิกอน 2 อะตอม และซิลิกอนแต่ละอะตอมจับยึดกับออกซิเจน 4 อะตอม ซิลิกอนนั้นพบได้มากในดินและหิน โดยมากจะเป็น SiO_4 Tetrahedral และมีกลุ่มของ $Si - O^-$ เป็นพวกเดียวกับไอออนลบของวัสดุพวกโลหะ มีห่วงโซ่เป็นแบบเกลียวเดี่ยว (Single – Strand) เป็นเกลียวคู่ (Double – Strand) หรือเป็นแผ่นและห่วงโซ่ของโพลีเมอร์จะมี 3 ทิศทาง จะเกิดขึ้นได้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ ซิลิกา: ออกซิเจน ($Si : O$), ไอออนบวก: ซิลิกา (Cation : Si) และประจุลบ

2.9.3 การประยุกต์ใช้โพลิเมอร์ [12]

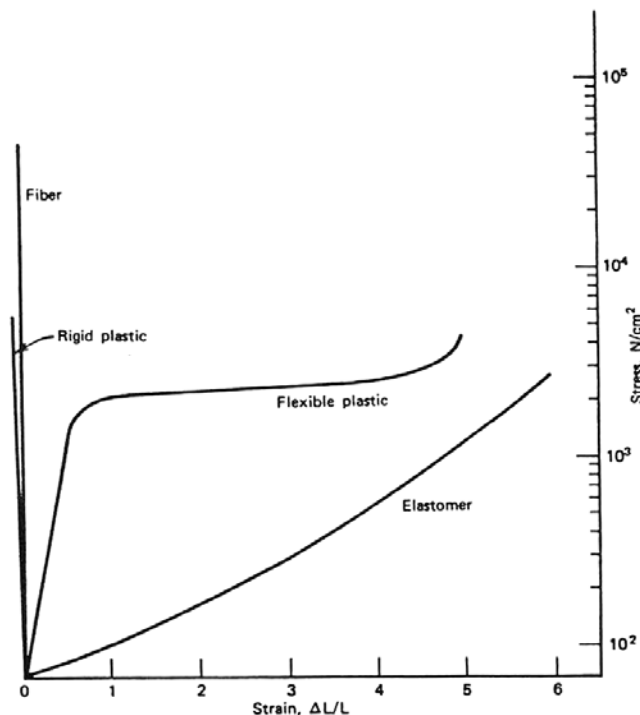
โพลิเมอร์มีคุณสมบัติหลายประการ เช่น ไม่ละลาย ความสามารถต้านทานต่อเคมีและไฟฟ้า และอากาศสามารถผ่านได้ คุณสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญมากในการเลือกโพลิเมอร์ให้เหมาะสมกับงาน อย่างไรก็ตามข้อสำคัญในการพิจารณาถึงโพลิเมอร์นั้นคือการพิจารณาถึงคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Behavior) นั่นคือ ลักษณะของการเสียรูปและเส้นกราฟภายใต้ความเค้น พฤติกรรมทางกลของโพลิเมอร์สามารถที่จะแสดงได้โดยคุณสมบัติของความเค้น – ความเครียด บ่อยครั้งที่ก่อให้เกิดการสังเกตพฤติกรรมของโพลิเมอร์ภายใต้ความเค้นถึงจนกระทั่งความเครียดถึงจุดแตกหัก โดยจะแสดงผลโดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับการเสียรูป (ความเครียด) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 คุณสมบัติ 4 อย่างที่มีความสำคัญต่อพฤติกรรมความเค้นความเครียดของโพลิเมอร์ คือ

2.9.3.1 โมดูลัส (Modulus) คือความต้านทานต่อการเสียรูป

2.9.3.2 ความแข็งแรงสูงสุด หรือแรงดึงสูงสุด (Ultimate Strength or Tensile Strength) คือความเค้นดึงสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างแตกหัก

2.9.3.3 ความยาวที่เปลี่ยนแปลงสูงสุด (Ultimate Elongation) คือ ระยะที่ตัวอย่างยืดออกที่จุดที่ตัวอย่างแตกหัก

2.9.3.4 การเสียรูปแบบอีลาสติก (Elastic Elongation) คือ จุดที่ตัวอย่างที่เสียรูปไปแล้วสามารถกลับมาที่เดิมได้เมื่อปล่อยแรงดึง



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียด สำหรับ Elastomer, Flexible, Plastic, Rigid Plastic และ Fiber [12]

2.10 สารผสมเพิ่มเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพโดยกลวิธีโพลิเมอร์ไรเซชัน [9]

2.10.1 โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate , Na_2SiO_3)

โซเดียมซิลิเกตหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า”น้ำแก้ว” มีสูตรทางเคมีคือ Na_2SiO_3 มีลักษณะเป็นของเหลวข้นๆ ละลายได้ในน้ำ ทำจากการหลอมตัวของทรายและโซเดียมคาร์บอเนต ใช้เป็นวัตถุประสานแก้วหรือเป็นซีเมนต์ทนไฟ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH) เท่ากับ 14

2.10.2 ไดโซเดียมคาร์บอเนต (Disodium Carbonate , Na_2CO_3)

โซเดียมคาร์บอเนตหรือโซดาแอช เป็นสารประกอบเกลือของกรดคาร์บอนิก มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น สามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดี ละลายได้ในน้ำ มีฤทธิ์เป็นด่างแก่เมื่อละลายน้ำ ละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์ พบในจีไธ้าของพืชหลายชนิดและสาหร่ายทะเล (จึงได้ชื่อว่าโซดาแอช เนื่องจาก แอช ในภาษาอังกฤษ หมายถึง จีไธ้า) มีสูตรทางเคมีคือ Na_2CO_3 มีลักษณะเป็นผงหรือเป็นก้อนแข็งสีขาวมีจุดหลอมเหลวที่ 851 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ 2.53 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH) เท่ากับ 12 เป็นสารไม่ติดไฟ การใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม ใช้เป็นสารลดความกระด้างของน้ำ ใช้ในผงซักฟอก สารปรุงแต่งอาหาร และใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า(สารฟอกผ้า ลินิน ปอ ผ้าฝ้าย) การกลั่นปิโตรเลียม การผลิตแก้ว การผลิตสบู่ การผลิตอลูมิเนียม ฯลฯ

2.10.3 ไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Disodium Hydrogen Orthophosphate , Na_2HPO_4)

ไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต ลักษณะเป็นผง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีสูตรทางเคมีคือ Na_2HPO_4 มีจุดหลอมเหลวที่ 240 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ 1.52 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH) เท่ากับ 9 การใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม เป็นสารอิมัลซิฟายเออร์ และบัฟเฟอร์ ในอาหาร สีย้อมผ้าไหม การวิเคราะห์ทางเคมี ในอุตสาหกรรมเคลือบเงาเซรามิกซ์ สารลดแรงตึงผิว

2.10.4 ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Trisodiums phosphate , Na_3PO_4)

ไตรโซเดียมฟอสเฟต มีสูตรทางเคมีคือ Na_3PO_4 มีลักษณะเป็นผงหรือผลึกสีขาว ไตรโซเดียมฟอสเฟตมีจุดหลอมเหลวที่ 75 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ 1.62 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH)เท่ากับ 11.5-12.5 การใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมใช้เป็นสารซักล้างทำความสะอาด

2.10.5 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide , KOH)

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีลักษณะเป็นผงของแข็งจับตัวกันเป็นแผ่นบาง สีขาว มีสูตรทางเคมีคือ KOH มีจุดหลอมเหลวที่ 361 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ 2.044 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH) เท่ากับ 13.5 การใช้ประโยชน์ในทางใช้ในกระบวนการผลิตเบตเตอรีเป็นอัลคาไลน์

2.10.6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide , NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างเข้มข้น ในชีวิตประจำวันมักเรียกโซดาไฟ มีสูตรทางเคมีคือ NaOH มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ระเหย มีจุดหลอมเหลวที่ 318 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ 2.13 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH) เท่ากับ 14 เป็นสารไม่ติดไฟ การใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม ใช้เป็นสารลดความกระด้างของน้ำ ใช้ในการผลิตสบู่ อุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม การทำผลิตภัณฑ์จากไม้ อุตสาหกรรมสังเคราะห์อินทรีย์

2.11 แคลอริเมตรี [15]

2.11.1 แคลอริเมตรี

การหาค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนจากการทดลองทำได้โดย การวัดการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ความดันคงที่เมื่อความร้อนถ่ายเทเข้าหรือออกจากสารใดสารหนึ่ง อุณหภูมิของสารนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปในทางปฏิบัติเราจึงวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ การวัดการถ่ายเทความร้อนนี้เรียกว่าแคลอริเมตรี (Calorimetry) ส่วนเครื่องมือที่ใช้วัดเรียกว่าแคลอริมิเตอร์ (Calorimeter) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัตถุที่ดูดพลังงานเข้าไปจำนวนหนึ่งวัดได้จากค่า ความจุความร้อน (Heat Capacity) ซึ่งให้คำนิยามว่าเป็นปริมาณความร้อนที่ทำให้วัตถุนั้นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ถ้าวัตถุใดมีความจุความร้อนสูง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัตถุนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามค่าที่กำหนดจะมีค่ามากด้วย สารบริสุทธิ์แต่ละชนิดจะมีค่าความจุความร้อน เฉพาะตัว ความจุความร้อนของสาร 1 กรัมเรียกว่า ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity) ความร้อนจำเพาะของสารทดลองโดยการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔT) ของสารที่มีมวลเป็น m ทั้งนี้ปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือเสียออกไปมีค่าเป็น q ความจุความร้อนจำเพาะของสารมีหน่วยเป็นจูลล์ต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส ($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$)

$$C_p = \frac{q}{(m + \Delta T)} \quad (2.1)$$

เมื่อ C_p = ความจุความร้อนจำเพาะของสาร
 q = ปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือเสียออกไป
 m = มวลของสาร
 ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

2.11.2 ปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อน

ปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือเสียออกไปแสดงเป็นหน่วยพลังงานในระบบ SI คือ จูลล์(Joule , J) หรือในหน่วยของพลังงานอีกหน่วยหนึ่งคือแคลอรี(Calorie , C) โดย 1 แคลอรีเป็นปริมาณพลังงานที่ทำให้ให้น้ำ 1 กรัมมีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศาเซลเซียส ปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือเสียออกไปสามารถคำนวณจากมวลของสารประกอบ ความร้อนจำเพาะของสารประกอบ และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

$$q = m \times C_p \times \Delta T \quad (2.2)$$

เมื่อ q = ปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือเสียออกไป
 m = มวลของสาร
 C_p = ความจุความร้อนจำเพาะของสาร
 ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

$$Q = q / m \quad (2.3)$$

เมื่อ Q = ปริมาณความร้อนต่อมวล
 q = ปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือเสียออกไป
 m = มวลของสาร

อัตราการเกิดความร้อนของสารละลาย ปฏิกริยาทางเคมี เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา ถ้ามีการทำปฏิกิริยามากจะมีการคายความร้อนมาก อัตราการเกิดความร้อนของสารละลายแสดงเป็นหน่วยพลังงานหรือปริมาณความร้อนต่อมวลที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนแปลง มีหน่วยเป็นจูลล์ต่อกรัมต่อชั่วโมง($J \cdot g^{-1} \cdot hr^{-1}$)

$$\Delta E = dQ/dt \quad (2.4)$$

เมื่อ ΔE = อัตราการเกิดความร้อน
 dQ/dt = อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนต่อมวลเทียบกับเวลา

2.11.3 การวัดอุณหภูมิ (Thermometry) [16]

คุณสมบัติที่จำเป็นของการวัดอุณหภูมิจะต้องมีคือ มีการเปลี่ยนแปลงที่วัดได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป และการเปลี่ยนแปลงที่วัดได้นี้จะต้องคงที่แน่นอน การเปลี่ยนแปลงที่ใช้วัดอุณหภูมิคือการเปลี่ยนแปลงขนาด(การขยายตัวหรือการหดตัว) ความดันเพิ่มขึ้นในที่ห่อหุ้ม การเปลี่ยนสี การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับการแผ่รังสีที่ผิว การเลือกวัสดุและผลที่เกิดขึ้นเพื่อใช้วัดอุณหภูมิขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิที่จะวัด ความละเอียดแม่นยำที่ต้องการ รูปแบบของการติดตั้ง และค่าใช้จ่ายตอนต้นในการติดตั้ง เทคนิคการตรวจวัดอุณหภูมิโดยทั่วไป เทอร์โมมิเตอร์เหล่านี้ใช้หลักของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหลากหลาย ดังต่อไปนี้

1. การเปลี่ยนแปลงมิติทางกายภาพ

- เทอร์โมมิเตอร์ของเหลว-ใน-แก้ว (Liquid-in-glass thermometers)
- โลหะสองชนิด (Bimetallic elements)

2. การเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซหรือความดันไอ

- เทอร์โมมิเตอร์ก๊าซปริมาตรคงที่ (Constant-volume gas thermometers)
- เทอร์โมมิเตอร์ความดัน (Pressure thermometers)

3. การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า

- เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน (Resistance thermometers) (RTD, PRT)
- เทอร์มิสเตอร์ (Thermistors)
- เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples)
- หัววัดข่าวสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor-junction sensors)

4. การเปลี่ยนแปลงการแผ่รังสีความร้อน

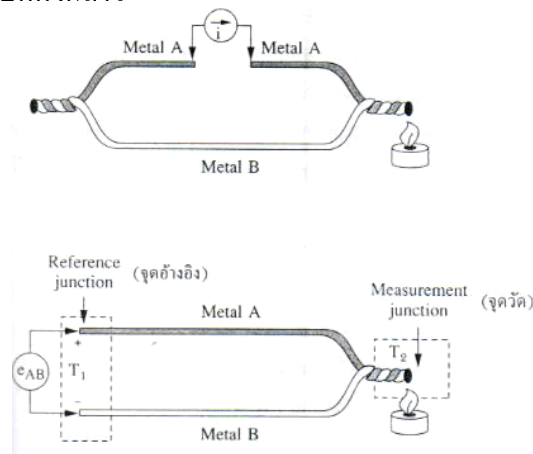
- หัววัดความร้อนและโฟตอน (Thermal and photon sensors)
- ไพโรมิเตอร์รังสีรวม (Total-radiation pyrometers)
- ไพโรมิเตอร์แสงและสองสี (Optical and two-color pyrometers)
- ไพโรมิเตอร์อินฟราเรด (Infrared pyrometers)

5. การเปลี่ยนแปลงสถานะทางเคมี

- การหลอม (Fusible indicators)
- ผลึกเหลว (Liquid crystals)
- เซลล์อุณหภูมิอ้างอิง (Temperature-reference (fixed-point) cells)

2.11.4 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) [16]

เทอร์โมคัปเปิล คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf.) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้เกิดการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ค้นพบโดย Thomas Seebeck นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันในปี ค.ศ.1821 ในรูปที่ 2.15 เป็นวงจรที่ใช้อธิบายผลแรงเคลื่อนไฟฟ้าของซีเบ็คดังกล่าว



รูปที่ 2.10 แสดงผลแรงเคลื่อนไฟฟ้าของซีเบ็ค[16]

1. ผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric Effect)

ทฤษฎีพื้นฐานของผลจากเทอร์โมอิเล็กทริก เกิดจากการส่งผ่านทางไฟฟ้าและทางความร้อนของโลหะ ที่ต่างกันจึงทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าตกคร่อมที่โลหะนั้น ความต่างศักย์นี้จะสัมพันธ์กับความจริงที่ว่า อิเล็กตรอนในปลายด้านร้อนของโลหะจะมีพลังงานความร้อนมากกว่าปลายทางด้านเย็น จึงทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็วไปหาปลายด้านเย็น ที่อุณหภูมิเดียวกันนี้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะแปรเปลี่ยนไปตามโลหะที่ต่างชนิดกันด้วย ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าโลหะที่ต่างกันจะมีการนำความร้อนที่ต่างกันนั่นเอง

1.1 ผลของซีเบ็ค (Seebeck Effect) โดยใช้ทฤษฎีโซลิตสเตด เราสามารถวิเคราะห์ค่าได้จากสมการอินทิเกรตค่าจากย่านของอุณหภูมิดังกล่าวนั้นคือ

$$\mathcal{E} = \int_{T_1}^{T_2} (Q_A - Q_B) dT \quad (2.5)$$

สมการนี้จะอธิบายผลของซีเบ็ค ซึ่งพบว่า

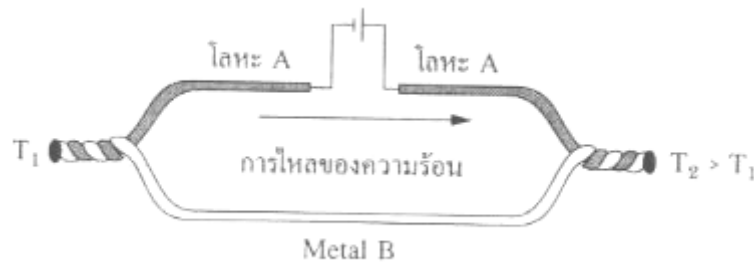
- ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf.) ที่เกิดจะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิจึงเกิด ความแตกต่างของค่าคงที่ในการส่งผ่านความร้อนของโลหะ
- ถ้าใช้โลหะชนิดเดียวกันมาทำเทอร์โมคัปเปิลค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ก็จะมีค่าเป็นศูนย์
- ถ้าอุณหภูมิทั้งสองจุดคือจุดวัดและจุดอ้างอิงเหมือนกันค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าก็จะเป็นศูนย์ โดยสูตรที่ง่ายและสามารถนำมาคำนวณได้เช่นกันคือ

$$\mathcal{E} = \alpha(T_2 - T_1) \quad (2.6)$$

เมื่อ α = ค่าคงที่หรือเรียกว่าสัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค ; volts/K

T_1, T_2 = อุณหภูมิที่จุดต่อ ; K

1.2 ผลของเพลเทียร์ (Peltier Effects) หากคิดย้อนกลับจากผลของซีเบ็ค นั่นคือใช้โลหะที่แตกต่างกันสองชนิดมาเชื่อมต่อทั้งสองเข้าด้วยกันแล้วจ่ายพลังงานจากภายนอกเข้าไป ก็จะเป็นเหตุให้เกิดกระแสไหลในวงจร เพราะจากคุณสมบัติในการส่งไฟฟ้าและความร้อนของโลหะ พบว่าขั้วหนึ่งจะเกิดความร้อน(T_2)และอีกขั้วหนึ่งจะเกิดความเย็น(T_1)ขึ้นโดยผลดังกล่าวเรียกว่า “ผลของเพลเทียร์” (Peltier effect) และถูกนำไปใช้งานพิเศษสำหรับการทำความเย็นกับส่วนของระบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือแม้กระทั่งเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก



รูปที่ 2.11 แสดงผลแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเพลเทียร์[16]

2. การใช้งานเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน (Characteristic in Application of Thermocouple Standard Type)
ในปัจจุบัน พบว่ามีเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานอยู่ 7 ชนิดตามมาตรฐานของ ANSI และ ASTM โดย
การจำแนกตามประเภทของวัสดุที่ใช้ทำได้แก่

2.1 เทอร์โมคัปเปิลแบบ S ประดิษฐ์โดยนาย Le Chatelier ในปี 1886 เป็นเทอร์โมคัปเปิลที่
ขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะโรเดียมและอีกขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะแพลทินัม

ข้อดีของแบบ S

- เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิไดซิง(oxidizing)
- เหมาะกับการใช้งานในสภาวะงานเฉื่อย คืองานที่ไม่เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาใดๆได้ง่าย ๆ
- นิยมใช้กับงานวัดตัวแปรที่มีอุณหภูมิสูง เช่น เตาหลอมเหล็ก
- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1550⁰c และอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วงประมาณ -50 ถึง
ประมาณ 1700⁰c
- หากอยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะให้ความเที่ยงตรงสูงที่สุด
- ใช้ในการสอบเทียบ ตั้งแต่จุดแข็งตัวของแอนติโมนี (630.74⁰c) จนถึงจุดแข็งตัวของ
ทองแดง (1064.43⁰c) ตามมาตรฐาน IPTS 68

ข้อเสียของแบบ S

- ต้องใช้ท่อป้องกันในทุกสภาวะบรรยากาศ
- ไม่เหมาะกับงานที่มีปฏิกิริยาแบบรีดิวซิง (reducing)
- ไม่เหมาะกับงานที่เป็นสุญญากาศ(vacuum)
- ไม่เหมาะกับงานที่มีไอโลหะ เช่น สังกะสี ตะกั่ว
- ไม่เหมาะกับงานที่มีไอของโลหะ เช่น จำพวก อาเซนิก ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส เพราะจะมี
อายุการใช้งานสั้นลง

2.2 เทอร์โมคัปเปิลแบบ R เป็นแบบที่เหมาะสมกับการวัดอุณหภูมิสูง ๆ เป็นเทอร์โมคัปเปิลที่ขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะโรเดียมและอีกขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะแพลทินัม

ข้อดีของแบบ R

- ให้แรงเคลื่อนทางด้านเอาต์พุตสูงกว่าแบบ S
- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1600⁰c
- วัดอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วง-50 ถึงประมาณ 1700⁰c
- เหมาะกับการวัดอุณหภูมิสูงๆ เช่น ในเตาหลอมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้ว
- ทนทานต่อการกัดกร่อน และให้เสถียรภาพของอุณหภูมิที่ดี

ข้อเสียเช่นเดียวกับแบบ S

2.3 เทอร์โมคัปเปิลแบบ B ผลิตครั้งแรกเมื่อปี 1954 ในประเทศเยอรมันเป็นเทอร์โมคัปเปิลที่ขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะโครเมียมและอีกขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะแพลทินัม

ข้อดีของแบบ B

- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วงประมาณ 100 ถึงประมาณ 1600⁰c
- วัดอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วงประมาณ 50 ถึงประมาณ 1750⁰c
- แข็งแรงกว่าแบบ S และแบบ R
- เหมาะกับการใช้งานในสถานะที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิงและสถานะเฉื่อยให้ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณ (linearity) ดี

ข้อเสียของแบบ B

- ให้แรงเคลื่อนของไฟฟ้าน้อยกว่าแบบอื่น ๆ เมื่อวัดอุณหภูมิที่เงื่อนไขเดียวกัน
- ไม่เหมาะกับสถานะที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาแบบรีดิวซิง
- ไม่เหมาะกับสถานะที่เป็นสุญญากาศ
- ไม่เหมาะกับสภาพงานที่มีไอของโลหะและอโลหะเช่นเดียวกับแบบ R และ S
- ให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสองค่า (double value region) จากอุณหภูมิในช่วง 0-42⁰c ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าที่แรงเคลื่อนไฟฟ้านั้นมีอุณหภูมิเป็นเท่าใด
- ให้ความชัน(การเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนต่ออุณหภูมิ) ของสัญญาณต่ำกว่าแบบอื่น ๆ

2.4 เทอร์โมคัปเปิลแบบ J เป็นเทอร์โมคัปเปิลที่ขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะเหล็กและอีกขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะผสมของทองแดง – นิกเกิล (คอนสแตนตัน) พบว่าหากใช้แพลทินัมมาทำเป็นเทอร์โมคัปเปิล ความคุ้มทุนก็ลดลงไป ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลราคาถูกลง จึงใช้วัสดุอื่นที่มีราคาถูกกว่ามาทดแทนแพลทินัม โดยรหัสสีตามมาตรฐาน BS มีดังนี้ ถ้าขั้วบวกจะเป็นสีดำ ขั้วลบจะเป็นสีขาว ทั้งตัวจะเป็นสีดำความแน่นอนตามมาตรฐาน BS 1797 Part 30 , 1993 ได้แก่

1. Class 1 = -40°C ถึง $+750^{\circ}\text{C} \pm 0.004 \times t$ หรือ $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$

2. Class 2 = -40°C ถึง $+750^{\circ}\text{C} \pm 0.0075 \times t$ หรือ $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$

เมื่อ t คือ อุณหภูมิจริง

ข้อดีของแบบ J

- ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิได้ดี
- มีราคาถูกกว่าแบบที่ทำจากธาตุบริสุทธิ์
- ตามมาตรฐาน BS 7937 Part 30 สามารถวัดอุณหภูมิได้ต่อเนื่องจากช่วงประมาณ -210 ถึง 1200°C
- เหมาะกับสภาพงานที่เป็นสุญญากาศงานที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิงและงานที่อยู่ในสภาพเฉื่อย เมื่ออุณหภูมิไม่เกิน 760°C
- นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก
- เป็นแบบที่นิยมใช้ ราคาไม่แพง

ข้อเสียของแบบ J

- วัดอุณหภูมิได้ต่ำกว่าแบบ T
- ไม่เหมาะสมมากนักกับงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C
- หากวัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 538°C จะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิงที่สายซึ่งทำจากเหล็กด้วยอัตราสูง
- หากใช้งานนานเกินช่วง 20 ปี ส่วนผสมทางเคมี คือ แมงกานีสในเหล็กจะเพิ่มขึ้น 0.5% ทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

2.5 เทอร์โมคัปเปิลแบบ K เป็นเทอร์โมคัปเปิลที่ขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะผสมของนิกเกิล - โครเมียม (โครเมล) และอีกขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะผสมของนิกเกิล-อะลูมิเนียม (อลูเมล) ธาตุหนึ่งที่เป็นฐานสำหรับการสร้างคือ นิกเกิล เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เริ่มผลิตให้เป็นมาตรฐานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1916 โดยพื้นฐานการผลิต ขั้วหนึ่งจะเป็นนิกเกิลที่เจือปนด้วยอะลูมิเนียมส่วนอีกด้านที่เจือปนด้วยโครเมียม เพราะในปี ค.ศ. 1916 ยังไม่สามารถสร้างนิกเกิลบริสุทธิ์ได้จึงได้เติมสารไม่บริสุทธิ์ต่าง ๆ ในส่วนผสมของวัสดุชนิด K แต่ในปัจจุบันได้มีการระมัดระวังส่วนผสมที่จะทำให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ดังกล่าวเพื่อเหตุผลในการบำรุงรักษาและสอบเทียบ ด้วยเหตุนี้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่กำหนดเป็นค่ามาตรฐานจะไม่ใช้โลหะผสมแต่โดยทั่วไปจะผสมธาตุพิเศษเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเคลื่อน/อุณหภูมิของจุดหลอมละลายที่กำหนดไว้ ข้อควรระวังในการใช้งานของชนิด K มีดังนี้

- ขั้วลบของเทอร์โมคัปเปิลจะเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (เหล็กที่เป็นสารแม่เหล็ก) ที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่จุดคิวรี (curie point) คืออุณหภูมิที่มันเปลี่ยนจากคุณสมบัติเหล็กไปเป็นแม่เหล็ก อยู่ในช่วงที่ใช้งานพอดี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางเอาต์พุตอย่างทันทีทันใด ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าจุดคิวรีดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะผสม จุดคิวรีนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติ

จากเทอร์โมคัปเปิลตัวหนึ่งให้เป็นเทอร์โมคัปเปิลอีกตัวหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องทดลองหาการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนที่ไม่ทราบค่า ณ อุณหภูมิที่เราไม่ทราบค่านี้

- ที่อุณหภูมิสูง ๆ (ช่วง 200°C ถึง 600°C) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะมีผลของฮิสเตอร์รีซิสเกิดขึ้นขณะที่มันอ่านค่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและในช่วงที่อุณหภูมิลดลง ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่สามารถจะคาดเดาการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนได้

- ที่อุณหภูมิ 1000°C ขั้วของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะเกิดออกไซด์ เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อน

- การใช้โคบอลต์เป็นโลหะผสมสำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะทำให้เกิดปัญหาในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์หรือในพื้นที่อื่น ๆ ที่มีฟลักซ์นิวตรอนสูงๆ ธาตุบางตัวจะรับเอาการปลดปล่อยนิวเคลียร์ จึงทำให้เปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางด้านเอาต์พุต

ย่านการทำงานและความแน่นอนของเทอร์โมคัปเปิลในงานอุตสาหกรรม ที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 (รหัสสำหรับการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล) ช่วงการวัดอุณหภูมิต่อเนื่องของเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้จะเป็น -270°C ถึง $+1,370^{\circ}\text{C}$

โดยมีระดับความแน่นอนซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 (ตารางอ้างอิงสำหรับเทอร์โมคัปเปิลนานาชาติ) เป็นดังนี้

1. Class 1 = -40°C ถึง $+1,000^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.004 \times t$ หรือ $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$
2. Class 2 = -40°C ถึง $+1,200^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.0075 \times t$ หรือ $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$
3. Class 1 = -200°C ถึง $+40^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.015 \times t$ หรือ $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$

เมื่อ t อุณหภูมิจริงที่ทำการวัด

รหัสสีสำหรับสายเทอร์โมคัปเปิลกำหนดโดยมาตรฐาน BS 4937 part 30, 1993 (รหัสสีตามมาตรฐานอังกฤษสำหรับสายชนิดแบบคู่ของเทอร์โมคัปเปิล) สำหรับชนิด K ขั้วบวกจะเป็นสีเขียว ขั้วลบจะเป็นสีขาว ถ้าตลอดทั้งตัวจะเป็นสีเขียว

ข้อดีของแบบ K

- เป็นแบบที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด
- สำหรับการวัดอุณหภูมิช่วงสั้น ๆ จะวัดได้จาก -180°C ถึงประมาณ $1,350^{\circ}\text{C}$
- สามารถใช้วัดในงานที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซิง หรือสภาวะแบบเฉื่อยได้ดีกว่าแบบอื่น ๆ
- สามารถใช้กับสภาพงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้ดี
- ให้อัตราการเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่น ๆ (ความชันเกือบเป็น 1) และมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในบรรดาเทอร์โมคัปเปิลด้วยกัน

ข้อเสียของแบบ K

- ไม่เหมาะกับการวัดที่ต้องสัมผัสกับปฏิกิริยารีดิวซิงและออกซิไดซิงโดยตรง
- ไม่เหมาะกับงานที่มีไอของซัลเฟอร์
- ไม่เหมาะกับสภาพงานที่เป็นสุญญากาศ (ยกเว้นจะใช้ในช่วงเวลาสั้นๆ)
- หลังการใช้งานไป 30 ปี ทำให้ส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไป เป็นผลทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไป

2.6 เทอร์โมคัปเปิลแบบ T เป็นเทอร์โมคัปเปิลที่ขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะทองแดงและอีกขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะผสมของทองแดง-นิกเกิล(คอนสแตนตัน)

ข้อดีของแบบ T

- ดีกว่าแบบ K ตรงที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ต่ำกว่า นั่นคือเหมาะกับการวัดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ เช่นในห้องเย็น ตู้แช่แข็ง
- ให้ความแม่นยำในการวัดดีกว่าแบบ K (ช่วงที่ต่ำกว่า 100°C ความแม่นยำจะเป็น $\pm 1\%$) มีเสถียรภาพในการวัดอุณหภูมิ
- การวัดสภาพงานที่เป็นสุญญากาศงานที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิงรีดิวซิงและงานที่มีปฏิกิริยาแบบเฉื่อยจะทำได้ดี
- วัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องได้จากช่วง -185 ถึง 300°C และวัดอุณหภูมิแบบช่วงสั้นๆ ได้จากช่วง -250 ถึง 400°C
- ทนต่อบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนได้ดี

ข้อเสียของแบบ T

- เป็นแบบที่วัดอุณหภูมิช่วงบวกได้น้อยกว่าแบบอื่นๆ
- หากใช้วัดอุณหภูมิที่สูงกว่า 370°C จะทำให้เกิดออกไซด์มาก
- ไม่เหมาะกับการวัดอุณหภูมิที่สัมผัสกับการแผ่รังสีความร้อนโดยตรง(ทำให้ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ทำเปลี่ยนไป คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วย)
- คุณสมบัติของแรงเคลื่อนต่ออุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้น (แต่ก็ปรับปรุงได้จากวงจรปรับสภาพสัญญาณ)

2.7 เทอร์โมคัปเปิลชนิด E เป็นเทอร์โมคัปเปิลที่ขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะผสมของนิกเกิล - โครเมียม (โครเมล)และอีกขั้วหนึ่งสร้างจากโลหะผสมของทองแดง-นิกเกิล(คอนสแตนตัน)

ข้อดีของแบบ E

- ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดเมื่อวัดอุณหภูมิเทียบกับแบบอื่น ๆ ในสถานะเดียวกัน
- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 800°C

3. การแก้ไขให้ระบบวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลให้ทำงานได้ดีขึ้น ต้องปฏิบัติดังนี้

- ใช้สายเทอร์โมคัปเปิลขนาดใหญ่ที่สุดที่จะเป็นไปได้ เพราะมันจะไม่พวงเอาความร้อนออกจากพื้นที่การวัดเข้ามา
- ถ้าต้องการใช้สายขนาดเล็ก ๆ ให้ใช้เฉพาะในขอบเขตที่ทำการวัด และใช้สายขยาย (extention wire) ในขอบเขตที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลางสาย
- หลีกเลี่ยงความเค้นทางกลและการสั่นสะเทือนที่มีผลให้เกิดความเครียดในสาย
- เมื่อใช้สายเทอร์โมคัปเปิลยาว ๆ ให้ต่อ shield ที่สายไปยังขั้วต่อสายของคิจิตอล โวลต์มิเตอร์ และใช้สายขยายสัญญาณแบบบิเดเกลียว
- หลีกเลี่ยงบริเวณที่เต็มไปด้วยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกลางสาย
- พยายามเลือกสายเทอร์โมคัปเปิลในพิสัยอุณหภูมิที่จะวัดค่า
- ป้องกันวงจรแปลง integrate A/D จากการรบกวน
- ใช้สายขยายเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลางสายน้อย ๆ
- ทดสอบและเก็บค่าความต้านทานของเทอร์โมคัปเปิลเก่า ๆ ไว้ พร้อมกับวัดค่าความต้านทานของเทอร์โมคัปเปิลเก็บไว้เป็นช่วง ๆ

บทที่ 3 วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 ดินขาว

ดินขาวที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นดินขาวที่ได้จากเหมืองดินขาวแหล่งต่างๆภายในประเทศ

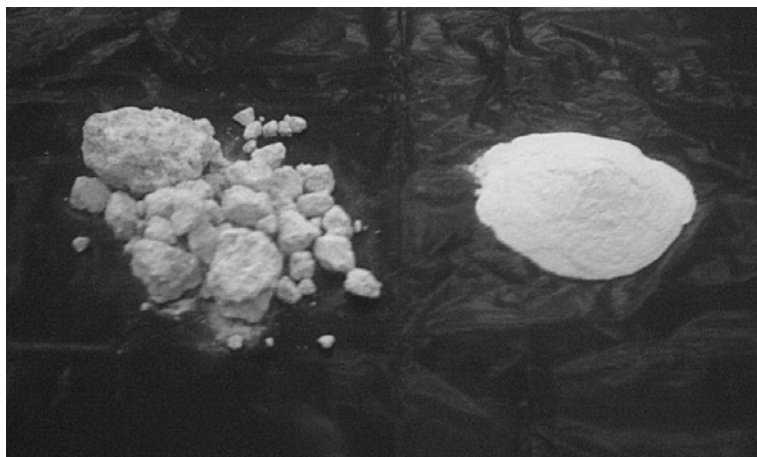
13 แหล่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สถานที่ตั้งเหมืองดินขาวแหล่งต่างๆภายในประเทศ

1. ดินขาวตำบลบุญนาควพัฒนา อำเภอมือง จังหวัดลำปาง

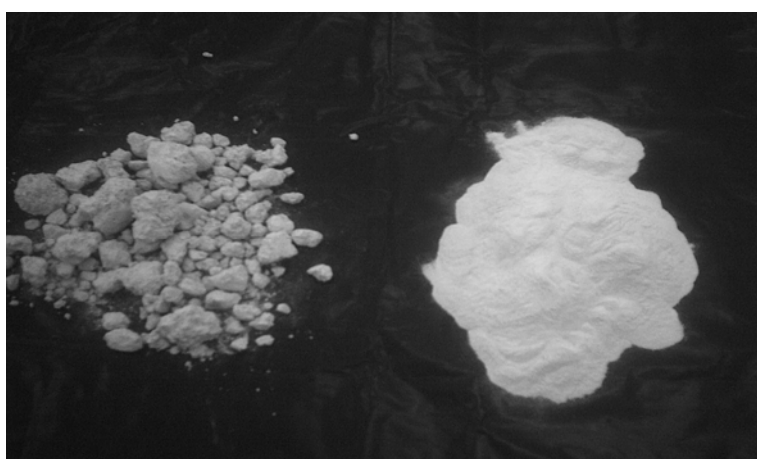
ลักษณะเม็ดดินตามธรรมชาติมีสีขาวนวลจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีขาวนวล ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ
ตำบลบุญนาควพัฒนา อำเภอมือง จังหวัดลำปาง

2. ดินขาวตำบลสันดอนแก้ว อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง

ลักษณะเม็ดดินตามธรรมชาติมีสีขาวนวลจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีเทาอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ
ตำบลสันดอนแก้ว อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง

3. ดินขาวตำบลทุ่งฝาย อำเภอเมือง-แจ้ห่ม จังหวัดลำปาง

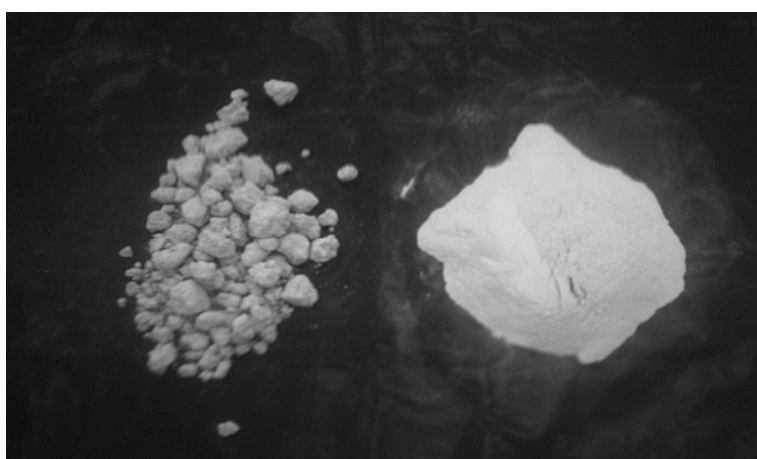
ลักษณะเมื่อดินตามธรรมชาติมีสีขาวนวลจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีขาวนวล ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของตำบลทุ่งฝาย อำเภอเมือง-แจ้ห่ม จังหวัดลำปาง

4. ดินขาวตำบลบ้านสา อำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง

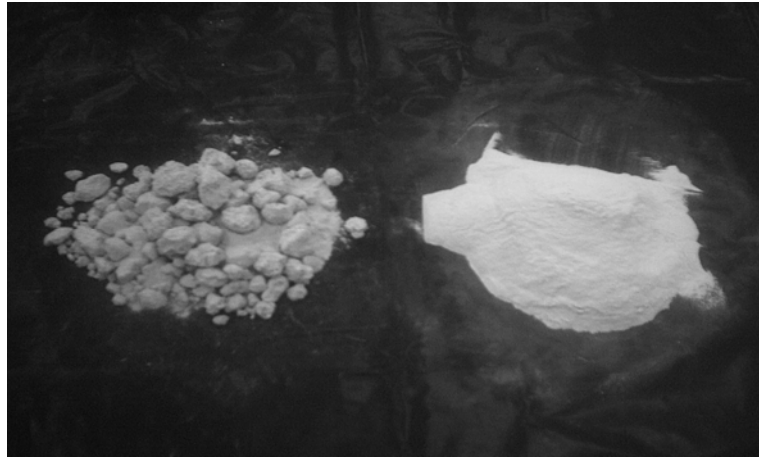
ลักษณะเมื่อดินตามธรรมชาติมีสีขาวนวลจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีขาวนวล ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของตำบลบ้านสา อำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง

5. ดินขาวตำบลผาจุ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์

ลักษณะเมื่อดินตามธรรมชาติมีสีขาวนวลจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีขาวนวล ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลผาจุ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์

6. ดินขาวตำบลโนนทอง อำเภอนาูง จังหวัดอุดรธานี

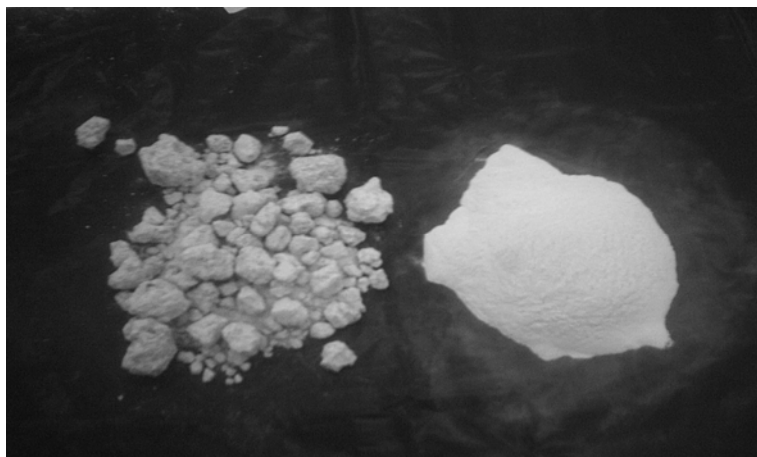
ลักษณะเมื่อดินตามธรรมชาติมีสีขาวนวลจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีขาวนวล ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ ตำบลโนนทอง อำเภอนาูง จังหวัดอุดรธานี

7. ดินขาวตำบลโคกไม้ลาย อำเภอมือง จังหวัดปราจีนบุรี

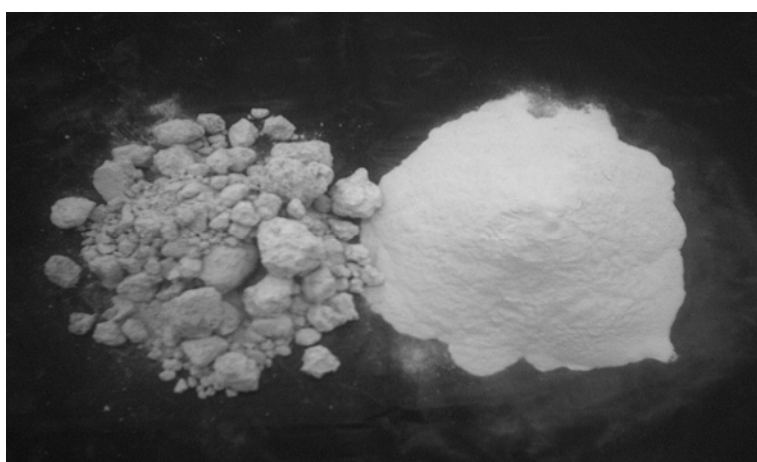
ลักษณะเมื่อดินตามธรรมชาติมีสีขาวนวลจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีขาวนวล ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของตำบลโคกไม้ลาย อำเภอมือง จังหวัดปราจีนบุรี

8. ดินขาวตำบลด่านทับตะโก อำเภोजอมบึง จังหวัดราชบุรี

ลักษณะเมื่อดินตามธรรมชาติมีสีน้ำตาลปนส้มจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีน้ำตาลปนส้ม ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของตำบลด่านทับตะโก อำเภोजอมบึง จังหวัดราชบุรี

9. ดินขาวตำบลวังจันทร์ อำเภอกำแพงกระเจาน จังหวัดเพชรบุรี

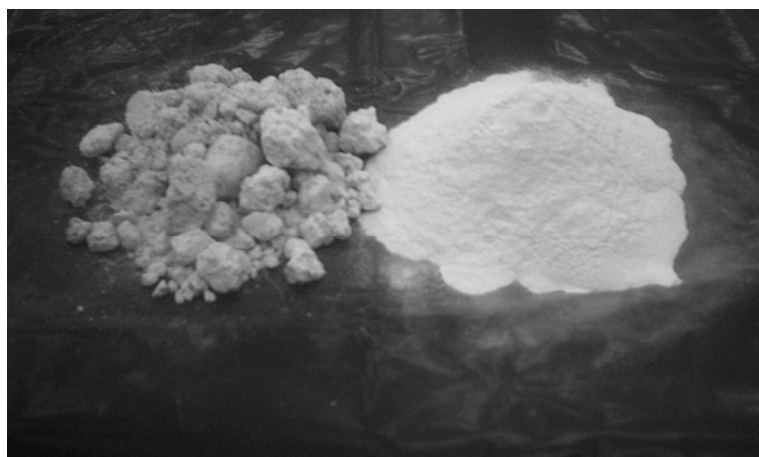
ลักษณะเมื่อดินตามธรรมชาติมีสีน้ำตาลปนส้มจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีน้ำตาลปนส้ม ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ
ตำบลวังจันทร์ อำเภอกำแพงกระเจาน จังหวัดเพชรบุรี

10. ดินขาวตำบลห้วยยาง อำเภอแกลง จังหวัดระยอง

ลักษณะเมื่อดินตามธรรมชาติมีสีน้ำตาลปนส้มจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีน้ำตาลปนส้ม ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ
ตำบลห้วยยาง อำเภอแกลง จังหวัดระยอง

11. ดินขาวตำบลหาดส้มแป้น อำเภอเมือง จังหวัดระนอง

ลักษณะเมื่อดินตามธรรมชาติมีสีขาวนวลจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีขาวนวล ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ
ตำบลหาดส้มแป้น อำเภอเมือง จังหวัดระนอง

12. ดินขาวตำบลขุนทะเล อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ลักษณะเมื่อดินตามธรรมชาติมีสีขาวนวลจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีขาวนวล ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ
ตำบลขุนทะเล อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี

13. ดินขาวตำบลดจวบ อำเภोजะเอยรื่อง จังหวัดนราธิวาส

ลักษณะเม็ดดินตามธรรมชาติมีสีขาวนวลจับกันเป็นก้อน มีเศษหินปนอยู่เล็กน้อย เนื้อดินที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดสีขาวนวล ดังแสดงในรูปที่ 3.14



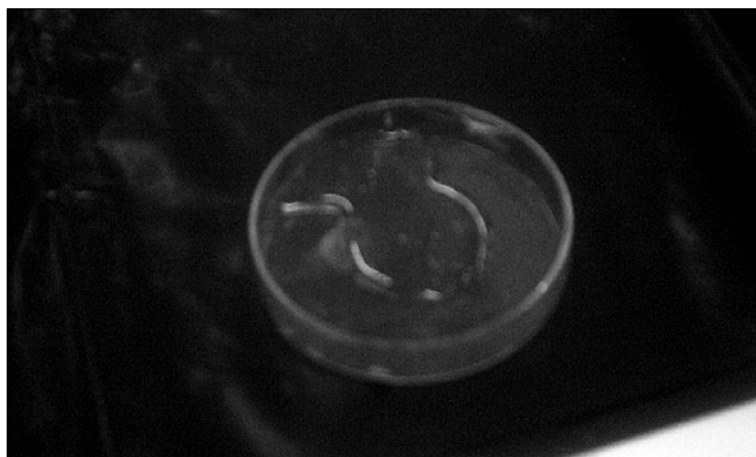
รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะดินขาวที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และดินขาวธรรมชาติของ
ตำบลดจวบ อำเภोजะเอยรื่อง จังหวัดนราธิวาส

3.1.2 สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพโดยกลวิธีโพลีเมอร์ไรเซชัน ที่นำมาใช้ผสมกับตัวอย่างดินขาวใช้เกรดพาณิชย์ มีจำหน่ายในท้องตลาด ซึ่งมีความแตกต่างกันจำนวน 6 สารคือ

1. โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate , Na_2SiO_3)

โซเดียมซิลิเกตหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “น้ำแก้ว” มีสูตรทางเคมีคือ Na_2SiO_3 มีลักษณะเป็นของเหลวข้นๆ ละลายได้ในน้ำ ทำจากการหลอมตัวของทรายและโซเดียมคาร์บอเนต ใช้เป็นวัตถุประสานแก้วหรือเป็นซีเมนต์ทนไฟ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH)เท่ากับ 14 ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ลักษณะของสารโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate , Na_2SiO_3)

2. ไดโซเดียมคาร์บอเนต (Disodium Carbonate , Na_2CO_3)

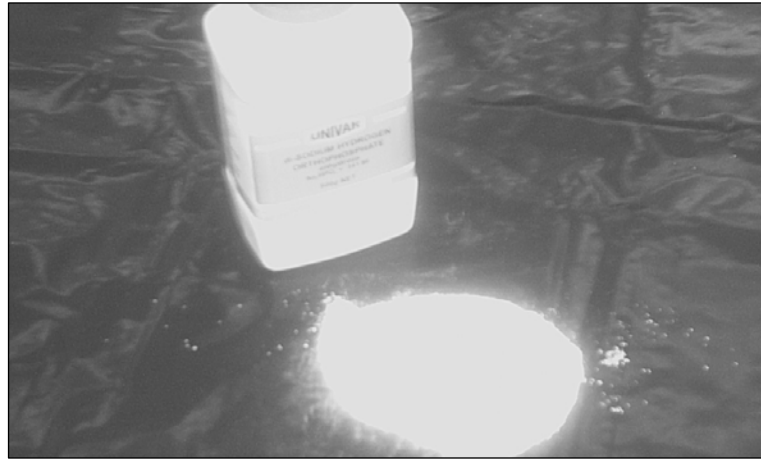
โซเดียมคาร์บอเนตหรือโซดาแอช เป็นสารประกอบเกลือของกรดคาร์บอนิก มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น ละลายได้ในน้ำ มีฤทธิ์เป็นด่างแก่เมื่อละลายน้ำ มีสูตรทางเคมีคือ Na_2CO_3 หลอมเหลวที่ 851 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ 2.53 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 12 เป็นสารไม่ติดไฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ลักษณะของสารไดโซเดียมคาร์บอเนต (Disodium Carbonate , Na_2CO_3)

3. ไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Disodium Hydrogen Orthophosphate , Na_2HPO_4)

มีลักษณะเป็นผง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีสูตรทางเคมีคือ Na_2HPO_4 มีจุดหลอมเหลวที่ 240 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ 1.52 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH)เท่ากับ 9 ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ลักษณะของสารไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Disodium Hydrogen Orthophosphate , Na_2HPO_4)

4. ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Trisodiums phosphate , Na_3PO_4)

มีลักษณะเป็นผงหรือผลึกสีขาว มีสูตรทางเคมีคือ Na_3PO_4 มีจุดหลอมเหลวที่ 75 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ 1.62 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH)เท่ากับ 11.5-12.5 ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ลักษณะของสารไตรโซเดียมฟอสเฟต (Trisodiums phosphate , Na_3PO_4)

5. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide , KOH)

มีลักษณะเป็นผงของแข็งจับตัวกันเป็นแผ่นบาง สีขาว มีสูตรทางเคมีคือ KOH มีจุดหลอมเหลวที่ 361 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ 2.044 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 13.5 ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ลักษณะของสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide , KOH)

6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide , NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างเข้มข้น ในชีวิตประจำวันมักเรียกโซดาไฟ มีสูตรทางเคมีคือ NaOH มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ระเหย มีจุดหลอมเหลวที่ 318 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ 2.13 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 14 เป็นสารไม่ติดไฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ลักษณะของสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide , NaOH)

3.1.3 น้ำ

น้ำที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำสะอาดสามารถดื่มได้

3.2 วิธีการทดสอบที่ใช้ในการศึกษา

วิธีการทดสอบที่ใช้ในการศึกษา สามารถแบ่งออกเป็น ส่วน ๆ ดังนี้

3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน

นำตัวอย่างดินขาวที่ใช้ในการศึกษา มาทดสอบคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ โดยศึกษาวิจัยตามหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินตามมาตรฐานของ ASTM D854 ซึ่งตัวอย่างที่ใช้มีสภาพความชื้นตามธรรมชาติ และแสดงค่าที่ได้ออกมาจากการเฉลี่ยค่าที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง
2. การทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุโดยผ่านตระแกรงแบบล้าง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2487
3. การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กโดยใช้ Hydrometer ซึ่งทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D422
4. Liquid Limit (LL) ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D4318 ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดสอบ เป็นส่วนที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 40 (ขนาด 0.425 มม.)
5. Plastic Limit (PL) ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D4318 ตัวอย่างดินที่นำมาใช้ในการทดสอบ เป็นส่วนที่ผ่านตระแกรงเบอร์ 40 (ขนาด 0.425 มม.)

3.2.2 การทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

การทดสอบการหาการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1557 เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยใช้แบบหล่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) สูง 116.8 มิลลิเมตร (4.584 นิ้ว) ค้อนหนัก 10 ปอนด์ ระยะตกกระทบของค้อน 18 นิ้ว ใช้จำนวนครั้งการบดอัด 25 ครั้งต่อชั้นและบดอัด 5 ชั้น โดยทดสอบกับตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดินขาว และค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมนี้จะนำไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เพื่อทดสอบแคลอริเมตรี

3.2.3 การทดสอบเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว

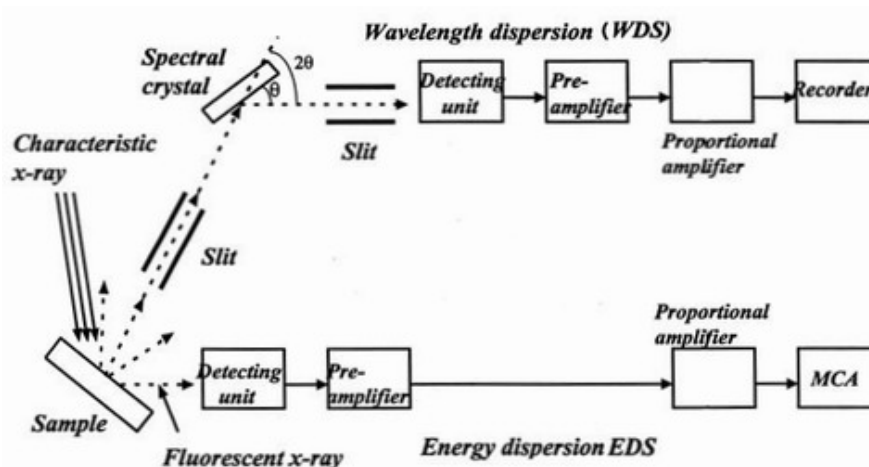
1. การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวโดยวิธี X-Ray Fluorescence(XRF) ซึ่งตัวอย่างดินขาวต้องมีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม. ต้องผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง การทดสอบดำเนินการโดยภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. หลักการทำงานของ X-Ray Fluorescence(XRF)[17]

X-Ray Fluorescence(XRF) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive analysis) สามารถนำมาใช้วิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆ ในตัวอย่างทั้งเชิงคุณภาพ (qualitative analysis) และเชิงปริมาณ (quantitative analysis) สามารถทำการวิเคราะห์ ธาตุได้ทีละธาตุหรือหลายๆ ธาตุพร้อมๆกัน นอกจากนี้ ยังใช้วิเคราะห์ปริมาณธาตุได้ ตั้งแต่ระดับความเข้มข้นสูงจนถึงระดับ trace element(ppm) จึงทำให้เทคนิคนี้ ได้รับความนิยมมากขึ้น ทั้งในด้านอุตสาหกรรม การแพทย์ ธรณีวิทยา สิ่งแวดล้อม และการเกษตร การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ประกอบด้วย 2 ระบบ คือ

- ระบบที่วัดความยาวคลื่น (Wavelength dispersive system, WDX) กระบวนการที่โฟตอนของรังสีเอกซ์ซึ่งมีพลังงานค่าหนึ่งถูกปลดปล่อยออกมาจากตัวอย่างที่ถูกฉายด้วยรังสีเอกซ์ รังสีแกมมา หรืออนุภาคอิเล็กตรอนหรือโปรตอนที่มีพลังงานสูง ซึ่งค่าความยาวคลื่นเฉพาะของรังสีเอกซ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมานั้นจะเป็น ตัวบ่งบอกถึงชนิดและปริมาณของธาตุนั้นที่มีอยู่ในวัตถุ

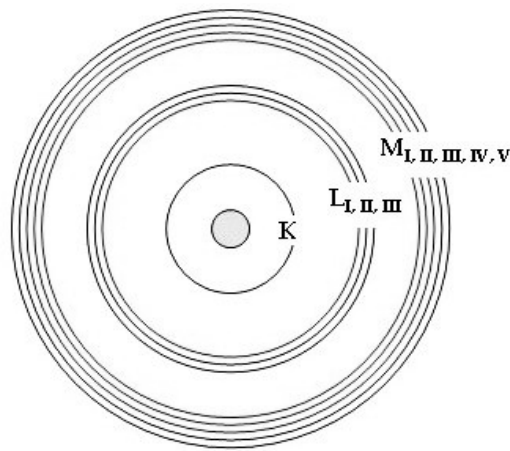
- ระบบที่วัดพลังงาน (Energy dispersive system, EDX) เมื่อกระตุ้นตัวอย่างด้วยกลุ่มพลังงาน (โฟตอน) ที่เหมาะสม จะเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic x-ray) ของธาตุนั้นที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งรังสีเอกซ์เฉพาะตัวนี้จะมีค่าพลังงานเฉพาะที่แตกต่างกันตามชนิดของธาตุ



รูปที่ 3.21 แผนผังการวิเคราะห์ธาตุโดย X-Ray Fluorescence(XRF)[17]

โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X ray) ของแต่ละธาตุ

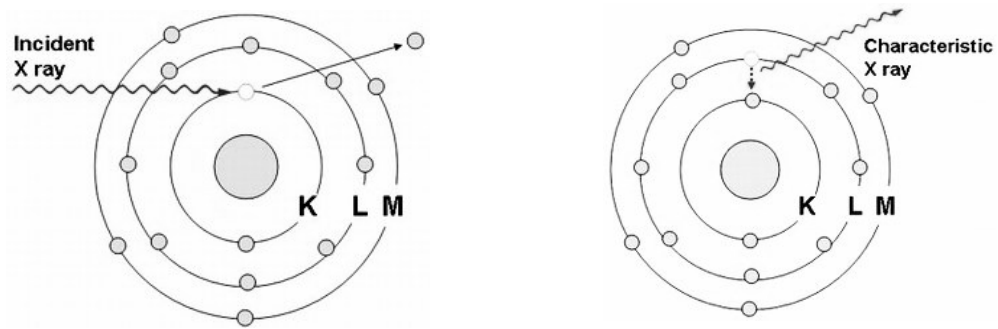
อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม แบ่งเป็นชั้น (shells) โดยชั้นในสุด ได้แก่ ชั้น K มีระดับพลังงาน (energy level) ต่ำสุด ถัดออกมา ได้แก่ ชั้น L, M, N, ... ซึ่งจะมีระดับพลังงานสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้อิเล็กตรอนในชั้น K ที่มีระดับพลังงานเดียวแล้ว อิเล็กตรอนในชั้นอื่น ยังแบ่งเป็นชั้นย่อย ได้แก่ L_I, L_{II}, L_{III} และ $M_I, M_{II}, M_{III}, M_{IV}, M_V$ ซึ่งอะตอมของธาตุแต่ละชนิด จะมีความแตกต่างของพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน



รูปที่ 3.22 อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมแบ่งเป็นชั้น[17]

อิเล็กตรอนในแต่ละชั้นของวงโคจร มีพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ที่ได้รับจากนิวเคลียสแตกต่างกัน อิเล็กตรอนวงในที่อยู่ใกล้นิวเคลียส จะได้รับพลังงานยึดเหนี่ยวมากกว่าอิเล็กตรอนวงนอก และธาตุที่มีเลขอะตอมสูงขึ้น จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ออิเล็กตรอนมากขึ้น

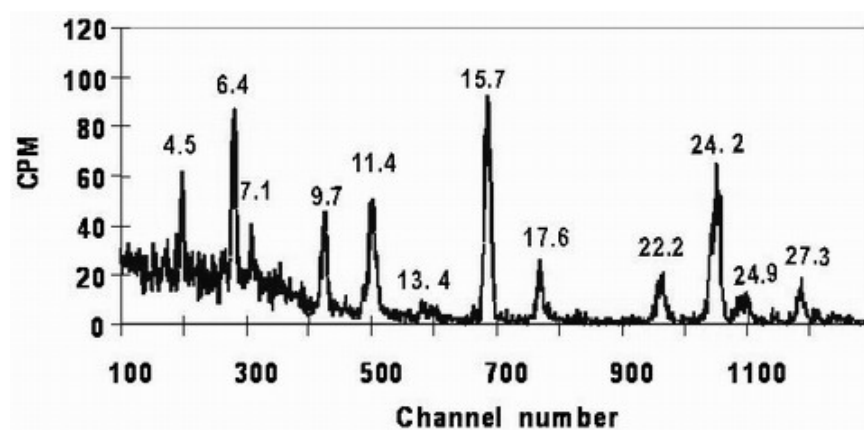
เมื่อยิงรังสีเอกซ์ รังสีแกมมา อิเล็กตรอนหรือโปรตอนไปยังอะตอมของธาตุ จะชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้ตำแหน่งนั้นว่าง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ เช่น จากชั้น L ไปชั้น K จากชั้น M ไปชั้น K หรือจากชั้น M ไปชั้น L โดยคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุ



รูปที่ 3.23 รังสีเอกซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจรและอิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่ โดยคายรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะออกมา[17]

รังสีที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม จะต้องมีความสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน หรือ แอ็บซอร์ปชันเอจ (absorption edge) โดยจะมีสัมประสิทธิ์ในการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อมีพลังงานใกล้เคียงกับ absorption edge และจะมีค่าลดลงเมื่อรังสีที่เข้าทำปฏิกิริยามีพลังงานสูงขึ้น โดยมีค่าแตกต่างกันสำหรับอิเล็กตรอนแต่ละชั้นและแตกต่างกันในแต่ละธาตุ

การหาชนิดของธาตุ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์จำเพาะ ขณะที่การหาปริมาณธาตุ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่คายออกมาเมื่อทำการวัดรังสีเอกซ์จำเพาะ ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากธาตุในตัวอย่าง ภายหลังการกระตุ้น ด้วยกลุ่มพลังงานที่เหมาะสม ด้วยระบบวัดรังสีเอกซ์แบบแยกพลังงาน จะได้สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ ที่มีลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกัน ตามชนิดของธาตุ องค์ประกอบในตัวอย่างนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.24 นำค่าพลังงานที่ได้ ไปเปรียบเทียบกับ Ka, Kb, La และ Lb ในตาราง Emission Energies Chart ทำให้หาธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างนั้นได้



รูปที่ 3.24 สเปกตรัมรังสีเอกซ์[17]

3.2.4 การทดสอบแคลอริเมตรี

การหาค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนหรืออัตราการเกิดความร้อนจากการทดลองทำได้โดยการวัดการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ความดันคงที่เมื่อความร้อนถ่ายเทเข้าหรือออกจากสารใดสารหนึ่ง อุณหภูมิของสารนั้นจะเปลี่ยนแปลงไป ในทางปฏิบัติเราจึงวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปนี้

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลคืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน

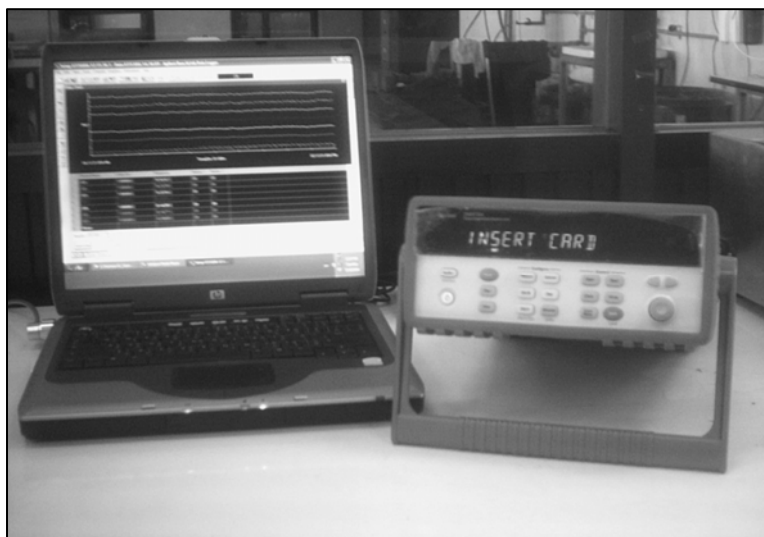
2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่งเรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง ในที่นี้เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ K ที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากให้อัตราการเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่น ๆ (ความชันเกือบเป็น 1) และมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในการบรรดาเทอร์โมคัปเปิลด้วยกันอีกทั้งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่จะวัดค่า ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลแบบ K

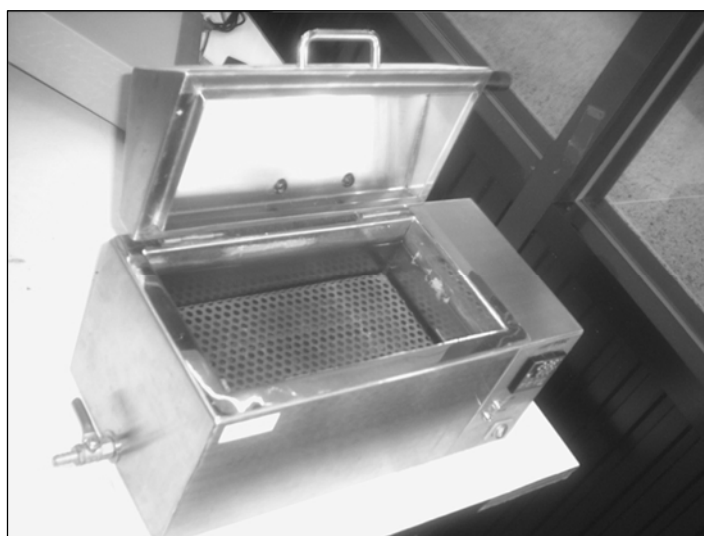
1.2 อุปกรณ์อ่านและบันทึกข้อมูล (Data logger) รุ่น 34970A ทำหน้าที่อ่านการเปลี่ยนแปลง

คุณสมบัติทางไฟฟ้า จากเทอร์โมคัปเปิลแบบ K แล้วส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 3.26 ความถี่ในการจัดเก็บข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้คือจัดเก็บทุก 1 นาทีเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.26 อุปกรณ์อ่านและบันทึกข้อมูล (Data logger) รุ่น 34970A

1.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมอุณหภูมิกระตุ้นของสารประกอบให้คงที่ อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) ที่ใช้มีความจุ 5 ลิตร ช่วงอุณหภูมิ (Temperature range) ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 100°C และอุณหภูมิกระตุ้นที่ใช้ในการทดสอบ คือ 40 , 60 และ 80 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)

2. การเตรียมตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มเพื่อทดสอบแคลอริเมตรี

ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อวัดอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวผสมสารผสมเพิ่มซึ่งแตกต่างกัน 6 ชนิดและน้ำ ปริมาณดินขาวที่ใช้ในการทดสอบ 25 กรัม ปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้แต่ละชนิดในการทดสอบ 2.5 กรัมและน้ำใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม(Optimum Moisture Content, OMC)ของดินขาวและสารผสมเพิ่มแต่ละชนิด ตามการทดสอบการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน การผสมดินขาว สารผสมเพิ่มและน้ำให้เข้ากันต้องกระทำให้เสร็จภายใน 4 นาที ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบแล้วจุ่มสายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K เพื่ออ่านค่าอุณหภูมิของตัวอย่างดินขาวที่ผสมสารผสมเพิ่มและน้ำแล้ว ในนาทีที่ 5 นับตั้งแต่เริ่มผสมจากนั้นนำตัวอย่างใส่ลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.28 จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่ออ่านและบันทึกค่าอุณหภูมิทุก 1 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.29 เมื่อครบ 24 ชั่วโมงให้นำตัวอย่างที่ทดสอบแล้วมาชั่งน้ำหนักเพื่อตรวจสอบว่ามีน้ำจากภายนอกเข้าไปในตัวอย่างหรือไม่ ค่าอุณหภูมิของตัวอย่างดินขาวที่ผสมสารผสมเพิ่มและน้ำที่ได้จากการอ่านการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า จากเทอร์โมคัปเปิลแบบ K แล้วส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูลค่าอุณหภูมินั้นก่อนนำค่าอุณหภูมิไปใช้งานต้องทำการปรับแก้ค่าอุณหภูมิ ซึ่งในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลทุกครั้ง ต้องทำการสอบเทียบสายเทอร์โมคัปเปิลทุกสายโดยการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ทราบค่าอุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียสเพื่อนำไปสร้างเส้นแนวโน้มและสมการของเส้นแนวโน้มเพื่อใช้ปรับแก้ค่าอุณหภูมิ



รูปที่ 3.28 แสดงตัวอย่างสารประกอบเพื่อทดสอบแคลอริเมตรี



รูปที่ 3.29 แสดงตัวอย่างการทดสอบแคลอริเมตรี

3. การรายงานผล

การแสดงค่าปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม

3.1 ปริมาณความร้อน(q)

$$q = m \times C_p \times \Delta T \quad (3.1)$$

เมื่อ q = ปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือเสียออกไป

m = มวลของสาร

C_p = ความจุความร้อนจำเพาะของสาร

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

3.2 ปริมาณความร้อนต่อมวล (Q)

$$Q = q / m \quad (3.2)$$

เมื่อ Q = ปริมาณความร้อนต่อมวล

q = ปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือเสียออกไป

m = มวลของสาร

3.3 อัตราการเกิดความร้อน(ΔE)

$$\Delta E = dQ/dt \quad (3.3)$$

เมื่อ ΔE = อัตราการเกิดความร้อน
 dQ/dt = อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนต่อมวลเทียบกับเวลา

3.2.4 การทดสอบความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity , Cp)

หน่วยวัดความสามารถของวัตถุในการดูดซึมความร้อนนั้นคือ ปริมาณของพลังงาน (จูล) ที่ต้องการทำให้สาร 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ความจุความร้อนจำเพาะของสารมีหน่วยเป็นจูลต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส ($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$)

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1.1 แคลอริมิเตอร์และภาชนะป้องกันความร้อนภายในบุด้วยโฟมซึ่งเป็นแผ่นปิดกั้นฉนวนความร้อนในภาชนะ ดังแสดงในรูปที่ 3.30

1.2 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลแบบ K และอุปกรณ์อ่านและบันทึกข้อมูล (Data logger) รุ่น 34970A



รูปที่ 3.30 แคลอริมิเตอร์และภาชนะป้องกันความร้อน

2. วิธีการทดสอบความจุความร้อนจำเพาะ

เมื่อนำดินขาวมาผสมกับน้ำจะมีการถ่ายเทปริมาณความร้อนจากดินขาว(ระบบที่มีอุณหภูมิสูงกว่า) ไปยังน้ำ (ของระบบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า) จนกระทั่งได้อุณหภูมิของสารผสมคงที่ค่าหนึ่ง (อุณหภูมิสมดุล) อ่านค่าอุณหภูมินี้ไว้ หลังจากนั้นก็คำนวณหาปริมาณความร้อนลดรวมของระบบที่มีอุณหภูมิสูงกว่า และปริมาณความร้อนเพิ่มรวมของระบบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยเทียบกับอุณหภูมิผสม (อุณหภูมิสมดุล) แล้วคำนวณหาค่าที่ต้องการจากหลักความถาวรของพลังงาน คือ

$$\begin{array}{ccc} \text{ปริมาณความร้อนลด} & = & \text{ปริมาณความร้อนเพิ่ม} \\ \text{(ของระบบที่มีอุณหภูมิสูงกว่า)} & & \text{(ของระบบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า)} \end{array}$$

$$q_s = m_s \times C_s \times \Delta T \quad (3.4)$$

เมื่อ q_s = ปริมาณความร้อนลด
 m_s = มวลของดินขาว
 C_s = ความจุความร้อนจำเพาะของดินขาว
 ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป(ผลต่างของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิของดินขาว)

$$q_w + q_c = (m_w \times C_w \times \Delta T) + (C_c \times \Delta T) \quad (3.5)$$

เมื่อ $q_w + q_c$ = ผลรวมของปริมาณความร้อนเพิ่ม
 m_w = มวลของน้ำ
 C_w = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ
 C_c = ค่าคงที่ของแคลอริมิเตอร์
 ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป(ผลต่างของอุณหภูมิน้ำและอุณหภูมิผสม)

ดังนั้น

$$C_s = \frac{(m_w \times C_w \times \Delta T) + (C_c \times \Delta T)}{(m_s \times \Delta T)} \quad (3.6)$$

การทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ตอนคือการหาค่าคงที่แคลอรีมิเตอร์และการหาความจุความร้อนจำเพาะของดินขาว การหาค่าคงที่แคลอรีมิเตอร์โดยใช้น้ำกลั่น 25 มิลลิลิตรจากบิวเรตใส่ในแคลอรีมิเตอร์ ปิดฝา วัดอุณหภูมิน้ำเย็นทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 5 นาที หาอุณหภูมิ น้ำ ใช้น้ำอุณหภูมิประมาณ 45 องศาเซลเซียสจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) ปริมาณ 25 มิลลิลิตรบันทึกอุณหภูมิ น้ำอุ่นผสมน้ำอุ่นลงในแคลอรีมิเตอร์ คนให้ทั่ว วัดอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 5 นาที หาอุณหภูมิ น้ำผสม คำนวณค่าคงที่ของเครื่องแคลอรีมิเตอร์ ทำซ้ำอีก 2 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าคงที่แคลอรีมิเตอร์ โดยคำนวณค่าคงที่ของเครื่องแคลอรีมิเตอร์จากสมการ

$$C_c = \frac{-m_w \times C_w + (\Delta T1 \times \Delta T2)}{\Delta T2} \quad (3.7)$$

เมื่อ C_c = ค่าคงที่ของแคลอรีมิเตอร์
 C_w = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.18 จูลล์ต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส ($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$)
 $\Delta T1$ = ผลต่างของอุณหภูมิ น้ำผสมและอุณหภูมิ น้ำอุ่น < 0
 $\Delta T2$ = ผลต่างของอุณหภูมิ น้ำผสมและอุณหภูมิ น้ำเย็น > 0

การหาความจุความร้อนจำเพาะของดินขาวเริ่มจากชั่งน้ำหนักอุปกรณ์แคลอรีมิเตอร์พร้อมฝาปิด ใช้น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรจากบิวเรตลงในแคลอรีมิเตอร์ชั่งน้ำหนัก วัดอุณหภูมิทุกๆ 1 นาทีเป็นเวลา 5 นาที หาอุณหภูมิเริ่มต้น นำดินขาว 25 กรัม เทสารใส่ลงในแคลอรีมิเตอร์คนให้ทั่ว วัดอุณหภูมิทุกๆ 1 นาทีเป็นเวลา 5 นาที หาอุณหภูมิผสม ทำซ้ำอีก 2 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยคำนวณหาความจุความร้อนจำเพาะของดินขาวจากสมการ

$$C_s = \frac{(m_w \times C_w \times \Delta Ta) + (C_c \times \Delta Tb)}{(m_s \times \Delta Tb)} \quad (3.8)$$

- เมื่อ C_s = ความจุความร้อนจำเพาะของดินขาว
 m_w = มวลของน้ำ
 C_w = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.18 จูลล์ต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส ($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$)
 ΔTa = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (ผลต่างของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิของสารประกอบ)
 C_c = ค่าคงที่ของแคลอรีมิเตอร์
 m_s = มวลของดินขาว
 ΔTb = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (ผลต่างของอุณหภูมิน้ำและอุณหภูมิผสม)

เมื่อทราบหาความจุความร้อนจำเพาะของดินขาวแล้วนำค่าความจุความร้อนจำเพาะของดินขาวไป
 คำนวณหาความจุความร้อนจำเพาะของดินขาวสารผสมเพิ่มและน้ำอีกครั้งจากสมการ

$$C_p = \frac{(m_s \times C_s) + (m_a \times C_a) + (m_w \times C_w)}{(m_s + m_a + m_w)} \quad (3.9)$$

- เมื่อ C_p = คำนวณหาความจุความร้อนจำเพาะของดินขาวสารผสมเพิ่มและน้ำ
 C_s = คำนวณหาความจุความร้อนจำเพาะของดินขาว
 m_s = มวลของดินขาว
 C_a = ความจุความร้อนจำเพาะของสารผสมเพิ่ม
 m_a = มวลของสารผสมเพิ่ม
 C_w = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.18 จูลล์ต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส ($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$)
 m_w = มวลของน้ำ

บทที่ 4 ผลการศึกษา

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินขาว

ผลการทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของตัวอย่างดินแหล่งต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ ก.1 ของภาคผนวก ก จากข้อมูลในการทดสอบคุณสมบัติทั่วไป จะสามารถจำแนกประเภทดินตามระบบ Unified Soil Classification (USC) และระบบ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ผลการทดสอบของดินขาวแต่ละแหล่งมีดังนี้

4.1.1 ดินขาวตำบลบุญนาควพัฒนา อำเภอมือง จังหวัดลำปาง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาวตำบลบุญนาควพัฒนา จังหวัดลำปาง พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.65 ชีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 54.64 เปอร์เซ็นต์ ชีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit) เท่ากับ 32.51 เปอร์เซ็นต์ ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) เท่ากับ 22.13 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC) จะได้ High Plasticity Silt (MH) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ High-compressibility silty clay (A-7-5) ซึ่งเป็นดินตะกอนที่มีความเหนียวสูง

4.1.2 ดินขาวตำบลสันดอนแก้ว อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาว ตำบลสันดอนแก้ว จังหวัดลำปาง พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.63 ชีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 53.43 เปอร์เซ็นต์ ชีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit) เท่ากับ 25.40 เปอร์เซ็นต์ ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) เท่ากับ 28.03 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC) จะได้ High Plasticity Clay (CH) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ High-compressibility clay (A-7-6) ซึ่งเป็นดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง

4.1.3 ดินขาวตำบลทุ่งฝาย อำเภอมือง-แจ้ห่ม จังหวัดลำปาง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาว ตำบลทุ่งฝาย จังหวัดลำปาง พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.66 ชีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 40.00 เปอร์เซ็นต์ ชีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit) เท่ากับ 29.16 เปอร์เซ็นต์ ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) เท่ากับ 10.83 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC) จะได้ Low Plasticity Silt, Fine Sand (ML) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ Low-compressibility silt (A-4-(8)) ซึ่งเป็นดินตะกอนที่มีความเหนียวต่ำ

4.1.4 ดินขาวตําลบ้านสา อำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาว ตําลบ้านสา จังหวัดลำปาง พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.69 ชีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 33.38 เปอร์เซ็นต์ ชีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit) เท่ากับ 23.33 เปอร์เซ็นต์ ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) เท่ากับ 10.05 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC) จะได้ Low Plasticity Clay (CL) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ Low-compressibility silt (A-4-(8)) ซึ่งเป็นดินเหนียวที่มีความเหนียวต่ำ

4.1.5 ดินขาวตําลผาจุก อำเภอมือง จังหวัดอุดรดิษฐ์

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาวตําลผาจุก จังหวัดอุดรดิษฐ์ พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.70 ชีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 30.48 เปอร์เซ็นต์ ชีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit) เท่ากับ 25.54 เปอร์เซ็นต์ ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) เท่ากับ 4.94 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC) จะได้ Low Plasticity Silt (ML) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ Low-compressibility silt (A-4-(8)) ซึ่งเป็นดินตะกอนที่มีความเหนียวต่ำ

4.1.6 ดินขาวตําลโนนทอง อำเภอนาญง จังหวัดอุดรธานี

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาวตําลโนนทอง จังหวัดอุดรธานี พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.69 ไม่มีดัชนีความเหนียว (Non Plastic) เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC) จะได้ Low Plasticity Silt or Fine sand (ML) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ Silt or Fine sand (A-3) ซึ่งเป็นดินตะกอนปนทรายละเอียดที่มีความเหนียวต่ำ

4.1.7 ดินขาวตําลโลกไม้ลาย อำเภอมือง จังหวัดปราจิณบุรี

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาวตําลโลกไม้ลาย จังหวัดปราจิณบุรี พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.64 ชีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 37.20 เปอร์เซ็นต์ ชีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit) เท่ากับ 15.48 เปอร์เซ็นต์ ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) เท่ากับ 21.72 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC) จะได้ Low Plasticity Clay (CL) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ Low-compressibility silt (A-6-(13)) ซึ่งเป็นดินเหนียวที่มีความเหนียวต่ำ

4.1.8 ดินขาวต่าบลด้านทับตะโก อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาวต่าบลด้านทับตะโก จังหวัดราชบุรี พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.69 ไม่มีดัชนีความเหนียว (Non Plastic) เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC) จะได้ Low Plasticity Silt or Fine sand (ML) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ Silt or Fine sand (A-3) ซึ่งเป็นดินตะกอนปนทรายละเอียดที่มีความเหนียวต่ำ

4.1.9 ดินขาวต่าบลวังจันทร์ อำเภอแกลงกระจาน จังหวัดเพชรบุรี

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาวต่าบลวังจันทร์ จังหวัดเพชรบุรี พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.70 ไม่มีดัชนีความเหนียว (Non Plastic) เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC) จะได้ Low Plasticity Silt or Fine sand (ML) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ Silt or Fine sand (A-3) ซึ่งเป็นดินตะกอนปนทรายละเอียดที่มีความเหนียวต่ำ

4.1.10 ดินขาวต่าบลห้วยยาง อำเภอแกลง จังหวัดระยอง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาวต่าบลห้วยยาง จังหวัดระยอง พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.69 จีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 65.34 เปอร์เซ็นต์ จีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit) เท่ากับ 38.25 เปอร์เซ็นต์ ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) เท่ากับ 27.09 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC) จะได้ High Plasticity Silt (MH) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ High-compressibility silty clay (A-7-5) ซึ่งเป็นดินตะกอนที่มีความเหนียวสูง

4.1.11 ดินขาวต่าบลหาดส้มแป้น อำเภอเมือง จังหวัดระนอง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาว ต่าบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนอง พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.64 จีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 43.40 เปอร์เซ็นต์ จีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit) เท่ากับ 22.89 เปอร์เซ็นต์ ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) เท่ากับ 20.51 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC)) จะได้ Low Plasticity Clay (CL) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ High-compressibility clay (A-7-6) ซึ่งเป็นดินเหนียวที่มีความเหนียวต่ำ

4.1.12 ดินขาวตึบลุนทะเล อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาวตึบลุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานี พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.65 ชีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 50.00 เปอร์เซ็นต์ ชีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit) เท่ากับ 23.22 เปอร์เซ็นต์ ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) เท่ากับ 26.78 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC) จะได้ High Plasticity Clay (CH) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ High-compressibility clay (A-7-6) ซึ่งเป็นดินเหนียวที่มีความเหนียวสูง

4.1.13 ดินขาวตึบลจวบ อำเภอเจาะไอร้อง จังหวัดนราธิวาส

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวอย่างดินขาวตึบลจวบ จังหวัดนราธิวาส พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 2.66 ชีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 86.00 เปอร์เซ็นต์ ชีดจำกัดความเหนียว (Plastic Limit) เท่ากับ 52.67 เปอร์เซ็นต์ ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) เท่ากับ 33.33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำแนกประเภทตามระบบ Unified Soil Classification (USC) จะได้ High Plasticity Silt (MH) และระบบของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) จะได้ High-compressibility silty clay (A-7-5) ซึ่งเป็นดินตะกอนที่มีความเหนียวสูง

4.2 ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานของตัวอย่างดินขาว 13 แห่ลง ผสมกับสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน 6 สาร ที่อัตราส่วนผสม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารผสมเพิ่ม เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบแคลอริเมตรี ได้ผลทดสอบดังแสดงไว้ในตารางที่ ข.1 ของภาคผนวก ข

จากผลการทดสอบการบดอัดตัวอย่างดินแห่ลงต่างๆ ผสมสารผสมแต่ละสาร พบว่าผลการบดอัดดินแต่ละสารในตัวอย่างดินมีแนวโน้ม ได้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็นไปในแนวเดียวกัน เนื่องจากสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, KOH และ NaOH มีค่าหน่วยน้ำหนักมากกว่าตัวอย่างดินขาว และจะทำให้ได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมลดน้อยลง ซึ่งเนื่องจากสารผสมดังกล่าวสามารถละลายน้ำค่อนข้างดี 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 และส่งผลกระทบต่อค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมของตัวอย่างดิน

4.3 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของดินขาว

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างดินขาว ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ได้ผลการทดสอบของดินขาวแต่ละแหล่งดังต่อไปนี้

4.3.1 ดินขาวตำบลบุญนาคนพัฒนา อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาวตำบลบุญนาคนพัฒนา จังหวัดลำปาง มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 2.28

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลบุญนาคนพัฒนา จังหวัดลำปาง

องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	61.96
อลูมินา, Al_2O_3	27.14
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	7.09
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	1.61
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	0.03
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	0.85
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.50
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	0.11

4.3.2 ดินขาวตำบลสันดอนแก้ว อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาวตำบลสันดอนแก้ว จังหวัดลำปาง มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 2.77

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลสันดอนแก้ว จังหวัดลำปาง

องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	66.97
อลูมินา, Al_2O_3	24.10
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	3.60
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	2.35
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	0.30
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	1.10
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.46
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	0.83

4.3.3 ดินขาวตำบลทุ่งฝาย อำเภอเมือง-แจ้ห่ม จังหวัดลำปาง

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาวตำบลทุ่งฝาย จังหวัดลำปาง มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 2.64

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลทุ่งฝาย จังหวัดลำปาง

องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	66.48
อลูมินา, Al_2O_3	25.11
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	5.76
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	0.99
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	0.66
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	0.49
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.12
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	0.05

4.3.4 ดินขาวตำบลบ้านสา อำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาวตำบลบ้านสา จังหวัดลำปาง มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 2.95

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลบ้านสา จังหวัดลำปาง

องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	68.75
อลูมินา, Al_2O_3	23.34
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	5.43
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	1.10
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	0.72
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	0.21
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.12
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	0.05

4.3.5 ดินขาวตำบลผาจุ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาวตำบลผาจุ จังหวัดอุดรธานี มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 5.46

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลผาจุ จังหวัดอุดรธานี

องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	74.92
อลูมินา, Al_2O_3	13.73
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	6.77
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	2.92
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	0.50
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	0.64
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.12
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	0.23

4.3.6 ดินขาวตำบลโนนทอง อำเภอนาเยีย จังหวัดอุตรธานี

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุตรธานี มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 5.33

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุตรธานี

องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	75.79
อลูมินา, Al_2O_3	14.21
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	5.44
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	2.78
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	0.82
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	0.47
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.03
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	0.18

4.3.7 ดินขาวตำบลโคกไม้ลาย อำเภอมือง จังหวัดปราจีนบุรี

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาวตำบลโคกไม้ลาย จังหวัดปราจีนบุรี มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 3.68

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลโคกไม้ลาย จังหวัดปราจีนบุรี

องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	75.90
อลูมินา, Al_2O_3	20.60
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	0.78
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	0.87
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	0.19
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	0.24
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.09
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	0.88

4.3.8 ดินขาวตำบลด่านทับตะโก อำเภोजอมบึง จังหวัดราชบุรี

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาวตำบลด่านทับตะโก จังหวัดราชบุรี มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 4.64

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลด่านทับตะโก จังหวัดราชบุรี

องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	73.00
อลูมินา, Al_2O_3	15.72
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	6.25
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	2.38
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	0.06
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	1.33
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.04
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	0.95

4.3.9 ดินขาวตำบลวังจันทร์ อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาวตำบลวังจันทร์ จังหวัดเพชรบุรี มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 3.99

ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลวังจันทร์ จังหวัดเพชรบุรี

องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	70.23
อลูมินา, Al_2O_3	17.59
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	5.49
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	3.34
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	0.13
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	1.46
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.06
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	1.04

4.3.10 ดินขาวตำบลห้วยยาง อำเภอแกลง จังหวัดระยอง

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาวตำบลห้วยยาง จังหวัดระยอง มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 1.58

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลห้วยยาง จังหวัดระยอง

องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	50.98
อลูมินา, Al_2O_3	32.17
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	0.29
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	14.25
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	-
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	1.19
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.34
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	0.43

4.3.11 ดินขาวตำบลหาดส้มแป้น อำเภอเมือง จังหวัดระนอง

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาว ตำบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนอง มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 1.57

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนอง

องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	57.45
อลูมินา, Al_2O_3	36.57
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	2.80
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	2.29
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	0.09
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	0.20
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.03
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	0.12

4.3.12 ดินขาวตำบลขุนทะเล อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาว ตำบลขุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.12 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 2.09

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลขุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานี

องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	64.46
อลูมินา, Al_2O_3	30.83
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	1.14
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	1.51
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	-
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	0.42
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.09
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	1.30

4.3.13 ดินขาวตำบลจวบ อำเภอเกาะไอร่อง จังหวัดนราธิวาส

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าดินขาวตำบลจวบ จังหวัดนราธิวาส มีปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา เท่ากับ 1.60

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวตำบลจวบ จังหวัดนราธิวาส

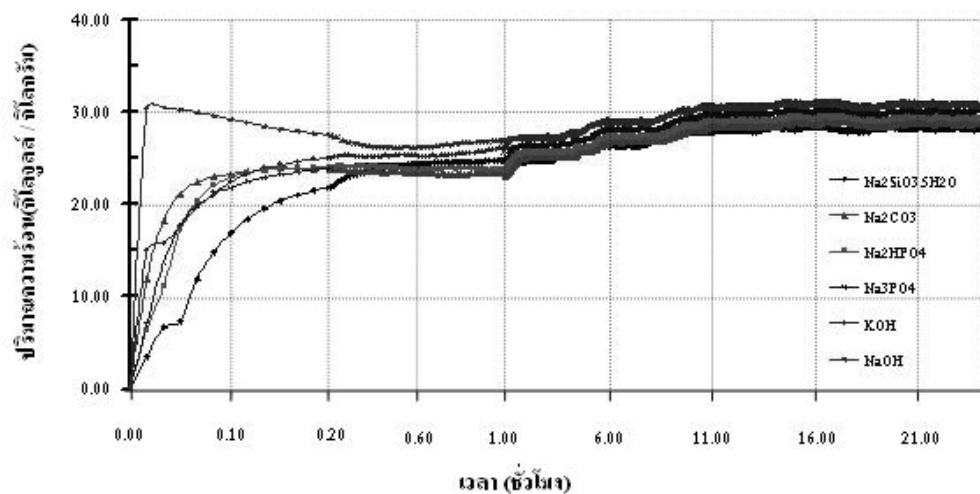
องค์ประกอบ	แร่ดินเหนียว (%)
ซิลิกา, SiO_2	58.85
อลูมินา, Al_2O_3	36.82
โพแทสเซียมออกไซด์, K_2O	1.81
เหล็กออกไซด์, Fe_2O_3	0.83
โซเดียมออกไซด์, Na_2O	-
แมกนีเซียมออกไซด์, MgO	0.38
แคลเซียมออกไซด์, CaO	0.03
ไทเทเนียมไดออกไซด์, TiO_2	0.14

4.4 ผลการทดสอบแคลอริเมตรีของตัวอย่างดินขาว

ผลการทดสอบแคลอริเมตรีของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มเป็นการวัดปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาว ปริมาณดินขาวที่ใช้ในการทดสอบ 25 กรัม ปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้แต่ละชนิด 2.5 กรัมและน้ำใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) ของดินขาวและสารผสมเพิ่มแต่ละชนิด และกระตุ้นปฏิกิริยาร่วมด้วยความร้อนในอ่างน้ำ (Water Baths) ที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับเป็นเวลา 24 ชั่วโมง อ่านค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในตัวอย่าง แล้วนำค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาคำนวณโดยใช้ค่าความจุความร้อนของดินขาวและสารผสมเพิ่มดังแสดงไว้ในตารางที่ ค.3 ของภาคผนวก ก เพื่อหาปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่าง ซึ่งแสดงรูปแบบและปริมาณของการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 - 4.78 จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มแต่ละสารซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

4.4.1 ดินขาวตำบลบุญนาควพัฒนา อำเภอมือง จังหวัดลำปาง

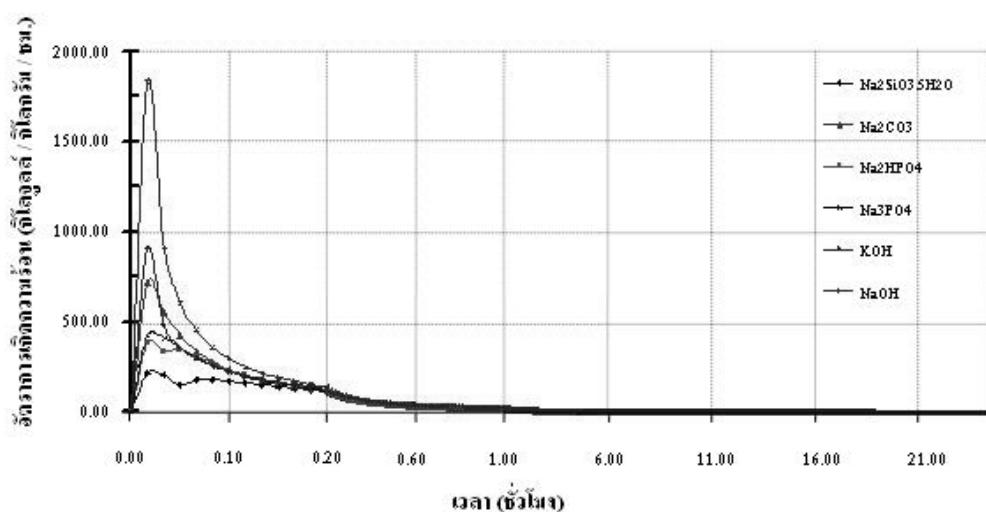
ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสกับน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 653.753, 662.194, 674.235, 693.423, 713.512 และ 712.935 kJ/kg·h ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ

ดินขาวตำบลบุญนาคนพัฒนา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

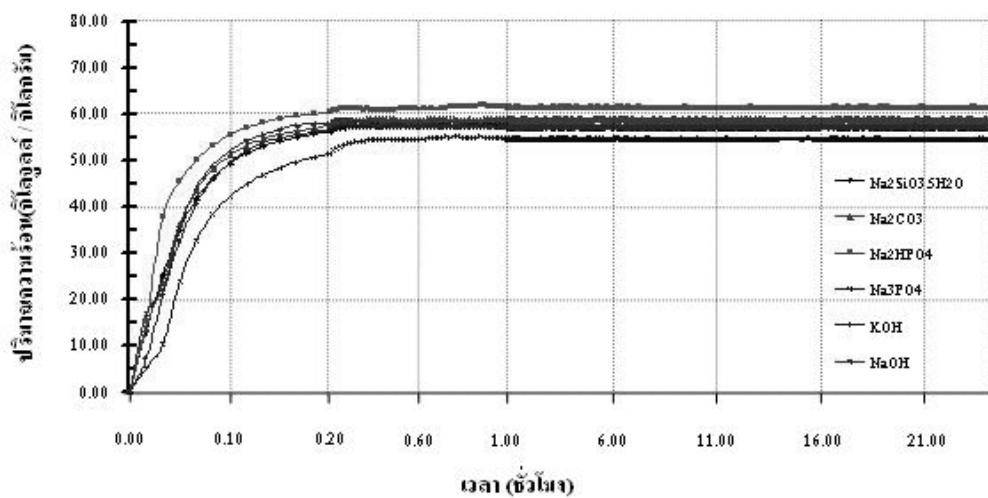
อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสกับน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมา หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 152.335, 178.710, 169.872, 174.748, 188.499 และ 225.307 kJ/kg ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ

ดินขาวตำบลบุญนาคนพัฒนา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

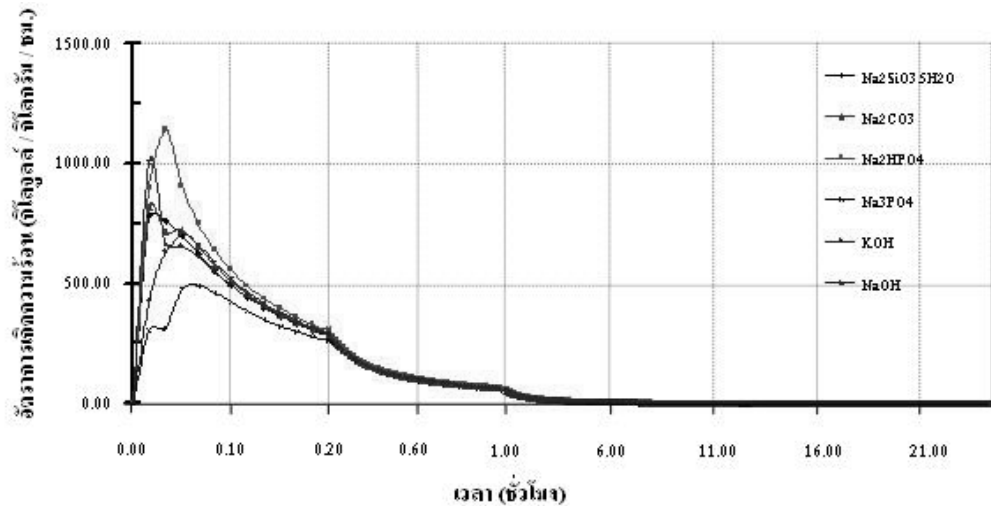
ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย และส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,369.146, 1,406.396, 1,467.968, 1,307.180, 1,364.759 และ 1,369.394 kJ/kg-h ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ

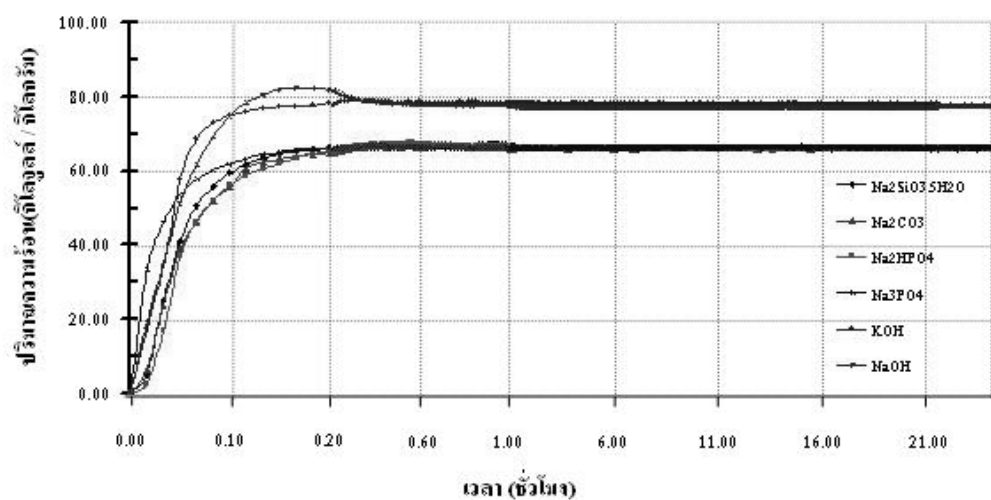
ดินขาวตำบลบุญนาควพัฒนา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 371.734, 381.734, 410.195, 331.001, 361.979 และ 378.077 kJ/kg ตามลำดับ



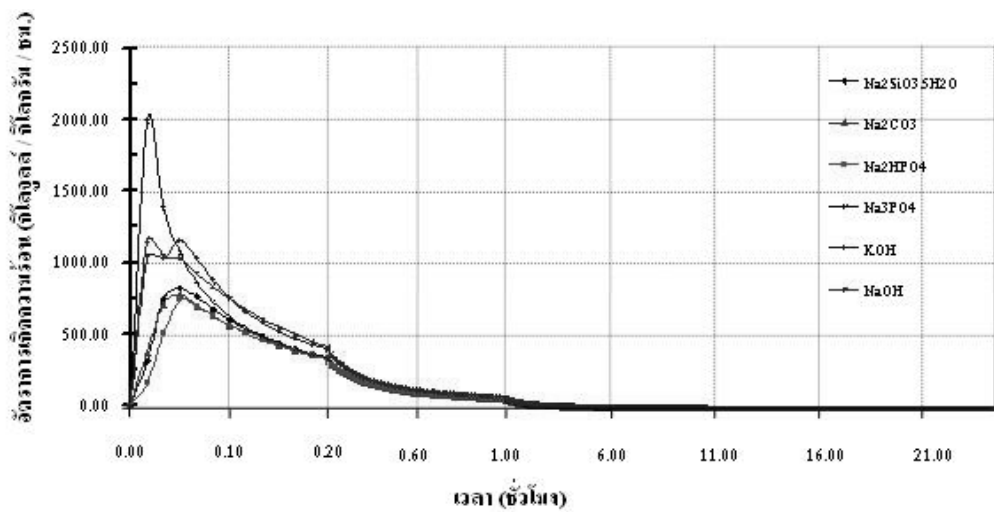
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลบุญนาพัฒนา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,603.366, 1,603.486, 1,603.125, 1,606.696, 1,883.311 และ 1,869.047 kJ/kg·h ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลบุญนาพัฒนา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_3PO_4 มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 424.644, 420.895, 413.306, 471.135, 522.079 และ 520.255 kJ/kg ตามลำดับ

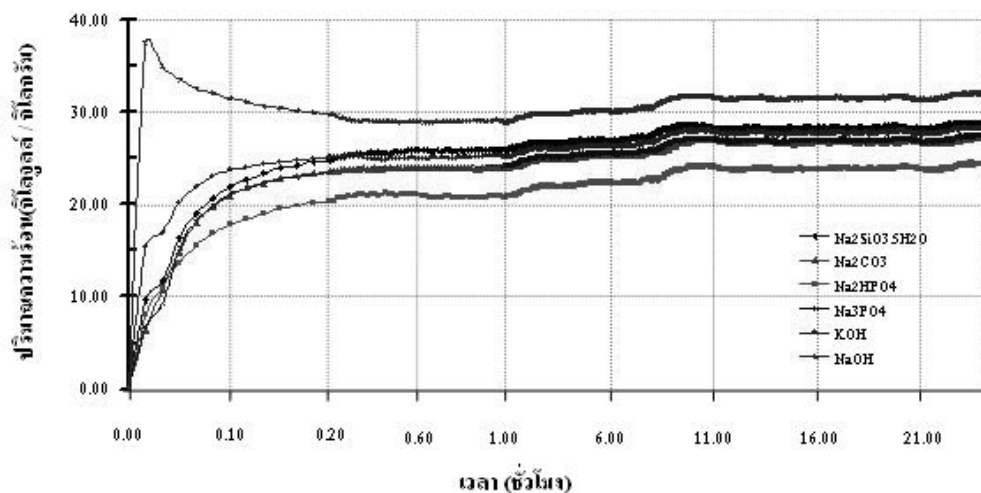


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลบุญนาควพัฒนา จังหวัดลำปาง ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลบุญนาควพัฒนา จังหวัดลำปาง ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆ เมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลบุญนาควพัฒนา จังหวัดลำปาง ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆ เมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

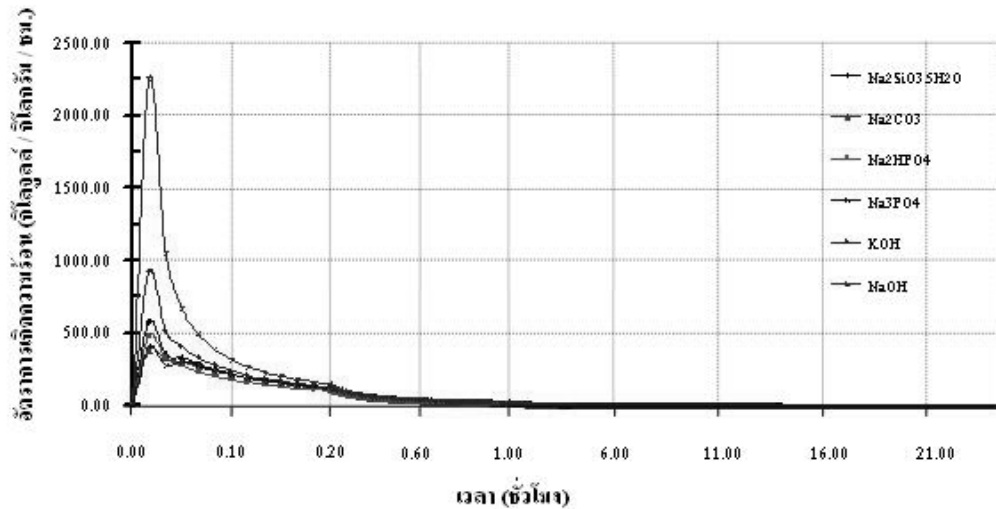
4.4.2 ดินขาวตำบลดอนแก้ว อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้นรูปแบบมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 668.088, 630.383, 558.609, 634.506, 653.754 และ 746.898 kJ/kg-h ตามลำดับ



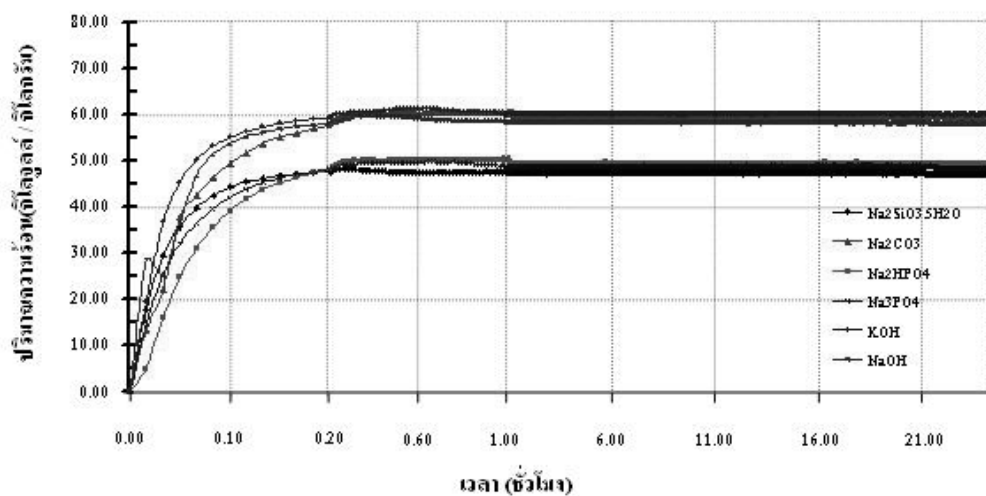
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลดอนแก้ว จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมา หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 175.976, 162.436, 145.588, 162.965, 184.726 และ 248.433 kJ/kg ตามลำดับ



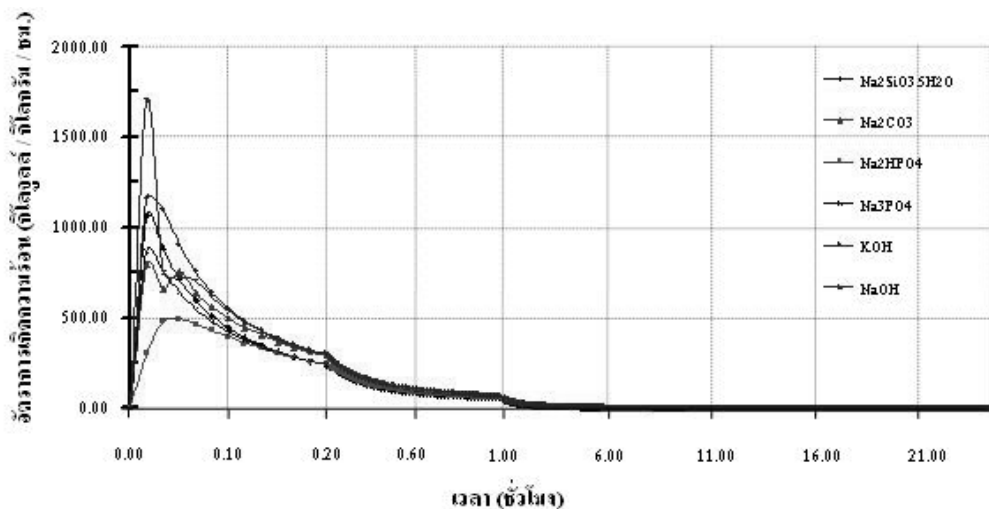
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวคัลลสันดอนแก้ว จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,135.640, 1,428.887, 1,182.989, 1,169.307, 1,438.084 และ 1,397.113 kJ/kg-h ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวคัลลสันดอนแก้ว จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

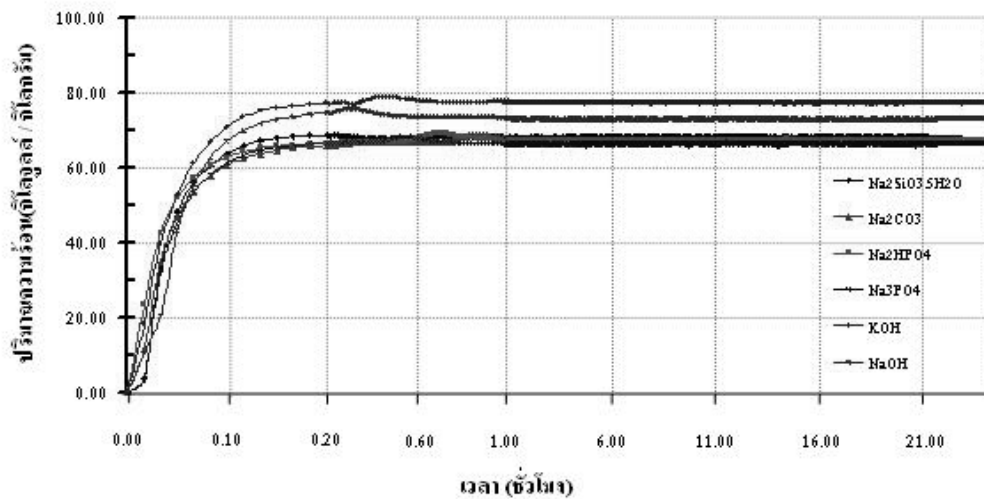
อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 325.771, 384.302, 306.973, 323.990, 408.059 และ 398.721 kJ/kg ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ

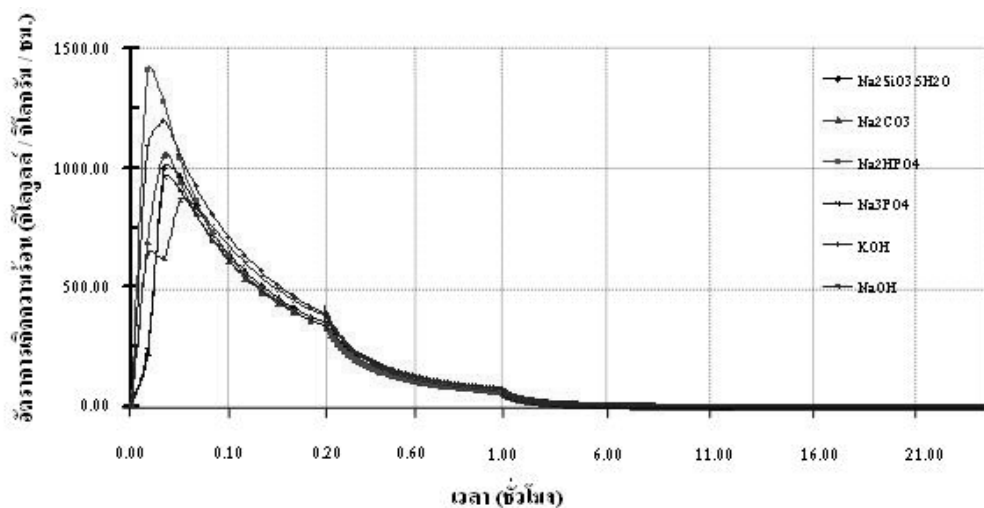
ดินขาวตำบลสันดอนแก้ว จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,644.059, 1,617.409, 1,627.616, 1,606.331, 1,866.564 และ 1,765.359 kJ/kg·h ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวด้าบลสันดอนแก้ว จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 442.828, 442.067, 463.738, 431.635, 515.701 และ 471.888 kJ/kg ตามลำดับ

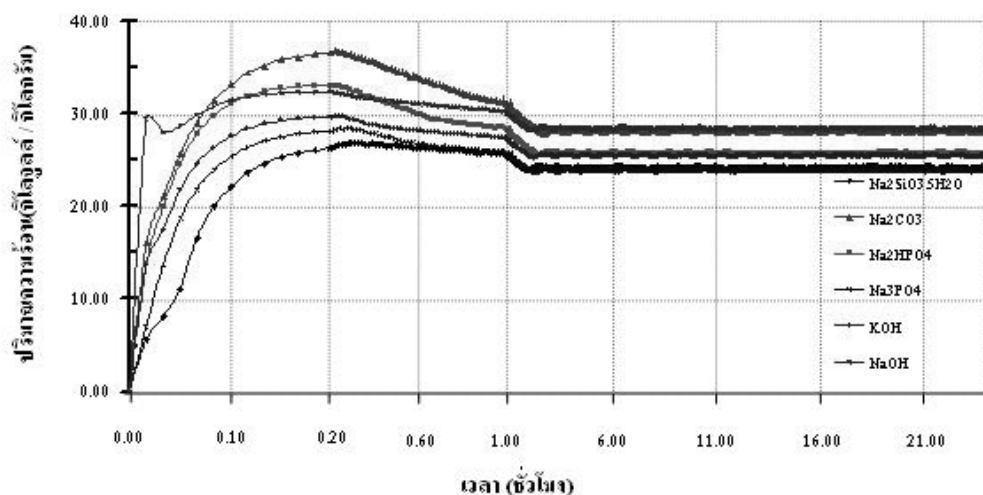


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวด้าบลสันดอนแก้ว จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลดอนแก้ว จังหวัดลำปาง ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลดอนแก้ว จังหวัดลำปาง ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

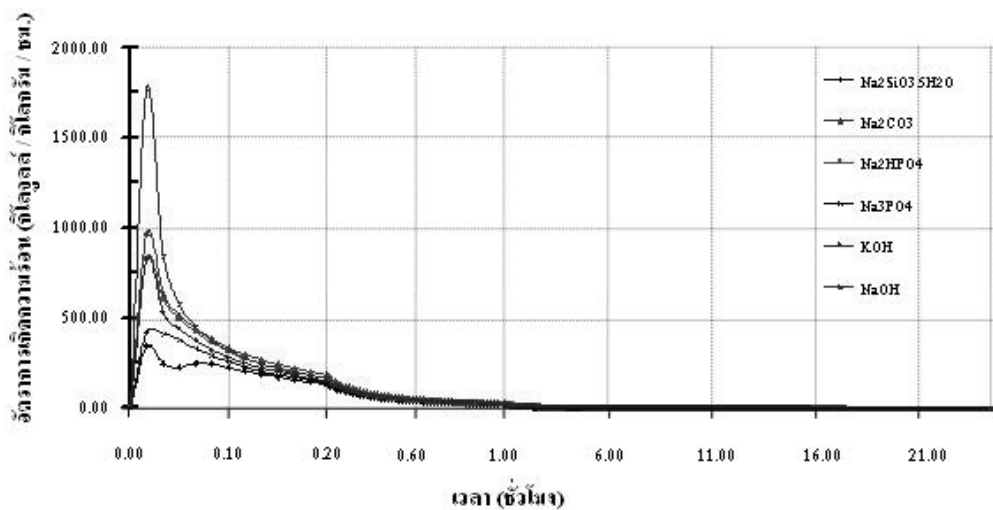
4.4.3 ดินขาวตำบลดงฝาย อำเภอเมือง-แจ้ห่ม จังหวัดลำปาง

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 584.336, 685.185, 625.790, 580.134, 616.562 และ 688.501 kJ/kg-h ตามลำดับ



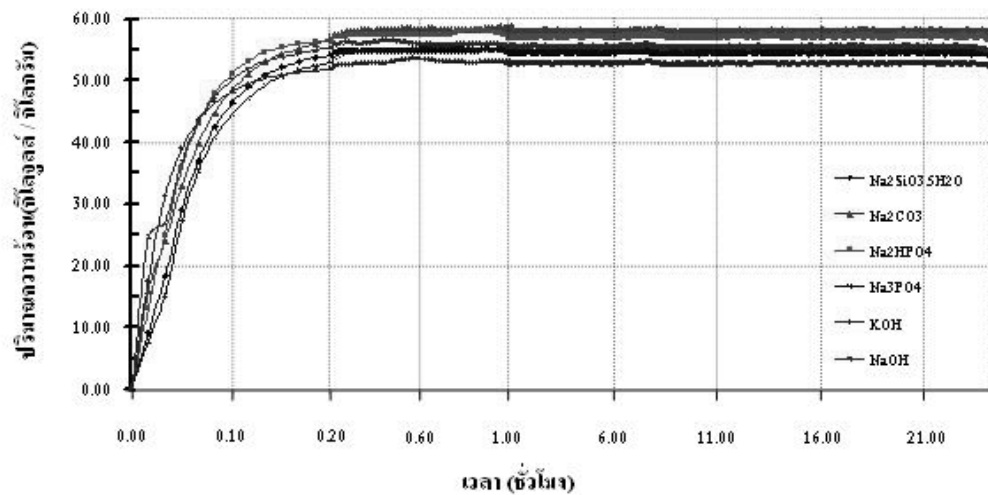
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลดงฝาย จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสกับน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมา หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 160.771, 222.983, 203.145, 172.575, 191.589 และ 233.543 kJ/kg ตามลำดับ



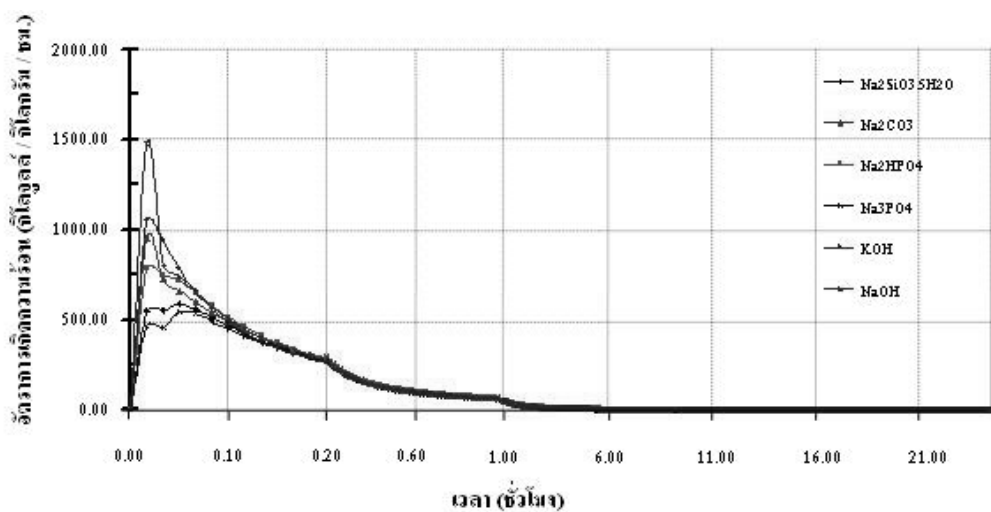
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลทุ่งฝาย จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2CO_3 มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย และส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,307.864, 1,388.548, 1,367.151, 1,309.278, 1,262.998 และ 1,330.685 kJ/kg·h ตามลำดับ



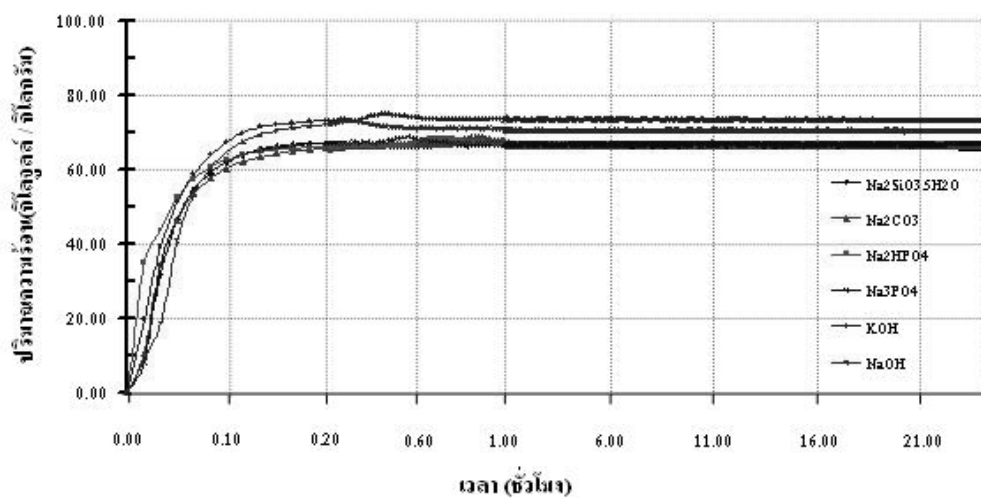
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลทุ่งฝาย จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 346.426, 376.142, 373.359, 341.146, 357.492 และ 378.297 kJ/kg ตามลำดับ



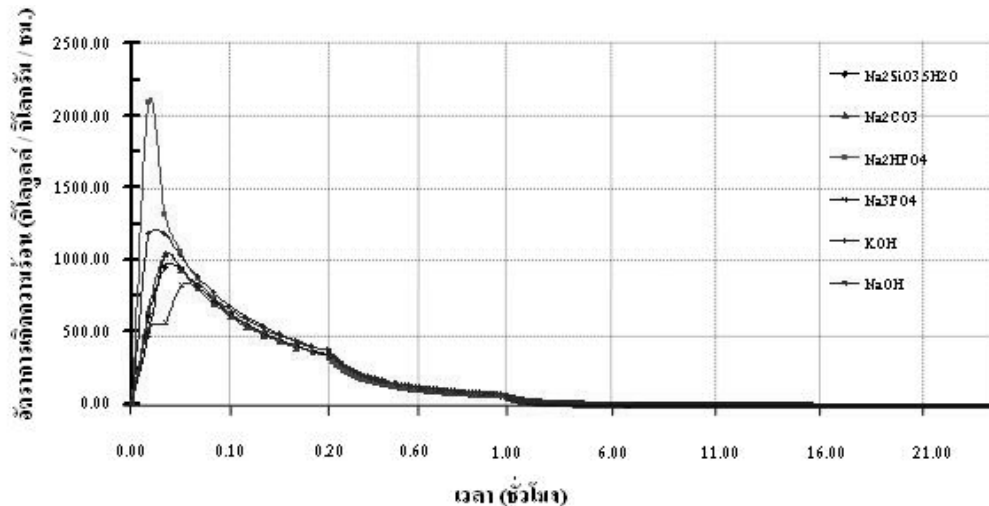
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลทุ่งฝาย จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.17 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,605.875, 1,611.932, 1,614.829, 1,616.392, 1,769.983 และ 1,705.248 kJ/kg·h ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลทุ่งฝาย จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 438.259, 439.658, 473.145, 440.442, 492.937 และ 453.319 kJ/kg ตามลำดับ

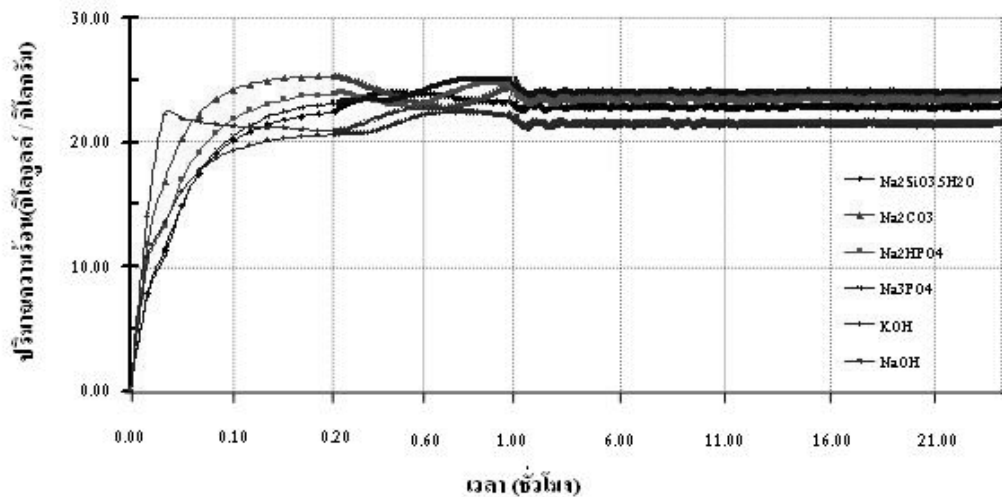


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลทุ่งฝาย จังหวัดลำปาง ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลทุ่งฝาย จังหวัดลำปาง ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลทุ่งฝาย จังหวัดลำปาง ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและส่งผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

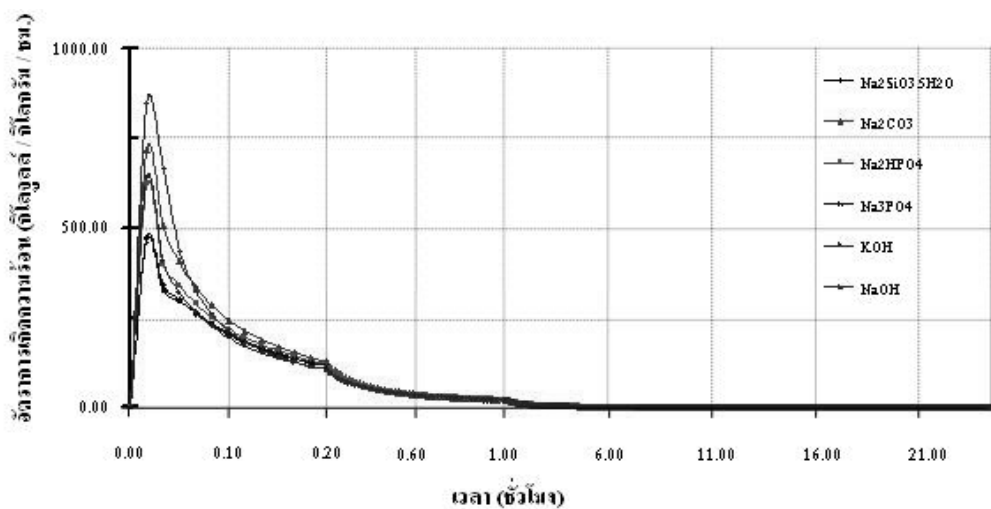
4.4.4 ดินขาวตำบลบ้านตา อำเภोज้าหม จังหวัดลำปาง

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 550.125, 570.656, 562.293, 578.674, 513.376 และ 521.264 kJ/kg·h ตามลำดับ



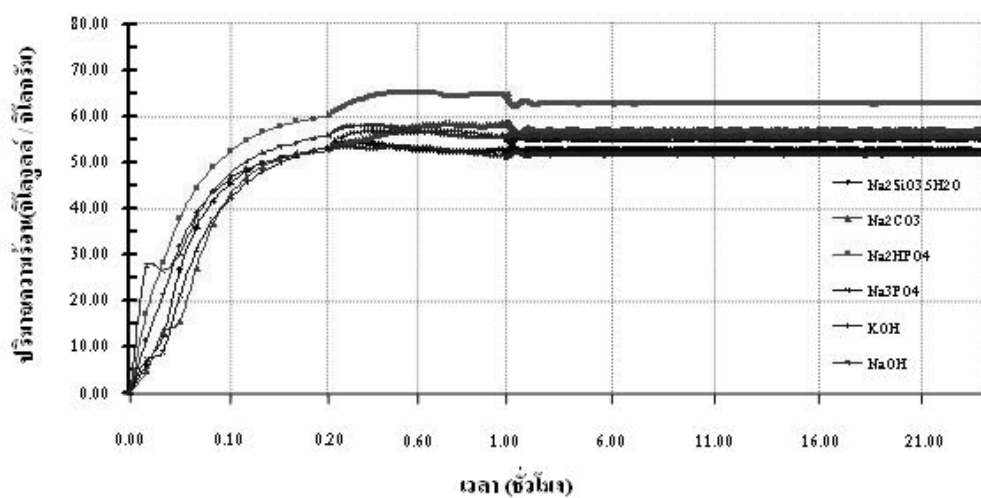
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลบ้านสา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสกับน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมา หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 153.987, 171.321, 162.177, 158.651, 149.067 และ 163.259 kJ/kg ตามลำดับ



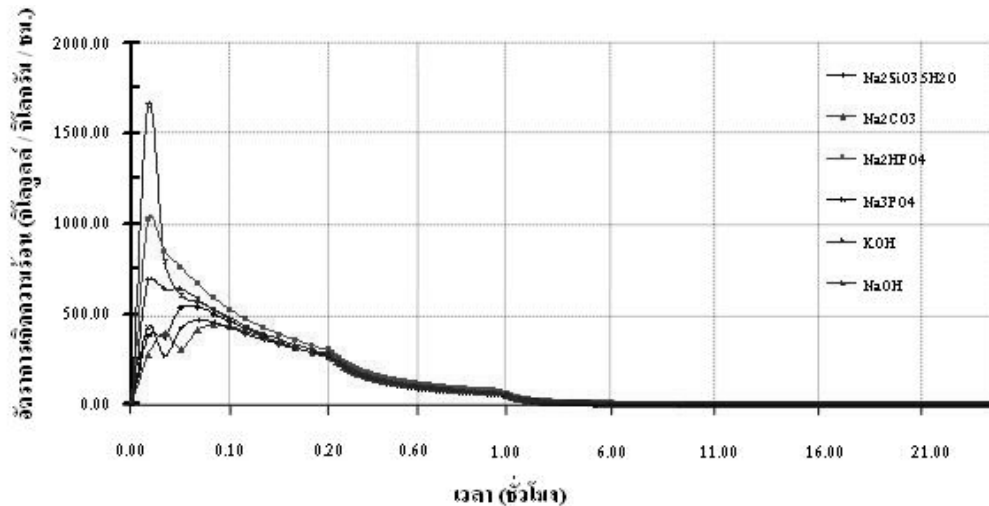
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลบ้านสา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย และส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,262.606, 1,360.546, 1,503.009, 1,318.544, 1,237.375 และ 1,337.834 kJ/kg-h ตามลำดับ



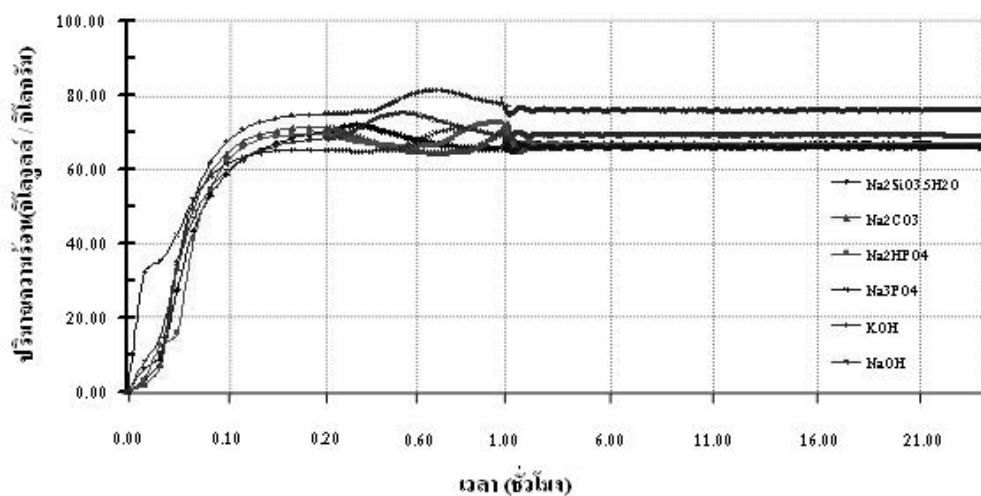
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลบ้านสา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 330.414, 339.285, 409.959, 336.034, 338.349 และ 378.409 kJ/kg ตามลำดับ



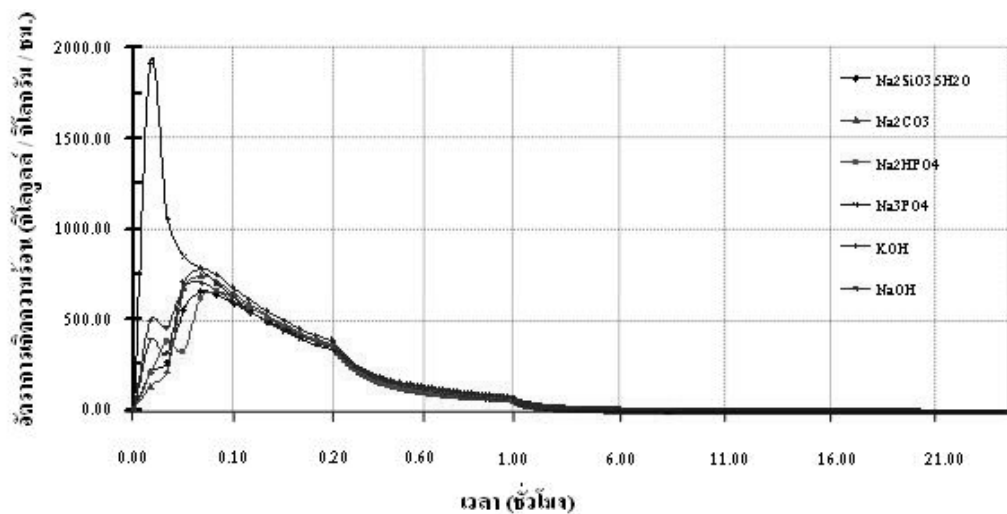
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลบ้านสา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,608.848, 1,605.233, 1,602.675, 1,595.085, 1,829.863 และ 1,674.849 kJ/kg-h ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลบ้านสา จังหวัดลำปางที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 414.138, 417.603, 411.393, 457.642, 472.103 และ 438.046 kJ/kg ตามลำดับ

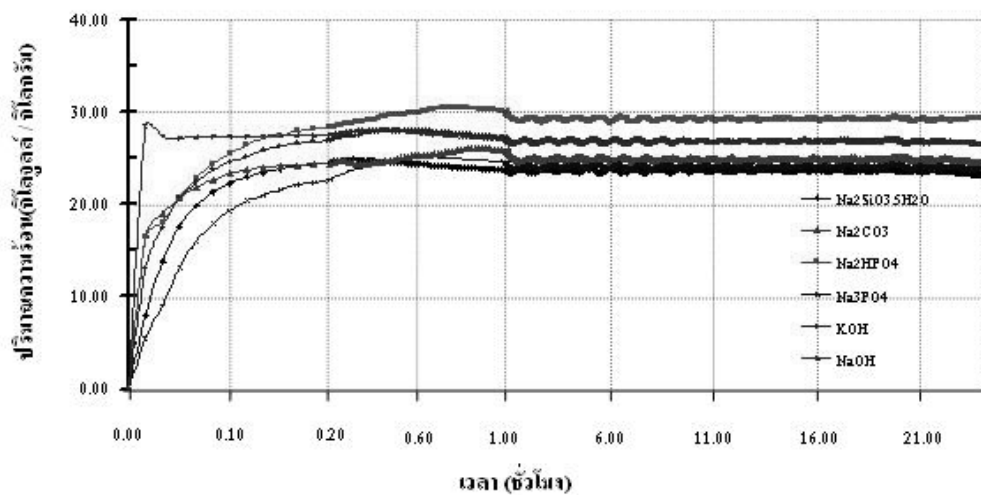


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลบ้านสา จังหวัดลำปาง ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลบ้านสา จังหวัดลำปาง ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลบ้านสา จังหวัดลำปาง ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

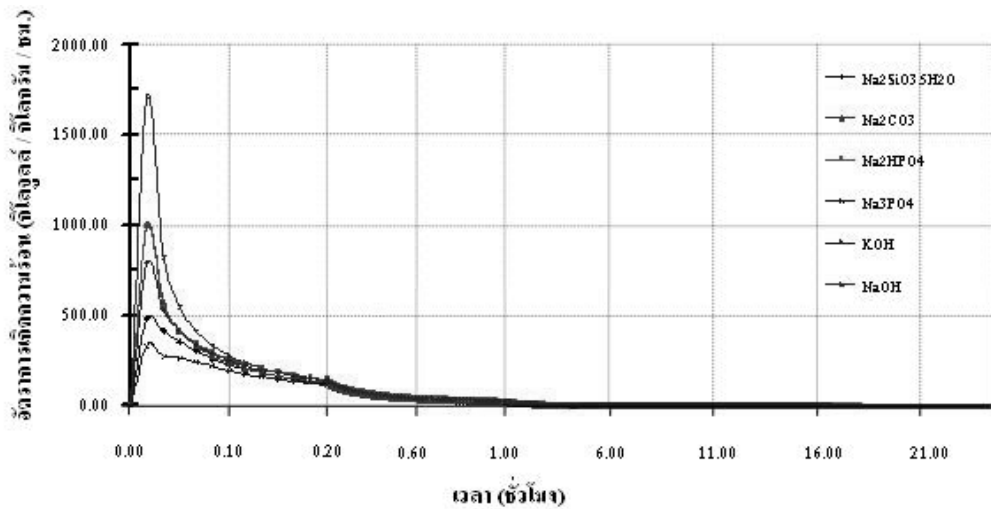
4.4.5 ดินขาวตำบลผาจุ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิษฐ์

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 571.588, 599.949, 703.094, 580.538, 646.213 และ 646.965 kJ/kg-h ตามลำดับ



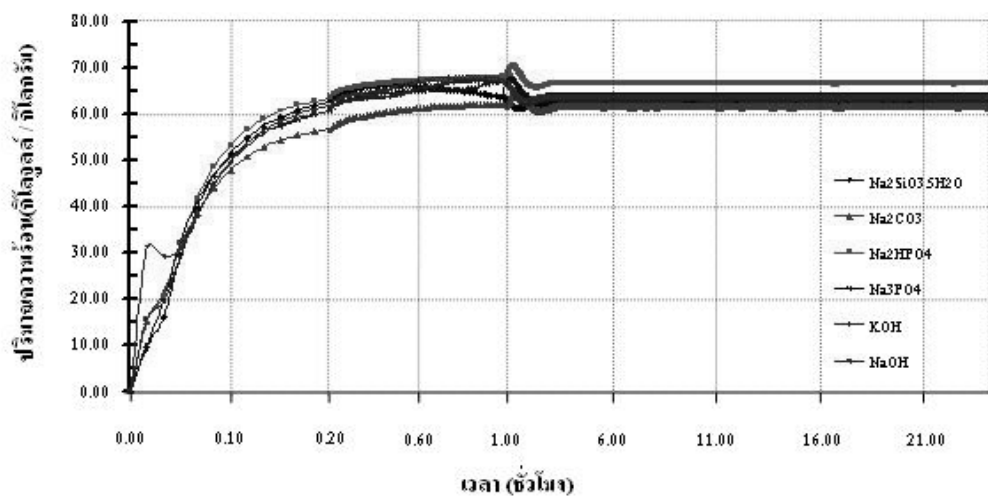
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลผาจุ จังหวัดอุดรดิษฐ์ที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมา หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 163.490, 181.719, 204.793, 154.467, 189.283 และ 215.187 kJ/kg ตามลำดับ



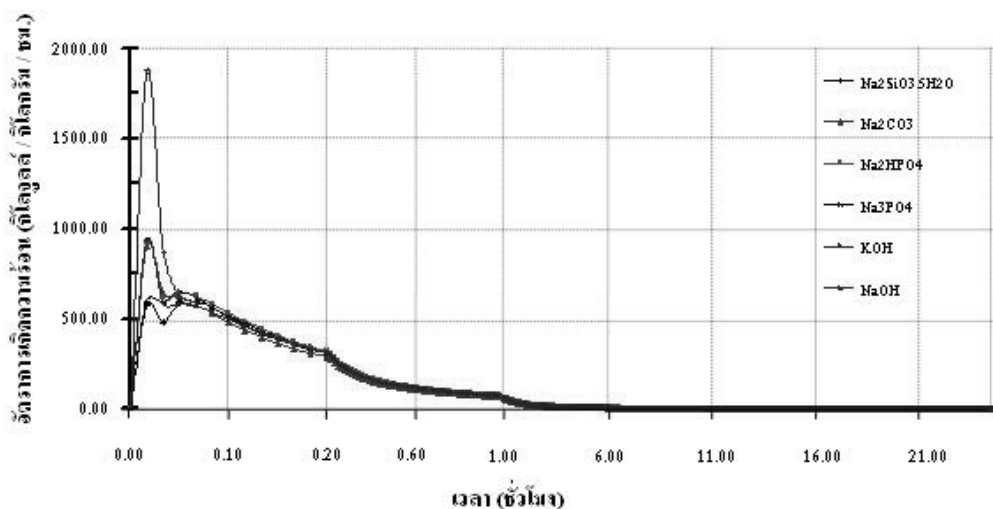
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลผาจุก จังหวัดอุดรดิษฐ์ที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย และส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,487.364, 1,474.092, 1,594.996, 1,534.681, 1,507.314 และ 1,526.622 kJ/kg-h ตามลำดับ



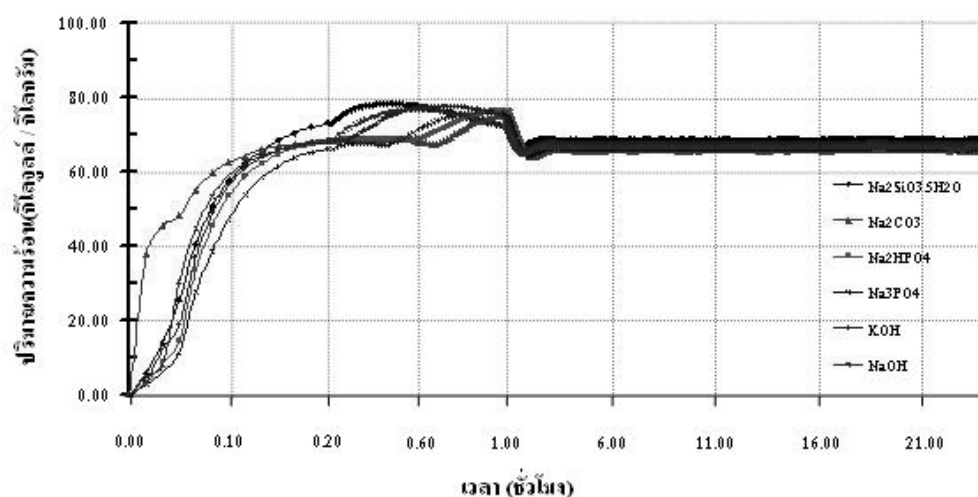
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลผาจุก จังหวัดอุดรดิษฐ์ที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 392.194, 388.764, 421.325, 401.141, 399.718 และ 425.803 kJ/kg ตามลำดับ



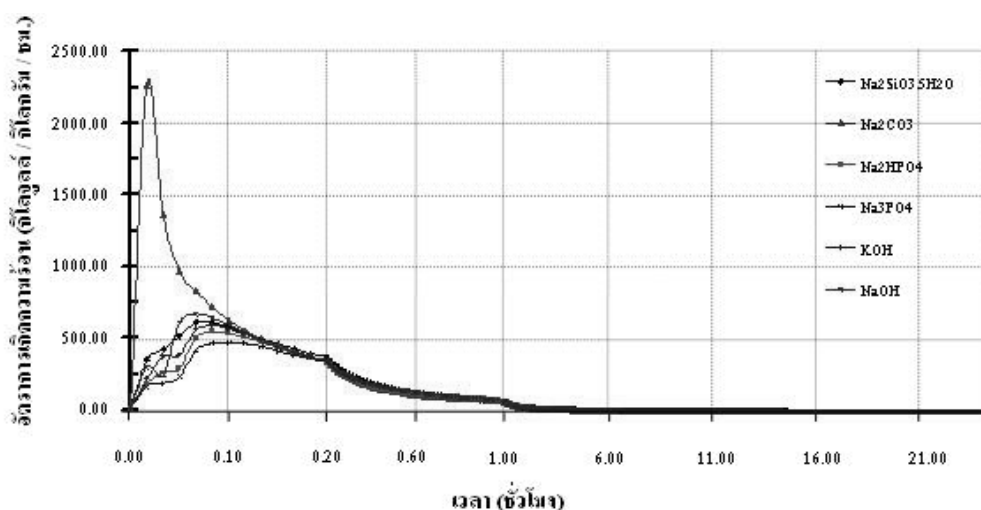
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวดำบลผาจุ จังหวัดอุดรธานีที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,659.492, 1,599.087, 1,604.312, 1,603.199, 1,633.008 และ 1,614.358 kJ/kg-h ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลผาจุ จังหวัดอุดรดิษฐ์ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ได้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 434.755, 479.904, 405.691, 396.145, 419.184 และ 423.133 kJ/kg ตามลำดับ

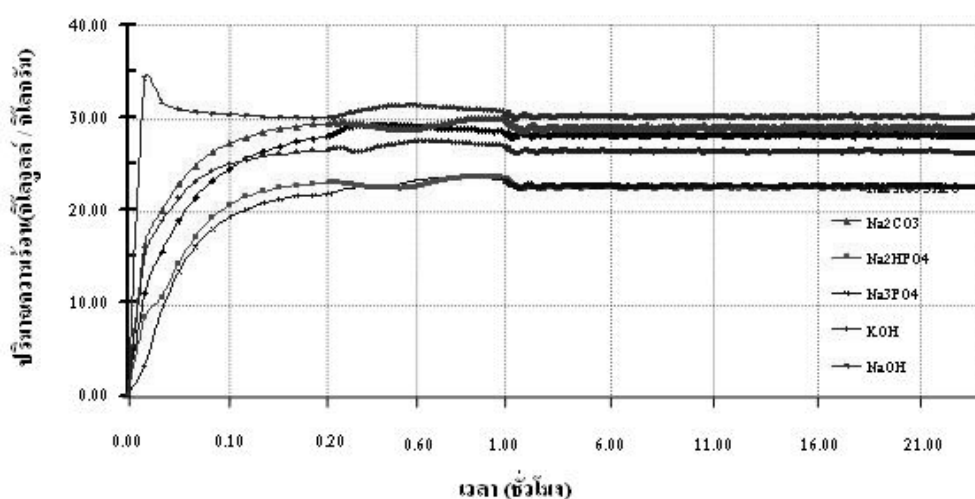


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลผาจุ จังหวัดอุดรดิษฐ์ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลผาจุ จังหวัดอุดรดิตถ์ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลผาจุ จังหวัดอุดรดิตถ์ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

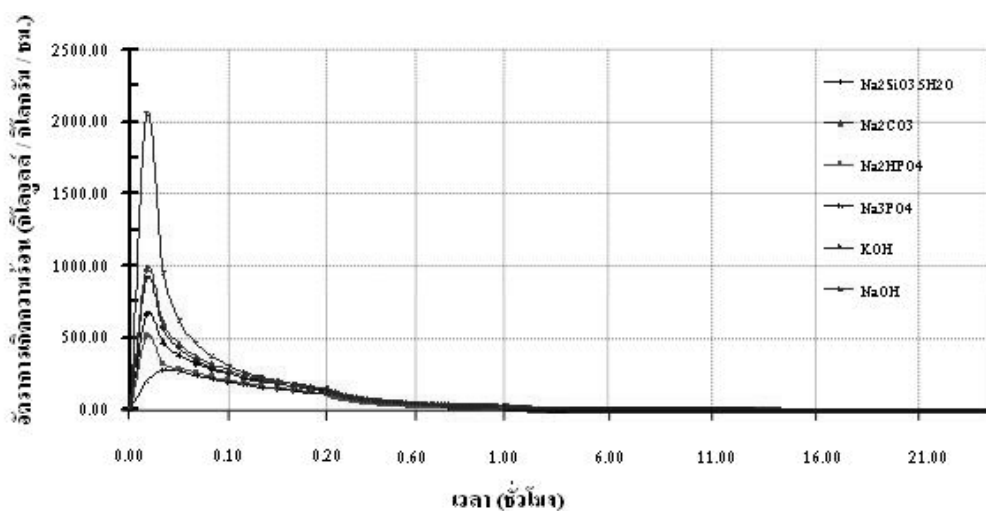
4.4.6 ดินขาวตำบลโนนทอง อำเภอนายูง จังหวัดอุดรธานี

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 677.464, 696.334, 542.095, 545.539, 633.523 และ 726.750 $\text{kJ/kg}\cdot\text{h}$ ตามลำดับ



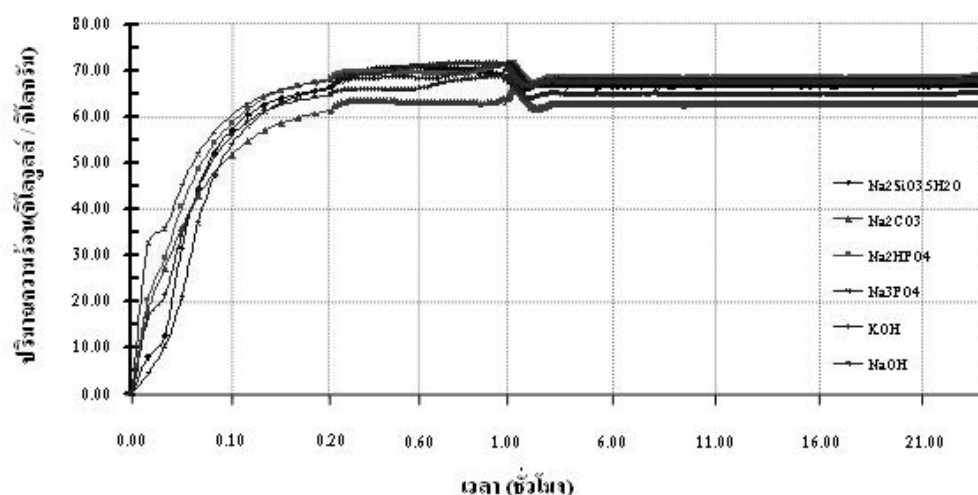
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานีที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมา หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.32 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 191.770, 207.026, 152.636, 145.128, 189.521 และ 243.513 kJ/kg ตามลำดับ



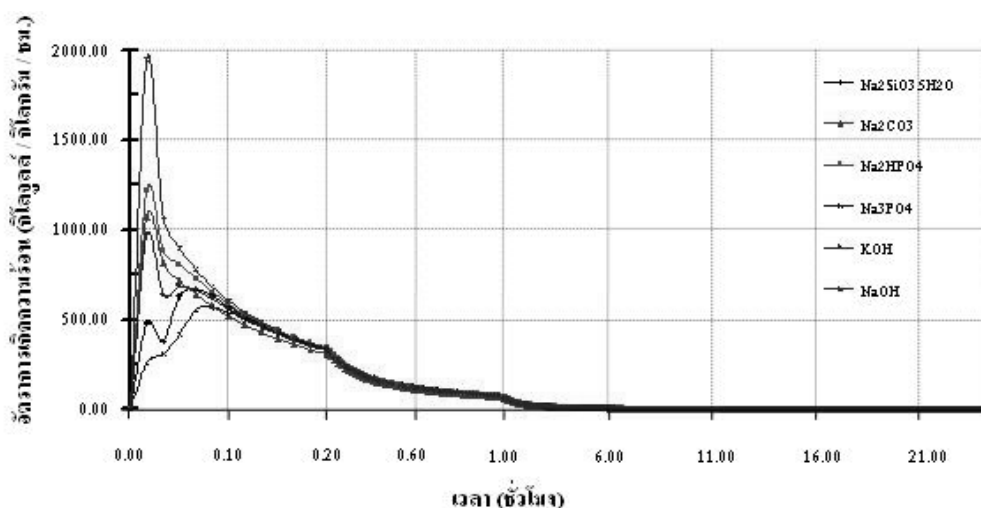
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานีที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.33 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,603.074, 1,504.605, 1,639.135, 1,627.255, 1,553.708 และ 1,621.763 kJ/kg·h ตามลำดับ



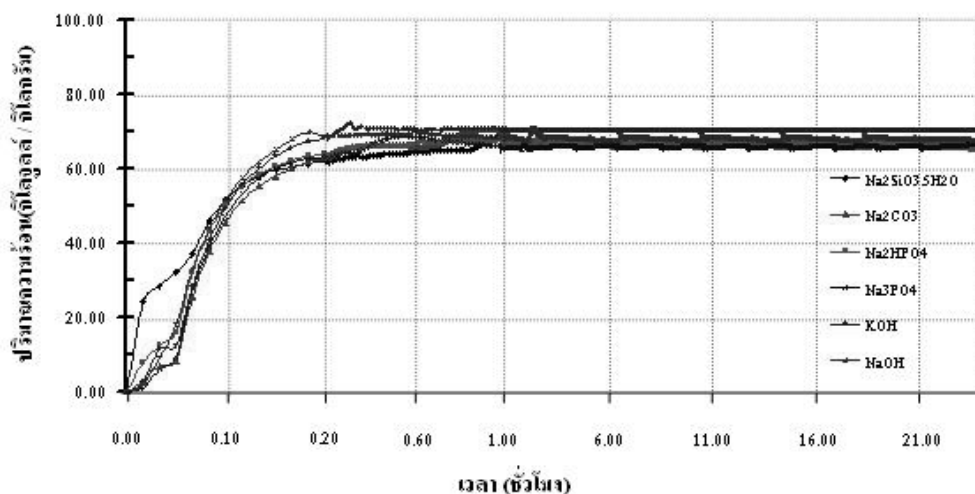
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานีที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.34 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 418.286, 409.689, 450.530, 408.688, 419.599 และ 467.054 kJ/kg ตามลำดับ



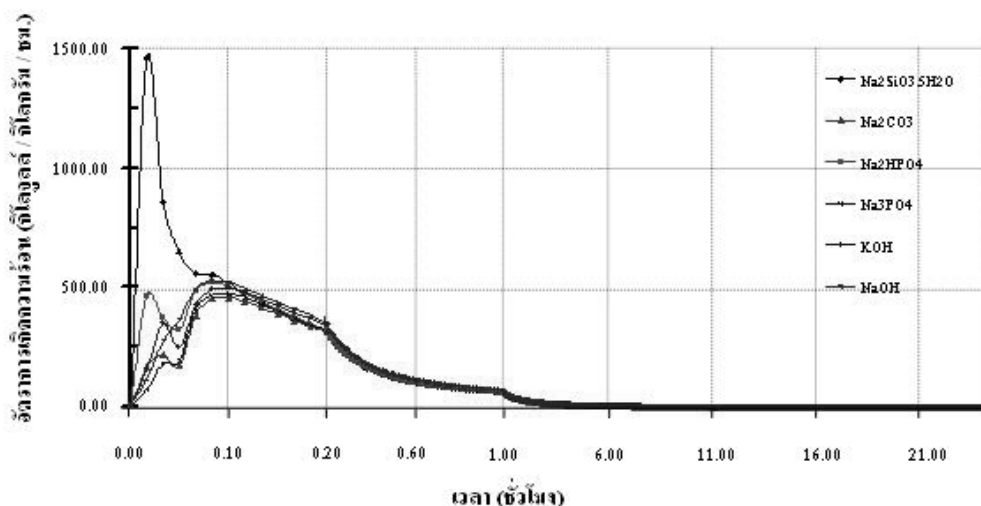
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานีที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ได้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,609.780, 1,621.597, 1,595.070, 1,591.501, 1,693.111 และ 1,643.888 kJ/kg-h ตามลำดับ



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานีที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.36 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ได้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 430.195, 389.280, 400.278, 383.278, 413.019 และ 407.795 kJ/kg ตามลำดับ

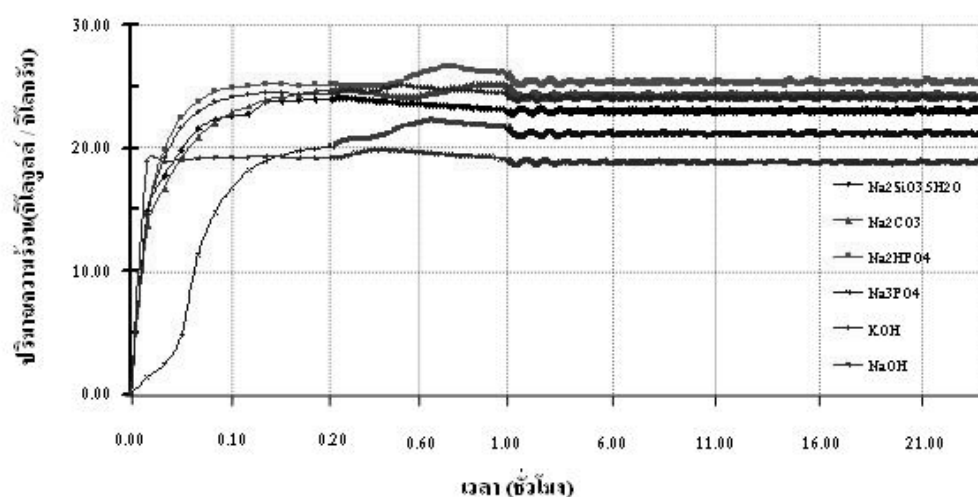


รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานี ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานี ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่อ อุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวม ซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลโนนทอง จังหวัดอุดรธานี อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

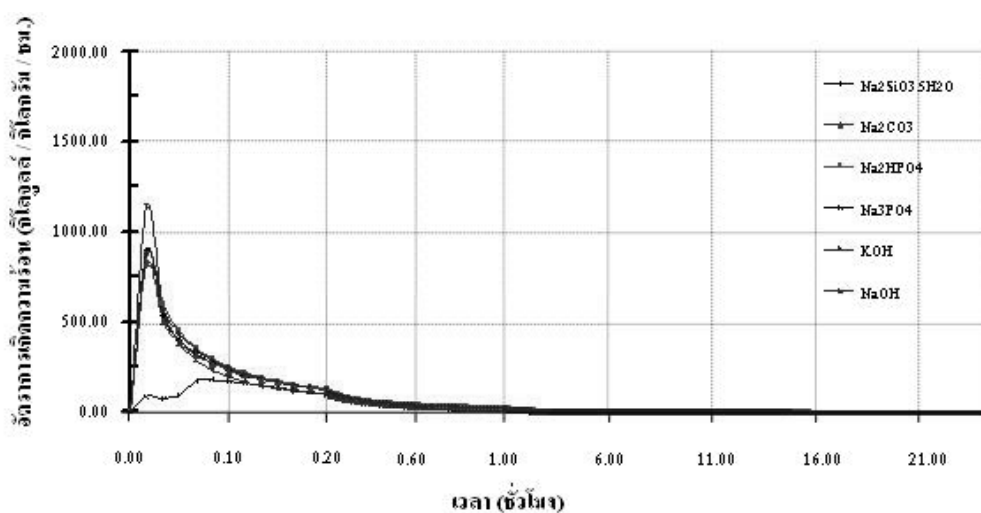
4.4.7 ดินขาวตำบลโคกไม้ลาย อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีรูปแบบและปริมาณแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.37 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 554.209, 584.706, 608.923, 509.264, 577.642 และ 455.147 kJ/kg·h ตามลำดับ



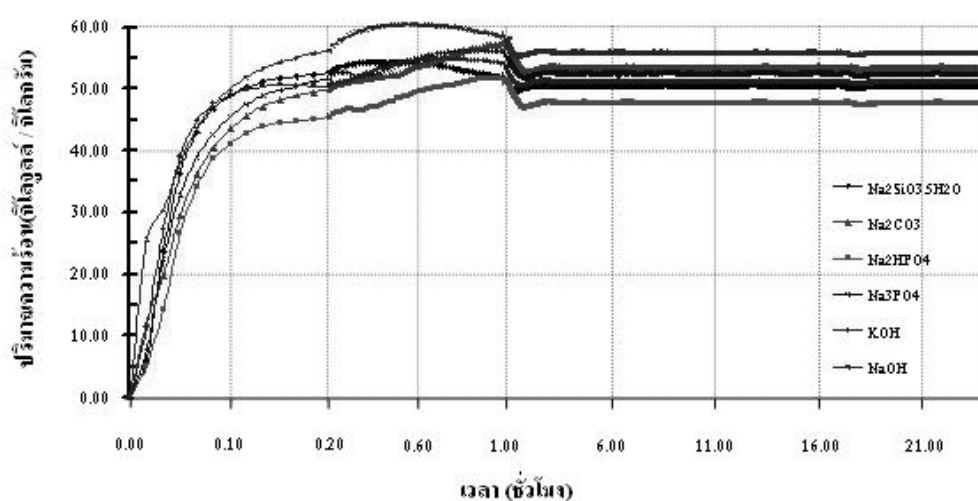
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลโคกไม้ลาย จังหวัดปราจีนบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.38 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ได้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 169.877, 173.827, 184.144, 126.356, 176.932 และ 150.185 kJ/kg ตามลำดับ



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลโคกไม้ลาย จังหวัดปราจีนบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

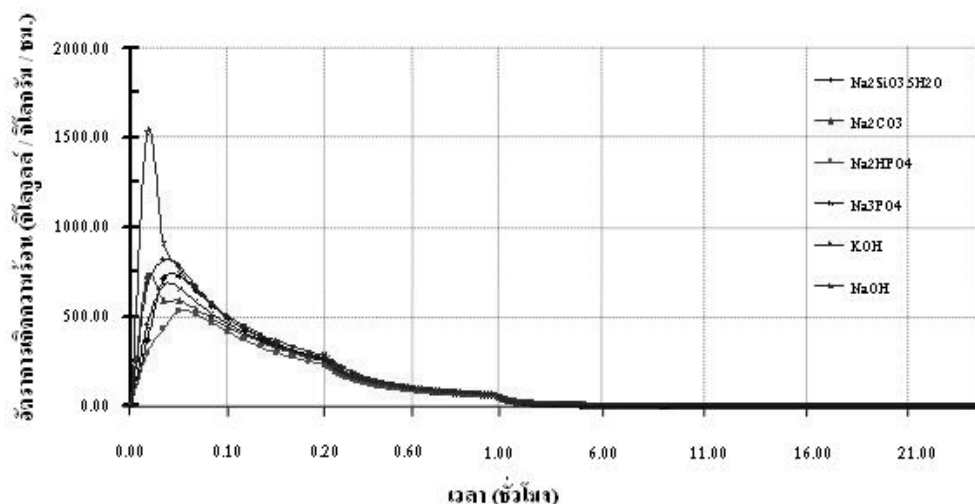
ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.39 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,212.859, 1,280.122, 1,143.191, 1,258.353, 1,226.439 และ 1,340.955 kJ/kg-h ตามลำดับ



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ

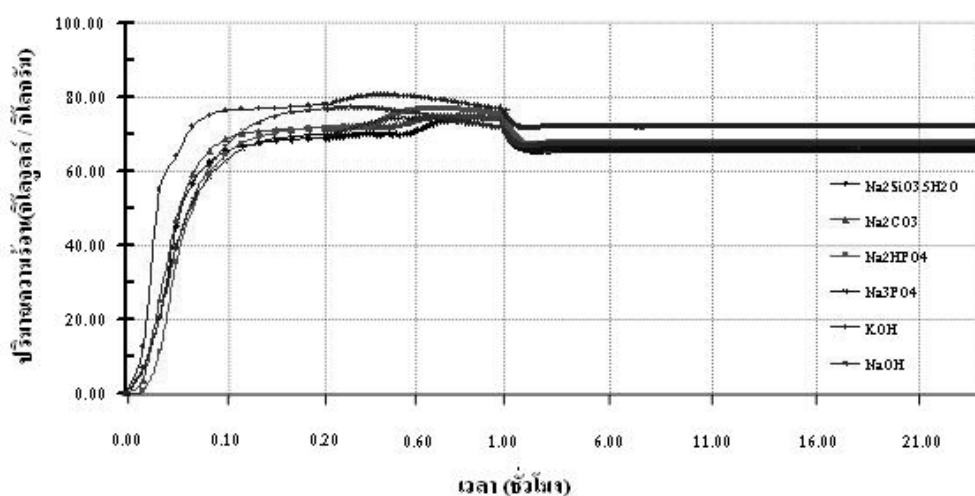
ดินขาวตำบลโคกไม้ลาย จังหวัดปราจีนบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.40 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 336.064, 340.838, 300.674, 339.179, 345.035 และ 387.690 kJ/kg ตามลำดับ



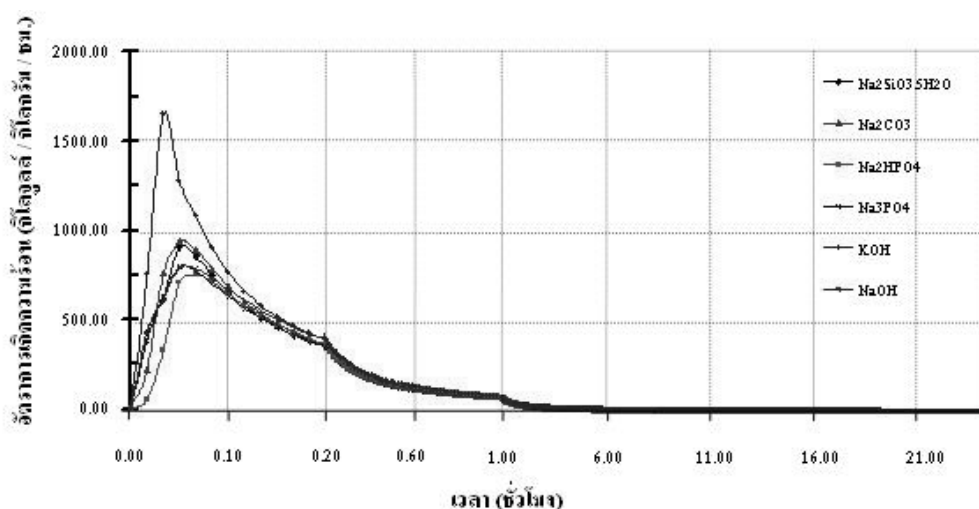
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลโคกไม้ลาย จังหวัดปราจีนบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.41 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ได้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,602.795, 1,615.265, 1,644.505, 1,607.719, 1,748.730 และ 1,640.546 kJ/kg-h ตามลำดับ



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลโคกไม้ลาย จังหวัดปราจีนบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.42 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 440.642, 447.642, 434.941, 437.803, 514.211 และ 452.472 kJ/kg ตามลำดับ



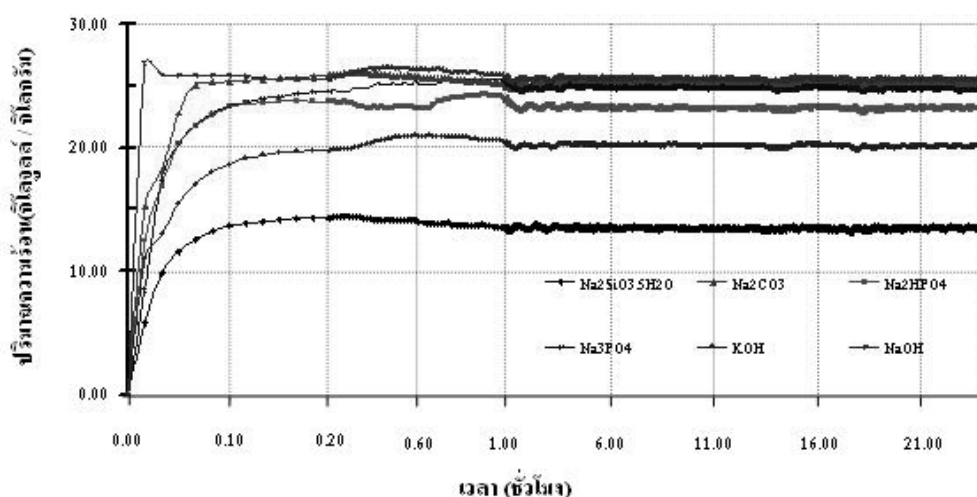
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ

ดินขาวตำบลโคกไม้ลาย จังหวัดปราจีนบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลโคกไม้ลาย จังหวัดปราจีนบุรี ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลโคกไม้ลาย จังหวัดปราจีนบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.4.8 ดินขาวดำน่านทับตะโก อำเภोजอมบึง จังหวัดราชบุรี

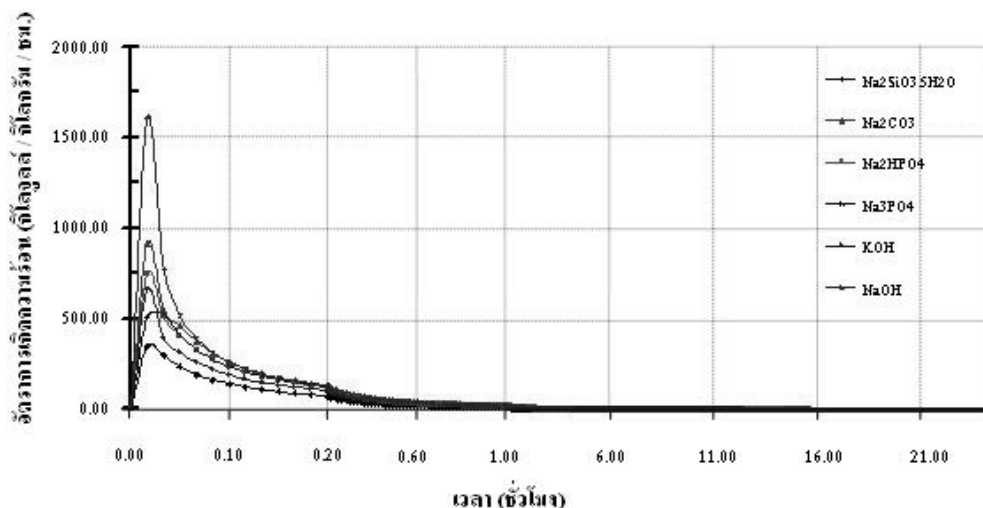
ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.43 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 325.826, 604.784, 557.913, 596.720, 484.668 และ 615.721 kJ/kg-h ตามลำดับ



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ

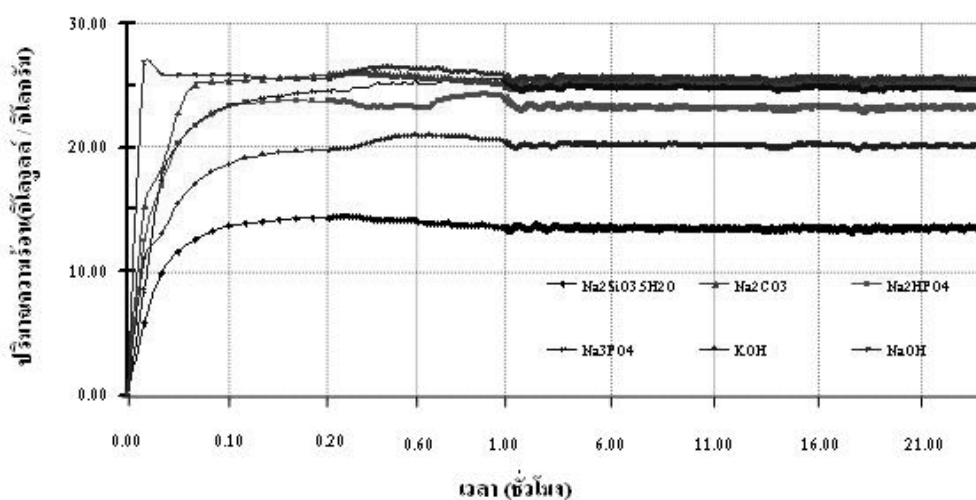
ดินขาวดำน่านทับตะโก จังหวัดราชบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมา หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.44 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 97.169, 184.617, 167.957, 172.063, 142.618 และ 203.589 kJ/kg ตามลำดับ



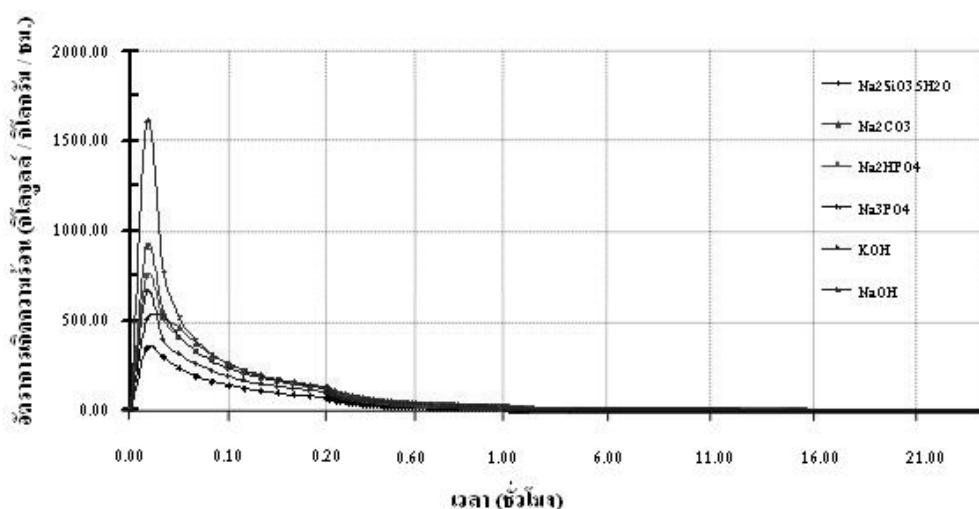
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวค้ำบลดำนทับตะโก จังหวัดราชบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย และส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.45 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,339.714, 1,403.565, 1,410.513, 1,389.087, 1,303.121 และ 1,181.736 kJ/kg-h ตามลำดับ



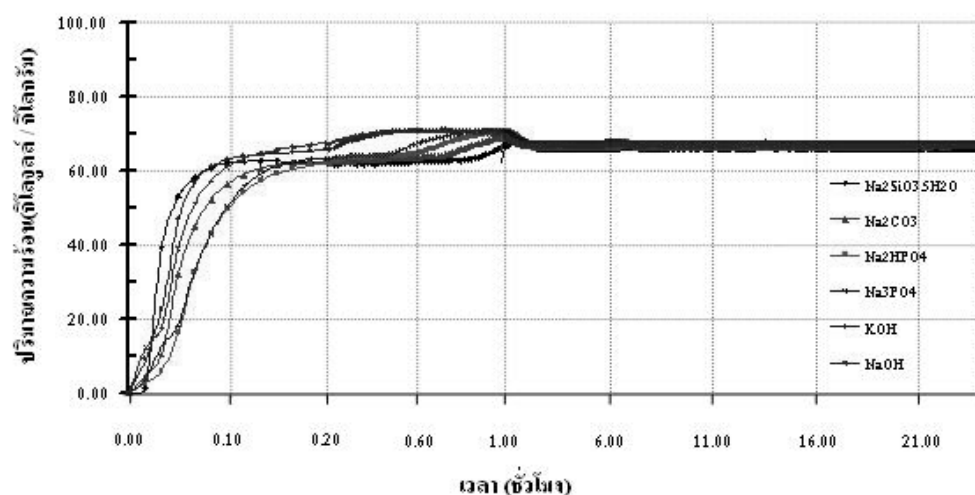
รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวค้ำบลดำนทับตะโก จังหวัดราชบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.46 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 373.077, 374.555, 381.563, 371.172, 356.002 และ 329.634 kJ/kg ตามลำดับ



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวดำบลค่านทับตะโก จังหวัดราชบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

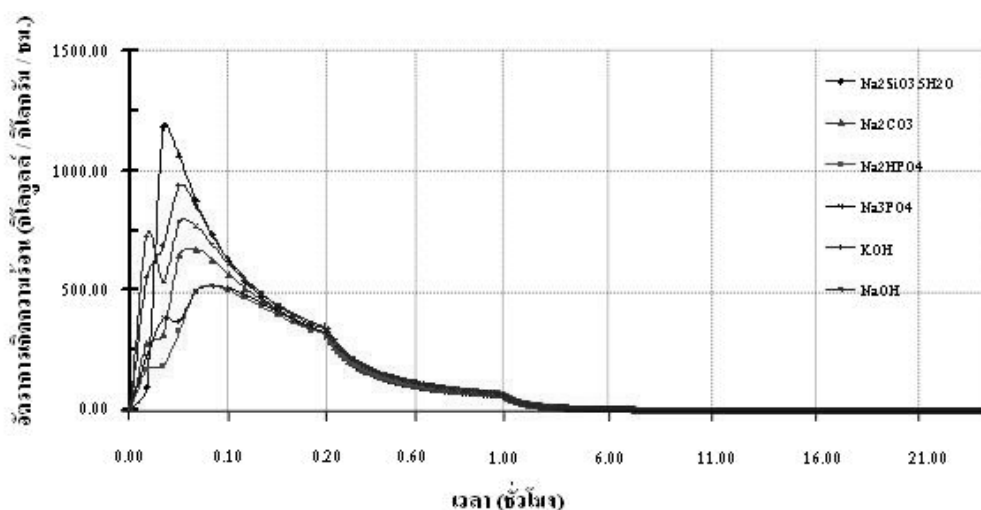
ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.47 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,597.682, 1,610.458, 1,625.685, 1,629.315, 1,631.621 และ 1,617.760 kJ/kg·h ตามลำดับ



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ

ดินขาวดำบลดำนทับตะโก จังหวัดราชบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.48 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 428.943, 407.843, 394.627, 402.824, 441.393 และ 436.467 kJ/kg ตามลำดับ



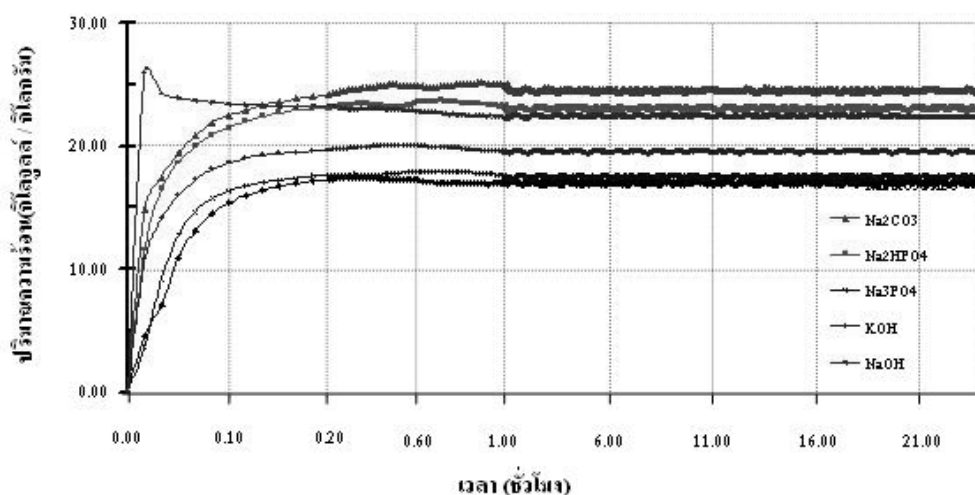
รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ

ดินขาวดำบลดำนทับตะโก จังหวัดราชบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลด่านทับตะโก จังหวัดราชบุรี ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลด่านทับตะโก จังหวัดราชบุรี ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.4.9 ดินขาวตำบลงิ้วจันทร์ อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี

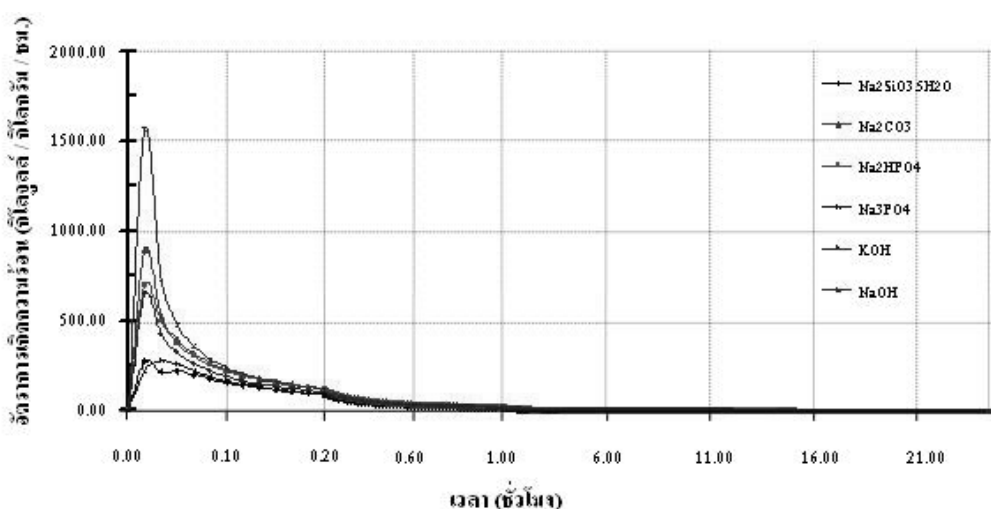
ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.49 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 410.285, 589.516, 553.546, 422.356, 469.965 และ 510.780 kJ/kg-h ตามลำดับ



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ

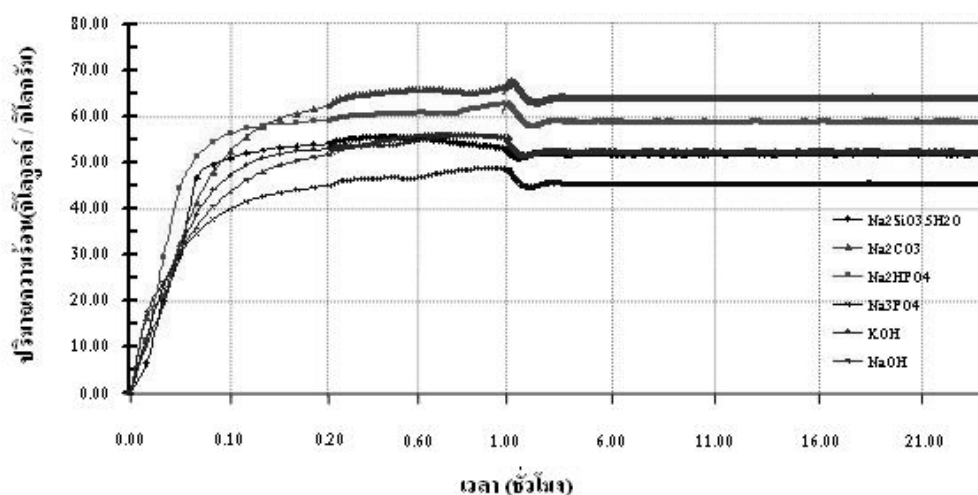
ดินขาวตำบลงิ้วจันทร์ จังหวัดเพชรบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมา หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.50 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 112.818, 175.776, 163.521, 117.125, 140.176 และ 183.382 kJ/kg ตามลำดับ



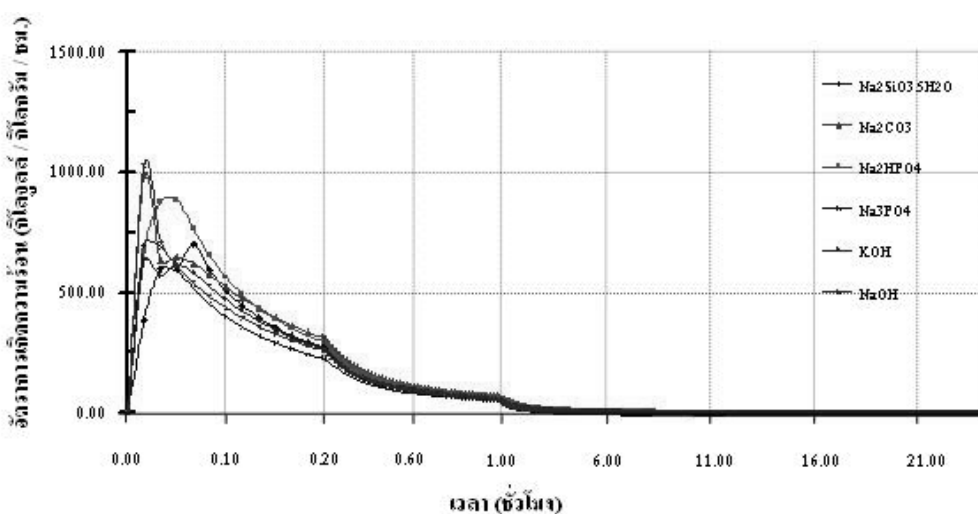
รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลวังจันทร์ จังหวัดเพชรบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย และส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.51 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,246.950, 1,532.865, 1,409.374, 1,090.377, 1,253.264 และ 1,251.509 kJ/kg·h ตามลำดับ



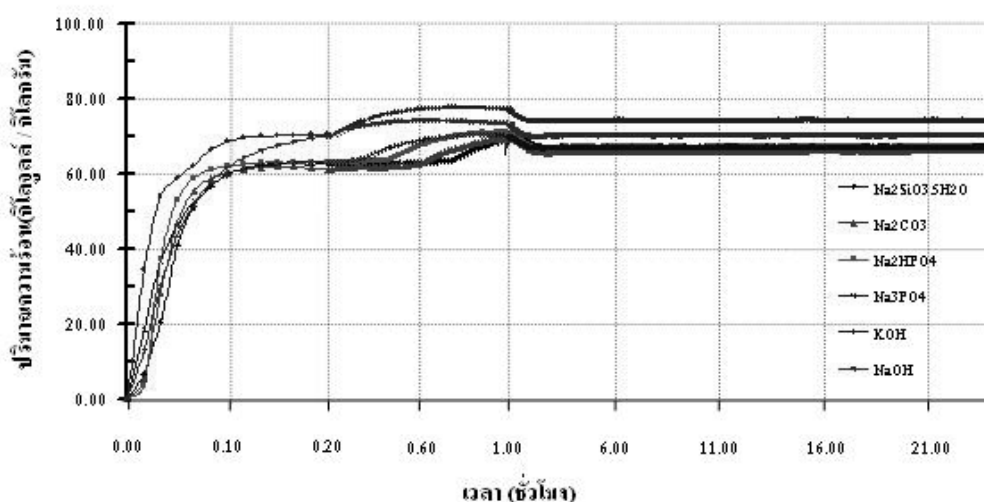
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวด้าปลั่งจันทร์ จังหวัดเพชรบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.52 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 341.456, 410.953, 393.835, 302.799, 341.110 และ 346.960 kJ/kg ตามลำดับ



รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวด้าปลั่งจันทร์ จังหวัดเพชรบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

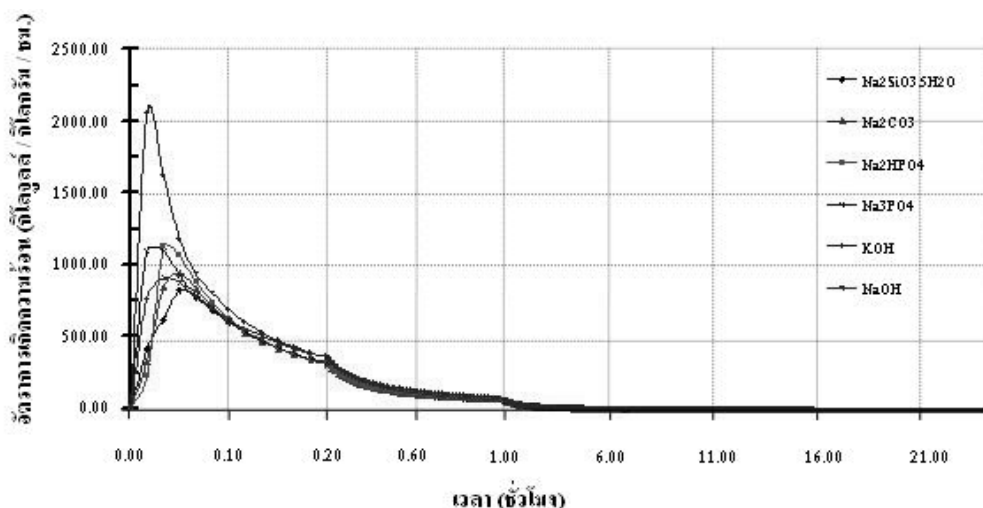
ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.53 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,623.304, 1,598.849, 1,622.821, 1,623.965, 1,793.854 และ 1,702.809 kJ/kg-h ตามลำดับ



รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ

ดินขาวตำบลวังจันทร์ จังหวัดเพชรบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.54 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 422.948, 424.874, 438.917, 449.034, 523.961 และ 462.899 kJ/kg ตามลำดับ

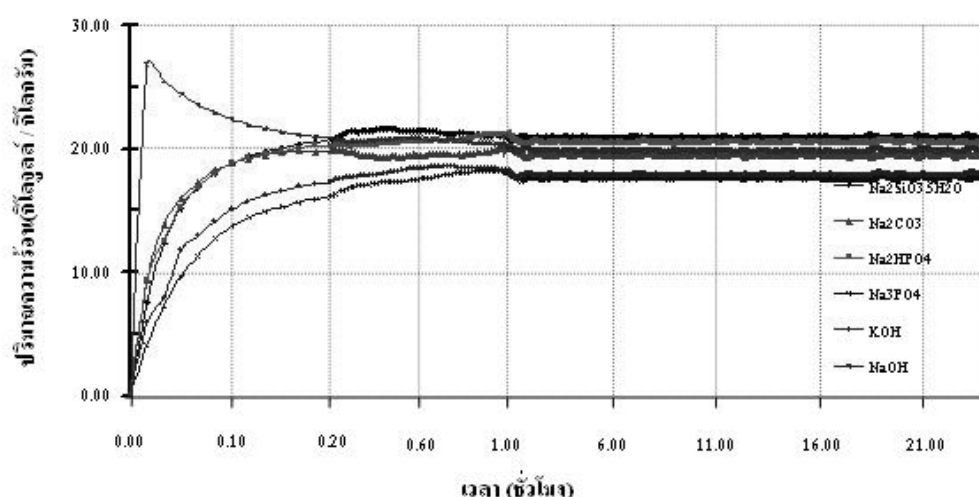


รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลวังจันทร์ จังหวัดเพชรบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลวังจันทร์ จังหวัดเพชรบุรี ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลวังจันทร์ จังหวัดเพชรบุรีที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

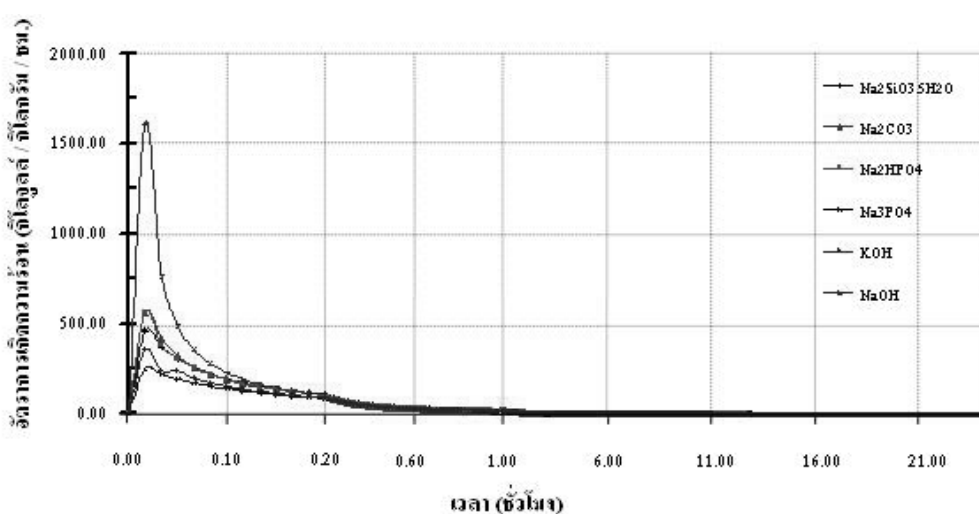
4.4.10 ดินขาวตำบลห้วยยาง อำเภอแกลง จังหวัดระยอง

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.55 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 503.058, 470.214, 493.869, 424.027, 431.067 และ 480.300 kJ/kg-h ตามลำดับ



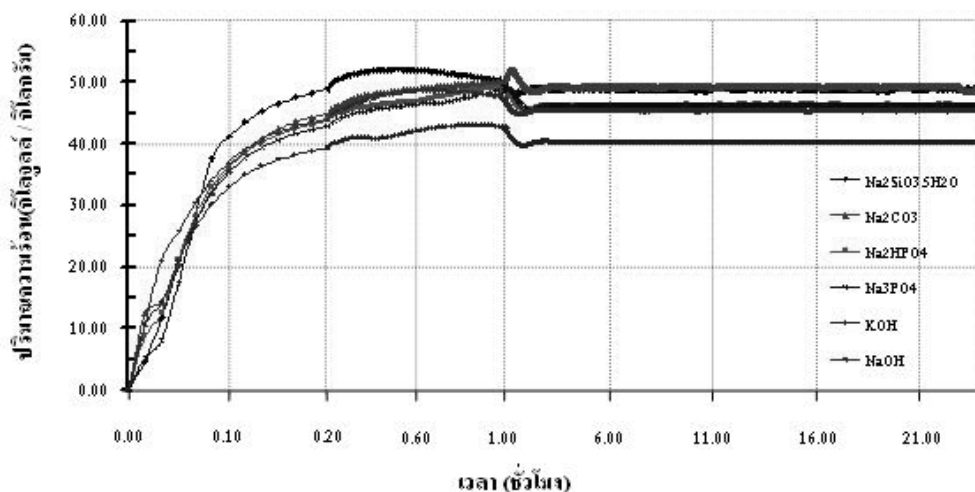
รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวด้าบลห้วยยาง จังหวัดระยองที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมา หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.56 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 142.911, 138.743, 142.470, 112.215, 118.732 และ 171.868 kJ/kg ตามลำดับ



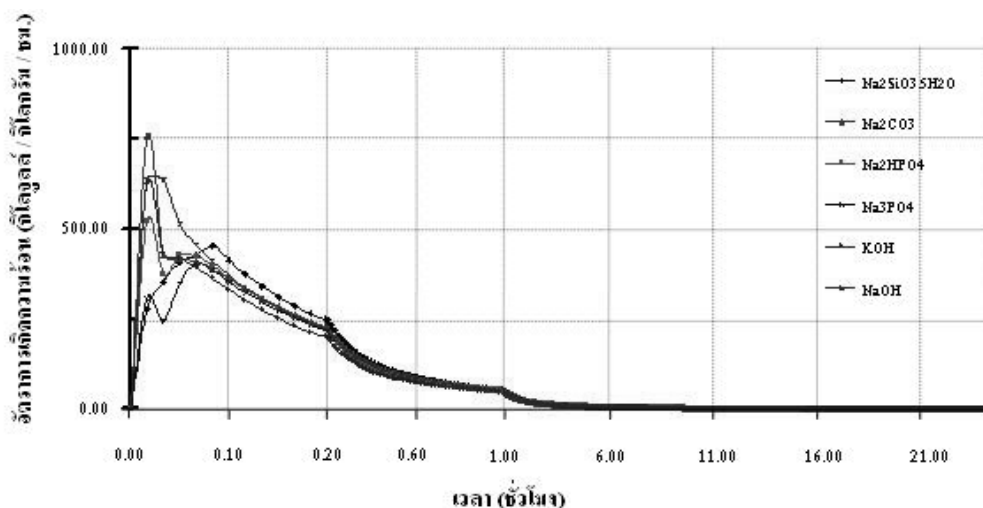
รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวด้าบลห้วยยาง จังหวัดระยองที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.57 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,172.289, 1,179.410, 1,108.342, 1,109.075, 965.012 และ 1,089.383 kJ/kg-h ตามลำดับ



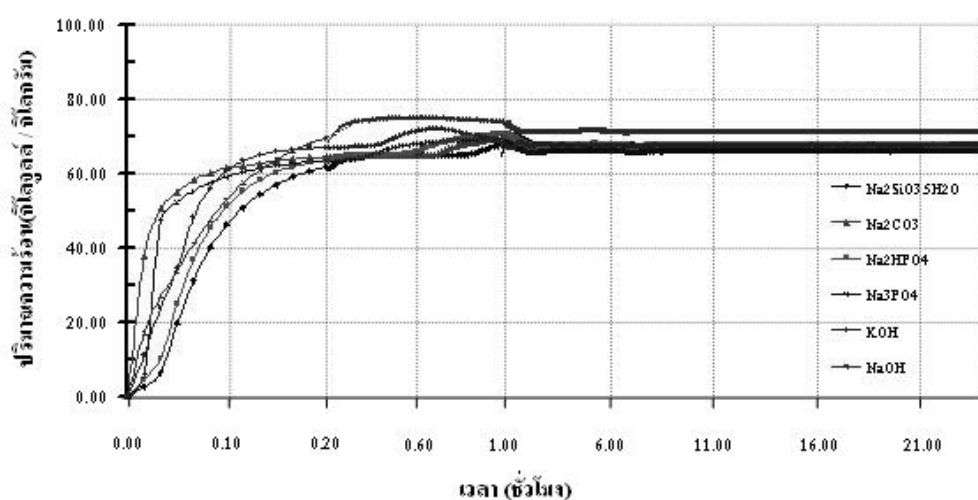
รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลห้วยยาง จังหวัดระยองที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2CO_3 มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.58 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 304.250, 306.102, 288.938, 279.981, 259.877 และ 295.930 kJ/kg ตามลำดับ



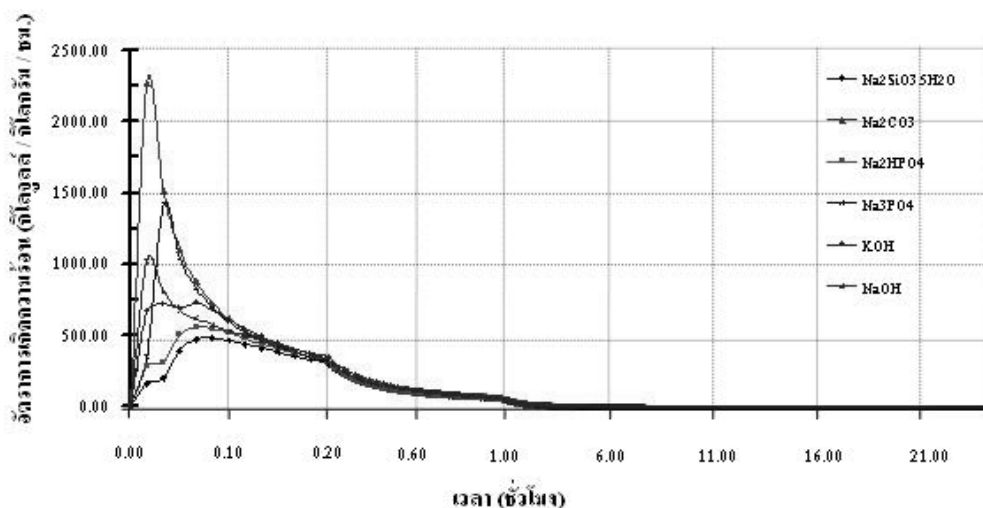
รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวค้ำบลห้วยยาง จังหวัดระยองที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.59 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ได้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,632.416, 1,612.966, 1,635.901, 1,598.559, 1,633.682 และ 1,727.283 kJ/kg·h ตามลำดับ



รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวค้ำบลห้วยยาง จังหวัดระยองที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.60 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 393.599, 478.437, 407.035, 439.879, 436.123 และ 458.224 kJ/kg ตามลำดับ

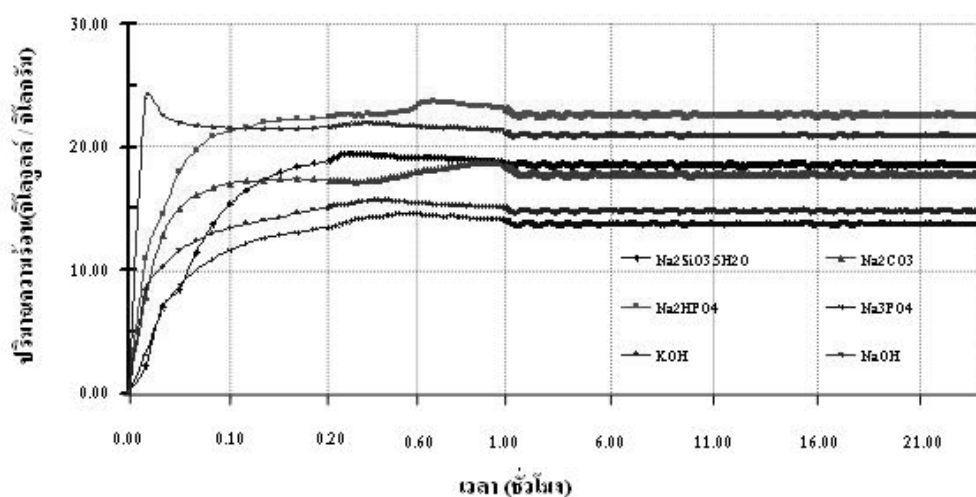


รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวดำบลห้วยยาง จังหวัดระยอง ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวดำบลห้วยยาง จังหวัดระยอง ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวดำบลห้วยยาง จังหวัดระยอง ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.4.11 ดินขาวตำบลหาดส้มแป้น อำเภอเมือง จังหวัดระนอง

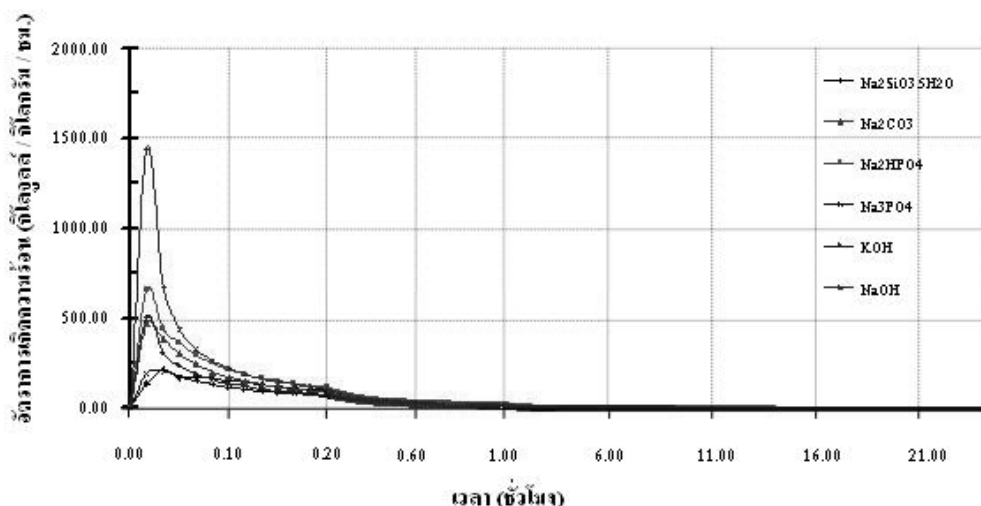
ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.61 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 447.342, 428.767, 542.901, 332.693, 356.685 และ 505.730 kJ/kg-h ตามลำดับ



รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ

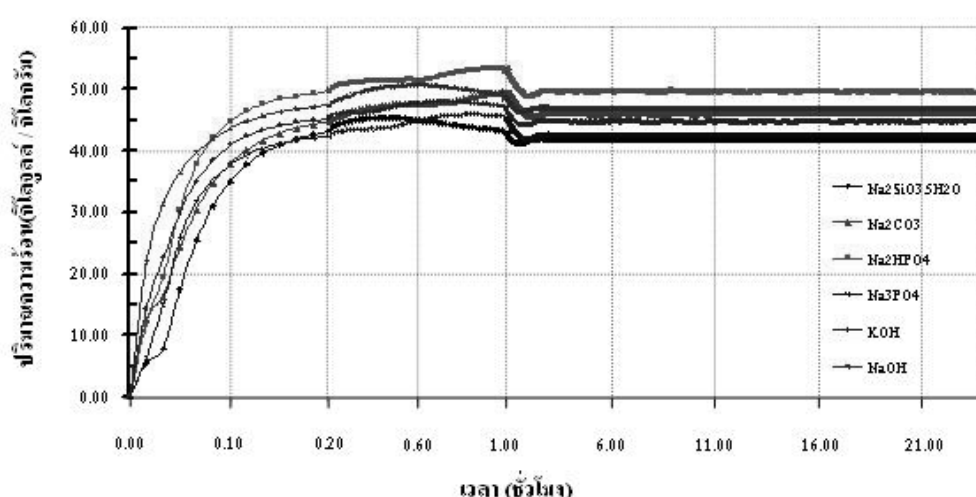
ดินขาวตำบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนองที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมา หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.62 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 117.797, 125.536436, 159.254, 91.029, 106.126 และ 171.182 kJ/kg ตามลำดับ



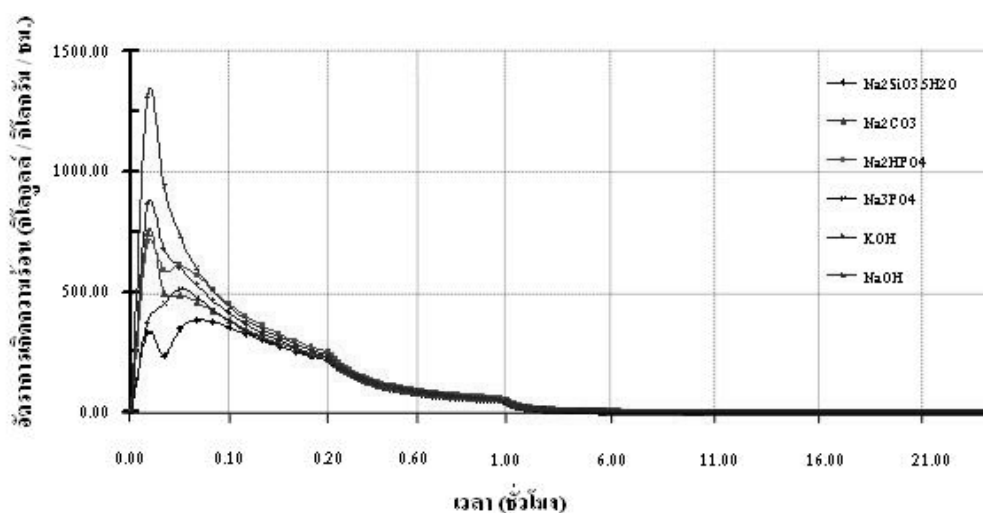
รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวค้ำบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนองที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.63 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,005.615, 1,108.516, 1,189.543, 1,023.555, 1,071.837 และ 1,127.476 kJ/kg-h ตามลำดับ



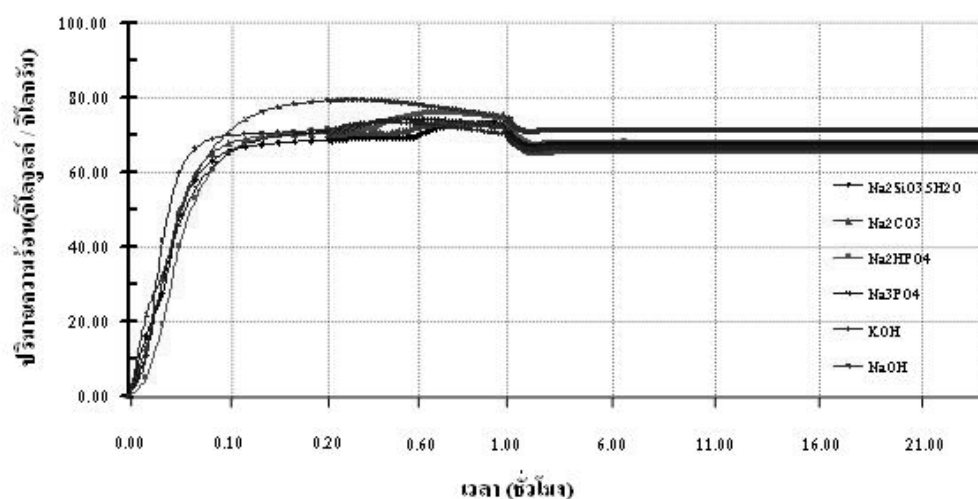
รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวค้ำบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนองที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.64 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 263.023, 299.188, 327.249, 275.533, 302.879 และ 332.342 kJ/kg ตามลำดับ



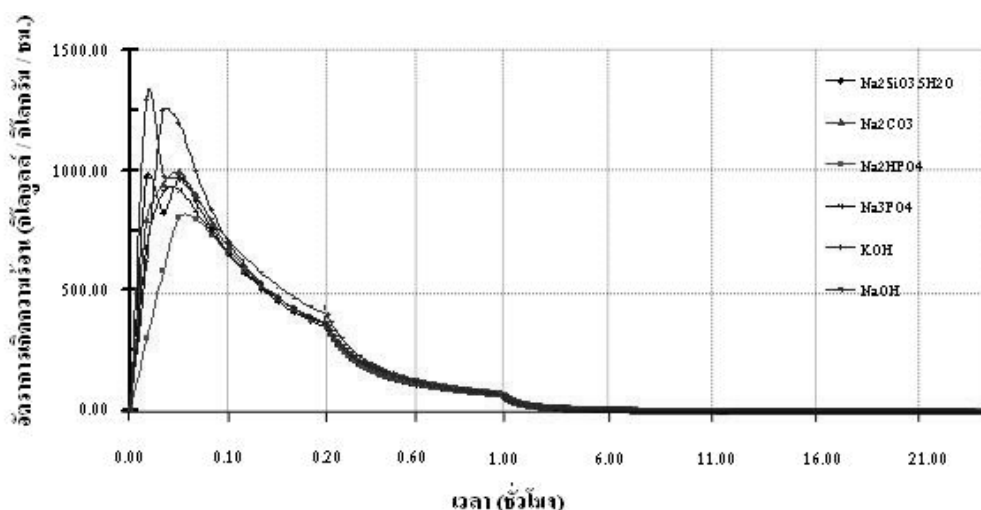
รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวด้าบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนองที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.65 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,600.656, 1,599.855, 1,647.561, 1,639.431, 1,610.968 และ 1,731.430 kJ/kg·h ตามลำดับ



รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินवाद้าบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนองที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินवाद้าบลหาดส้มแป้นเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินवाद้าบลหาดส้มแป้นที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินवाद้าบลหาดส้มแป้นที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.66 ตัวอย่างดินवाद้าบลหาดส้มแป้นที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 452.751, 455.970, 444.969, 456.713, 466.888 และ 496.986 kJ/kg ตามลำดับ

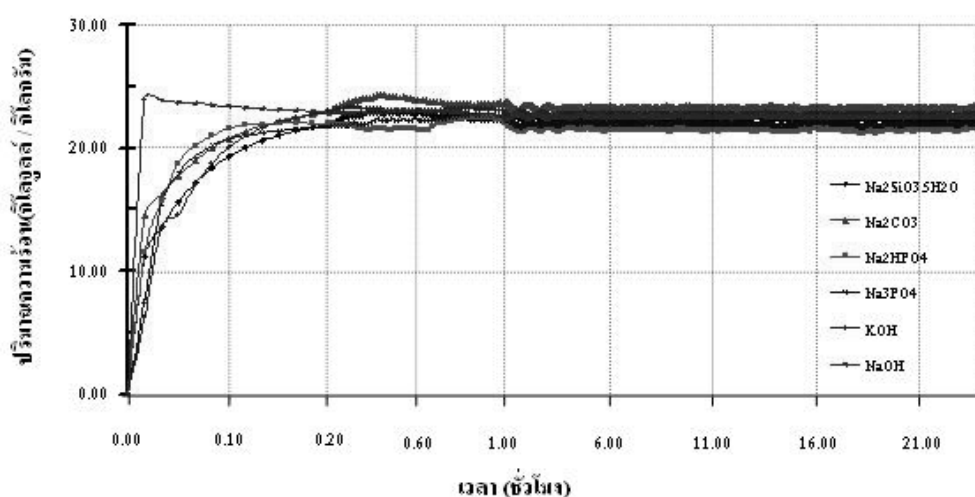


รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินवाद้าบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนองที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลดหาดส้มแป้น จังหวัดระนอง ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลดหาดส้มแป้น จังหวัดระนอง ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

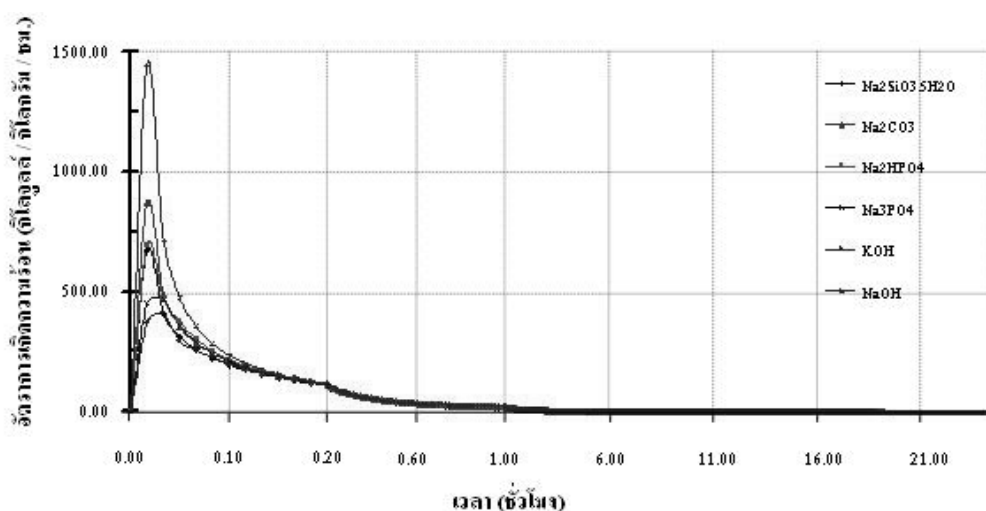
4.4.12 ดินขาวตำบลดุนทะเล อำเภอมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.67 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 539.395, 559.971, 517.556, 529.100, 546.255 และ 543.296 kJ/kg-h ตามลำดับ



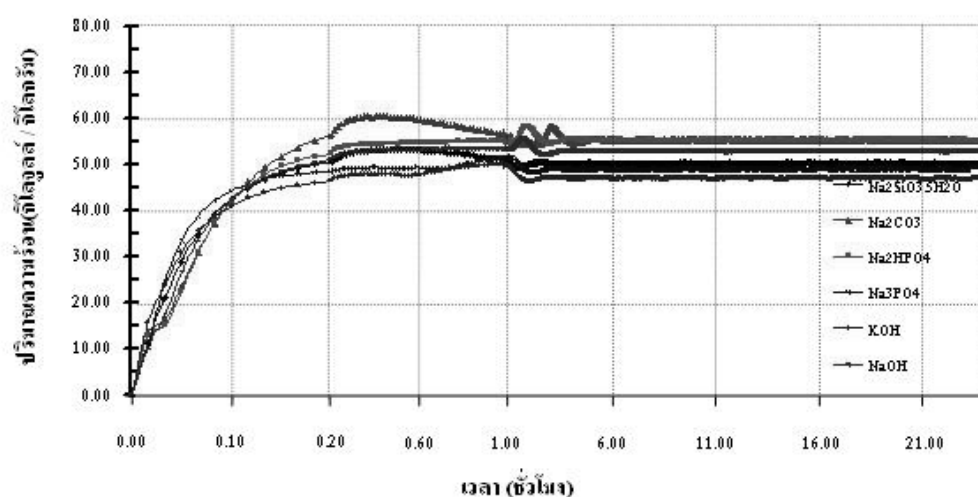
รูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลดุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานีที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมา หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.68 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 154.972, 166.738, 155.788, 152.546, 152.193 และ 181.347 kJ/kg ตามลำดับ



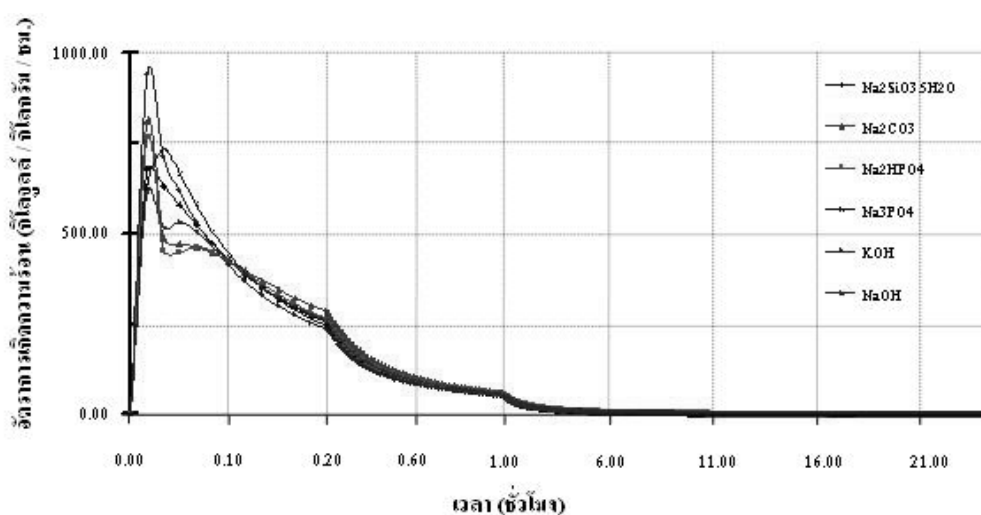
รูปที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลขุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานีที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2CO_3 มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย และส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.69 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,205.352, 1,326.732, 1,323.063, 1,175.283, 1,126.202 และ 1,269.459 kJ/kg-h ตามลำดับ



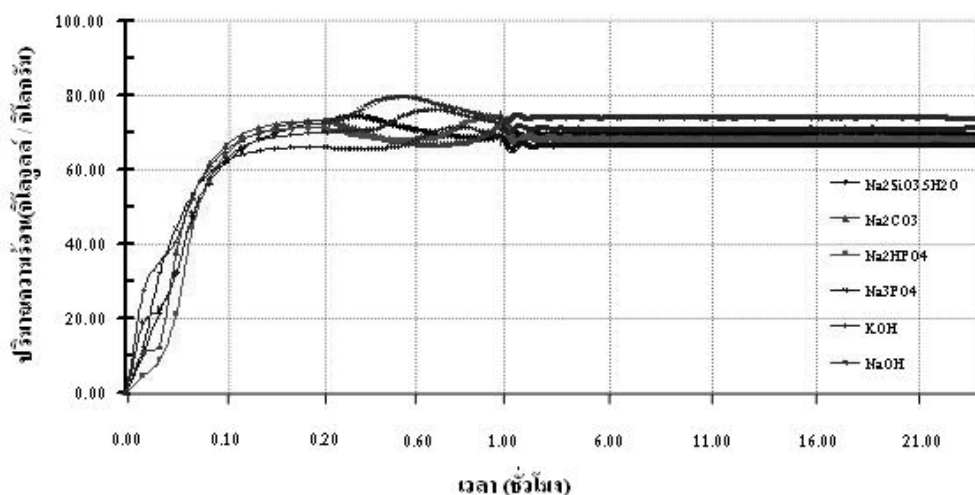
รูปที่ 4.69 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลขุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานีที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียง ดังแสดงในรูปที่ 4.70 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 327.823, 353.013, 343.290, 324.121, 315.448 และ 334.560 kJ/kg ตามลำดับ



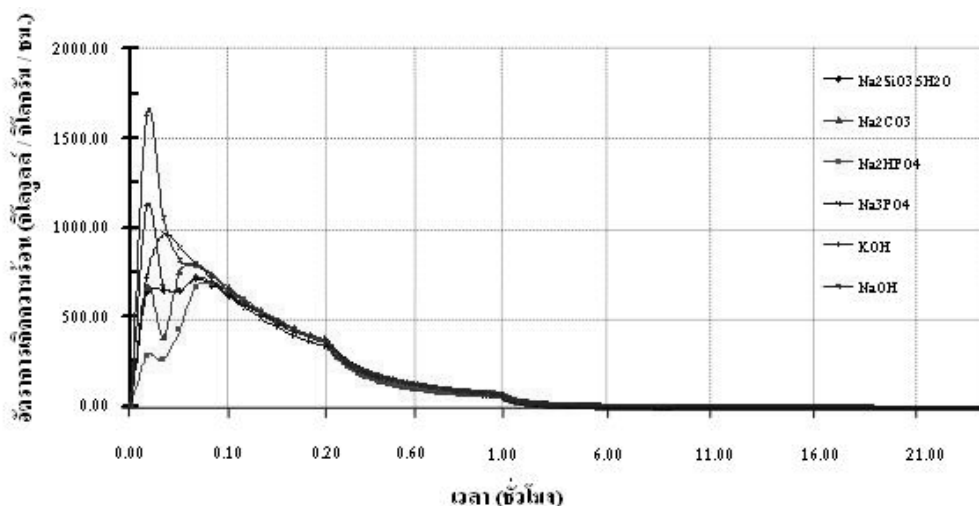
รูปที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลขุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานีที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบและปริมาณใกล้เคียงกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.71 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,677.748, 1,655.556, 1,646.221, 1,609.179, 1,719.146 และ 1,790.193 kJ/kg-h ตามลำดับ



รูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลขุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานีที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.72 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 446.846, 443.484, 423.838, 440.656, 460.251 และ 498.759 kJ/kg ตามลำดับ

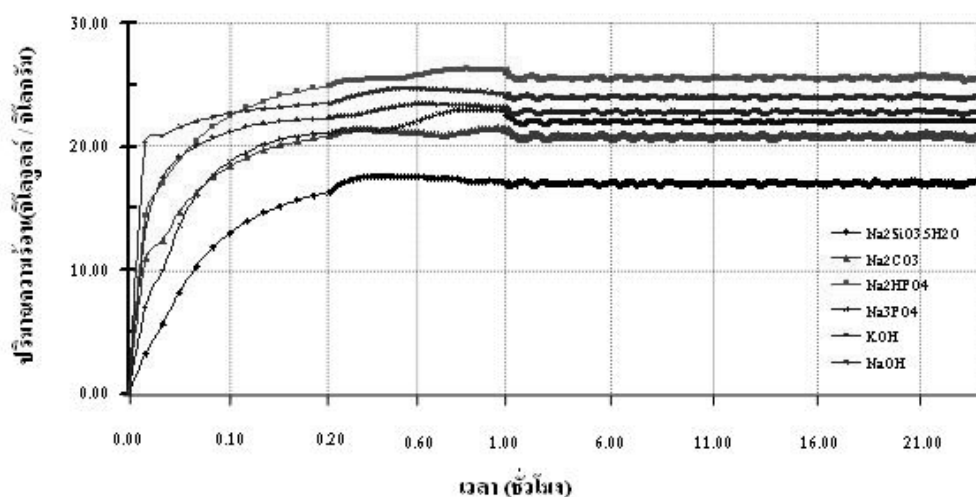


รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลขุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานี ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลขุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานี ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่อ อุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวม ซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวตำบลขุนทะเล จังหวัดสุราษฎร์ธานี ที่ อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมี ผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

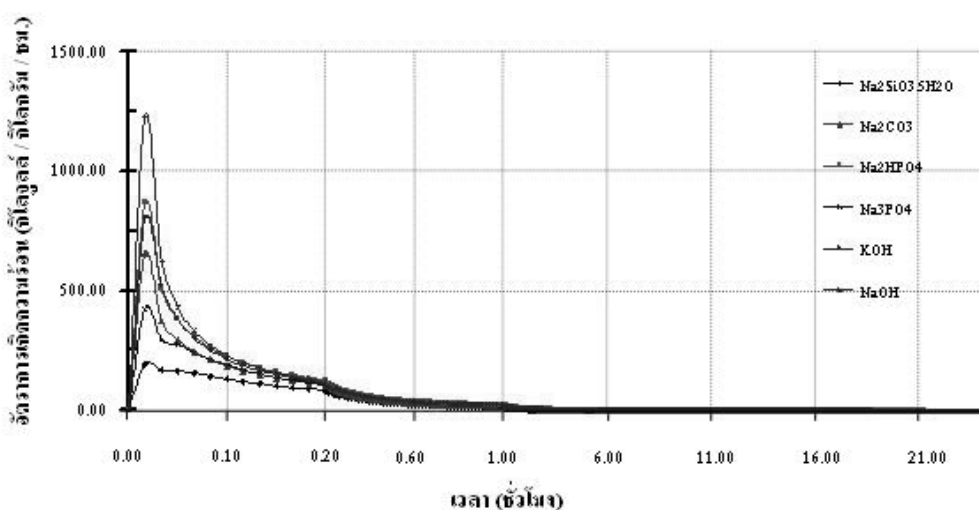
4.4.13 ดินขาวตำบลจวบ อำเภอเจาะไอร้อง จังหวัดนราธิวาส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันทั้งรูปแบบและปริมาณในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อ สัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินขาวสูงกว่าอุณหภูมิกระตุ้น หลังจากนั้น รูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.73 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความ ร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 410.304, 501.711, 612.929, 529.828, 547.118 และ 577.795 kJ/kg·h ตามลำดับ



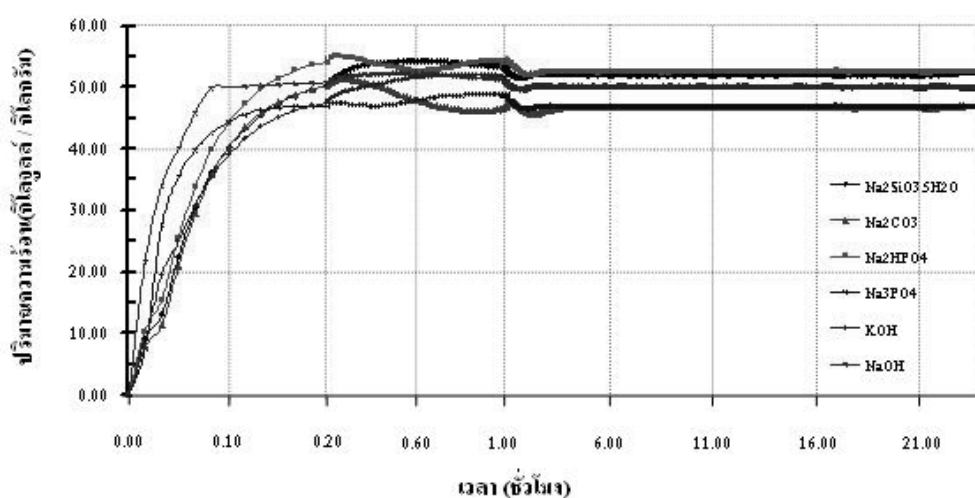
รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลจวบ จังหวัดนราธิวาสที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร NaOH มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นอย่างชัดเจนเนื่องจากสาร NaOH เมื่อสัมผัสน้ำแล้วจะคายความร้อนออกมา หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.74 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 107.299, 145.625, 179.558, 145.224, 163.906 และ 181.731 kJ/kg ตามลำดับ



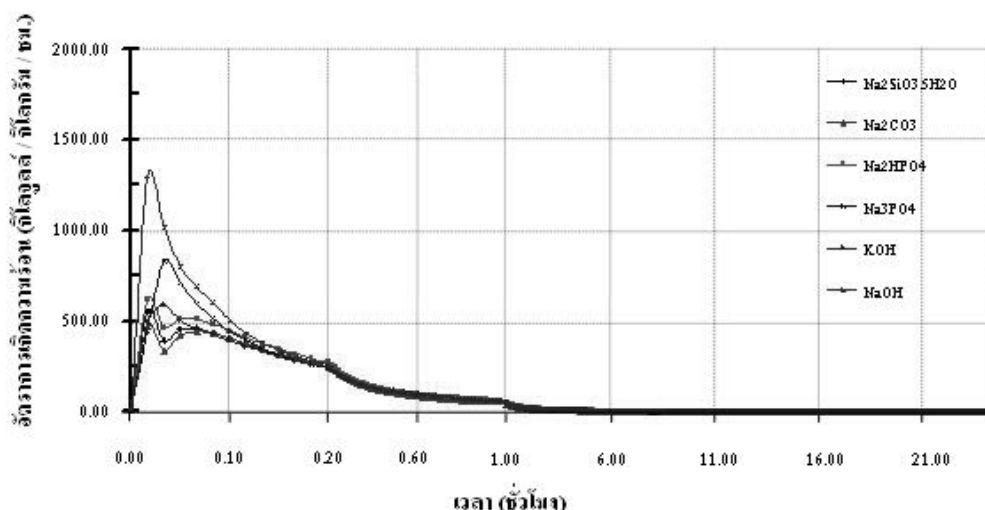
รูปที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลจวบ จังหวัดนราธิวาสที่อุณหภูมิกระตุ้น 40 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย และส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.75 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,249.189, 1,120.723, 1,258.077, 1,125.706, 1,195.646 และ 1,203.895 kJ/kg-h ตามลำดับ



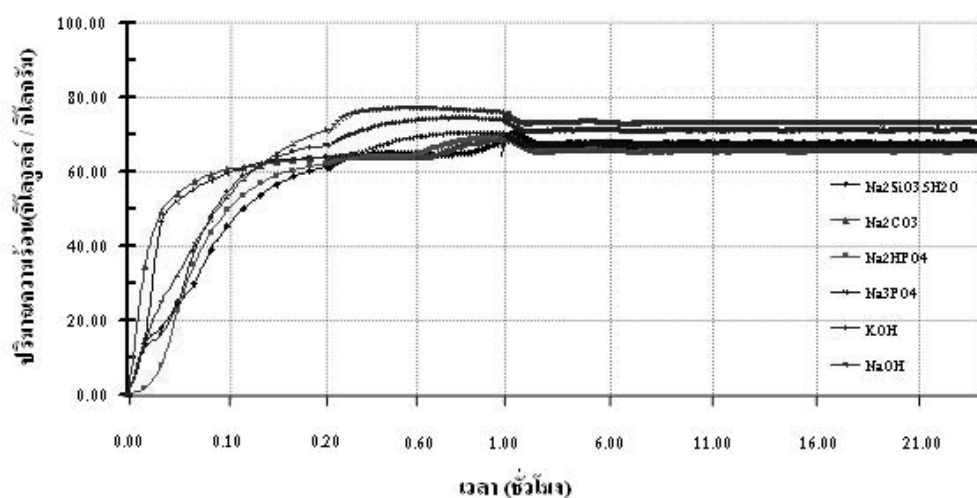
รูปที่ 4.75 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลจวบ จังหวัดนราธิวาสที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2HPO_4 มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.76 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 324.305, 297.659, 335.063, 313.340, 314.507 และ 355.043 kJ/kg ตามลำดับ



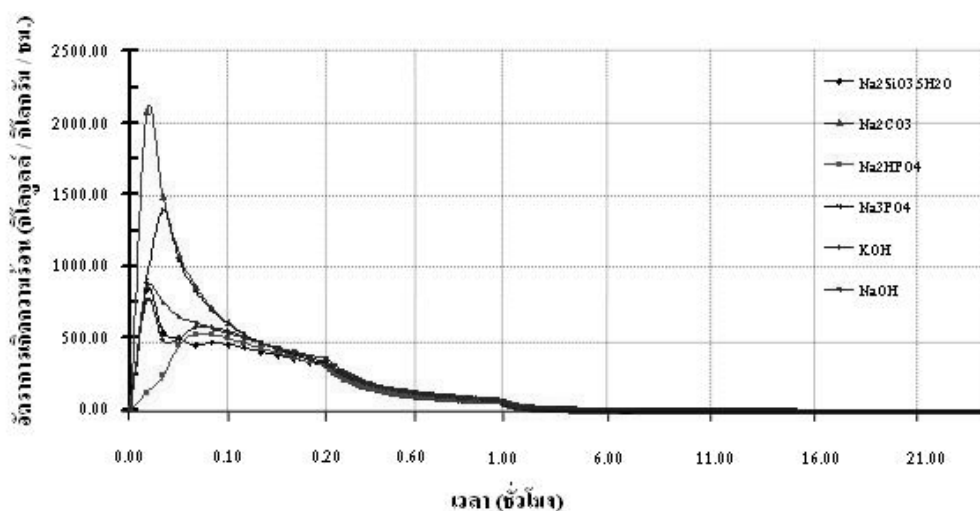
รูปที่ 4.76 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลจวบ จังหวัดนราธิวาสที่อุณหภูมิกระตุ้น 60 องศาเซลเซียส

ปริมาณความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม เมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีรูปแบบใกล้เคียงกันเพียงแต่ปริมาณแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร KOH และ NaOH มีปริมาณความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อยและส่งผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งจะมากกว่าดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสารชนิดอื่นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.77 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิปริมาณความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 1,631.231, 1,595.386, 1,606.415, 1,625.523, 1,714.622 และ 1,770.290 kJ/kg.h ตามลำดับ



รูปที่ 4.77 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของ
ดินขาวตำบลจวบ จังหวัดนราธิวาสที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

อัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 12 นาทีแรก หลังจากนั้นรูปแบบและปริมาณมีความใกล้เคียงกัน โดยดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร Na_2CO_3 มีอัตราการเกิดความร้อนมากกว่าตัวอย่างดินขาวที่ผสมด้วยสารชนิดอื่นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.78 ตัวอย่างดินขาวที่ผสมเพิ่มด้วยสาร $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Na_2CO_3 , Na_2HPO_4 , Na_3PO_4 , KOH และ NaOH มีขนาดพื้นที่ใต้เส้นแผนภูมิอัตราการเกิดความร้อนเมื่อกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 410.569, 469.468, 394.198, 454.240, 440.314 และ 463.339 kJ/kg ตามลำดับ

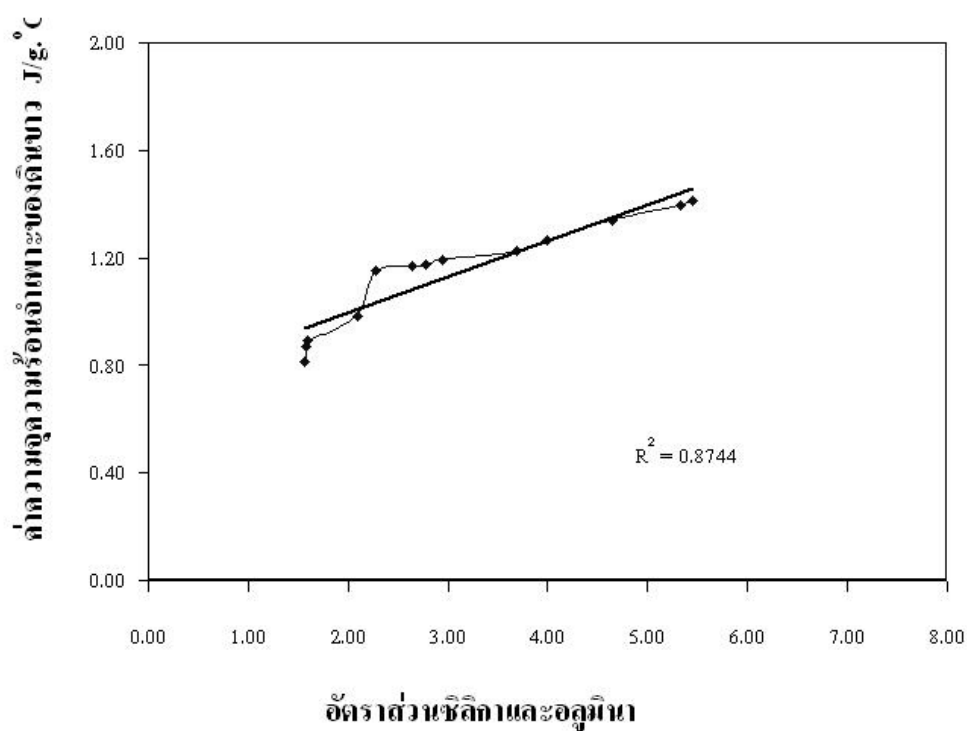


รูปที่ 4.78 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อน กับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวด้าบลจวบ จังหวัดนราธิวาสที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวด้าบลจวบ จังหวัดนราธิวาส ที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบและปริมาณของเส้นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาของดินขาวด้าบลจวบ จังหวัดนราธิวาสที่อุณหภูมิกระตุ้นต่างๆเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างและมีผลไปถึงอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.5 ผลการทดสอบค่าความจุความร้อนจำเพาะของตัวอย่างดินขาว

รูปที่ 7.49 แสดงให้เห็นว่าความจุความร้อนของดินขาวแปรผันตามอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินาอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด (R -squared) เท่ากับ 0.8744 ข้อมูลการทดสอบดังแสดงไว้ในตารางที่ ค.3 ของภาคผนวก ค



รูปที่ 4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความร้อนจำเพาะของดินขาวและอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ 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 เพื่อหาปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มและศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิกะตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของดินขาวโดยวิธีแคลอริเมตรี สามารถสรุปผลของการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 ปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของดินขาวจากแหล่งต่างๆในประเทศไทยและสารผสมเพิ่มโดยใช้วิธีแคลอริเมตรี

ในการทดสอบแคลอริเมตรีเพื่อหาปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่มพบว่า ที่อุณหภูมิกระตุ้น 80 องศาเซลเซียส ตัวอย่างดินขาวตำบลบุญนาคนพัฒนา 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 จังหวัดระยอง ผสมด้วย 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

5.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิกระตุ้นต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว

ปริมาณความร้อนของดินขาวและสารผสมเพิ่มมีรูปแบบและปริมาณใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิกระตุ้นเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกกลุ่มตัวอย่างและมีผลไปถึงปริมาณความร้อนรวมและอัตราการเกิดความร้อนรวมซึ่งเพิ่มขึ้น กลุ่มตัวอย่างดินขาวมีค่าอัตราการเกิดความร้อนในช่วงแรกมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน หลังจากนั้นไม่เกิดอัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นอีกในทุกกลุ่มตัวอย่าง

5.1.3 ผลกระทบของสารผสมเพิ่มแต่ละชนิดต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว

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

5.1.4 ผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา ต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว

ตัวอย่างดินขาวตำบลผาจุ 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·h ตามลำดับ เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนรวมและอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด(R-squared)เท่ากับ 0.2877 เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความร้อนรวมและอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินาแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด(R-squared)เท่ากับ 0.2386 ดังนั้นอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา ไม่มีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันของดินขาว

5.1.5 ผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา ต่อค่าความจุความร้อนจำเพาะของดินขาว

จากผลการศึกษาอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา ไม่มีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันของดินขาว แต่เมื่อนำอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินามาเปรียบเทียบกับค่าความจุความร้อนจำเพาะของดินขาว ปรากฏว่าสัมพันธ์กัน กล่าวคือเมื่ออัตราส่วนซิลิกาและอลูมินาสูงขึ้นค่าความจุความร้อนจำเพาะของดินขาวจะสูงขึ้นด้วย เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะของดินขาวและอัตราส่วนซิลิกาและอลูมินา แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด (R^2) เท่ากับ 0.8744 โดยค่าความจุความร้อนจำเพาะของดินขาวเป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้คำนวณหาปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการทดสอบแคลอริเมตริกเพื่อหาปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม ใช้ปริมาณส่วนผสมของสารผสมเพิ่มที่ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของดินขาว เพื่อให้ได้ผลของการปรับปรุงคุณภาพที่ชัดเจน หากมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารผสมเพิ่ม คาดว่าปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนซึ่งสัมพันธ์กับกำลังจะเปลี่ยนแปลงไป จึงควรมีการทดสอบหาปริมาณสารผสมเพิ่มที่เหมาะสม เพื่อเป็นแนวทางที่จะนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม

5.2.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบแคลอริเมตริกนั้น การชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบจะช่วยควบคุมปริมาณความชื้นในตัวอย่าง เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงความชื้นซึ่งมีผลต่อปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างดินขาวและสารผสมเพิ่ม

5.2.3 ปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างที่วัดได้เป็นปฏิกิริยาที่แสดงออกมาของดินขาวและสารผสมเพิ่มที่ถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิในระหว่าง 24 ชั่วโมงแรกของการผสม ปรากฏว่าหลังจากปฏิกิริยาเริ่มต้นในช่วง 12 นาทีแรกแล้ว ไม่มีปฏิกิริยาใดๆ ปรากฏอีกเลย หากทำการตรวจวัดต่อเนื่องหลังจากหยุดกระตุ้นด้วยอุณหภูมิแล้วจนกระทั่งถึงอายุบ่มที่ 56 วัน เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบทิศทางเดียว คาดว่าจะสามารถทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนของตัวอย่างและกำลังรับแรงอัดแบบทิศทางเดียว อีกทั้งปฏิกิริยาที่เกิดภายหลังจากหยุดกระตุ้นด้วยอุณหภูมิแล้ว

เอกสารอ้างอิง

1. อมลวรรณ พิทยฐานิช, ศักยภาพในการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกลวิธีโพลีเมอไรเซชัน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 123 หน้า
2. Mitchell, J.K., 1993, **Fundamentals of Soil Behavior**, 2nd ed., University of California, John Wiley and Sons Inc., Canada, pp. 18-40.
3. Gillott, J.E., 1968, **Clay in Engineering Geology**, Elsevier Pub. Co., New York, pp. 195-215.
4. Grim, R.E., 1968, **Clay Mineralogy**, 2nd ed., Mc Graw-Hill Book Company, New York, pp. 51-70.
5. Wilson, M.J., 1987, **A Handbook of Determinative Method in Clay Mineralogy**, Chapman and Hall, U.S.A., pp. 26-131, 174-206.
6. วิไลลักษณ์ เรืองเศรษฐกิจ, 2544, การวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีของดินขาว, รายงานทางวิชาการฉบับที่ กว 8/2544, 35 หน้า
7. ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541, **เนื้อดินเซรามิก**, สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ กรุงเทพฯ, หน้า 53
8. Ingles, O.G. & Metcalf, J.B., 1972, **Soil Stabilization Principles and Practice**, Butterworths Pty. Limited., Australia, pp. 169-185.
9. Ingles, O.G., 1970, Mechanisms of Clay Stabilization with Inorganic Acids and Alkalis, **Australia Journal of Soil Research**, Vol. 8, pp. 81-95.
10. Lee, Sung-Reol, Han, Yang-Su, & Choy, Jin-Ho, 2002, 2D → 3D Transformation of Layered Aluminosilicate Upon Base Treatment, **Australia Journal of Soil Research**, Vol. 151, pp. 343-346.

11. ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548, สารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ, วิศวกรรมสาร มข., ปีที่ 32, ฉบับที่ 5, หน้า 715-725.
12. Odian, George, 1991, **Principles of Polymerization**, 3rd ed, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp.33-37.
13. Archer, Ronald D., 2001, **Inorganic and Organometallic Polymer**, John Wiley and Sons Inc., pp. 1-31.
14. National Institute of Standard and technology, **Chemical Formula**[Online], Available: <http://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser.html>
15. Theodore L.Brown, 2003, **Chemistry The Central Science**, Pearson Education Indochina Ltd., pp. 127-157.
16. สมศักดิ์ กীরติวุฒิเศรษฐ์, **อุณหภูมิและเครื่องมือวัดอุณหภูมิ**, หลักการใช้เครื่องมือวัดอุตสาหกรรม, หน้า 4-16.
17. สัมพันธ์ วงศ์นาวา, **เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมตรีแบบกระจายพลังงาน**, หน้า 15-27.

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงคุณสมบัติทั่วไปของตัวอย่างดินแหล่งต่างๆ

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงคุณสมบัติทั่วไปของตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษา

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

หมายเหตุ : ระบบ Unified Soil Classification (USC)

MH (High Plasticity Silt), CH (High Plasticity Clay)

ML (Low Plasticity, Fine Sand Silt), CL (Low Plasticity Clay)

ระบบ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

A-3 (Silt or Fine sand), A-4(8) (Low-compressibility silt)

A-6(13) (Medium-compressibility clay), A-7-5 (High-compressibility silty clay)

A-7-6 (High-compressibility clay)

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงผลการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ

แหล่งที่มา	สารผสมที่ 10 %	ค่าความหนาแน่นแห้ง สูงสุด (KN/m ³)	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (%)
ต.บุญนาพัฒนา จ.ลำปาง	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	19.59	17.25
	Na ₂ CO ₃	15.59	17.25
	Na ₂ HPO ₄	16.05	19.50
	Na ₃ PO ₄	16.84	16.25
	KOH	20.48	16.25
	NaOH	20.48	16.25
ต.สันดอนแก้ว จ.ลำปาง	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	19.78	14.65
	Na ₂ CO ₃	16.93	14.65
	Na ₂ HPO ₄	15.49	19.25
	Na ₃ PO ₄	16.78	14.65
	KOH	19.78	14.65
	NaOH	19.78	14.65
ต.ทุ่งฝาย จ.ลำปาง	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	18.83	15.00
	Na ₂ CO ₃	14.94	16.50
	Na ₂ HPO ₄	15.48	17.50
	Na ₃ PO ₄	14.94	16.50
	KOH	18.97	16.50
	NaOH	18.92	16.00
ต.บ้านสา จ.ลำปาง	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	18.32	13.38
	Na ₂ CO ₃	14.49	15.50
	Na ₂ HPO ₄	15.45	18.75
	Na ₃ PO ₄	15.07	14.00
	KOH	19.22	13.50
	NaOH	19.22	13.50

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงผลการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ (ต่อ)

แหล่งที่มา	สารผสมที่ 10 %	ค่าความหนาแน่นแห้ง สูงสุด (KN/m ³)	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (%)
ต.ผาจุก จ.อุดรดิตถ์	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	18.44	15.21
	Na ₂ CO ₃	14.64	17.50
	Na ₂ HPO ₄	13.84	19.00
	Na ₃ PO ₄	14.24	15.21
	KOH	16.44	15.21
	NaOH	16.44	15.21
ต.หาดส้มแป้น จ.ระนอง	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	18.75	14.65
	Na ₂ CO ₃	15.75	14.65
	Na ₂ HPO ₄	16.78	19.25
	Na ₃ PO ₄	14.55	14.65
	KOH	18.75	14.65
	NaOH	18.75	14.65
ต.ขุนทะเล จ.สุราษฎร์ธานี	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	18.19	15.80
	Na ₂ CO ₃	16.10	16.80
	Na ₂ HPO ₄	16.95	19.00
	Na ₃ PO ₄	18.19	15.80
	KOH	18.19	15.80
	NaOH	18.19	15.80
ต.จวบ จ.นราธิวาส	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	18.49	19.05
	Na ₂ CO ₃	14.44	22.00
	Na ₂ HPO ₄	14.89	25.30
	Na ₃ PO ₄	15.49	19.05
	KOH	18.49	19.05
	NaOH	18.49	19.05

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงผลการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ (ต่อ)

แหล่งที่มา	สารผสมที่ 10 %	ค่าความหนาแน่นแห้ง สูงสุด (KN/m ³)	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (%)
ต. โศกไม้ลาย จ.ปราจีนบุรี	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	18.94	10.45
	Na ₂ CO ₃	14.88	11.25
	Na ₂ HPO ₄	17.44	15.45
	Na ₃ PO ₄	16.72	12.50
	KOH	19.72	12.50
	NaOH	19.72	12.50
ต. ห้วยยาง จ.ระยอง	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	17.64	15.48
	Na ₂ CO ₃	15.18	15.48
	Na ₂ HPO ₄	16.16	18.10
	Na ₃ PO ₄	15.65	15.45
	KOH	19.42	12.38
	NaOH	19.42	12.38
ต. โนนทอง จ.อุดรธานี	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	16.93	15.50
	Na ₂ CO ₃	14.73	15.80
	Na ₂ HPO ₄	14.05	17.95
	Na ₃ PO ₄	14.73	15.80
	KOH	16.73	15.80
	NaOH	16.73	15.80
ต. วังจันทร์ จ.เพชรบุรี	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	19.11	10.50
	Na ₂ CO ₃	14.95	17.50
	Na ₂ HPO ₄	15.75	18.75
	Na ₃ PO ₄	16.86	11.50
	KOH	19.86	11.50
	NaOH	19.86	11.50

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงผลการทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ (ต่อ)

แหล่งที่มา	สารผสมที่ 10 %	ค่าความหนาแน่นแห้ง สูงสุด (KN/m ³)	ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (%)
ต. ด่านทับตะโก จ.ราชบุรี	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	16.64	10.50
	Na ₂ CO ₃	13.93	15.50
	Na ₂ HPO ₄	15.93	15.50
	Na ₃ PO ₄	13.72	11.50
	KOH	16.72	11.50
	NaOH	16.72	11.50

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะของดินขาว, สารผสม และมวลผสม

ตารางที่ ค.1 ตารางแสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat capacity, C_s) ของตัวอย่างดินขาวแต่ละแหล่ง

แหล่งที่มา	ความจุความร้อนจำเพาะของดินขาว (J/g.°C)
ต.บุญนาคนพัฒนา จ.ลำปาง	1.152
ต.สันดอนแก้ว จ.ลำปาง	1.174
ต.ทุ่งฝาย จ.ลำปาง	1.168
ต.บ้านสา จ.ลำปาง	1.195
ต.วังจันทร์ จ.เพชรบุรี	1.265
ต.ห้วยยาง จ.ระยอง	0.873
ต.ขุนทะเล จ.สุราษฎร์ธานี	0.986
ต.หาดส้มแป้น จ.ระนอง	0.814
ต.จวบ จ.นราธิวาส	0.891
ต.โคกไม้ลาย จ.ปราจีนบุรี	1.224
ต.โนนทอง จ.อุดรธานี	1.398
ต.ผาจุก จ.อุตรดิตถ์	1.412
ต.ด่านทับตะโก จ.ราชบุรี	1.342

ตารางที่ ค.2 ตารางแสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat capacity, C_a) ของสารผสมที่อุณหภูมิ 25°C

สารผสม	ความจุความร้อนจำเพาะของสารผสม (J/g.°C)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.915
Na_2CO_3	1.047
Na_2HPO_4	1.335
Na_3PO_4	1.081
KOH	1.156
NaOH	1.488

ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat capacity, c_p) ของมวลผสม
ของตัวอย่างดินขาวแต่ละแหล่ง

แหล่งที่มา	สารผสม	ความจุความร้อนจำเพาะของสารผสม (J/g. °C)
ต.บุญนาคพัฒนา จ.ลำปาง	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.578
	Na_2CO_3	1.589
	Na_2HPO_4	1.660
	Na_3PO_4	1.570
	KOH	1.576
	NaOH	1.602
ต.สันดอนแก้ว จ.ลำปาง	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.557
	Na_2CO_3	1.579
	Na_2HPO_4	1.736
	Na_3PO_4	1.570
	KOH	1.576
	NaOH	1.602
ต.ทุ่งฝาย จ.ลำปาง	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.542
	Na_2CO_3	1.585
	Na_2HPO_4	1.629
	Na_3PO_4	1.588
	KOH	1.594
	NaOH	1.609
ต.บ้านสา จ.ลำปาง	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.525
	Na_2CO_3	1.584
	Na_2HPO_4	1.678
	Na_3PO_4	1.553
	KOH	1.547
	NaOH	1.574

ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat capacity, c_p) ของมวลผสม
ของตัวอย่างดินขาวแต่ละแหล่ง (ต่อ)

แหล่งที่มา	สารผสม	ความจุความร้อนจำเพาะของมวลผสม (J/g. °C)
ต.วังจันทร์ จ.เพชรบุรี	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.513
	Na_2CO_3	1.682
	Na_2HPO_4	1.731
	Na_3PO_4	1.550
	KOH	1.557
	NaOH	1.584
ต.ห้วยยาง จ.ระยอง	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.320
	Na_2CO_3	1.330
	Na_2HPO_4	1.416
	Na_3PO_4	1.332
	KOH	1.260
	NaOH	1.287
ต.ขุนทะเล จ.สุราษฎร์ธานี	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.417
	Na_2CO_3	1.450
	Na_2HPO_4	1.523
	Na_3PO_4	1.430
	KOH	1.436
	NaOH	1.462
ต.หาดส้มแป้น จ.ระนอง	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.252
	Na_2CO_3	1.263
	Na_2HPO_4	1.397
	Na_3PO_4	1.266
	KOH	1.272
	NaOH	1.298

ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat capacity, c_p) ของมวลผสม
ของตัวอย่างดินขาวแต่ละแหล่ง (ต่อ)

แหล่งที่มา	สารผสม	ความจุความร้อนจำเพาะของสารผสม (J/g. °C)
ต.จวบ จ.นราธิวาส	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.419
	Na_2CO_3	1.496
	Na_2HPO_4	1.588
	Na_3PO_4	1.432
	KOH	1.438
	NaOH	1.463
ต.โคกไม้ลาย จ.ปราจีนบุรี	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.478
	Na_2CO_3	1.508
	Na_2HPO_4	1.628
	Na_3PO_4	1.541
	KOH	1.547
	NaOH	1.574
ต.โนนทอง จ.อุดรธานี	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.734
	Na_2CO_3	1.751
	Na_2HPO_4	1.817
	Na_3PO_4	1.753
	KOH	1.759
	NaOH	1.785
ต.ผาจุก จ.อุดรดิษฐ์	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.738
	Na_2CO_3	1.796
	Na_2HPO_4	1.848
	Na_3PO_4	1.751
	KOH	1.757
	NaOH	1.784

ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat capacity, c_p) ของมวลผสม
ของตัวอย่างดินขาวแต่ละแหล่ง (ต่อ)

แหล่งที่มา	สารผสม	ความจุความร้อนจำเพาะของสารผสม (J/g. °C)
ต.ด่านทับตะโก จ.ราชบุรี	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.577
	Na_2CO_3	1.619
	Na_2HPO_4	1.642
	Na_3PO_4	1.613
	KOH	1.620
	NaOH	1.647

ประวัติผู้วิจัย

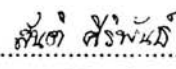
ชื่อ – สกุล	ว่าที่ ร.ต.สันติ ศิริพันธ์
วัน เดือน ปีเกิด	18 พฤษภาคม 2521
ประวัติการศึกษา	
ระดับอาชีวศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2542
ระดับปริญญาตรี	ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ. 2544
ระดับประกาศนียบัตรบัณฑิต	ประกาศนียบัตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2545
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2549
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	สันติ ศิริพันธ์ และวิชัย สังวรปทานสกุล ผลกระทบของอุณหภูมิกะดุ่นต่อปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน ของดินขาว วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่ 34 ฉบับที่ 4 ประจำเดือน ก.ค. – ส.ค. 2550

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์วิทยานิพนธ์

วันที่ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2550

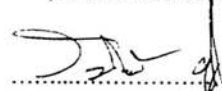
ข้าพเจ้า ว่าที่ ร.ต.สันติ ศิริพันธ์ รหัสประจำตัว 48403617
เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญาโท เอก
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
อยู่บ้านเลขที่ 310/10 ตรอก/ซอย - ถนน -
ตำบล/แขวง ทุ่งสองห้อง อำเภอ/เขต หลักสี่ จังหวัด กรุงเทพมหานคร
รหัสไปรษณีย์ 10210 ขอโอนลิขสิทธิ์วิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
โดยมี รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์ ตำแหน่ง คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง ผลกระทบของอุณหภูมิกะดุนต่อปฏิกิริยาโพลิเมอร์เซชันของคินชาว วิทยานิพนธ์วิศวกรรมโยธา ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ รศ.วิชัย สังวรปธานสกุล ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดจนอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย
3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่
4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลง หรือเผยแพร่ต่อสาธารณะชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28, มาตรา 29 และมาตรา 30 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ ว่าที่ ร.ต.  ผู้โอนลิขสิทธิ์
(สันติ ศิริพันธ์)

ลงชื่อ  ผู้รับโอนลิขสิทธิ์
(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ  พยาน
(รศ.วิชัย สังวรปธานสกุล)

ลงชื่อ  พยาน
(ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว)