การสังเคราะห์วัสดุที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจากดินเกาลิน เพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ยั่งยืน

นางสาวพรสุดา โกฏค้างพลู

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

SYNTHESIS OF HIGH REACTIVITY POZZOLANIC MATERIALS FROM KAOLINITE CLAY FOR USING AS A SUSTAINABLE CEMENT REPLACEMENT MATERIAL

Pornsuda Kotkhangphlu

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Material Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การสังเคราะห์วัสดุที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจากดินเกาลิน
เพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ยั่งยืน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อ่อนลมี กมลอินทร์)
ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.อนุรัตน์ ภูวานคำ)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.จิรัชญา อายะวรรณา)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)

(ผศ. ดร.ศิริวรรณ โชคค้า)
กรรมการ

(รศ. ดร.นนทพงษ์ พลพวก)
กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และพัฒนาความเป็นสากล

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พรสุดา โกฏค้างพลู : การสังเคราะห์วัสดุที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจากดินเกาลินเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ยั่งยืน (SYNTHESIS OF HIGH REACTIVITY POZZOLANIC MATERIALS FROM KAOLINITE CLAY FOR USING AS A SUSTAINABLE CEMENT REPLACEMENT MATERIAL) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุรัตน์ ภูวานคำ, 65 หน้า

อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมหาศาลซึ่งก๊าซดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักของปัญหาสภาวะโลกร้อน จากผลกระทบดังกล่าวจึงจำเป็นต้องหาวัสดุชนิดใหม่มาทดแทน ดินเกาลินเผาเป็นหนึ่งในวัสดุทางเลือกที่ได้รับความสนใจเนื่องจากมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานและสามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้บางส่วน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะสังเคราะห์วัสดุที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจากดินเกาลิน โดยดินเกาลินจะถูกเผา ณ อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และจะถูกทำให้เย็นตัวในสองลักษณะ ได้แก่ การปล่อยให้เย็นตัวตามปกติภายในเตาเผา และการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จากนั้นดินเกาลินเผาจะถูกนำไปทดสอบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

ผลการทดลองพบว่าการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วสามารถลดอุณหภูมิการเผาแคลไซด์จาก 600 °C เหลือ 500 °C ในขณะที่ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลินเผายังคงเดิม และกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยดินเกาลินเผาทั้งสองอุณหภูมิมีค่าเท่ากัน นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วมีผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเร็วกว่าการใช้ดินเกาลินเผาที่ถูกทำให้เย็นตัวตามปกติภายในเตาเผา

งานวิจัยนี้เผยให้เห็นถึงองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับการพัฒนาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ ลายมือชื่อนักศึกษา พรสุดา

ปีการศึกษา 2562 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ________

PORNSUDA KOTKHANGPHLU : SYNTHESIS OF HIGH REACTIVITY POZZOLANIC MATERIALS FROM KAOLINITE CLAY FOR USING AS A SUSTAINABLE CEMENT REPLACEMENT MATERIAL THESIS ADVISOR : ASST. PROF. ANURAT POOWANCUN, Ph.D., 65 PP.

POZZOLAN MATERIAL/CEMENT REPLACEMENT/CALCINED KAOLINITE

The cement industry emits a large amount of carbon dioxide (CO_2) into the environment. CO_2 is well known as the main cause of the global warming problem. Thereby, the cement replacement materials are required. Calcined kaolinite clay (CKC) is one of the alternative materials since CKC has the pozzolanic property and can be used as a partial cement replacement material. The research aims to synthesize high reactive pozzolanic materials by using kaolinite clay as a starting material. Kaolinite clay was calcined at 450^{o}C, 500^{o}C, and 600^{o}C for 6 hours, and then cooled down to room temperature by two different methods, i.e., natural cool down and quenching. Pozzolanic reactivity of the CKC and strength of the cement partially replaced by CKC was examined.

The results showed that by using the quenching method, the calcined temperature can be reduced from 600^{o}C to 500^{o}C, meanwhile, the pozzolanic reactivity of CKC insignificantly change, and the compressive strength of the cement replaced by both CKC are comparable. Moreover, the strength development in the cement replaced by CKC and using the quenching cool down method is faster than using the normal one.

This research reveals an important knowledge for the development of environmentally-friendly cement replacement materials for sustainable development.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Material Engineering	Student's Signature พรสุดา

Academic Year 2019	Advisor's Signature ______

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลทุกท่าน ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรัตน์ ภูวานคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยเรียบเรียงตรวจสอบความสมบูรณ์ของเนื้อหาในงานวิจัยเล่มนี้ ตลอดจนชี้แนะแนวทางการเรียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรัชญา อายะวรรณา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

คณาจารย์ทุกท่านในสาขาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความเมตตาอบรม และให้ความรู้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

คุณพันทิพา นำสว่างรุ่งเรือง ที่ให้ความช่วยเหลือและประสานงานทางด้านเอกสารตลอดระยะเวลาที่ศึกษา รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือให้กับผู้วิจัย

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้เปิดโอกาสทางการศึกษา และให้การช่วยเหลือสนับสนุนด้านทุนการศึกษา รวมทั้งด้านอุปกรณ์เครื่องมือวิทยาศาสตร์มาโดยตลอด

คุณประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ย่อมเป็นผลจากความช่วยเหลือและกรุณาจากทุกท่านที่ได้กล่าวนามมาข้างต้น รวมทั้งบุคคลอื่นที่ผู้วิจัยมิได้กล่าวถึง ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

พรสุดา โกฏค้างพลู

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ไทย) .... ก
บทคัดย่อ (อังกฤษ) .... ข
กิตติกรรมประกาศ .... ง
สารบัญ .... จ
สารบัญตาราง .... ฌ
สารบัญรูป .... ญ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย 3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 ปูนซีเมนต์ 4
2.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 4
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5
2.1.3 สมบัติของสารประกอบหลัก 6
2.1.4 สมบัติของสารประกอบรอง 7
2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น 8
2.3 วัสดุปอซโซลาน 9
2.3.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน 9
2.3.1.1 วัสดุปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ 9
2.3.1.2 วัสดุปอซโซลานดัดแปลง 9

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุปอซโซลาน 11
2.5 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่มีวัสดุปอซโซลาน 11
2.6 ดินเกาลิน 13
2.7 แนวคิดงานวิจัย 14
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 15

3 วิธีดำเนินงานวิจัย 19
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ 19
3.2 สัญลักษณ์ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย 21
3.3 การดำเนินงานวิจัย 21
3.3.1 การเตรียมดินเกาลิน 23
3.3.2 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเกาลิน 23
3.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของดินเกาลิน 24
3.3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเกาลิน 25
3.3.5 การวิเคราะห์พลังงานและปริมาณองค์ประกอบของดินเกาลิน 26
3.3.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของดินเกาลิน 27
3.3.7 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเกาลิน 28
3.3.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคของดินเกาลิน 29
3.3.9 การเผาดินเกาลิน 30
3.3.10 การหาปริมาณผลึกเคโอลินไนท์ของดินเกาลินเผา 30
3.3.11 การทดสอบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก 30
3.3.12 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของดินเกาลินเผา 32
3.3.13 การวิเคราะห์การนำไฟฟ้าของดินเกาลินเผา 33
3.3.14 การทดสอบการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผา 34
3.3.15 การทดสอบกำลังรับแรงอัด 35

4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 36

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของดินเกาลินก่อนการเผาแคลไซด์ 36
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเกาลิน 36
4.1.2 องค์ประกอบทางเฟสของดินเกาลิน 37
4.1.3 โครงสร้างเคมีของดินเกาลิน 37
4.1.4 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเกาลิน 39
4.1.5 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินเกาลิน 40
4.1.6 สมบัติด้านความร้อนของดินเกาลิน 41
4.2 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อสมบัติปอซโซลานของดินเกาลิน 42
4.2.1 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อองค์ประกอบทางเฟสของดินเกาลินเผา 42
4.2.2 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อปริมาณเฟสอสัณฐานของดินเกาลิน 44
4.2.3 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อโครงสร้างทางเคมีของดินเกาลิน 45
4.2.4 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเกาลินเผา 46
4.2.5 ผลของการเย็นตัวหลังเผาต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของดินเกาลินเผา 47
4.2.6 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก 48
4.2.7 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยดินเกาลินเผาในปริมาณร้อยละ 20 และ 50 โดยน้ำหนัก 52

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.8 ผลของการเย็นตัวหลังเผาต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยดินเกาลินเผาในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก 54
5 สรุปผลการวิจัย 57
5.1 ดินเกาลินหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงต่อปริมาณร้อยละอสัณฐานและความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก .. 57
5.2 ข้อเสนอแนะ 58
รายการอ้างอิง 59
ภาคผนวก ก การคำนวณหาร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผา............................. 61
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS 63
ประวัติผู้เขียน 65

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 องค์ประกอบหลักและรองทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 6
3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย 19
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย....19
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย....20
3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย....21
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเกาลิน 36
4.2 ตำแหน่งของพันธะของดินเกาลิน ที่ค่าเลขคลื่นต่างๆ 38
4.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 47
4.4 โครงสร้างระดับจุลภาคของปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยดินเกาลินเผาในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ทดสอบที่อายุการบ่ม 2 และ 7 วัน 55

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต 8
2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก 12
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 22
3.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์....................24
3.3 เครื่องวิเคราะห์ธาตุวิธีเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์....................25
3.4 เครื่องวิเคราะห์พลังงานและปริมาณองค์ประกอบ 26
3.5 เครื่องวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างสาร โดยอาศัยการวัดการดูดกลืนรังสีช่วงอินฟาเรด 27
3.6 เครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค....................28
3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด 29
3.8 ขั้นตอนการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก....................31
3.9 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ....................32
3.10 เครื่องวัดการนำไฟฟ้า 33
3.11 เครื่องมือทดสอบแรงอัด 35
4.1 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของดินเกาลิน 37
4.2 รูปองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของดินเกาลิน.................... 38
4.3 รูปขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเกาลิน....................39
4.4 รูปโครงสร้างระดับจุลภาคของดินเกาลิน 40
4.5 รูปสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้องของดินเกาลิน 41
4.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง....................43
4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของผลึกเคโอลินไนท์ในดินเกาลินเผา 44
4.8 รูปองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของดินเกาลินเผา 45
4.9 รูปขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเกาลินเผา....................46

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

4.10 ผลการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ 2 วัน 49

4.11 ผลการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ 7 วัน 50

4.12 ผลการลดลงของค่าการนำไฟฟ้าของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงที่ 2 และ 7 วัน 51

4.13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินเกาลินเผา โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อายุการบ่ม 2 และ 7 วัน 52

4.14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินเกาลินเผา โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อายุการบ่ม 2 และ 7 วัน 5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) หรือปูนซีเมนต์ (Cement) เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลายโดยทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (Binder) ในคอนกรีต เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) ดังแสดงในสมการที่ 1.1 (Vance H, 1990)

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \dashrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (1.1)$$

สมการดังกล่าวมีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate ; CSH) หรือถูกเรียกอีกอย่างว่าโตเบอร์มอไรต์ (Tobermorite) เป็นตัวให้ความแข็งแรง แม้ปูนซีเมนต์จะมีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้ในงานก่อสร้างที่หลากหลายแต่ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงและพลังงานสูง (ประมาณ 1500 องศาเซลเซียส) ประกอบกับในกระบวนการผลิตมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมหาศาล ประมาณการกันว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 1 ตัน เช่นกัน (Hermawan, 2015) ซึ่งก๊าซดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักของการเกิดสภาวะโลกร้อน (Global warming) จากผลกระทบดังกล่าวจึงมีแนวคิดเกี่ยวกับการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ โดยการหาวัสดุชนิดอื่นมาทดแทน ซึ่งวัสดุปอซโซลานเป็นกลุ่มวัสดุที่มีความเป็นไปได้สูงในการนำมาใช้งาน และกำลังได้รับความสนใจศึกษาทดลองอย่างกว้างขวาง

วัสดุปอซโซลานคือวัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกาในปริมาณสูงและสามารถเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อันเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (สมการ

ที่1.1) แล้วเปลี่ยนสภาพเป็นโตเบอร์มอไรต์ (Huang, 1985) ปฏิกิริยาดังกล่าวถูกเรียกว่า "ปฏิกิริยาปอซโซลานิก" ดังแสดงในสมการที่ 1.2 (Vance H, 1990)

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \quad (1.2)$$

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีอะลูมินา(Alumina; Al_2O_3) อยู่ในองค์ประกอบ อะลูมินาดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท ($3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$) ดังแสดงในสมการที่ 1.3

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \quad (1.3)$$

การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกคล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่า ดังนั้น จึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้

วัสดุปอซโซลานมีบทบาทสำคัญในการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ มีวัสดุหลายชนิดมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน เช่น ซิลิกาฟูม (Silica fume), เถ้าลอย (Fly ash), เถ้าแกลบ (Rice hush ash), ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก (Granulated blast furnace slag) และดินเกาลินเผา (Calcined kaolin) อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงการผลิตที่มีประสิทธิภาพประกอบกับการควบคุมคุณภาพที่มีความสม่ำเสมอ ดินเกาลินเผา จัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีความน่าสนใจมากที่สุด

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาการใช้ดินเกาลินเผาเป็นวัสดุปอซโซลานอย่างกว้างขวาง หากแต่ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ศึกษาผลของกระบวนการเผาดินเกาลินต่อความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลของการควบคุมการเย็นตัวระหว่างการเผาดินเกาลิน

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการสังเคราะห์วัสดุที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจากดินเกาลิน ด้วยการควบคุมการเย็นตัวระหว่างการเผาเพื่อให้ได้วัสดุปอซโซลานที่เหมาะกับการใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อสังเคราะห์วัสดุที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากดินเกาลิน ด้วยการควบคุมการเย็นตัวระหว่างการเผา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ตรวจสอบปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลินหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 450°C - 600°C

1.3.2 ตรวจสอบผลกระทบของการทำให้ดินเกาลินเผาเย็นตัวอย่างรวดเร็วต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิก

1.3.3 ตรวจสอบค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ของซีเมนต์หลังจากแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผา

1.3.4 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของดินเกาลินหลังผ่านการเผา และโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์หลังถูกแทนที่ด้วยดินเกาลินเผา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 งานวิจัยนี้เป็นการสร้างฐานงานวิจัยชิ้นใหม่ ผ่านขบวนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อเป็นองค์ความรู้ในด้านการใช้ทรัพยากรณ์ธรรมชาติให้คุ้มค่าและได้ประสิทธิภาพสูงสุด รวมถึงสามารถใช้งานวิจัยนี้เป็นต้นแบบในการนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

1.4.2 สามารถประยุกต์ใช้วัสดุธรรมชาติที่หาได้ในประเทศ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมซีเมนต์ในการลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์และลดภาวะโลกร้อน

1.4.3 ได้เทคโนโลยีและองค์ความรู้ที่สำคัญในการพัฒนาการสังเคราะห์วัสดุปอซโซลานคุณภาพสูงจากดินเกาลินเผาเพื่อลดปริมาณการใช้และการผลิตปูนซีเมนต์ อันจะเป็นการลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์

เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน วัตถุดิบสำคัญที่นำมาผลิตเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น ได้แก่ วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของปูนขาว (Lime) มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, $CaCO_3$) วัตถุดิบเหล่านี้สามารถพบได้ตามแหล่งธรรมชาติ เช่น หินปูน (Limestone) หินชอล์ก (Chalk) ดินขาว (Kaolinite) รวมถึงวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีของ ซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ แหล่งวัตถุดิบสามารถพบตามธรรมชาติ ได้แก่ ดินดำ (Clay) ดินดาน (Shale) หินชนวน (Slate) และวัตถุดิบใช้ปรับแต่งสมบัติ (Corrective materials) เป็นต้น

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แบ่งออกเป็นสองระบบได้แก่ กระบวนการผลิตระบบเปียก (Wet process) และกระบวนการผลิตระบบแห้ง (Dry process) โดยนำวัตถุดิบตามธรรมชาติมาทำการบดให้ละเอียดผสมตามสัดส่วนให้เข้ากันด้วย Wet process หรือ Dry process แล้วเผาด้วยเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ความร้อนจากเตาเผาจะทำให้น้ำระเหยออกสู่อากาศภายนอกเหลือแต่เม็ดดินจนถึงอุณหภูมิ 1200°C จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาได้สารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตและเฟอร์ไรต์ (Calcium aluminate and ferrite) และเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 1350°C จนถึงอุณหภูมิ 1400°C -1600°C เกิดการหลอมตัวรวมกันเป็นเม็ดซีเมนต์ จากนั้นจะถูกลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลต่ออัตราการเกิดผลึก (Crystal) ในเม็ดปูน เมื่อได้เม็ดปูนแล้วจะถูกนำมาบดและเติมแร่ยิปซั่มเพื่อช่วยในการหน่วงเวลาการก่อตัวของซีเมนต์

2.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถจำแนกปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ 5 ประเภท ดังนี้คือ

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้ทำคอนกรีตใช้ในการก่อสร้างปกติ หรือในที่ที่ไม่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ หรือ ในที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศรุนแรง หรือ ความร้อนที่คอนกรีตรวมตัวกับน้ำ จะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงจนทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังช้ากว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตที่ต้องการให้เกิดความร้อนต่ำ ทนซัลเฟตได้พอใช้ เช่น งานหล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ งานสร้างเขื่อนคอนกรีต งานสร้างตอม่อสะพาน

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบแข็งเร็ว (High Early Strength) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังรับแรงอัดเร็วกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 มีเนื้อผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 และเปลี่ยนสัดส่วนผสมโดยการเพิ่มไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และลดไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) หรืออาจเติมสารอื่นใช้ทำคอนกรีตที่ต้องการรื้อแบบเร็วเช่น ถนน เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้นหรือคานที่ต้องรีบถอดแบบ

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบให้ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้ความร้อนต่ำสุด และให้การเกิดกำลังของคอนกรีตอย่างช้าๆ ใช้ในงานก่อสร้าง เขื่อน คอนกรีตหลา (Mass concrete)

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistance Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวช้ากว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ต่ำสุด สามารถต้านทานซัลเฟตได้สูง ใช้ในงานก่อสร้างที่ต้องเจอสภาวะซัลเฟตอย่างรุนแรง

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (แสดงในตารางที่ 2.1) ซึ่งองค์ประกอบหลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา (SiO_2), อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันแล้วได้มากกว่าร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รองและอื่นๆผสมอยู่ด้วย ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์(MgO), โซเดียมออกไซด์ (Na_2O), โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O), ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) และ ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) เมื่อทำการเผาออกไซด์เหล่านี้แล้วจะได้สารประกอบ 4 ชนิด ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต องค์ประกอบทางเคมีคือ 3CaO , SiO_2 และย่อว่า C_3S, ไดแคลเซียมซิลิเกต องค์ประกอบทางเคมีคือ 2CaO , SiO_2 และย่อว่า C_2S, ไตรแคลเซียมอลูมิเนต องค์ประกอบทางเคมี คือ 3CaO , Al_2O_3 และย่อว่า C_3A, เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรด์ องค์ประกอบทางเคมี 4CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ ย่อว่า C_4AF

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบหลักและรองทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ , 2549)

องค์ประกอบทางเคมี	%โดยน้ำหนัก
CaO	64.4
SiO_2	20.0
Al_2O_3	5.8
Fe_2O_3	3.2
MgO	0.5
Na_2O	0.5
K_2O	0.5
SO_3	2.6

2.1.3 สมบัติของสารประกอบหลัก (Major compound)

สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกกำหนดด้วยองค์ประกอบของปูนซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate ; C_3S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยมมีสีเทาเข้มคุณสมบัติของ C_3S จะเหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำ จะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำ จะให้ความร้อน 500 จูลต่อกรัม ปริมาณของไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 35-55

ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate ; C_2S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดยไดแคลเซียมซิลิเกตสามารถมีได้หลายรูปแบบ แต่มีเพียง β -C_2S เท่านั้น ที่สามารถคงตัวอยู่ได้ที่อุณหภูมิทั่วไป เนื่องจากเลขโคออดิเนชันของแคลเซียม (Ca^{2+}) มีลักษณะที่ผิดปกติ (Irregular) เป็นผลให้เกิดความไม่เสถียร จึงสามารถทำปฏิกิริยาได้ และ β -C_2S มีคุณสมบัติในการยึดเกาะเมื่อผสมกับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยปล่อยความร้อนประมาณ 250 จูลต่อกรัม จะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะยาว ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีไดแคลเซียมซิลิเกตอยู่ประมาณร้อยละ 15-35

ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium aluminate ; C_3A) เป็นสารแระกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อน เมื่อผสมกับน้ำ C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ทำให้เกิดความร้อนจำนวนมาก

ประมาณ 850 จูนต่อ เกิดการก่อตัวขึ้นทันทีสามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ภายใน 1-2 วัน แต่จะมีค่าค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีอยู่ประมาณร้อยละ 7-15

เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium aluminoferrite ; C_4AF) เมื่อผสมกับน้ำแล้วจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วมากเหมือนกับ C_3A แต่ความร้อนจากปฏิกิริยากับน้ำจะมีค่าปานกลางไม่สูงเทียบเท่า C_3A ซึ่งอยู่ที่ 420 จูลต่อกรัม สามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ภายในหนึ่งวันเช่นกันกับ C_3A แต่จะมีค่าค่อนข้างต่ำ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์อยู่ประมาณร้อยละ 5-10

2.1.4 สมบัติของสารประกอบรอง (Minor compounds)

ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfer Trioxide, SO_3) ในการผลิตปูนซีเมนต์ปูนเม็ด (Clinker) จะถูกบดร่วมกับยิปซั่ม (Gypsum, $CaSO_4 .2H_2O$ หรือ CSH_2) เพื่อป้องกันการก่อตัวที่เร็วจนเกินไป ในทางกลับกันปริมาณของยิปซั่มจะต้องมีปริมาณที่ไม่มากจนเกินไป เพราะจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการแตกร้าวได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอะลูมิเนตกับยิปซั่ม ทำให้เกิดเอ็ททริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้น เมื่อยิปซั่มผสมอยู่น้อยปฏิกิริยาระหว่าง C_3A กับยิปซั่มจะเกิดเมื่อซีเมนต์เพสต์อยู่ในสภาพที่เป็นพลาสติก การขยายตัวของปริมาตรเกิดก่อนที่ซีเมนต์เพสต์จะแข็งตัว แต่เมื่อยิปซั่มผสมอยู่ในปริมาณที่มากปฏิกิริยาจะเกิดต่อเนื่องไปหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว และอาจทำให้เกิดการแตกร้าวได้

ปูนขาวอิสระ (Free Lime, CaO) จะเกิดขึ้นเนื่องจากวัตถุดิบที่มีปูนขาวมากเกินไปสำหรับการทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2), อะลูมินา (Al_2O_3) และไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ในเตาเผา ปูนขาวอิสระสามารถรวมตัวกับน้ำ ซึ่งการรวมตัวดังกล่าวหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว ผลที่ได้คือปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ถ้าปูนขาวอิสระมีปริมาณมากพออาจทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ก่อตัวแล้วขยายตัวและแตกร้าวได้

แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โดยวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมี $MgCO_3$ ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมตัวเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในภาพของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะเหมือนกัน CaO คือมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้นซึ่งก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว (Unsoundness)

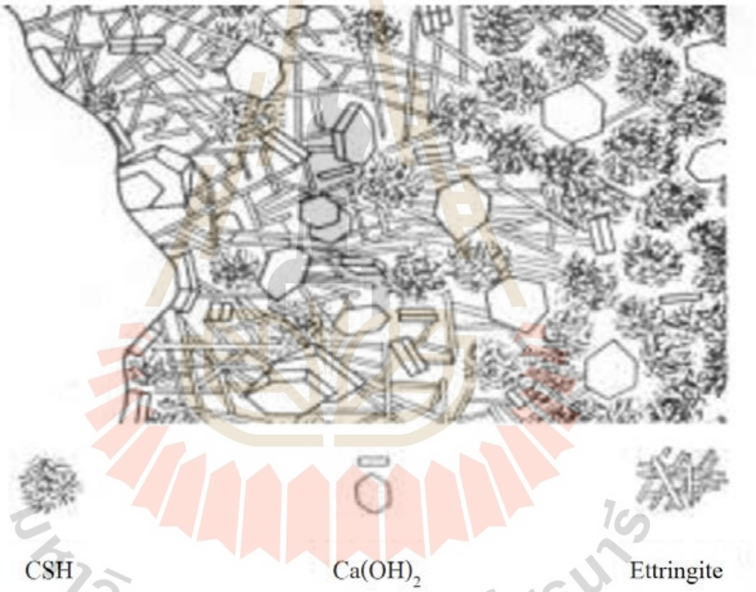
ออกไซด์ของอัลคาไลด์ (Alkali Oxide, K_2O และ Na_2O) ออกไซด์ของอัลคาไลด์จะมีบทบาทสาคัญเมื่อวัสดุผสม (Aggregate) สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลด์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า "ปฏิกิริยาอัลคาไลด์มวลรวม" ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวและอาจทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้

ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (Phosphorous Pentaoxide, P_2O_5) ส่วนมากมาจากหินปูนสารนี้ทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้าเนื่องจาก P_2O_5 ทำให้ C_3S สลายตัวเป็น C_2S กับ CaO

2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น” ซึ่งจะทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบนี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ สามารถเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์ ยกตัวอย่างเช่นแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) จะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) ดังสมการที่ (1.1) โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.1

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \text{ ----> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \qquad (1.1)$$



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า CSH จะอยู่ในภาพของอนุภาคเล็กๆ มีขนาดเท่ากับสารแขวนลอย มีลักษณะปรากฏเป็นอสัณฐาน (Amorphous) และมีผลึกที่หยาบมาก (Poorly Crystalline) โดยอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลิเกต (C/S) ใน CSH ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิและปริมาณน้ำ สัญลักษณ์ทางเคมีของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีอัตราส่วน $C_3S_2H_3$ เป็นเพียงค่าเฉลี่ยเท่านั้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.3 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan material)

วัสดุปอซโซลาน หมายถึง วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา (SiO_2) หรืออะลูมินาและซิลิกา (Al_2O_3 และ SiO_2) มีสมบัติในการเชื่อมประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนกลายเป็นผงละเอียด จะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ที่อุณหภูมิปกติ เกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีสมบัติในการเชื่อมประสาน (ASTM C 618, 2001) เมื่อผสมวัสดุปอซโซลานในปูนซีเมนต์แล้วจะได้ผลิตผลของปฏิกิริยาเคมีเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate;CSH) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate ; CAH) ที่มีการก่อตัวและแข็งตัวเช่นเดียวกับการผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ

การนำวัสดุปอซโซลานมาผสมในคอนกรีต โดยทั่วไปจะช่วยเพิ่มสมบัติที่ดีให้กับคอนกรีตหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติทางด้านความทนทานของคอนกรีต (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) นอกจากนี้เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีอนุภาคขนาดเล็ก จึงทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างและรูพรุนขนาดต่างๆ ในคอนกรีตได้ ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยวัสดุปอซโซลานมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

2.3.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) และวัสดุปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

2.3.1.1 วัสดุปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

วัสดุปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural pozzolan) ได้แก่ หินดินดาน (Shales), เศษหินภูเขาไฟ (Tuff), เถ้าภูเขาไป (Volcanic ash), หินภูมิไซท์ (Pumisite), หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) หินปูน (limestone) และดินเกาลิน (Kaolin clay) วัสดุปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อต้องการนำไปใช้งาน จะต้องนำมาบดก่อน

2.3.1.2 วัสดุปอซโซลานดัดแปลง (Modify pozzolan)

วัสดุปอซโซลานดัดแปลงเกิดจากขบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By-products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งโดยมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบัน

ปอซโซลานดัดแปลงที่พบได้แก่เถ้าลอย (Fly ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า, ซิลิกาฟูม (Silica fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น

นอกจากนี้ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001) ยังมีวัสดุอีกหลายชนิดที่มีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยทั่วไปแล้วสามารถจำแนกวัสดุปอซโซลานได้เป็น 3 กลุ่ม ตามคุณภาพ ได้แก่กลุ่มชั้นคุณภาพเอ็น (Class N) กลุ่มชั้นคุณภาพเอฟ (Class F) และกลุ่มชั้นคุณภาพซี (Class C)

- วัสดุปอซโซลานชั้นคุณภาพเอ็นเป็นวัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติ หรือ วัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ ซึ่งดินเกาลินเผา (Calcined kaolin) จัดอยู่ในกลุ่มนี้
- วัสดุปอซโซลานชั้นคุณภาพเอฟเป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70
- วัสดุปอซโซลานชั้นคุณภาพซี ส่วนใหญ่เป็นเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) มีปริมาณผลรวมของซิลิกา อะลูมินา และ เฟอร์ริกออกไซด์มากกว่า 50%

แม้จะมีวัสดุหลายชนิดที่มีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานแต่หากพิจารณาถึงการผลิตที่มีประสิทธิภาพและคุณภาพที่มีความสม่ำเสมอ ดินเกาลินเผาจัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีความน่าสนใจมากที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4 ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของวัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกา (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \text{ หรือ (CSH)} \quad (2.1)$$

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอะลูมินา (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

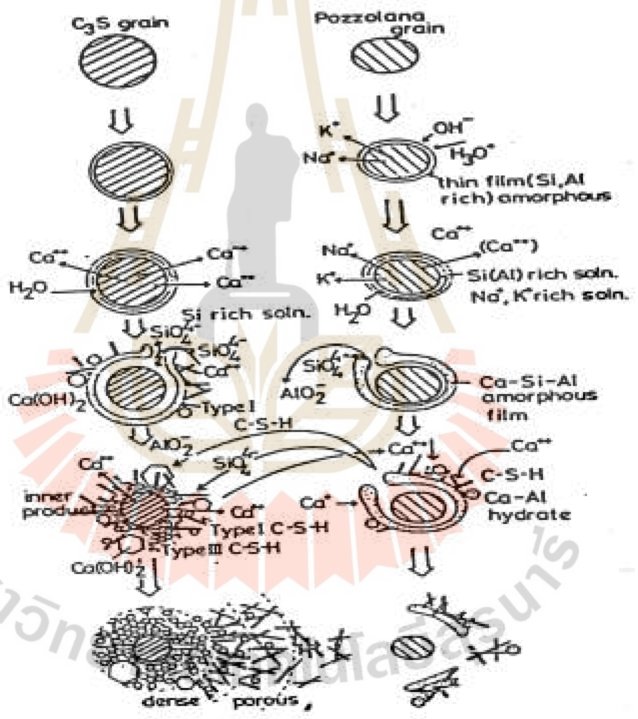
$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \text{ หรือ (CAH)} \quad (2.2)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่มีวัสดุปอซโซลาน

จากรูปที่ 2.2 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในระบบซึ่งมีทั้งไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และวัสดุปอซโซลานเริ่มขึ้นจากไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) จะละลายออกจากสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) อย่างอิสระลงไปในของเหลว แต่ไอออนดังกล่าวจะถูกดักจับด้วยอนุภาคที่มีประจุลบจากวัสดุปอซโซลานโดยอาศัยการชนกัน และถูกดูดซับที่ไว้ที่ผิวของอนุภาคปอซโซลาน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต จะเกิดการตกตะกอนที่อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกา (CaO/SiO_2) สูง ในขณะที่บนผิวของวัสดุปอซโซลานจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกันแต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่มีอัตราส่วนระหว่าง

แคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาต่ำ และมีความพรุนสูง โดยปกติเมื่ออนุภาคปอซโซลานสัมผัสกับน้ำ ผิวของสารปอซโซลานจะมีคุณสมบัติเป็นประจุบวก อันเนื่องมาจากการดึงดูดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำไว้และจะทำให้มีการแตกตัวของโซเดียมไอออน (Na^+) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) และไอออนอื่นๆ ทีละน้อยตามมา เป็นผลให้เกิดชั้นที่ผิวของอนุภาคปอซโซลานซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ การละลายของโซเดียมไอออนและโพแทสเซียมไอออนจะช่วยเร่งการแตกตัวของน้ำ ให้มีปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเร่งการแตกตัวของซิลิเกตไอออน (SiO_4^{4-}) และอะลูมิเนียมไอออน (AlO_2^-) ด้วย และเมื่อรวมกับผลของแคลเซียมไอออนจึงทำให้ความหนาของชั้นบนอนุภาคปอซโซลานเพิ่มขึ้นและแตกออกในที่สุด



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก

2.6 ดินเกาลิน (Kaolin clay)

ดินเกาลิน (Kaolin clay) เป็นดินชนิดปฐมภูมิ (Primary Clay) ได้จากกระบวนการทำเหมืองแบบเปิด(Open-cast Pits) โดยใช้น้ำแรงดันสูงในการฉีดชะล้างดิน จากนั้นน้ำจะพัดพาเอาดินและสิ่งเจือปนไปยังด้านล่างของเหมือง จากจุดนี้น้ำดินจะถูกผสมกับสารแขวนลอยและถูกปั๊มไปยังถังตกตะกอนขนาดใหญ่ซึ่งสิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะถูกตกตะกอนแยกออกไป ทำให้ในสารแขวนลอยดังกล่าวจะเหลือเพียงอนุภาคของดินและสิ่งเจือปนที่มีขนาดละเอียดกว่าเท่านั้น

ในขั้นตอนต่อมาสิ่งเจือปนในน้ำดินจะถูกแยกออกโดยการใช้ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclones) สารแขวนลอยจะเกิดการหมุนเหวี่ยงอยู่ภายในทำให้สิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ถูกแรงเหวี่ยงหมุนออกมาอยู่ที่บริเวณด้านข้างของไฮโดรไซโคลนจากนั้นจะตกลงสู่ด้านล่างและถูกกำจัดออกสู่ด้านนอกต่อไป อนุภาคที่มีขนาดละเอียดกว่าซึ่งจะอยู่บริเวณตรงกลางของแรงเหวี่ยงหมุนจะถูกเหวี่ยงไปทางด้านบน รวมเป็นองค์ประกอบของดินต่อไป หากทำการหมุนเหวี่ยงน้ำดินด้วยกระบวนการไฮโดรไซโคลนต่อไป สิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาด 30 ไมครอนจะถูกแยกออกเหลือไว้เพียงส่วนของวัตถุดิบที่มีความละเอียดมาก ๆ และมีองค์ประกอบที่เป็นส่วนของดินรวมอยู่มากกว่า 95%

การใช้ไฮโดรไซโคลนเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนดังกล่าวให้ออกไปจากเนื้อดิน จะทำการกำจัดที่ขนาดอนุภาคละเอียดขึ้นที่ประมาณ 15 ไมครอน ทำให้ดินที่ได้มีความขาวและมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง ดินที่ได้จะถูกนำมาผ่านกระบวนการแยกน้ำออกจากเนื้อดินโดยการตกตะกอนหรือการอัดกรอง (Filter Pressing) และผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเตาชนิดพิเศษในขั้นตอนสุดท้าย

ปริมาณสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ในเนื้อดินมีปริมาณที่น้อยทำให้ดินเกาลิน (Kaolin Clay) มีสมบัติหลังเผาที่ดี ให้สีหลังเผาที่ขาวมากซึ่งจะตรงกันข้ามกับดินประเภททุติยภูมิ (Secondary Clays) ที่พบโดยส่วนใหญ่เนื่องจากดินประเภทนี้มีสิ่งเจือปนอยู่ในปริมาณมากทำให้ดินมีสีที่ขาวนวลหลังเผา และดินจากบางแหล่งอาจจะให้สีหลังเผาเป็นสีงาช้าง (Ivory) สีฟางข้าว (Straw) สีน้ำตาล (Brown) หรือสีแดง (Red) ซึ่งแล้วแต่แหล่งที่มาของดินนั้น ๆ

ดินเกาลินเผา (Calcined kaolin) ได้จากการนำดินเกาลินซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติมาเผาในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้ได้โครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$; CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท ($3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$; CAH) ที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานและเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต อนุภาคของดินเกาลินเผามีส่วนช่วยลดความพรุน (Porosity) ในเนื้อคอนกรีตโดยการเข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงและความหนาแน่นสูงขึ้น แต่การนำดินเกาลินมาผสมกับปูนซีเมนต์โดยตรงอาจทำให้

ได้คอนกรีตที่มีสมบัติไม่แน่นอน จากผลงานวิจัยของ Sayamipuk (2000) พบว่ามอร์ต้าผสมดินเกาลินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้กำลังรับแรงอัดได้ต่ำ ในขณะที่มอร์ต้าผสมดินเกาลินที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน โดยการนำดินเกาลินมาผ่านกระบวนการเผาเพื่อเป็นการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีดังสมการที่ 2.3

$$\underset{\text{(Kaolinite)}}{Al_2O_3 \,.\, 2SiO_2 \,.\, 2H_2O} \longrightarrow \underset{\text{(Metakaolin)}}{Al_2O_3 \,.\, 2SiO_2} \qquad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.3 เมื่อดินเกาลินได้รับความร้อนด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมแล้วน้ำในโครงสร้างของดินเกาลิน (Chemical combined water) จะถูกทำให้หลุดออกไปส่งผลให้ดินเกาลินจากเดิมที่มีโครงสร้างในรูปของแร่เคโอลิไนท์ (Kaolinite) เปลี่ยนเป็นโครงสร้างเมตาเคโอลิน(Metakaolin) ที่อยู่ในรูปอสัณฐานไม่เสถียร สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดี เหมาะสมในการใช้ผสมปูนซีเมนต์

2.7 แนวคิดงานวิจัย

วัสดุปอซโซลานที่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีต้องมีเฟส (Phase) อยู่ในรูปอสัณฐาน ซึ่งอัตราการเย็นตัวหลังการเผาจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณอสัณฐานที่เกิดขึ้น แม้ที่ผ่านมาจะมีการศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมกับการเผาดินเกาลินเพื่อให้ได้วัสดุปอซโซลานที่เหมาะกับการใช้งาน แต่ส่วนใหญ่ศึกษาเพียงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเผา ยังไม่พบรายงานฉบับใดที่รายงานผลของการเย็นตัวหลังการเผาต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการสังเคราะห์วัสดุปอซโซลานจากดินเกาลินที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกด้วยการควบคุมการเย็นตัวระหว่างการเผา ตลอดจนทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังจากแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผา

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากแนวคิดในการศึกษาและพัฒนาวัสดุที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากดินเกาลินดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Murat และ Comel (1983) ศึกษาอุณหภูมิในการเผาดินเกาลิน โดยทำการทดลองเผาดินเกาลินด้วยวิธีการเผาแบบถังนิ่ง (Fixed-bed) และแบบถังกวน (Stirred-bed) หรือการเผาแบบหม้อหมุน (Rotary kiln) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาสำหรับทั้ง 2 วิธีอยู่ในช่วง 700°C ถึง 850°C สำหรับวิธีการเผาแบบถังนิ่งเวลาที่เหมาะสมคือ 6 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดของดินเกาลินผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำที่อายุการบ่มระหว่าง 7 ถึง 90 วัน สูงกว่ากำลังรับแรงอัดของดินเกาลินจากวิธีการเผาแบบถังกวนซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการเผาคือ 3 ชั่วโมง

Oriol และ Pera (1995) พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และดินเกาลินในปริมาณร้อยละ 30 ถึง 40 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมดภายในเวลา 28 วัน

Nevill และคณะ (1996) พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดินเกาลินมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลิน โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 650°C ถึง 850 °C

Wild และคณะ (1996) พบว่าผลกระทบของดินเกาลินต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินเกาลินในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักและทำการบ่มในช่วงอายุ 1 ถึง 90 วัน คอนกรีตที่ผสมดินเกาลินมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตอ้างอิงในทุกปริมาณของการแทนที่และทุกช่วงอายุของการบ่ม โดยปริมาณของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยดินเกาลินที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 20 และสรุปว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมดินเกาลินเกิดจากผลของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น โดยพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะเกิดขึ้นชัดเจนที่สุดในช่วง 7 ถึง 14 วันแรก นอกจากนี้ดินเกาลินยังมีส่วนช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในคอนกรีตในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังจากการผสม

Kostuch และคณะ (2000) พบว่าปริมาณดินเกาลินที่ใช้เพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จนหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 20 โดยปริมาณที่เหมาะสมในการใช้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของดินเกาลิน พื้นที่ผิวจำเพาะของดินเกาลินและปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

Anupong (2000) ศึกษาศักยภาพและเงื่อนไขที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินเกาลินในประเทศไทยจาก 3 แหล่ง ได้แก่ แหล่งปราจีนบุรี ระนอง และลำปาง โดยนำดินเกาลินมาเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700°C, 800°C, 900°C และ 1000°C และแปรผันเวลาในการเผาคือ 4, 6 และ 8 ชั่วโมง จากการทดลอง เมื่อพิจารณาจากดัชนีกำลัง (Strength activity index) ของมอร์ต้าผสมดินเกาลินที่ได้จาก

การเผา พบว่าวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินเกาลินที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับดินเกาลินทั้ง 3 แหล่งคือ เผาด้วยอุณหภูมิ 800°C อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง โดยมอร์ต้าที่ผสมดินเกาลินเผาจากแหล่งปราจีนบุรี ให้ค่าดัชนีกำลังสูงที่สุดร้อยละ 131 เมื่อเทียบกับมอร์ต้าที่ผสมดินเกาลินจากแหล่งจังหวัดระนองและลำปางที่ให้ค่าดัชนีกำลังร้อยละ 115 และ 100 ตามลำดับ

Sayamipuk และคณะ (2000) พบว่ามอร์ต้าผสมดินเกาลินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ต้าอ้างอิง ในขณะที่มอร์ต้าที่ผสมดินเกาลินที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

Pekmezci และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณปอซโซลานธรรมชาติที่มีต่อคอนกรีต ทำการศึกษาโดยการทดสอบคอนกรีตทั้งหมด 15 ส่วนผสม โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิงที่มีปริมาณซีเมนต์ 300, 350 และ 400 kg/m^3 และได้ดัดแปลงส่วนผสมเพื่อศึกษาเปรียบเทียบโดยลดปริมาณซีเมนต์ลงเป็น 250, 300 และ 350 kg/m^3 ของคอนกรีตอ้างอิง และได้เพิ่มปริมาณปอซโซลานธรรมชาติเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์ 40, 50, 75 และ 100 kg/m^3 ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่มากเกินไปส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดต่ำลง ดังนั้นจึงควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่สูงที่สุด และ Pekmezci (2004) ยังพบอีกว่าในกรณีที่ลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมแล้วแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานธรรมชาตินั้น ส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เนื่องจากปอซโซลานธรรมชาติไม่มีคุณสมบัติในการเป็นสารซีเมนต์ (Cementitious material) และเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าปอซโซลานธรรมชาติจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเกิดจากผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่อัตราส่วนระหว่างวัสดุปอซโซลานต่อปูนซีเมนต์ (Pozzolan/Cement ratio, P/C) ที่ 0.28 เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด

Alejandra และคณะ (2012) นำดินเกาลินจาก 5 แหล่งที่มีปริมาณเกาลินไนท์และสิ่งเจือปนที่แตกต่างกันมาเพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยนำดินเกาลินทั้ง 5 แหล่งมาเผาที่อุณหภูมิ 700°C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟสอสัณฐานเมตาเคโอลินที่สมบูรณ์ พบว่าดินเกาลินที่มีปริมาณเกาลินไนท์สูงหลังจากทำการเผาแล้วจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้มากที่สุด และพบว่าอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟสอสัณฐานเมตาเคโอลินที่สมบูรณ์ จะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

A.Tironi และคณะ (2012) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลินที่มีการปรับปรุงความร้อนที่แตกต่างกัน โดยทำการเผาดินเกาลินที่อุณหภูมิ 700°C, 750°C และ 800°C

ด้วยช่วงเวลา 10, 20 และ 30 นาที พบว่าที่อุณหภูมิ 700°C ที่ช่วงเวลาเผาสูงขึ้นทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิกเพิ่มขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิ 800 ที่ช่วงเวลาเผาสูงขึ้นทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิกลดลง และที่อุณหภูมิ 750°C การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก จะอยู่ในช่วงกลางๆ ระหว่างอุณหภูมิที่ 700°C กับ 800°C

Sofie และคณะ (2016) ทำการศึกษากลุ่มแร่ดิน 3 กลุ่ม ได้แก่ ดินเกาลินไนท์ ดินสเมคไตต์ และดินอิลไลท์ โดยผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 500°C, 600°C, 700°C, 800°C และ 900°C พบว่าดินเกาลินไนท์จัดอยู่ในกลุ่มดินที่ให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิกระดับสูง รองลงมาคือดินสเมคไตต์ และดินอิลไลท์ตามลำดับ ซึ่งดินเกาลินไนท์ที่เผาอุณหภูมิ 600°C ได้ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากที่สุด

Alejandra และคณะ (2017) ทำการศึกษาอุณหภูมิการเผาดินเกาลินที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและสัณฐานวิทยาของฮาลอยไซต์ (Halloysite) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกคือช่วงอุณหภูมิที่ 400°C - 600°C แต่อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีที่สุดคือที่อุณหภูมิ 600°C รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 500°C และ 400°C ตามลำดับ และยังพบว่าดินเกาลินที่มีสัณฐานวิทยาของฮาลอยไซต์แบบท่อจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีกว่าฮาลอยไซต์ที่มีสัณฐานวิทยาแบบกลม

Yuanyuan และคณะ (2017) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลินที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา และดินเกาลินที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500°C, 600°C, 700°C, 800°C และ 900°C ต่อกำลังรับแรงอัด พบว่าดินเกาลินที่ไม่ผ่านกระบวนการเผาไม่มีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด ที่อุณหภูมิ 800°C พบว่าเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากที่สุดจึงส่งผลให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด แต่เมื่อนำดินเกาลินมาเผาที่อุณภูมิที่สูงขึ้นคือ 900°C พบว่าดินเกาลินเผามีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาได้น้อยลงและค่ากำลังรับแรงอัดก็ลดต่ำลงด้วย เนื่องจากที่อุณหภูมิ 900°C เริ่มเกิดการเปลี่ยนเฟสจากอสัณฐานเมตาเคโอลินไปเป็นสปิเนล

Kamal และคณะ (2017) ได้นำดินเกาลินจาก 3 แหล่งมาเพื่อศึกษาปริมาณเมตาเคโอลินที่มีอยู่ในดินเกาลินของแต่ละแหล่งต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ในตอนต้นของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก พบว่าดินเกาลินที่มีปริมาณเมตาเคโอลินในปริมาณมากจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้น้อยกว่าดินเกาลินที่มีเมตาเคโอลินปริมาณน้อย แต่จะมีผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้มากขึ้นเรื่อยๆในระยะยาว ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น

Hamdy El-Diadamony (2018) ทำการนำดินเกาลินจาก 4 แหล่งมาเผาที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเมตาเคโอลินร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักหลังจากทำการบ่มนาน 90 วัน พบว่าการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานโดยเมตาเคโอลินทั้งร้อยละ 10

และ 20 โดยน้ำหนักสามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงได้อย่างรวดเร็ว แต่การแทนที่ด้วยเมตาเคโอลินร้อยละ 10 โดยน้ำหนักจะทำให้ค่ากำลังแรงอัดคงที่รวดเร็วกว่า เนื่องจากการทำปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ในขณะที่การแทนที่ด้วยเมตาเคโอลินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นอย่างสม่ำเสมอจนถึง 90 วัน

Trezza, M.A และคณะ (2019) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลินจาก 5 แหล่งโดยทำการเผาดินเกาลินที่อุณหภูมิ 700°C พบว่าดินเกาลินเผาจากแหล่งที่ 2 มีค่าการนำไฟฟ้าและมีค่าแคลเซียมไอออนและไฮดรอกไซด์ที่ต่ำที่สุด ส่วนดินเกาลินแหล่งที่ 5 พบว่าที่อายุทดสอบ 7 วันไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้และที่อายุทดสอบ 28 วันสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เล็กน้อยเนื่องจากค่าที่ได้อยู่ใกล้เส้นไอโซเทอมของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์มาก เพราะดินเกาลินแหล่งที่ 2 มีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด รองลงมาคือดินแหล่งที่ 3, 4, 1 และ 5 ตามลำดับ

แม้จะมีงานวิจัยเกี่ยวกับดินเกาลินเผาจำนวนมาก แต่ส่วนใหญ่กล่าวถึงอุณหภูมิและเวลาในการเผาดินเกาลินให้เป็นดินเกาลินเผาเท่านั้น แต่ยังไม่พบการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการเย็นตัวระหว่างการเผาดินเกาลิน จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการวิจัยครั้งนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

วัตถุดิบ	แหล่งที่มา
ดินเกาลิน (Kaolin)	บริษัท Lucky Union
ปูนซีเมนต์ (Cement)	บริษัท Siam Cement Group
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide : $Ca(OH)_2$)	บริษัท LOBA Chemie
น้ำกลั่น (Distilled water : H_2O)	อาคารเครื่องมือ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

อุปกรณ์	ยี่ห้อ/รุ่น
เตาเผาไฟฟ้า (Electric kiln)	Ceradel / PS5943
ถ้วยหลอมอะลูมินา (Alumina crucible)	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ	ยี่ห้อ/รุ่น
เครื่องวิเคราะห์พลังงานและปริมาณองค์ประกอบ (Simultaneous Thermal Analysis : STA-TGA/DSC)	NETZSCH / Model STA 449F3
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer : XRD)	Bruker / D8 ADVANCE
เครื่องวิเคราะห์ธาตุวิธีเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence spectrometer : XRF)	Rigaku / ZSXPrimus IV
เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer : ICP-OES)	Perkin Elmer / Optima 8000
เครื่องมือวัดการนำไฟฟ้า (Conductivity Meter)	HACH / HQ430d
เครื่องมือทดสอบแรงอัด (Compression Machine)	ELE / ELE300T
เครื่องวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างสาร โดยอาศัยการวัดการดูดกลืนรังสีช่วงอินฟาเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR Spectrometer)	Bruker 2 / Tensor 27-Hyperion
เครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer : LPA)	HORIBA / LA950V2
กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)	ZEISS / AURIGA

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 สัญลักษณ์ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.4

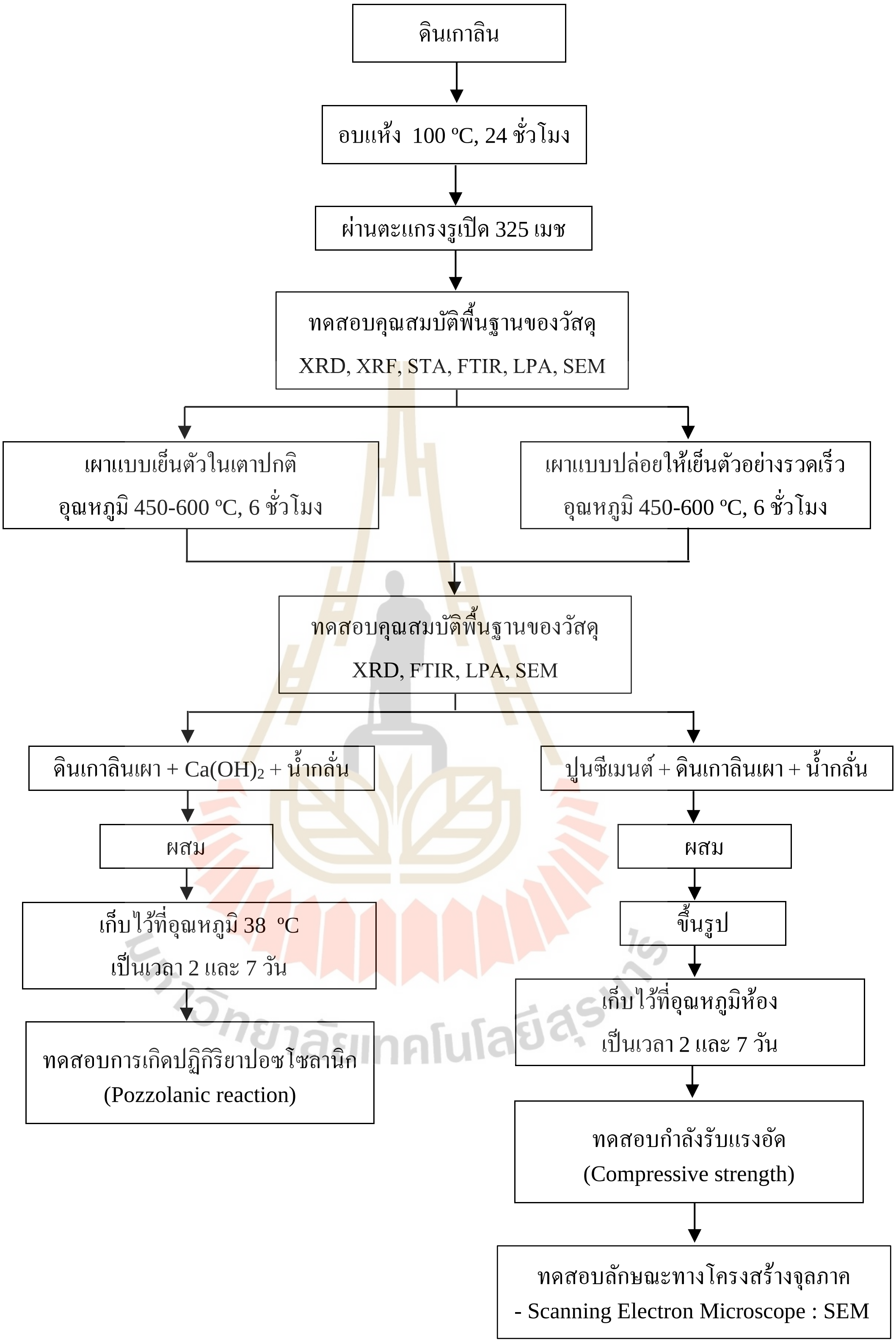
ตารางที่ 3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

อุณหภูมิการเผาแคลไซด์ (^{o}C)	การเย็นตัว	สัญลักษณ์
450	ปกติภายในเตาเผา	450N
	อย่างรวดเร็ว	450Q
500	ปกติภายในเตาเผา	500N
	อย่างรวดเร็ว	500Q
600	ปกติภายในเตาเผา	600N
	อย่างรวดเร็ว	600Q

3.3 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดดังอธิบายในหัวข้อ 3.3.1 ถึง 3.3.15

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.1 การเตรียมดินเกาลิน

การเตรียมดินเกาลินทำโดยนำดินเกาลินไปอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช (Mesh)

3.3.2 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเกาลิน

ดินเกาลินจากข้อที่ 3.3.1 จะถูกนำไปทดสอบองค์ประกอบทางเฟสและองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer : XRD) และเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence spectrometer : XRF) ตามลำดับ จากนั้นจะถูกนำไปศึกษาสมบัติด้านความร้อนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์พลังงานและปริมาณองค์ประกอบ (Simultaneous Thermal Analysis : STA-TGA/DSC) และศึกษาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างสารโดยอาศัยการวัดการดูดกลืนรังสีช่วงอินฟาเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR Spectrometer) และจะถูกนำไปศึกษาขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer : LPA) และทดสอบลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของดินเกาลิน

วิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer : XRD) แสดงดังรูปที่ 3.2 การวิเคราะห์ดินเกาลินและดินเกาลินเผา ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) เป็นวิธีที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของแร่ดิน โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แร่ดินแต่ละชนิดจะให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ที่มีลักษณะเฉพาะทำให้สามารถจำแนกชนิดของแร่ดินได้

ใช้เงื่อนไขการทดสอบดังนี้

- หลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) : Cu-Kα
- กระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้า (Current and Tension) : 40 mA และ 40 kV
- ขนาดของการกวาดมุม (Step size; 2θ) : 0.02^{o}
- ความเร็วในการตรวจวัด (Scan speed) : 2^{o}/min
- ช่วงของการทดสอบ (Scan range; 2θ) : 5-60^{o}

รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer : XRD)

3.3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเกาลิน

วิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุวิธีเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence spectrometer : XRF) แสดงดังรูปที่ 3.3 อาศัยหลักการยิงรังสีเอ็กซ์เข้าไปกระทบกับตัวอย่าง ส่งผลให้ธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ แล้วคายพลังงานออกมาโดยพลังงานที่คายหรือ Fluorescene ออกมาจะมีค่าพลังงานเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด แล้วระบบทำการวัดค่ารังสีที่กระเจิงออกมาแล้วทำการประมวลผล

ใช้เงื่อนไขการทดสอบดังนี้

- วิเคราะห์ทดสอบตัวอย่างด้วยเทคนิค Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WD-XRF) แบบเชิงคุณภาพด้วยโปรแกรม ZSX Guidance
- ขนาดลำแสงเอ็กซเรย์ (Beam size) 10 มิลลิเมตร
- วิเคราะห์ธาตุตั้งแต่ โบรอน (B) จนถึง ยูเรเนียม (U)
- เวลาในการทดสอบ 18 นาที

รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์ธาตุวิธีเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence spectrometer : XRF)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.5 การวิเคราะห์พลังงานและปริมาณองค์ประกอบของดินเกาลิน

วิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์พลังงานและปริมาณองค์ประกอบ (Simultaneous Thermal Analysis : STA-TGA/DSC) แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติความแตกต่างทางความร้อนของสสาร โดยวัดความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างสารตัวอย่างและสารอ้างอิงที่อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน และได้รับพลังงานความร้อนเท่ากัน ในการวิเคราะห์ตัวอย่างตัวอย่างจะถูกวางบนถ้วยอะลูมิเนียมที่อยู่ภายในเตาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยภายในเตาจะมีสารอ้างอิงซึ่งเป็นถ้วยอะลูมิเนียมเปล่า เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับตัวอย่างภายใต้สภาวะเดียวกัน และเทคนิค Thermogravimetry Analysis (TGA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลของสารซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จะทำให้ทราบค่าอุณหภูมิที่น้ำหนักสารเริ่มลดลงและลดลงเป็นปริมาณเท่าไหร่ จากข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารได้

ใช้เงื่อนไขการทดสอบดังนี้

- โปรแกรมอุณหภูมิ : จาก 35 °C ถึง 1200 °C
- อัตราให้ความร้อน : 10.00 °C/min
- ก๊าซ : ออกซิเจน

รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์พลังงานและปริมาณองค์ประกอบ (Simultaneous Thermal Analysis)

3.3.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของดินเกาลิน

วิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างสารโดยอาศัยการวัดการดูดกลืนรังสีช่วงอินฟาเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR Spectrometer) แสดงดังรูปที่ 3.5 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเกิดจากการสั่นของอะตอมที่เป็นส่วนประกอบของแร่ดินและความถี่ของการสั่นจะขึ้นอยู่กับมวลของอะตอม, แรงระหว่างพันธะและรูปร่างโครงสร้างของกลุ่มแร่ดินนั้น IR spectrum ของการดูดกลืนที่แต่ละความถี่ที่ได้จะแทนคุณลักษณะเฉพาะของแร่แต่ละชนิดในกลุ่มดังกล่าว

Infrared (IR) Spectroscopy เป็นหนึ่งในเทคนิค Spectroscopy ทั่วๆ ไป ที่ใช้ในทางเคมีอินทรีย์และเคมีอนินทรีย์ โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะ หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นลายพิมพ์โมเลกุล (Finger print) สามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีในตัวอย่าง โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละพันธะ

ใช้เงื่อนไขการทดสอบดังนี้

- ช่วงที่ใช้ในการทดสอบ : 4000-400 cm^{-1}
- Resolution : 2 cm^{-1}

รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างสารโดยอาศัยการวัดการดูดกลืนรังสีช่วงอินฟาเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR Spectrometer)

3.3.7 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเกาลิน

วิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer : LPA) แสดงในรูปที่ 3.6 เป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการเลี้ยวเบนของแสงจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์วัดขนาด ขนาดอนุภาคขนาดเล็กแสงจะถูกขยายแล้วส่งผ่านไปยังอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวที่มีความโปร่งใสและจะเกิดการกระเจิงแสงที่บริเวณผิวอนุภาค เมื่อแสงผ่านตัวอย่างอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย จะปรากฏการกระเจิงแสง โดยแสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะมีรูปแบบความเข้ม (Intensity) ที่มุมต่างกันขึ้นกับขนาดของอนุภาค

ใช้เงื่อนไขการทดสอบดังนี้

- ตัวกลาง : น้ำกลั่น
- เวลาทดสอบ : 4 นาที

รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer : LPA)

3.3.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคของดินเกาลิน

วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) แสดงดังรูปที่ 3.7 การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง และทำการเตรียมตัวอย่าง โดยการนำชิ้นตัวอย่างเล็กๆ ติดบนแท่นวางตัวอย่างด้วยเทปกาวชนิดคาร์บอน ถ้ากรณีเป็นผงจะโรยผงตัวอย่างลงบนแท่นวางตัวอย่าง (Stub) จากนั้นนำไปเคลือบทองด้วยเครื่อง Sputter Coater แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราดเป็นลำดับต่อไป

ใช้เงื่อนไขการทดสอบดังนี้

- เวลาเคลือบทอง : 2 นาที

รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.9 การเผาดินเกาลิน

ดินเกาลินที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.3.1 จะถูกนำไปเผา ณ อุณหภูมิ 450 °C, 500 °C และ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นดินเกาลินจะถูกทำให้เย็นตัวในสองลักษณะที่ต่างกันได้แก่ การปล่อยให้เย็นตัวตามปกติภายในเตาเผาและการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quench) ดินเกาลินที่ผ่านการเผาแล้วจะถูกนำไปทดสอบความเป็นผลึก (หัวข้อ 3.3.3), องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมี (หัวข้อ 3.3.6), ขนาดของอนุภาค (หัวข้อ 3.3.7), ลักษณะทางโครงสร้างจุลภาค (หัวข้อ 3.3.8), ปริมาณเฟสอสัณฐานของดินเกาลินเผา, ความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปริมาณที่เหมาะสมในการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อไป

3.3.10 การหาปริมาณผลึกเคโอลินไนท์ของดินเกาลินเผา

นำผลของดินเกาลินเผาที่ได้จากข้อที่ 3.3.3 มาหาปริมาณผลึกเคโอลินไนท์จากสมการที่ 3.1 โดย 2θ ของผลึกเคโอลินไนท์และควอตซ์ที่ใช้ในการคำนวณคือที่ 24.83° และ 26.63° ตามลำดับ

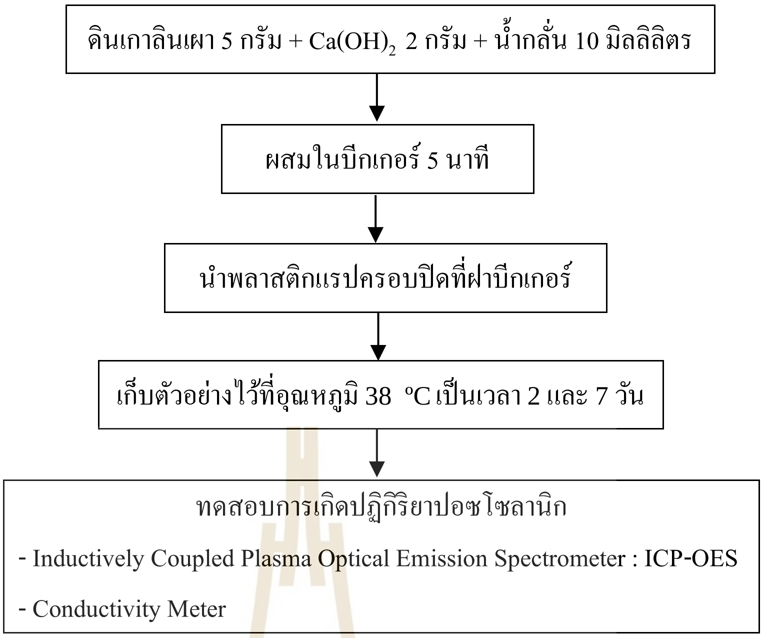
$$\text{ปริมาณผลึกเคโอลินไนท์} = \frac{I_k}{I_k+I_q} \times 100 \qquad (3.1)$$

โดย I_k คือ ความเข้มสูงสุดของผลึกเคโอลินไนท์

I_q คือ ความเข้มสูงสุดของผลึกควอตซ์

3.3.11 การทดสอบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction)

ดินเกาลินเผาจากข้อที่ 3.3.9 จะถูกนำไปทดสอบปฏิกิริยาปอซโซลานิกตามมาตรฐาน ASTM C311 ดังแสดงดังรูปที่ 3.8 โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก

(1) ชั่งดินเกาลินเผา 5 กรัม, แคลเซียมไฮดรอกไซด์ 2 กรัม และน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร

(2) นำส่วนผสมทั้งหมดเทลงในบีกเกอร์ และผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องกวนสารเป็นเวลา 5 นาที

(3) เมื่อส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ใช้พลาสติกแรปคลอบปิดที่ปากบีกเกอร์

(4) เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 และ 7 วัน

(5) นำตัวอย่างไปทดสอบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณของธาตุ (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer : ICP-OES) และเครื่องมือวัดการนำไฟฟ้า (Conductivity Meter)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.12 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของดินเกาลินเผา

วิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer : ICP-OES) แสดงดังรูปที่ 3.9 เป็นเทคนิคในการทดสอบหาปริมาณแร่ธาตุ โดยมีก๊าซอาร์กอนเป็นพลาสมา (Plasma) ที่เกิดในสภาพความดันบรรยากาศ และคงอยู่ได้ด้วยพลังงานที่ถ่ายเทมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อนำสารละลายตัวอย่างเข้าเครื่อง ICP-OES จะถูกทำให้เป็นละอองขนาดเล็กๆและก๊าซอาร์กอนเป็นตัวพาละอองตัวอย่างเข้าสู่กึ่งกลางของพลาสมาที่เป็นแหล่งให้พลังงานกระตุ้นความร้อนสูง โดยอะตอมของตัวอย่างเมื่อได้รับพลังงานจากพลาสมา จะทำให้อะตอมเปลี่ยนจากสภาวะพื้น (Ground state) ไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร ดังนั้นอะตอมของธาตุจะคายพลังงานเพื่อกลับสู่สภาวะพื้น ซึ่งอะตอมของธาตุ แต่ละชนิดจะคายพลังงานออกมาโดยการเปล่งแสง (Emission)ที่ มีชุดความยาวคลื่นเฉพาะตัว ตัวตรวจวัดก็จะสามารถวัดชนิดและปริมาณสำหรับแร่ในตัวอย่างได้

ใช้เงื่อนไขการทดสอบดังนี้

- เวลาในการทดสอบ : 10 วินาที
- สารละลายมาตรฐาน (standard solution) : 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm
- สารละลาย Blank : น้ำกลั่น

รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer : ICP-OES)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.13 การวิเคราะห์การนำไฟฟ้าของดินเกาลินเผา

วิเคราะห์โดยเครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Conductivity Meter) แสดงดังรูปที่ 3.10 เป็นเทคนิควัดค่าการนำไฟฟ้าในการติดตามการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงอายุทดสอบ 7 วัน โดยอาศัยการวัดค่าการนำไฟฟ้าของดินเกาลินเผาในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป ใช้เป็นตัวแทนผลผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน พบว่าเป็นเทคนิคที่รวดเร็วและสามารถใช้ทำนายระดับความเป็นปอซโซลานดินเกาลินเผาได้

ใช้เงื่อนไขการทดสอบดังนี้

- เวลาในการทดสอบ : 8 วินาที
- สารละลาย Blank : น้ำกลั่น
- อุณหภูมิในการทดลอง : อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 3.10 เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Conductivity Meter)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.14 การทดสอบการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผา

ดินเกาลินเผาจากข้อที่ 3.3.9 จะถูกนำไปทดสอบการแทนที่ปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้

(1) ชั่งวัตถุดิบ โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ คือ 0.40 แล้วใช้ดินเกาลินเผาแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 50 โดยน้ำหนัก

(2) ผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเทวัตถุดิบลงในแม่พิมพ์ทองเหลืองขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร จากนั้นพันด้วยพลาสติกฟิล์ม ก่อนเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(3) นำตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์ทองเหลือง และใช้พลาสติกแรปพันตัวอย่างอีกครั้ง จากนั้นเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 และ 7 วัน

(4) ทดสอบกำลังรับแรงอัด ด้วยเครื่องมือทดสอบแรงอัด (Compression Machine)

(5) ร้อยละของดินเกาลินเผาที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากที่สุดจะถูกนำไปทดสอบลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (หัวข้อ 3.3.8)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.15 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

ทดสอบโดยเครื่องมือทดสอบแรงอัด (Compression Machine) แสดงดังรูปที่ 3.11 เป็นเครื่องทดสอบความแข็งแรงในการรับแรงอัด (Compressive Strength) ของคอนกรีต แบบตั้งพื้นเป็นระบบไฮโดรลิคส์แบบใช้มอเตอร์ไฟฟ้า โดยการใช้แรงกดหรือแรงอัดในแนวตรง เมื่อชิ้นงานได้รับแรงอัดจนเกินกำลังรับแรงอัด ชิ้นงานจะแตกออกจดบันทึกค่าแรงกดที่ทำให้ชิ้นงานแตก และนำค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ผลต่อไป

ใช้เงื่อนไขการทดสอบดังนี้

- มาตรฐานที่ใช้ : ASTM C109
- ขนาดชิ้นงาน : 50x50x50 มิลลิเมตร
- จำนวนชิ้นงานต่อ 1 ตัวแปร : 3 ชิ้น

รูปที่ 3.11 เครื่องมือทดสอบแรงอัด (Compression Machine)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของดินเกาลินก่อนการเผาแคลไซด์

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเกาลิน

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินเกาลินด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence spectrometer : XRF) แสดงในตารางที่ 4.1 จากผลการวิเคราะห์พบว่าดินเกาลินมีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาเป็นส่วนประกอบในปริมาณร้อยละ 53.3 และ 40.8 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และไม่พบซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

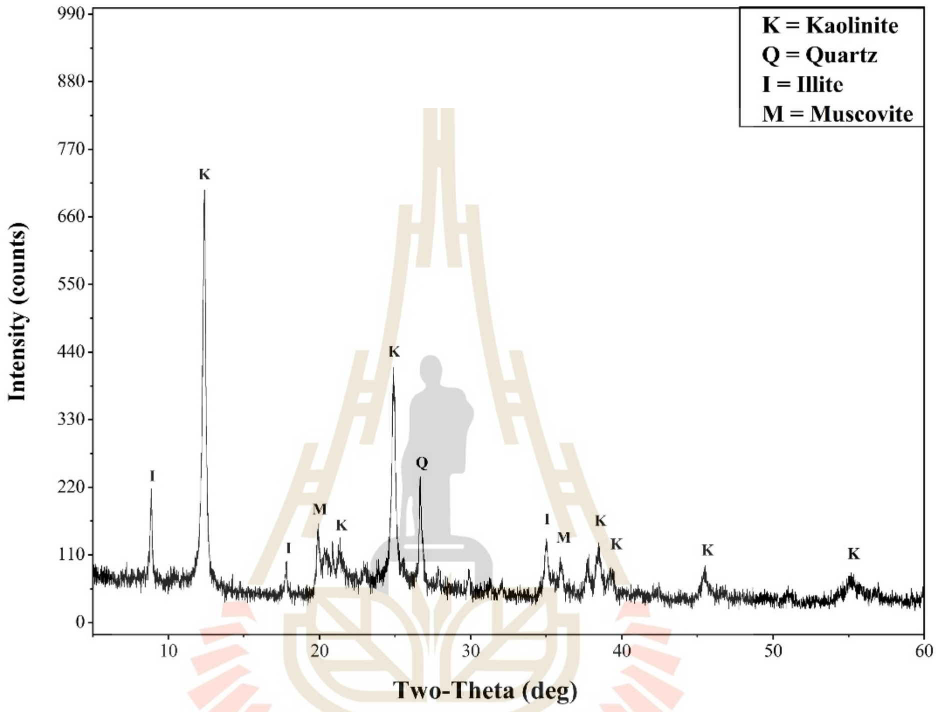
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินเกาลิน

องค์ประกอบทางเคมี	%โดยน้ำหนัก
SiO_2	53.3
Al_2O_3	40.8
Fe_2O_3	1.4
K_2O	3.6
MgO	0.3
Na_2O	0.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.1.2 องค์ประกอบทางเฟสของดินเกาลิน

องค์ประกอบทางเฟสส่วนใหญ่ของดินเกาลินที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วยผลึกของ เคโอลิไนท์ (Kaolinite), ควอตซ์ (Quartz), อิลไลต์ (Illite) และ มัสโคไวต์ (Muscovite) ดังแสดงในรูปที่ 4.1



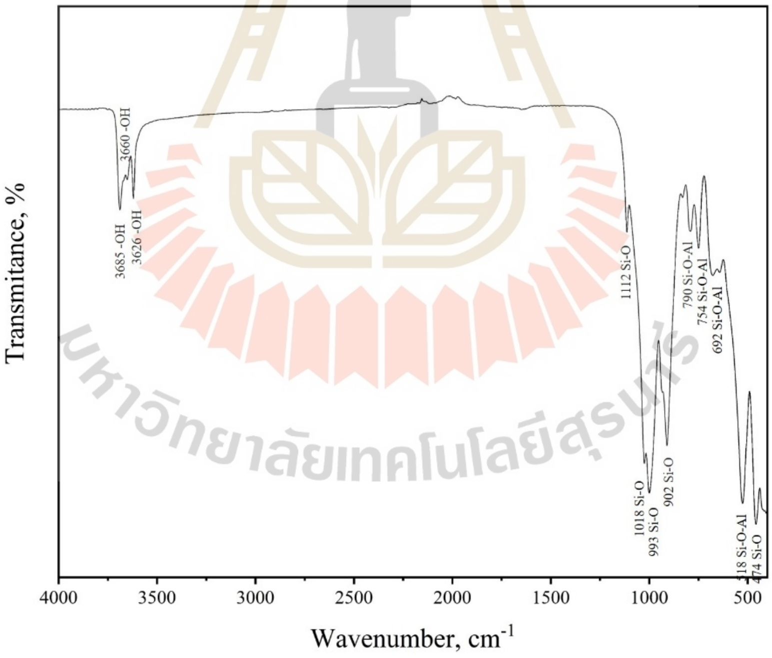
รูปที่ 4.1 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer : XRD) ของดินเกาลิน

4.1.3 โครงสร้างเคมีของดินเกาลิน

โครงสร้างทางเคมีของดินเกาลิน ซึ่งถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างโดยอาศัยการวัดการดูดกลืนรังสีช่วงอินฟาเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR Spectrometer) แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าความเป็นเอกลักษณ์ของแร่เคโอลินไนท์สามารถสังเกตได้ 2 ช่วงการดูดกลืนได้แก่ 1) ประมาณช่วง 3800-3600 cm^{-1} และ 2) ประมาณช่วง 1200-400 cm^{-1} ช่วงที่ปรากฏพีคการดูดกลืน (absorption band) และเลขคลื่น (wavenumber) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของพันธะของดินเกาลิน ที่ค่าเลขคลื่นต่างๆ

Wavenumber (cm^{-1})	**Assignments**
3685	OH stretching of inner-surface hydroxyl
3660	OH stretching of inner-surface hydroxyl
3626	OH stretching of inner hydroxyl group
1112	Si-O stretching
1018	Si-O stretching
993	Si-O stretching
902	Si-O stretching
790	Si-O-Al bending
754	Si-O-Al bending
692	Si-O-Al bending
518	Si-O-Al bending
474	Si-O bending

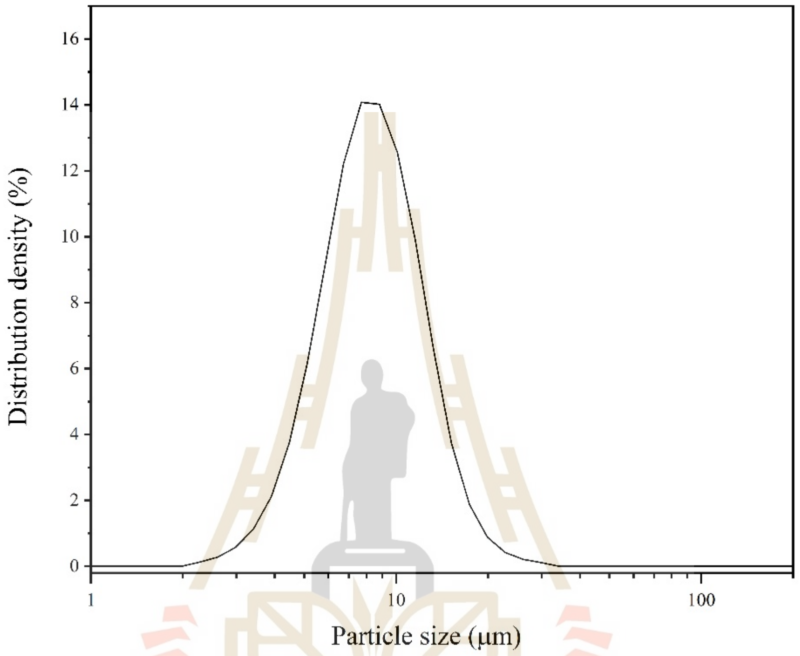


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.2 รูปองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของดินเกาลิน วิเคราะห์โครงสร้างโดยอาศัยการวัดการดูดกลืนรังสีช่วงอินฟาเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR Spectrometer)

4.1.4 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเกาลิน

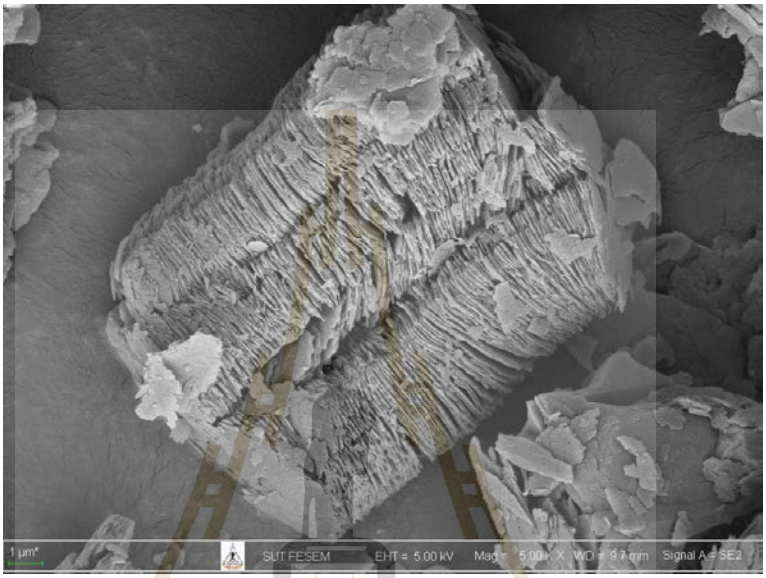
ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเกาลิน ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer : LPA) แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าดินเกาลินมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 8 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.3 รูปขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเกาลิน วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer : LPA)

4.1.5 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินเกาลิน

โครงสร้างระดับจุลภาคของดินเกาลิน ซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในรูปที่ 4.4 พบผลึกเคโอลินไนท์ ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางเรียงซ้อนทับกันและเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน

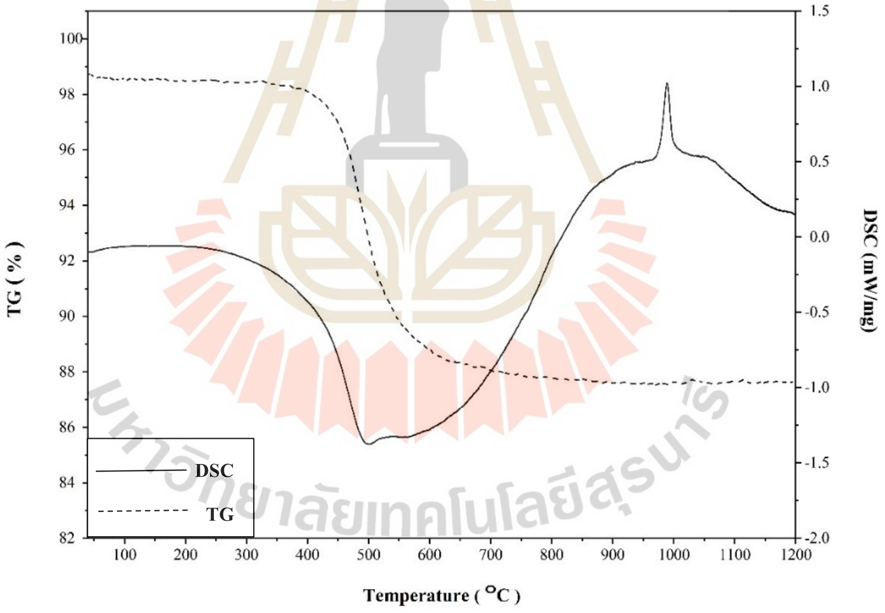


รูปที่ 4.4 รูปโครงสร้างระดับจุลภาคของดินเกาลิน ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีองค์ประกอบทางเฟสและลักษณะโครงสร้างจุลภาคของดินเกาลินพบว่า ดินเกาลินที่นำมาใช้ในการทดลองจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุปอซโซลานธรรมชาติชั้นคุณภาพเอ็น (Class N) (ASTM C 618, 2008) และมีสมบัติเหมาะกับการนำมาสังเคราะห์เป็นวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน

4.1.6 สมบัติด้านความร้อนของดินเกาลิน

การวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของดินเกาลินด้วยเครื่องมือวิเคราะห์พลังงานและปริมาณองค์ประกอบ แสดงในรูปที่ 4.5 พบการเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic) ที่ช่วงอุณหภูมิ 450°C - 600°C และปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ที่ช่วงอุณหภูมิ 980°C - 1010°C ซึ่งปฏิกิริยาดูดความร้อนสอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชั่น (Dehydration) ของดินเกาลิน โดยเมื่อดินเกาลินได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 450°C น้ำในโครงสร้างของดินเกาลิน (Chemical combined water) จะหลุดออกไปส่งผลให้ดินเกาลินเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างผลึกของเคโอลินไนท์ ไปเป็นโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ของเมตาเคโอลิน การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิ 500°C และสิ้นสุดที่อุณหภูมิ 600°C จากนั้นเมื่อดินเกาลินได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นไปอีกจนถึงอุณหภูมิ ประมาณ 985°C จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากอสัณฐานเมตาเคโอลินไปเป็นผลึกสปิเนล (Tironi, A., 2012)



รูปที่ 4.5 รูปสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของดินเกาลิน ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์พลังงานและปริมาณองค์ประกอบ (Simultaneous Thermal Analysis : STA-TGA/DSC)

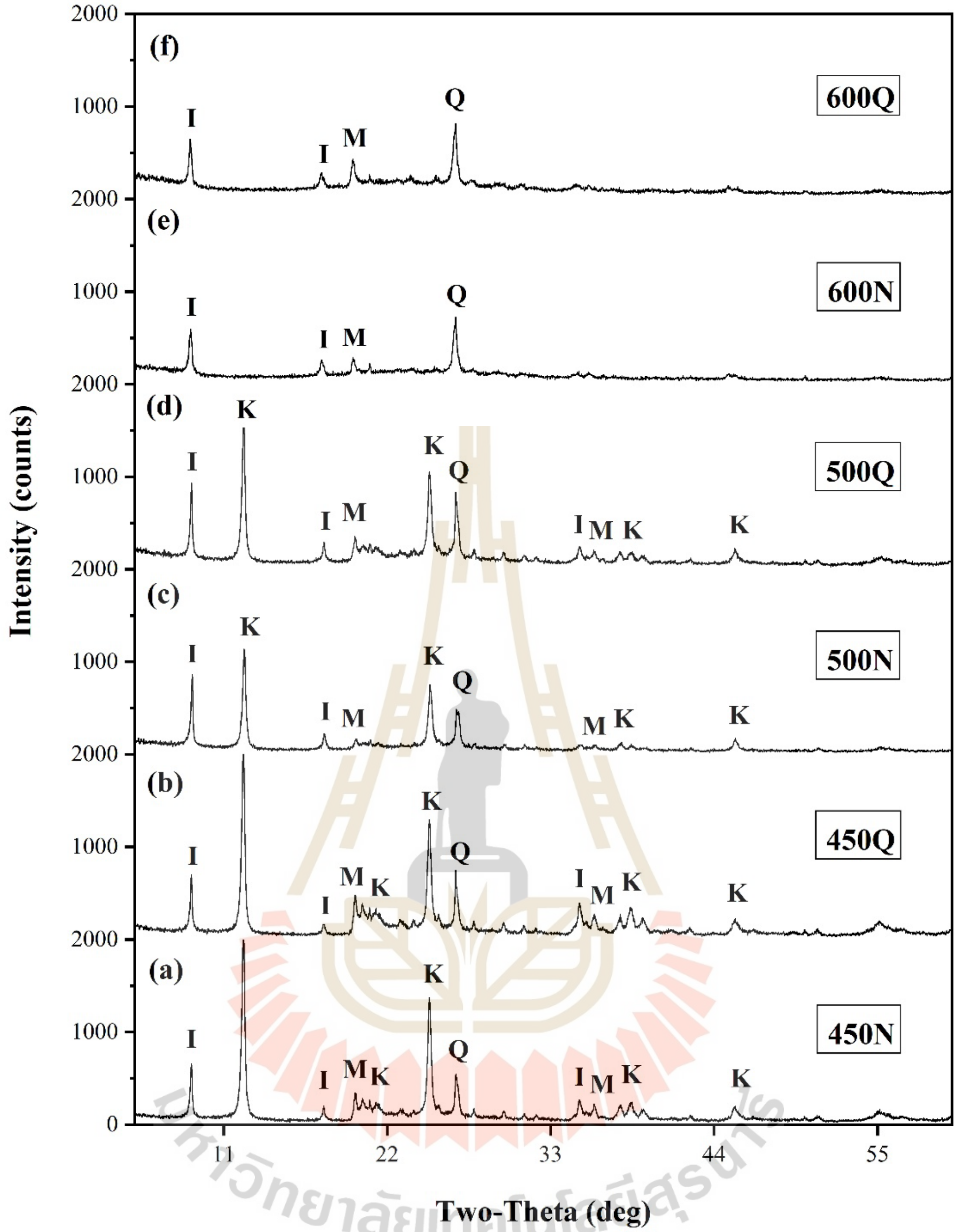
4.2 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อสมบัติปอซโซลานของดินเกาลิน

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.6 พบว่าดินเกาลินสามารถเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน แล้วเปลี่ยนเป็นเมตาเคโอลินที่ช่วงอุณหภูมิ 450°C - 600°C เพื่อให้เข้าใจถึงผลของอุณหภูมิการเผาและผลของการเย็นตัวหลังเผาต่อสมบัติของดินเกาลิน ดินเกาลินจะถูกนำไปเผาแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นจะถูกปล่อยให้เย็นตัวตามธรรมชาติภายในเตาเผา และ ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการนำตัวอย่างออกจากเตาเผาอย่างฉับพลันโดยมีผลการทดลองดังนี้

4.2.1 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อองค์ประกอบทางเฟสของดินเกาลินเผา

การเปลี่ยนแปลงทางเฟสของดินเกาลินหลังผ่านการเผาแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าความสูงของพีคเคโอลิไนท์ (Kaolinite) ลดลงเมื่ออุณหภูมิของการเผาเพิ่มขึ้น เนื่องจากหลังได้รับความร้อนตั้งแต่ 450°C เป็นต้นไปน้ำในโครงสร้างของดินเกาลินจะถูกทำให้หลุดออกไปส่งผลให้ดินเกาลินจากเดิมที่มีโครงสร้างในรูปของแร่เคโอลิไนท์เปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างเมตาเคโอลิน (Metakaolin) ที่อยู่ในรูปอสัณฐานไม่เสถียร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.6

ด้วยการเผาแช่ (Soaking) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง อุณหภูมิที่สามารถเปลี่ยนเฟสของเคโอลินไนท์ให้อยู่ในรูปอสัณฐานของเมตาเคโอลินได้สมบูรณ์ คือ 600°C สำหรับอุณหภูมิ 500°C และ 450 °C ยังพบพีคของเคโอลินไนท์อยู่ เนื่องจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเกิดได้ไม่สมบูรณ์ และพบว่าการทำให้ดินเกาลินเย็นตัวอย่างรวดเร็วสามารถเปลี่ยนโครงสร้างจากเคโอลินเป็นเมตาเคโอลินได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการปล่อยให้ดินเกาลินเย็นตัวภายในเตา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วมีความพร้อมในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากกว่าตัวอย่างที่เย็นตัวภายในเตา เนื่องจากโครงสร้างของดินเกาลินที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีมักอยู่ในรูปอสัณฐาน

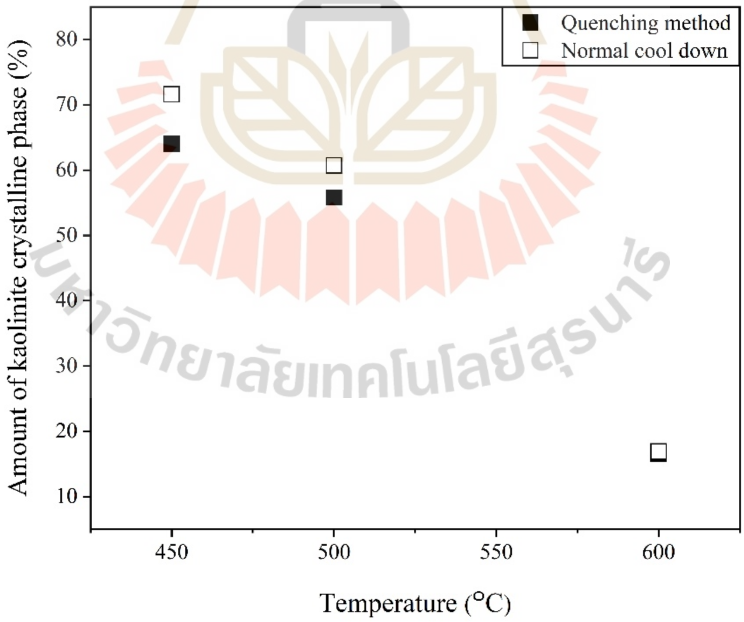


รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ; (a) (c) (e) คือการเผาแบบปกติ ; (b) (d) (f) คือการเผาแบบปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer : XRD)

4.2.2 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อปริมาณผลึกเคโอลินไนท์ของดินเกาลิน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของผลึกเคโอลินไนท์ในดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าผลของร้อยละของผลึกเคโอลินไนท์ต่ออุณหภูมิการเผาทั้งแบบเย็นตัวปกติและแบบเย็นตัวอย่างรวดเร็วมีแนวโน้มสวนทางกัน กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นร้อยละผลึกเคโอลินไนท์ก็จะลดลง ซึ่งแสดงถึงปริมาณของเฟสอสัณฐานที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1 ร้อยละผลึกเคโอลินไนท์ของตัวอย่าง 450N, 500N และ 600N มีค่า 72, 61 และ 17 ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่าง 450Q, 500Q และ 600Q มีปริมาณผลึกเคโอลินไนท์ร้อยละ 64, 56 และ 16 ตามลำดับ

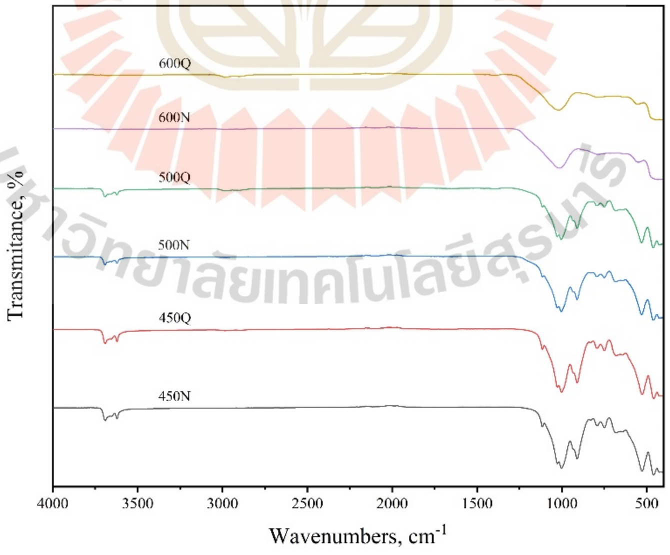
เมื่อเปรียบเทียบร้อยละของเฟสอสัณฐานของการปล่อยดินเกาลินเผาให้เย็นตัวทั้ง 2 แบบ พบว่าการเย็นตัวอย่างรวดเร็วให้ค่าร้อยละของเฟสอสัณฐานสูงกว่าการปล่อยให้เย็นตัวตามปกติ เนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วสามารถคงความเป็นอสัณฐานของเมตะเกาลินไม่ให้เปลี่ยนสภาพกลับไปอยู่ในรูปผลึกเคโอลินไนท์



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของผลึกเคโอลินไนท์ในดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยการถูกทำให้เย็นตัวในสองลักษณะ ได้แก่ ปล่อยให้เย็นตัวตามปกติภายในเตา และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว

4.2.3 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อโครงสร้างทางเคมีของดินเกาลิน

การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเคมีของดินเกาลินหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยการถูกทำให้เย็นตัวในสองลักษณะ ได้แก่ ปล่อยให้เย็นตัวตามปกติภายในเตาและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าพีคของแถบการดูดกลืน (absorption band) ช่วง 3685-3626 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งไฮดรอกซิลและเป็นลักษณะเฉพาะของแร่เคโอลินไนท์ มีความลึกที่ค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ตามอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1 จากการที่ได้รับความร้อนตั้งแต่ 450°C เป็นต้นไป น้ำในโครงสร้างของดินเกาลินจะหลุดออกไปส่งผลให้ดินเกาลินจากเดิมที่มีโครงสร้างในรูปของแร่เคโอลินไนท์ได้ถูกเปลี่ยนเป็นโครงสร้างเมตาเคโอลิน สำหรับพีคของการดูดกลืนช่วง 1112-474 cm^{-1} พบว่ากลุ่มไฮดรอกซิลหายไป โดยพีคที่พบเป็นลักษณะการสั่นของพันธะ Si-O-Al (ตารางที่ 4.2) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของอสัณฐานซิลิกา และเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นอสัณฐานซิลิกาไม่ได้ลดลง แต่กลับทำให้สัดส่วนของอสัณฐานซิลิกาเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันสัดส่วนของอลูมินาก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน และสำหรับในทุกตัวอย่างพบว่าการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว มีความลึกของพีคที่ตื้นกว่าการเย็นตัวแบบปกติในเตา เนื่องจากสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นเฟสอสัณฐานได้รวดเร็วกว่าและเกิดเฟสอสัณฐานในปริมาณที่มากกว่า

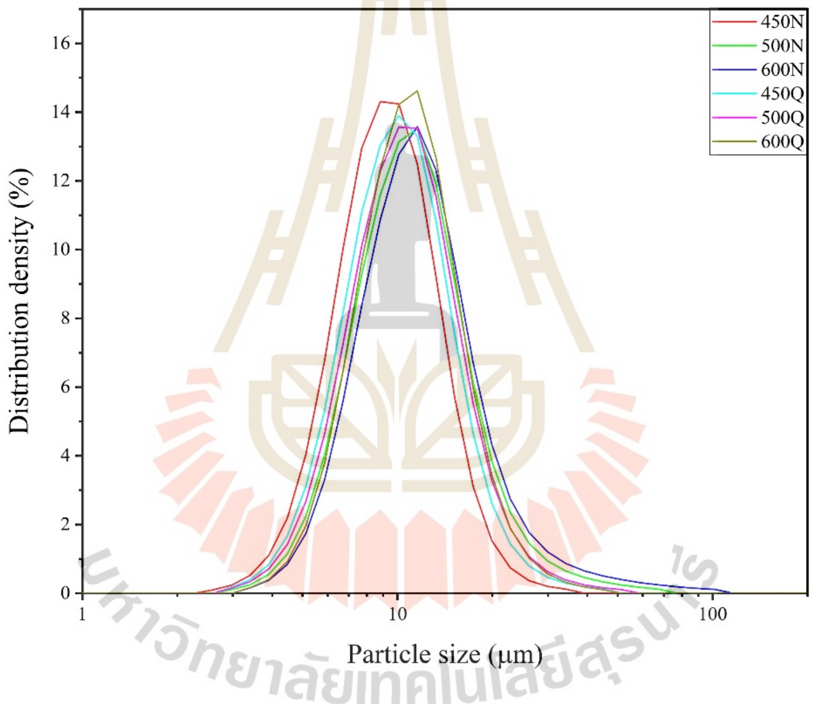


รูปที่ 4.8 รูปองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของดินเกาลินเผา วิเคราะห์โครงสร้างโดยอาศัยการวัดการดูดกลืนรังสีช่วงอินฟาเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR Spectrometer)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2.4 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเกาลินเผา

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเกาลินหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยการถูกทำให้เย็นตัวในสองลักษณะ ได้แก่ ปล่อยให้เย็นตัวตามปกติภายในเตา และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าการกระจายขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทุกตัวอย่างใกล้เคียงกันโดยอยู่ระหว่าง 8 ถึง 12 ไมโครเมตร ซึ่งไม่แตกต่างจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยก่อนเผา แสดงให้เห็นว่าการเผาและการเย็นตัวหลังเผาไม่ส่งผลให้อนุภาคของดินเกาลินเผาเกิดการเชื่อมติดกัน (Aggregate) จึงไม่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคของดินหลังเผา

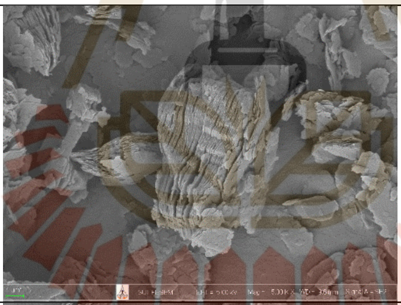
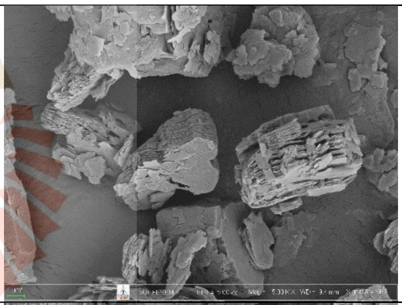
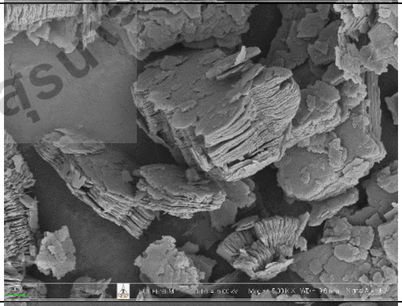
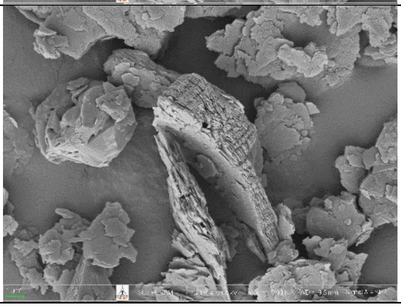
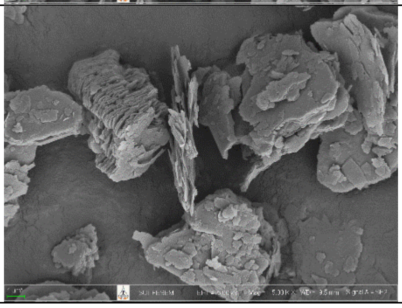


รูปที่ 4.9 รูปขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินเกาลินเผา วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer : LPA)

4.2.5 ผลของการเย็นตัวหลังเผาต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของดินเกาลินเผา

การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างระดับจุลภาคของดินเกาลินหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยการถูกทำให้เย็นตัวในสองลักษณะ ได้แก่ ปล่อยให้เย็นตัวตามปกติภายในเตาและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าผลึกของแร่เคโอลินไนท์ จากที่เคยเรียนซ้อนทับกันเป็นปึกแผ่นคล้ายหนังสือเรียงซ้อนกัน เริ่มเกิดการแตกออกจากกันและผลึกมีลักษณะเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเผาแคลไซน์จะทำให้น้ำในโครงสร้างของดินเกาลินหลุดออกไป ส่งผลให้ดินเกาลินถูกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากโครงสร้างที่อยู่ในรูปของผลึกเคโอลินไนท์เปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างเมตาเคโอลินที่อยู่ในรูปอสัณฐาน

ตารางที่ 4.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

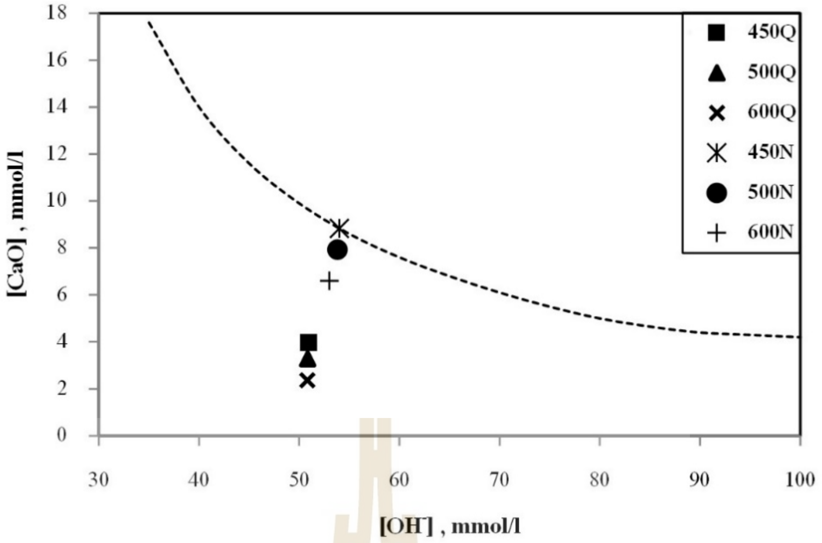
อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ (°C)	การเย็นตัวปกติภายในเตา (Normal)	การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quench)
450		
500		
600		

4.2.6 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก

รูปที่ 4.10 แสดงผลการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลินเผา แกนเอ็กซ์ (X-axial) และแกนวาย (Y-axial) แสดงปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออน, แคลเซียมไอออน ตามลำดับ เส้นประแสดงเส้นไอโซเทอร์มของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเป็นเส้นที่ถูกใช้แบ่งพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก พื้นที่การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะอยู่ใต้เส้นประ ส่วนพื้นที่ที่อยู่เหนือเส้นประแสดงบริเวณที่ไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก วัสดุปอซโซลานที่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้สูงจะต้องมีค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนและแคลเซียมไอออนที่ต่ำมาก นั่นหมายถึงยิ่งอยู่ห่างจากเส้นประลงมาด้านล่างมากยิ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้สูง

จากผลการทดลองพบว่าดินเกาลินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และถูกทำให้เย็นตัวแบบปกติและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว หลังถูกแช่ไว้ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 2 วัน ทุกตัวอย่างจะอยู่ด้านล่างของเส้นไอโซเทอร์มของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดยกเว้นตัวอย่าง 450N นอกจากนี้จากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการทำให้ดินเกาลินเย็นตัวอย่างรวดเร็วสามารถลดอุณหภูมิการเผาแคลไซด์ลงได้และยังคงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดี ดังจะเห็นได้จากความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของตัวอย่าง 450Q จะอยู่ในตำแหน่งใต้เส้นไอโซเทอร์มของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าตัวอย่าง 500N และ 600N ดังได้อธิบายเหตุผลไว้แล้วในหัวข้อ 4.2.2

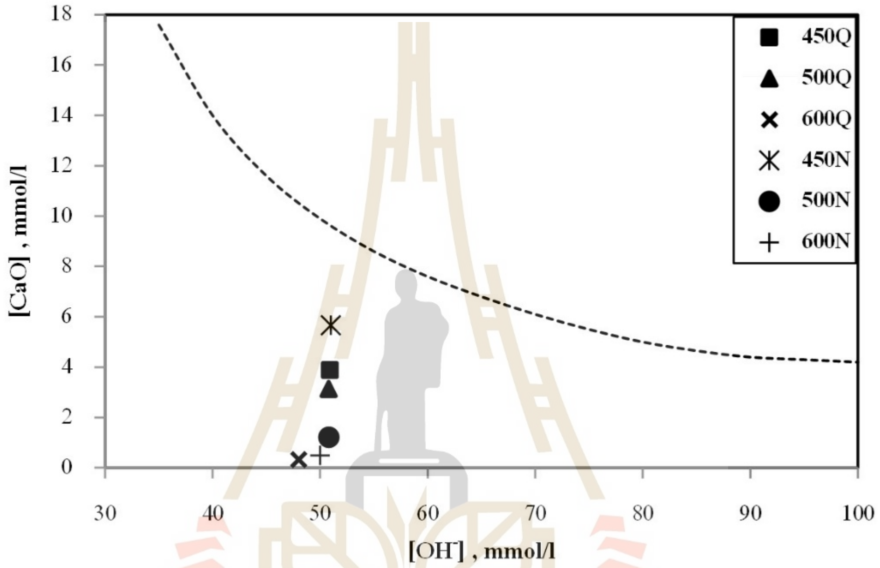
จากผลการทดลองยังพบว่าการทำให้ดินเกาลินเย็นตัวอย่างรวดเร็ว สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้รวดเร็วกว่าการเย็นตัวแบบปกติอย่างเห็นได้ชัด จะเห็นได้จากค่าของแคลเซียมไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนในระบบลดลงอย่างมากตั้งแต่ 2 วันแรก เพราะการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้ได้ดินเกาลินที่พร้อมจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้กระบวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและการสร้างสารประกอบใหม่เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.10 ผลการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ 2 วัน โดยการถูกทำให้เย็นตัวในสองลักษณะ ได้แก่ ปล่อยให้เย็นตัวตามปกติภายในเตาและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว

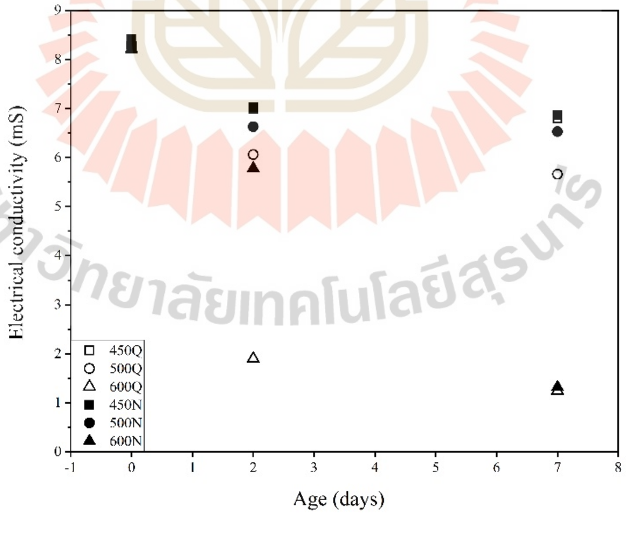
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลินเผาหลังถูกแช่ไว้ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 7 วัน พบว่าทุกตัวอย่างแสดงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่าง 450N เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนลดลงจาก 8.8 mmol/l เหลือ 5.7 mmol/l และไฮดรอกไซด์ไอออนลดลงจาก 54 mmol/l เหลือ 51 mmol/l เมื่อใช้เวลาในการบ่มจาก 2 วันเป็น 7 วัน เนื่องจากสำหรับวัสดุปอซโซลานที่เกิดปฏิกิริยาได้ช้าต้องอาศัยเวลาในการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 4.11 ผลการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ 7 วัน โดยการถูกทำให้เย็นตัวในสองลักษณะ ได้แก่ ปล่อยให้เย็นตัวตามปกติภายในเตา และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว

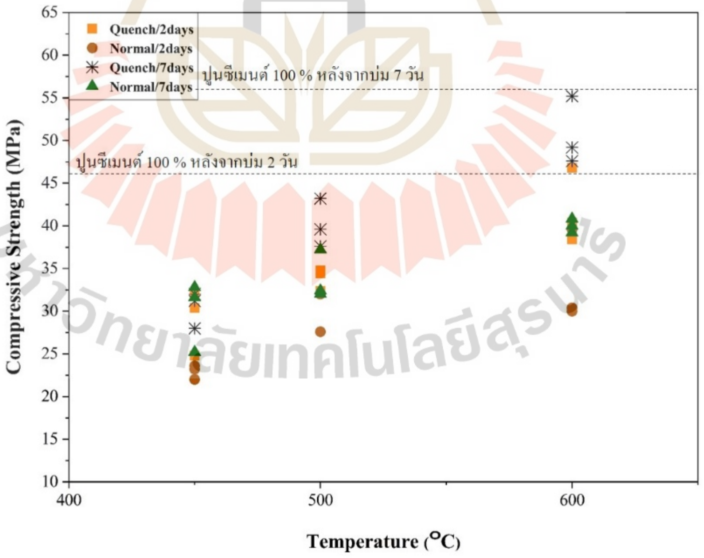
นอกจากนี้ยังพบว่าการทำให้ดินเกาลินเย็นตัวอย่างรวดเร็วสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้รวดเร็วกว่าการเย็นตัวตามปกติ โดยหากเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง 600N และ 600Q จะพบว่าตัวอย่าง 600Q เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้สูงสุดและเกือบสมบูรณ์ โดยค่าความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนลดลงจาก 2.3 mmol/l เหลือ 0.3 mmol/l และไฮดรอกไซด์ไอออนลดลงจาก 50.8 mmol/l เหลือ 48 mmol/l ในขณะที่ตัวอย่าง 600N มีค่าความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนลดลงจาก 6.6 mmol/l เหลือ 0.5 mmol/l และไฮดรอกไซด์ไอออนลดลงจาก 53 mmol/l เหลือ 50 mmol/l เมื่อใช้เวลาในการบ่มจาก 2 วันเป็น 7 วัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการนำไฟฟ้าของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ขณะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ที่เวลา 2 วันและ 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยพบว่าค่าการนำไฟฟ้าในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยาลดลงอย่างมากและลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับดินเกาลินเผาได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังเห็นได้ชัดว่าในทุกตัวอย่างของการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะมีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่าการเย็นตัวภายในเตา เนื่องจากมีปริมาณเมตาเคโอลินในปริมาณที่สูงกว่าและปริมาณอสัณฐานเมตาเคโอลินนี้ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้สูงกว่าเช่นกัน



รูปที่ 4.12 ผลการลดลงของค่าการนำไฟฟ้าของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ 2 และ 7 วันโดยการทำให้เย็นตัวในสองลักษณะ ได้แก่ ปล่อยให้เย็นตัวตามปกติภายในเตาและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว

4.2.7 ผลของอุณหภูมิการเผาและการเย็นตัวหลังเผาต่อค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยดินเกาลินเผาในปริมาณร้อยละ 20 และ 50 โดยน้ำหนัก

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยดินเกาลินเผาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก หลังการบ่มเป็นเวลา 2 และ 7 วัน แสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากอุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นส่งผลให้ดินเกาลินเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทั้งหมด มีค่าสูงกว่าค่าความต้องการขั้นต่ำของปูนซีเมนต์คือที่ 19 MPa (ASTM C150, 2003) และการทำให้ดินเกาลินเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าการปล่อยให้ดินเย็นตัวตามปกติในเตาเผา เนื่องจากการปล่อยให้ดินเกาลินเย็นตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้ดินเกาลินเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีกว่าการปล่อยให้เย็นตัวตามปกติในเตาเผา (ดังอธิบายในหัวข้อ 4.2.6) ภายหลังการบ่ม 7 วัน พบว่าตัวอย่าง 600Q มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 51 MPa ซึ่งมีความแข็งแรงเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์สำหรับงานโครงสร้างที่ไม่มีการเติมดินเกาลินเผา ซึ่งมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 57 MPa (ค่าเฉลี่ยจากการทดลองวัดกำลังรับแรงอัด 3 ครั้ง)

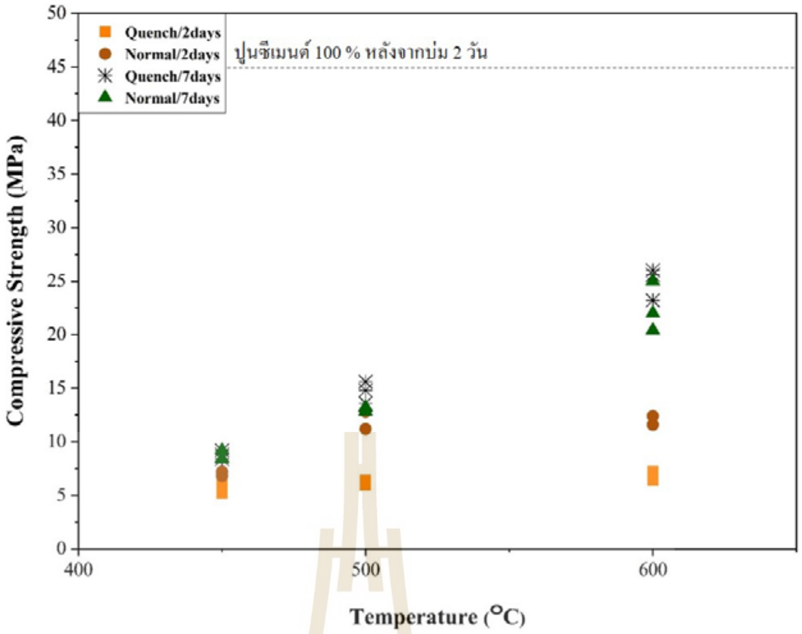


รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และถูกทำให้เย็นตัวในสองลักษณะ ได้แก่ ปล่อยให้เย็นตัวตามปกติภายในเตา และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อายุการบ่ม 2 และ 7 วัน

แม้จากสมการที่ (1.1) จะแสดงให้เห็นว่าปริมาณดินเกาลินเผาสูงสุดที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้คือร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) อย่างไรก็ตามเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาในปริมาณดังกล่าวแล้วพบว่า หลังการบ่มเป็นเวลา 2 วัน และ 7 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของทุกตัวอย่างมีค่าระหว่าง 5.2 - 26 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งแตกต่างจากกรณีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เนื่องจากความแข็งแรงหลักของปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยดินเกาลินเผาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก คือปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำรวมกับความแข็งแรงที่ได้จากปฏิกิริยารองระหว่างดินเกาลินเผากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อันเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ในขณะที่ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำไม่ใช่ปฏิกิริยาหลักที่ทำให้เกิดความแข็งแรงในกรณีของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในกรณีดังกล่าวความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ต้องอาศัยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างดินเกาลินเผากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดได้สมบูรณ์ก็ต่อเมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเสร็จสมบูรณ์ก่อน ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการบ่มจาก 2 เป็น 7 วัน

เมื่อเทียบกำลังรับแรงอัดสำหรับการเย็นตัวภายในเตาและการเย็นตัวอย่างรวดเร็วพบว่ามีค่าที่ไม่ต่างกันมากนัก เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำมีไม่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับดินเกาลินเผา จึงส่งผลให้ดินเกาลินเผาไม่สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงในช่วงต้นนี้ได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

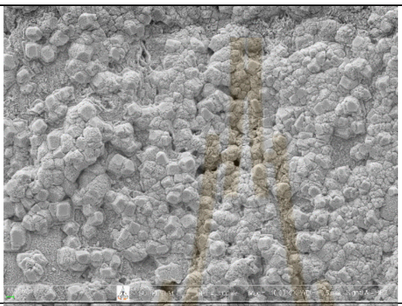
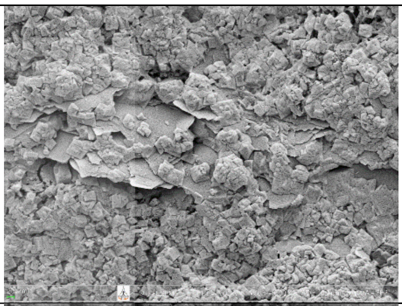
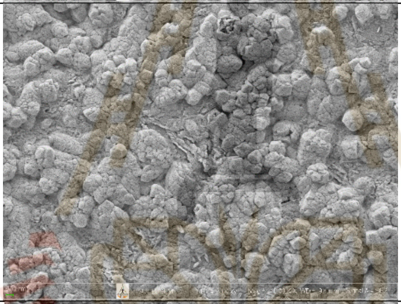
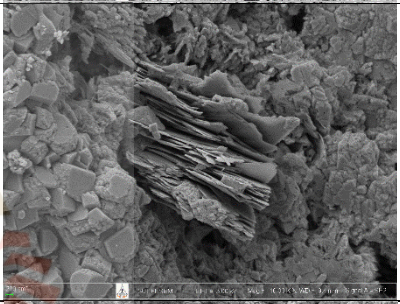
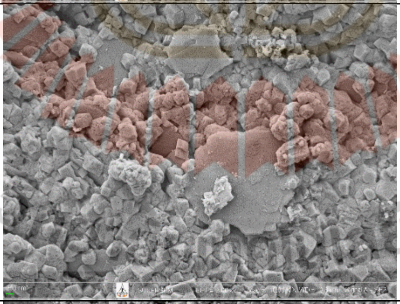
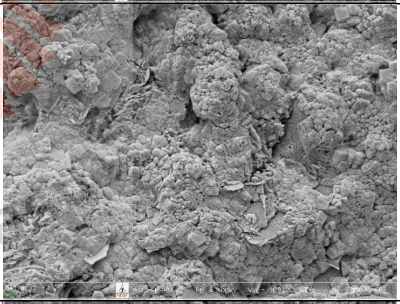
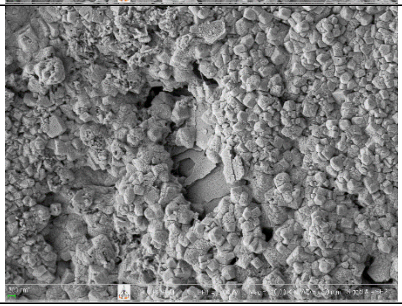
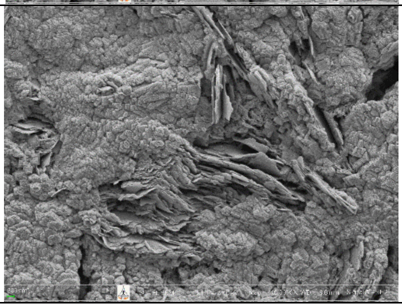


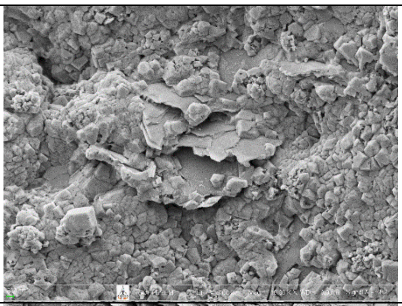
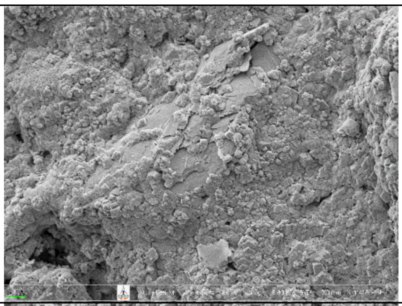
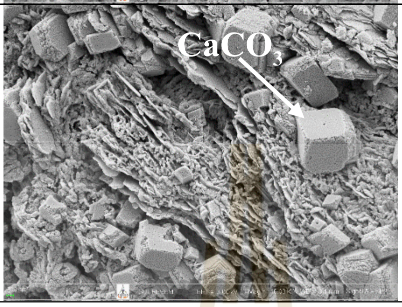
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของดินเกาลิน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และถูกทำให้เย็นตัวในสองลักษณะ ได้แก่ ปล่อยให้เย็นตัวตามปกติภายในเตา และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อายุการบ่ม 2 และ 7 วัน

4.2.8 ผลของการเย็นตัวหลังเผาต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยดินเกาลินเผาในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

โครงสร้างระดับจุลภาคของปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยดินเกาลินเผาในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทดสอบที่อายุการบ่ม 2 และ 7 วัน ซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในตารางที่ 4.4 พบผลึกทรงก้อนสี่เหลี่ยมของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) (ผล EDS แสดงในภาคผนวก ข) เมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นพบว่าผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตเริ่มลดลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำปฏิกิริยากับดินเกาลินเผาแล้วเกิดเป็นสารประกอบใหม่คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่อยู่ในบรรยากาศแล้วเกิดเป็นผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตได้น้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างของปูนซีเมนต์และดินเกาลินเผาเชื่อมประสารเป็นเนื้อเดียวกันและอนุภาคแพคตัวกันแน่นกว่าการเย็นตัวภายในเตาเผา และยังมีพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระมากกว่า บ่งบอกถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้มาก ซึ่งสอดคล้องกับผลกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 โครงสร้างระดับจุลภาคของปูนซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยดินเกาลินเผาในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ทดสอบที่อายุการบ่ม 2 และ 7 วัน

อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ (°C)	เวลาบ่ม (วัน)	การเย็นตัวปกติภายในเตา (Normal)	การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quench)
450	2		
	7		
500	2		
	7		

<table>
<tr><td rowspan="2">600</td><td>2</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>7</td><td>
</td><td> </td></tr>
</table>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการสังเคราะห์วัสดุที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากดินเกาลินหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450°C, 500°C และ 600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยการควบคุมการเย็นตัวหลังเผา และทำการศึกษาผลกระทบของการทำให้ดินเกาลินเผาเย็นตัวอย่างรวดเร็วต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์หลังจากแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผา ตลอดจนติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของดินเกาลินหลังผ่านการเผา และโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์หลังถูกแทนที่ด้วยดินเกาลินเผาพบว่า

ผลของอุณหภูมิการเผาจะแปรผันตรงกับความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก กล่าวคือ หากเผาดินเกาลินที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกสูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งอุณหภูมิการเผาที่ 600°C จะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกมากที่สุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 500°C และ 450°C ตามลำดับ

ดินเกาลินเผาที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้สูงกว่าการปล่อยให้เย็นตัวตามปกติในเตาเผา เนื่องจากการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วสามารถรักษาความเป็นอสัณฐานของดินเกาลินเผาได้มากกว่าการปล่อยให้เย็นตัวตามปกติ จึงทำให้สามารถคงรูปของเฟสอสัณฐานเมตาเคโอลินได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการทดลองพบว่าการสังเคราะห์วัสดุปอซโซลานิกโดยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วสามารถลดอุณหภูมิการเผาแคลไซด์ลงได้ 100°C จาก 600°C เหลือ 500°C เนื่องจากความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของดินเกาลินเผาที่ถูกปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500°C เทียบเท่าได้กับดินเกาลินที่ถูกปล่อยให้เย็นตัวตามปกติภายหลังการเผาด้วยอุณหภูมิ 600 °C

อัตราส่วนที่เหมาะสมและให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วมีผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเร็วกว่าการใช้ดินเกาลินเผาที่ถูกทำให้เย็นตัวตามปกติภายในเตาเผา โดยค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยดินเกาลินเผาที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังการบ่ม 2 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด ใกล้เคียงกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาที่เย็นตัวตามปกติภายในเตาเผา หลังการบ่ม 7 วัน เนื่องจากการปล่อยดินเกาลินเผาให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้ดินเกาลินเผาเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีขึ้น

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิการเผาแคลไซด์ดินเกาลินเพื่อผลิตวัสดุปอซโซลานิกสามารถลดลงได้โดยการทำให้ดินเกาลินเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังผ่านการเผา ซึ่งนับเป็นองค์ความรู้ใหม่อันเป็นประโยชน์ในทางวิศวกรรมและการรักษาสิ่งแวดล้อมในมิติด้านการลดการใช้พลังงาน การลดต้นทุนการผลิต รวมถึงการลดการปล่อยก๊าซเลือนกระจกอันเป็นต้นเหตุสำคัญของปัญหาสภาวะโลกร้อน งานวิจัยนี้เผยให้เห็นถึงองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตปูนซีเมนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไปในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ดินเกาลินเผาที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ควรมีการลดเวลาในการเผาลงจากเวลาเดิมเป็น 4 หรือ 5 ชั่วโมง เพื่อแสดงให้เห็นว่านอกจากการเผาแบบเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะสามารถลดอุณหภูมิการเผาดินเกาลินลงได้แล้ว ยังสามารถลดเวลาในการเผาลงได้อีกด้วย

5.2.2 ควรมีการขยายขนาดชิ้นงานทดสอบให้มีขนาดใกล้เคียงกับของจริงที่ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เพื่อสามารถเปรียบเทียบกับภาคอุตสาหกรรมได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

A. Tironi, M. A. Trezza, E. F. Irassar, A. N. Scianb. (2012). Thermal treatment of kaolin:effect on the pozzolanic activity. Procedia Materials Science, 43 – 350.

Alejandra Tironi, Monica A. Trezza, Alberto N.Scian, Edgardo F.Irassar. (2012). Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans. Journal of Construction and Building Materials , 216 – 281.

American Society for Testing and Materials,ASTM C150 : Standard Specification for Portland Cement,Annual Book of Standards, Philadelphia, 2001, Vol.04.01,149-155.

American Society for Testing and Materials, 2008. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM C618, Philadelphia, United States of America.

Alejandra Tironi, Fernanda Cravero, Alberto N. Scian, Edgardo F. Irassar. (2017). Pozzolanic activity of calcined halloysite-rich kaolinitic clays. Journal of Applied Clay Science 147, 11–18.

Balaguru, P., 2001. Properties of Normal and High-strength Concrete Containing Metakaolin. In V.M.Malthotra ed. Fly Ash, Silica Fume, Slag & natural Pozzolans in Concrete. proceeding seventh CANMET/ACI International Conference. Bangkok.pp.737-756.

Huang, Cheng-yi, Feldman, R.F., Hydration Reactions in Portland Cement Silica Fume Pastes.,(1985). Cement and Concrete Research.Vol.15, pp.585-592

Hermawan, Puti F. Marzuki.,(2015). Identification of source factors of carbon dioxide (CO2) emissions in concreting of reinforced concrete. Procedia Engineering 125, 692 – 698.

Hamdy El-Diadamony. Ahmed A. Amer.,(2018). Hydration and characteristics of metakaolin pozzolanic cement pastes. Journal of HBRC 14, 150 – 158.

Kamal ABDELLI, Mahfoud TAHLAITI, Rafik BELARBI.(2017). Influence of the origin of metakaolin on pozzolanic reactivity of mortars. Journal of Energy Procedia, 230–235.

Kostuch, J.A., Walters, V., and Jones, T.R. (2000). High Performance Concretes Incorporating Metakaolin : A Review.Concrete Economic and Durable Concrete through. pp.1799-18

Murat, M., and Comal, C.,(1983). Influence of Calcination Process of Kaolinnite on Mechanical Strength of hardened Metakaolinite. Cem. Concr. Vol.13(5).pp631-63

Neville, A. M.,(1996). Properties of Concrete. 4 nd ed. Addison Wesley Longman Ltd. England. Oriol, M., and Pera, J., 1995. Pozzolanic activity of metakaolin under microwave treatment. Cem. Concr. Res. Vol.25(2).pp 265-270.

Pekmezci, B.Y. and Akyuz, S. (2004). Optimum Usage of A Natural Pozzolan for The Maximum Compressive Strength of Concrete. Cement and Concrete Research. Vol.34. pp.2175-2179

Sofie Hollanders, Rieko Adriaens, Jørgen Skibsted, Özlem Cizer, Jan Elsen.(2016). Pozzolanic reactivity of pure calcined clays. Journal of Applied Clay Science, 552–560.

Salvador, S., (1995).Pozzolanic Properties of Flash-Calcined Kaolinnite A Comparative Study with Soak-Calcined Products. Cem.Concr. Vol.25. pp.102-112.

Trezza, M.A., Tironi, A., Scian, A.N., (2019). Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinite clays. J. Therm. Anal. Calorim. 117, 547-556.

Vance H. Dodson, PhD.,(1990).Concrete Admixtures. pg.159-193.

Wild, S., Khatib, J. M., and Craythorne, M. J.,(1997). Strength Development of mortar contain metakaolin. In Proceedings of the Fifth International Conference on Modern Building Materials, Strtcture and Techniques. Lithuania: Vilnius Gediminas Technical University. pp. 58-63.

Yuanyuan Liu, Shaomin Lei, Min Lin, Yang Li, Zhao Ye.,(2017). Assessment of pozzolanic activity of calcined coal-series kaolin. Journal of Applied Clay Science, 159–167.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

คำนวณหาร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผา

วิธีคำนวณหาร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผา

จากสมการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับน้ำ สามารถคำนวณหาร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาที่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้จนหมด แสดงดังการคำนวณต่อไปนี้

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \text{ ---->} 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \qquad (1.1)$$

จากสมการที่ (1.1) หากใช้ปูนซีเมนต์ 100 กรัม จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น $Ca(OH)_2$ 39.47 กรัม

หากใช้ $Ca(OH)_2$ 2 กรัม จะต้องเติมดินขาว 5 กรัม (ตามมาตรฐาน ASTM C311)

หากใช้ $Ca(OH)_2$ 39.47 กรัม จะต้องเติมดินเกาลินเผา $\frac{39.47}{2} \times 5 = 98.675$ กรัม

ดังนั้นถ้าคิดเป็นอัตราส่วน ปูน : ดินเกาลินเผา คือ 1 : 0.9867

หาร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาได้ดังนี้

จากสมการ ร้อยละดินเกาลินเผา $= \frac{\text{อัตราส่วนดินเกาลินเผา}}{\text{อัตราส่วนปูนซีเมนต์ + ดินเกาลินเผา}} \times 100\%$

$$= \frac{0.98675}{1 + 0.98765} \times 100\%$$

$$= 50\ \%$$

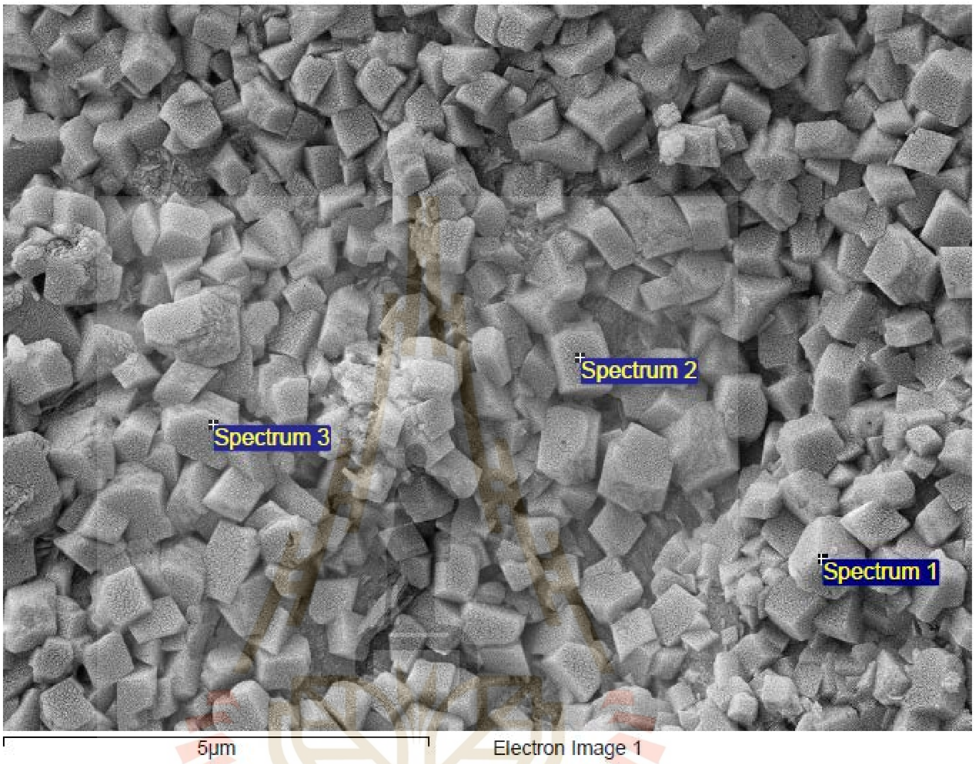
ดังนั้นดินเกาลินเผาที่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้จนหมด คือ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินเกาลินเผาด้วยเทคนิค EDS



Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	C	O	Ca	Total
Spectrum 1	Yes	12.06	49.33	38.61	100.00
Spectrum 2	Yes	12.55	49.72	37.73	100.00
Spectrum 3	Yes	11.62	42.68	45.70	100.00
Mean		12.08	47.24	40.68	100.00
Std. deviation		0.47	3.95	4.37	
Max.		12.55	49.72	45.70	
Min.		11.62	42.68	37.73	

All results in weight%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวพรสุดา โกฏค้างพลู เกิดเมื่อวันที่ 10 เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านหนองตะไก้ อำเภอหนองบุญมาก จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหนองบุญมากพิทยาคม อำเภอหนองบุญมาก จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2558 ภายหลังสำเร็จการศึกษาแล้วได้เข้าทำงานที่บริษัท สทรีมวอช (ประเทศไทย) จำกัด จากนั้นศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะที่ศึกษาอยู่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่บทความทางวิชาการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี