วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001

บทความวิจัย

การวิเคราะห์และทดสอบดินเลนจากบ่อดักตะกอนของเหมืองแม่เมาะเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน

สุชีวัน อินทุ่ง[1*] ไพรัช จรูญพัฒนพงศ์[2] และ อนุชา วรรณก้อน[3]

[1] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
[2] ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
[3] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sucheewan_nab@cmru.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 มีนาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 15 สิงหาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 29 สิงหาคม 2565
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 15 พฤศจิกายน 2565

บทคัดย่อ: ดินเลนในบ่อดักตะกอนของเหมืองแม่เมาะถูกนำมาทดสอบและผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน จากการวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่า ดินเลนมีแร่เคโอลิไนต์เป็นส่วนประกอบ เมื่อทดลองเผาตัวอย่างดินเลนที่อุณหภูมิในช่วง 700-900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และนำดินเลนเผามาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในอัตราส่วนร้อยละ 0,10 และ 20 โดยน้ำหนัก แล้วบ่มในน้ำปูนใสเป็นเวลา 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างจากกระบวนการพบเฟสของสารปอซโซลานิคในรูปของ Tobermorite ($Ca_5(Si_6O_{16})(OH)_2.4H_2O$) และ Foshagite ($Ca_4(Si_3O_9)(OH)_2$) หรือโครงสร้าง (CSH) จากนั้นนำดินเลนเผาที่ 100 และ 700-900 °C ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา โดยผสมดินเลนเผาร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และทรายละเอียดในสัดส่วนตามมาตรฐานการขึ้นรูปเป็นมอร์ต้าร์ในแบบพิมพ์ทองเหลืองขนาด 5 x 5 x 5 ซม. จากนั้นบ่มในน้ำปูนใสเป็นเวลา 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ทำการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ปอซโซลานตามมาตรฐาน มอก.849 พบว่า ตัวอย่างที่มีการผสมดินเลนเผาในช่วง 700-900 °C ผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีกำลังอัดที่เป็นไปตามมาตรฐาน ตัวอย่างที่ผ่านการเผา 800 °C ผสมร้อยละ10 โดยน้ำหนักบ่ม 28 วัน มีกำลังอัดที่สูงที่สุด จากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าดินเลนจากบ่อดักตะกอนในเหมืองแม่เมาะมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน

คำสำคัญ: ดินเลน; ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน; กำลังรับแรงอัด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001

บทความวิจัย

Analysis and Testing of Muddy Soil from the Sediment Pond of The Mae Moh Mine for Portland Pozzolan Cement Production

Sucheewan Inthung[1*], Pirat Jaroonpattanapong[2] and Anucha Wannagon[3]

[1] Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University

[2] Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

[3] National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency

[*]Corresponding author, E-mail: sucheewan_nab@cmru.ac.th

Received: 16 March 2022; Revised: 15 August 2022; Accepted: 29 August 2022
Online Published: 15 November 2022

Abstract: The clayed soil from the sediment-trapping sump of the Mae Moh mine was examined to produce Portland pozzolan cement. The X-ray diffusion (XRD) analysis showed that the clayed soil consisted of kaolinite. After heat-treated at temperatures in the range of 700-900 ^{o}C for 3 h, the clayed soil samples were mixed with ordinary Portland cement at the ratio of 0, 10 and 20 wt.%, and then cured in lime water for 3, 7 and 28 days, respectively. XRD results of the cement samples from the process revealed pozzolanic phases as Tobermorite ($Ca_5(Si_6O_{16})(OH)_2.4H_2O$) and Foshagite ($Ca_4(Si_3O_9)(OH)_2$) or CSH structure. Consequently, the 100 and 700-900 ^{o}C of heat-treated clayed soils were mixed with ordinary Portland cement and sand to form the mortar in the proportions of 0, 10 and 20 wt.% according to the mortar forming standard. The mortar sample was formed in a brass mold of size 5 x 5 x 5 cm., then cured in lime water for 3, 7 and 28 days respectively. The properties of the samples were tested according to the TIS 849 standard. The results showed that the samples with 10 wt.% of 700 - 900 ^{o}C heat-treated clayed soils achieved compressive strength according to standard. The samples with 10 wt.% of 800 ^{o}C heat-treated clayed soil after being cured for 28 days have maximum compressive strength. This study shows the potential of clayed soil from the sediment-trapping sump of the Mae Moh mine for use in Portland pozzolan cement production.

Keywords: Clayed soil; Portland pozzolan cement; compressive strength

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001

1. บทนำ

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุผสมที่ประกอบไปด้วยซิลิกา อลูมินา หรือซิลิกาและอลูมินา ที่มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย [1] แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดและมีความชื้นจะทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติแล้วเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตซึ่งมีสมบัติยึดประสานได้ [2] และมักจะนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ แต่ต้องใช้ปริมาณของสารปอซโซลานในปริมาณจำกัด [3] ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน หมายถึง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุปอซโซลาน และปูนไฮดรอลิกจะก่อตัวและแข็งตัวขึ้นได้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำหรือเมื่ออยู่ในน้ำ [3] วัสดุปอซโซลานมี 2 ประเภท ได้แก่ วัสดุธรรมชาติ เช่น แร่ไดอะตอมมา-เชียสเอิร์ท เถ้าภูเขาไฟ ดินขาวซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้จะต้องผ่านกระบวนการบด และเผาก่อนนำไปใช้ และวัสดุปอซโซลานอีกประเภทหนึ่งคือ วัสดุที่ได้จากกระบวนการผลิต เช่น เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าเป็นต้น [1] ดินขาวเป็นดินที่มีซิลิกา และอลูมินาที่อยู่ในรูปของ แร่เคโอลิไนต์สูง เมื่อนำมาการเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 800 ºC จะทำให้แร่เคโอลิไนต์เปลี่ยนเป็นเมตะเกาลินซึ่งอยู่ในรูปของอสัณฐาน และเมื่อเมตะเกาลินทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างปูนกับน้ำจะเกิดเป็นสารปอซโซลาน เรียกนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งผลของปฏิกิริยาอาจจะอยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีคุณสมบัติช่วยเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีต [4]

ตัวอย่างดินเลนจากบ่อดักตะกอนในเหมืองแม่เมาะนั้นมีแร่เคโอลิไนต์เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างถึงแม้จะไม่ใช่แร่ที่มีปริมาณมากที่สุดก็ตาม แต่เมื่อทดลองนำดินเลนไปเผาที่อุณหภูมิ 500 - 900 ºC [4] พบว่าแร่เคโอลิไนต์ในดินเลนได้กลายเป็นเมตะเกาลิน ตามผลการวิเคราะห์เฟสของตัวอย่างด้วย XRD [2] ทำให้ผู้วิจัยเห็นความเป็นไปได้ที่จะนำเอาดินเลนจากบ่อดักตะกอนในเหมืองแม่เมาะซึ่งมีปริมาณมากครอบคลุมพื้นที่ถึง 42,890 ตร.ม. และมีความลึกถึง 15 เมตร (ข้อมูลจาก กฟผ. ปี 2563) และกำลังจะลันบ่อมาทดลองผลิตเป็นสารปอซโซลาน เพื่อที่สามารถนำมาผลิตเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานเพื่อที่สามารถนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ที่มีต้นทุนการผลิตสูง และสร้างมลพิษ (CO_2) ให้กับสิ่งแวดล้อม ถ้าทำได้ก็จะทำให้ดินเลนที่เหลือทิ้งเหล่านี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างสูงสุด ที่ผ่านมามีการสังเคราะห์วัสดุปอซโซลานจากหลายแหล่งเพื่อผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างเช่น คอนกรีต [5] อิฐบล๊อกประสานที่ผลิตจากดินตะกอนน้ำประปา [6] และตัวดูดซับโลหะหนัก [7] และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของสารปอซโซลานประเภทเมตะเกาลินเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์จะอยู่ในช่วงร้อยละ 10-20 [5, 8]

2. วิธีดำเนินการวิจัย

นำตัวอย่างดินเลนจากบ่อดักตะกอนในเหมืองแม่เมาะมาแยกสิ่งเจือปนออก ล้างด้วยน้ำ ปั่นน้ำดินในถังปั่น ร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช. จากนั้น นำดินเลนไปอบแห้งที่ 100 ºC มาเผาที่ 500 - 900 ºC เป็นเวลา 3 ชม. และวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงแร่ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชั่น (XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001

นำดินเลนที่อบแห้งและเผาที่อุณหภูมิ 700-900 °C ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในอัตราส่วนดินเลนเผาร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และบ่มในน้ำปูนใสเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก [9] เป็นเวลา 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ จากนั้นวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นด้วย XRD

นำดินเลนเผาอุณหภูมิที่ 700-900 °C ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในอัตราส่วนดินเลนร้อยละ 0, 10 และ 20 และทรายละเอียดตามมาตรฐานในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายร้อยละ 1 : 2.75 [10] โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปเป็นมอร์ต้าร์ในแบบพิมพ์ทองเหลืองขนาดกว้าง 5 ซม. ยาว 5 ซม. ลึก 5 ซม. [11] และบ่มในน้ำปูนใสเป็นเวลา 3, 7 และ 28 วันจากนั้นทดสอบหาค่ากำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัดแบบทำลาย (Uniaxial Compressive Test รุ่น Model Controls S.P.A 50-C 46L2) ทดสอบหาร้อยละการดูดซึมน้ำ การหดและขยายตัว และการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5910LV

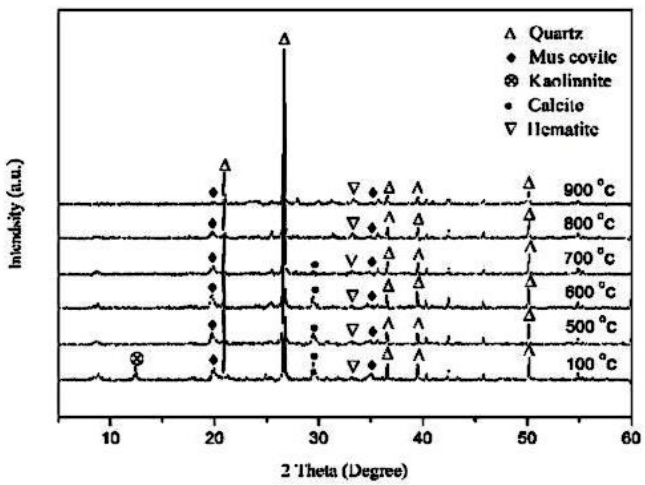
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ดินเลน

ผลการวิเคราะห์ XRD ตัวอย่างดินเลนอบที่ 100 °C พบ แร่ควอตซ์ มัสโคไวต์ แร่เคโอลิไนต์ แร่แคลไซต์ และเฮมาไทต์ ผล XRD ดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 500-900 °C พบแร่ควอตซ์ มัสโคไวต์และแร่เฮมาไทต์ ตามที่แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่า ตัวอย่างดินเลนที่เผาอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 500-900 °C ไม่พบแร่เคโอลิไนต์ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเมตะเกาลิน [4]

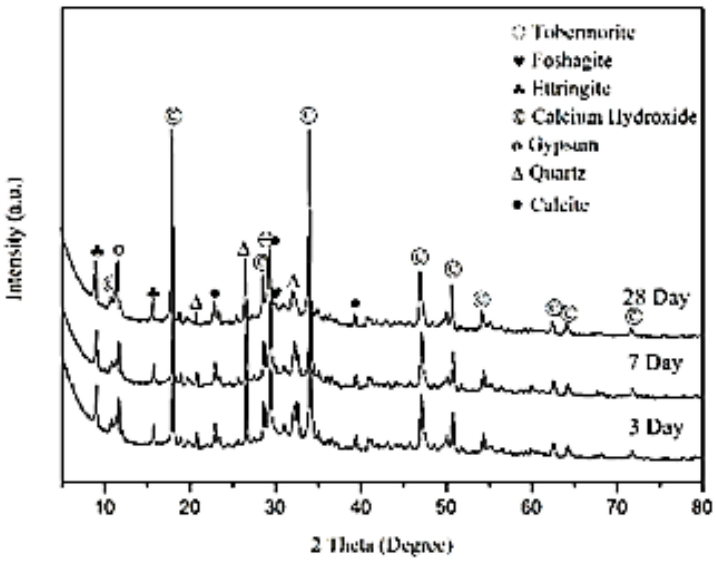
3.2 ผลการวิเคราะห์เฟส

ผลการวิเคราะห์เฟสของสารปอซโซลานในตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานเพสต์ 700-900 °C บ่ม 3,7 และ 28 วัน ในอัตราส่วนผสมดินเลนเผาร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ด้วย XRD พบ เฟส Tobermorite ($Ca_5(Si_6O_{16})(OH)_2.4H_2O$) และ Foshagite ($Ca_4(Si_3O_9)(OH)_2$) เป็นโครงสร้างแบบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นเฟสหนึ่งของสารปอซโซลาน [12] ตามกราฟที่แสดงในรูปที่ 2, 3 และ 4

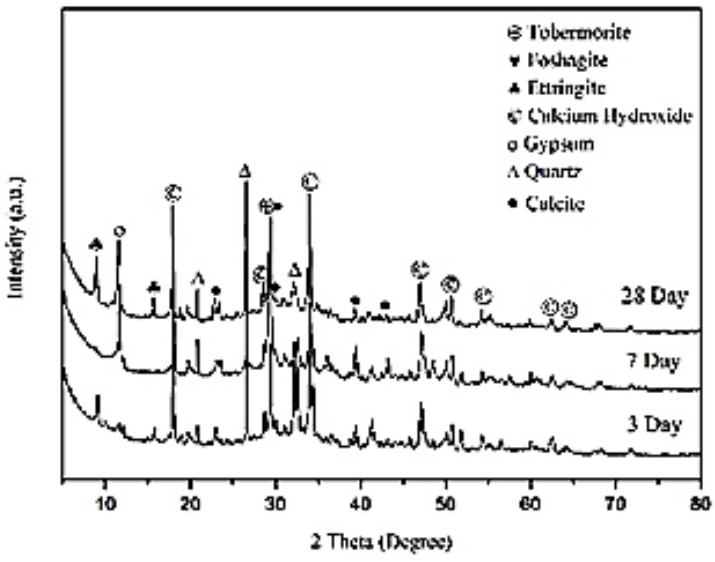


รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 100, 500 – 900 °C

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001



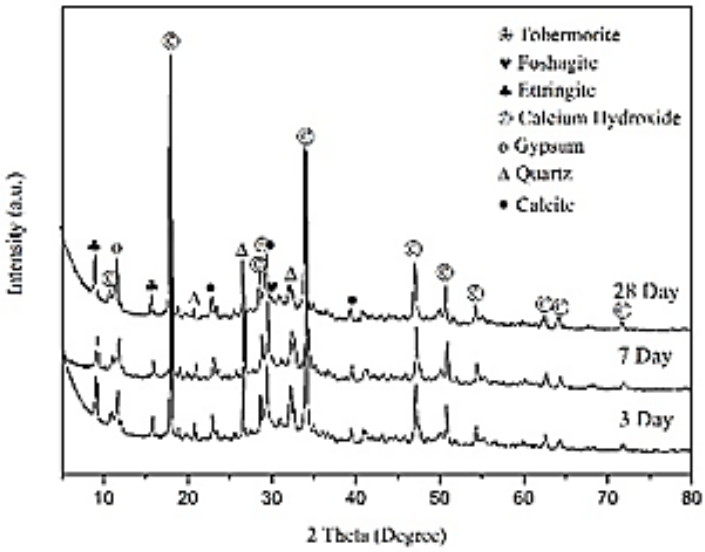
(ก)



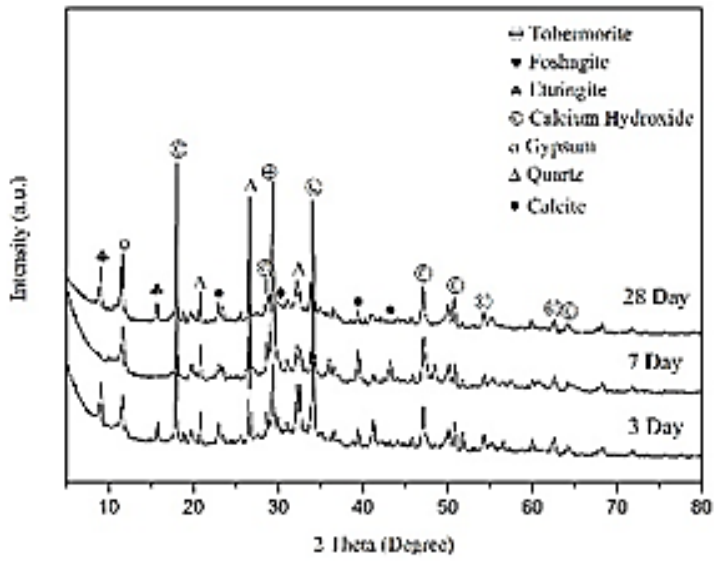
(ข)

รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์เฟสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมดินเลนเผา 700 ^{O}C (ก) อัตราส่วนร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก บ่ม 3,7 และ 28วัน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001



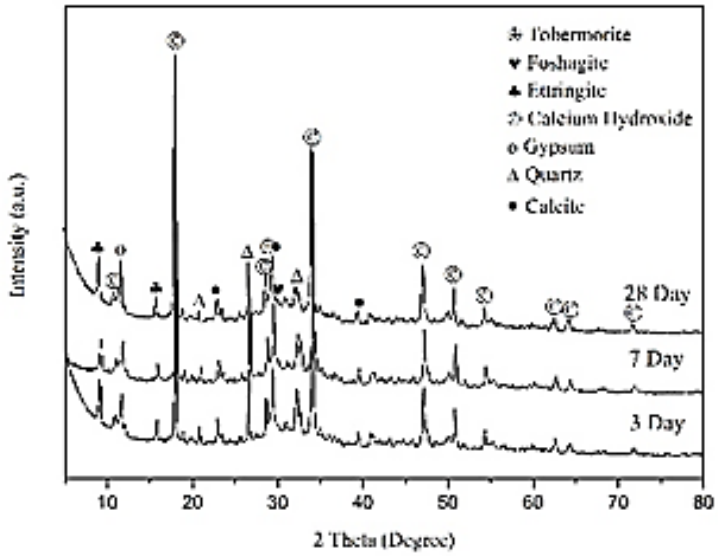
(ก)



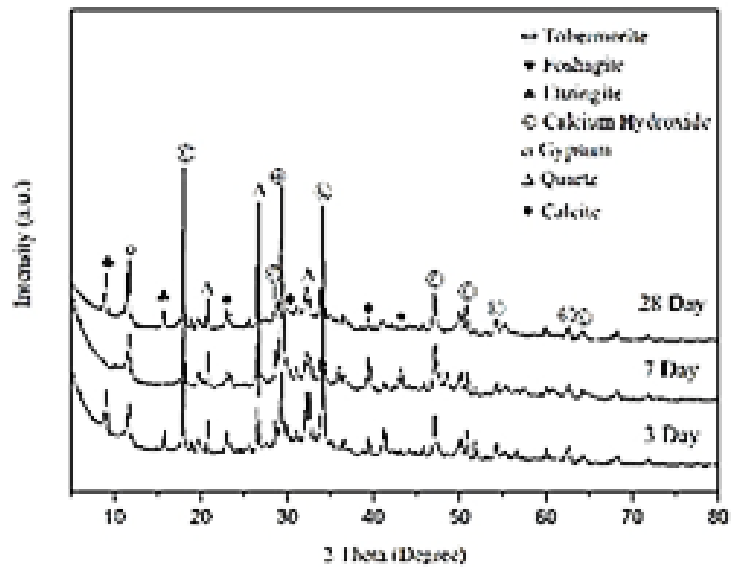
(ข)

รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์เฟสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมดินเลนเผา 800 ^{O}C (ก) อัตราส่วนร้อยล10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก บ่ม 3,7 และ 28 วัน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์เฟสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมดินเลนเผา 900 ^{O}C (ก) อัตราส่วนร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 บ่ม 3,7 และ 28 วัน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001

3.3 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์

ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิที่ 700-900 ^{O}C ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิที่ 700-900 ^{O}C ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานกำลังอัดเป็นไปตามมาตรฐาน (มอก.849-2556) คือไม่ต่ำกว่า 13, 20 และ 25 MPa เมื่อบ่ม 3,7 และ 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 5

ค่ากำลังอัดที่สูงคือ ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิที่ 800 ^{O}C ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก บ่ม 28 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30.68 MPa ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาที่ว่า เคโอลิไนต์จะเปลี่ยนเป็นเมตะเกาลินได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 800 ^{o}C [4] แต่เมื่อเพิ่มดินเลนเผาเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า ไม่มีตัวอย่างใดที่มีค่าความต้านทานกำลังอัดที่เป็นไปตามมาตรฐาน ถึงแม้ว่ากำลังอัดในช่วง 3 วันแรกจะมีค่าเกินมาตรฐานก็ตามซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยที่ว่าสารปอซโซลานประเภทเมตะเกาลินนั้นจะทำให้กำลังอัดของปูนซีเมนต์ในช่วงแรกดีก็ตาม [8] ดังแสดงในตารางที่ 2 และ รูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดของดินเลนเผาเพื่อผลิตเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานคือ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

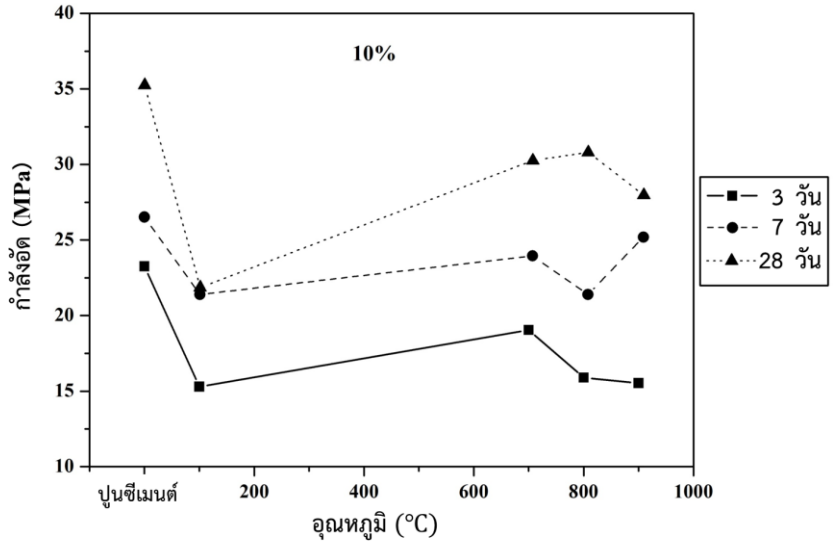
ตารางที่ 1 กำลังอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุปูนซีเมนต์ปอตแลนด์ และตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700–900 ^{o}C ในอัตราส่วนร้อยละ 0,10 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	กำลังอัด (MPa)		
	บ่ม 3 (วัน)	บ่ม 7 (วัน)	บ่ม 28 (วัน)
มอก.849-2562 (IP)	13	20	25
100	15.29	21.00	21.79
700	19.04	23.88	30.14
800	15.89	21.34	30.68
900	15.53	25.11	27.86

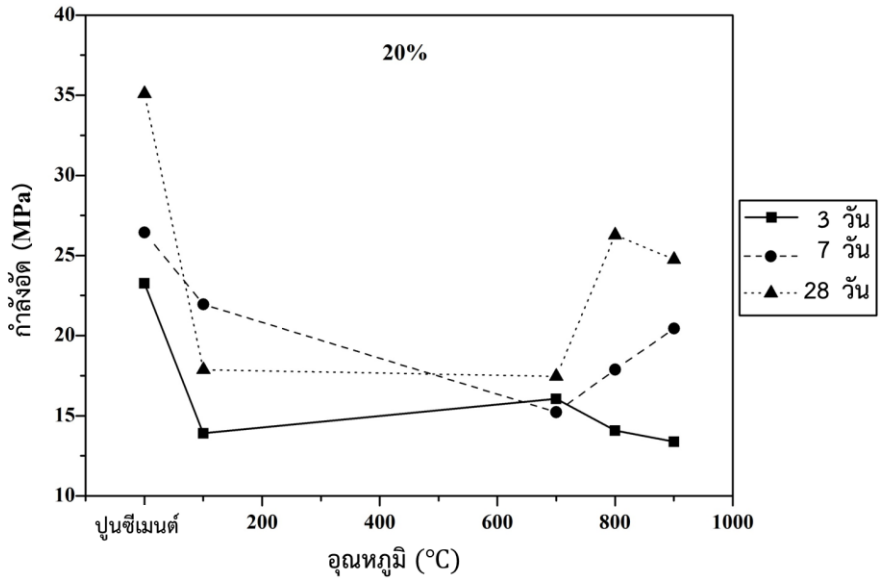
ตารางที่ 2 กำลังอัดของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700–900 ^{o}C ในอัตราส่วนร้อยละ 0,20 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก	กำลังอัด (MPa)		
	บ่ม 3 (วัน)	บ่ม 7 (วัน)	บ่ม 28 (วัน)
มอก.849-2562 (IP)	13	20	25
100	13.91	21.95	17.87
700	16.06	15.22	17.46
800	14.07	17.88	26.28
900	13.38	20.44	24.76

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001



รูปที่ 5 ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700–900 °C ร้อยละ 0,10 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 6 ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700–900 °C ผสมร้อยละ 0,20 โดยน้ำหนัก

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001

3.4 ผลการทดสอบค่าการหดและการขยายตัว

ผลการทดสอบค่าการหดและการขยายตัวของมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 700-900 ºC บ่ม 3, 7 และ 28 วัน ในอัตราส่วนผสมดินเลนเผาร้อยละ 10 และ 20 พบว่ามีค่าการหดและการขยายตัวในช่วงแคบ ๆ ระหว่าง -0.34 (หดตัว) ถึง +2.07 (ขยายตัว) ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4

3.5 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 100 ºC และ 700-900 ºC บ่ม 3, 7 และ 28 วัน ผสมดินเลนเผาร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า ตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมดินเลนเผา 800 และ 900 ºC มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาบ่มนานขึ้น ตรงข้ามกับตัวอย่างที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 100ºC ที่มีแนวโน้มลดลง ที่ดังตารางที่ 5 และ 6

3.6 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่ากำลังอัด กับค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ในอัตราส่วนร้อยละ 10

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่ากำลังอัด กับค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอซแลนด์ปอซโซลาน สำหรับตัวอย่างที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 800 ºC ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักซึ่งให้กำลังอัดสูงที่สุด พบว่า เมื่อเวลาบ่มมากขึ้นทำให้ กำลังอัดเพิ่มขึ้น จาก 15.89 เป็น 21.34 และ 30.68 MPa เมื่อบ่ม 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ในขณะที่ การดูดซึมน้ำก็มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 10.30 เป็น 10.73 และ 10.87 เมื่อบ่ม บ่ม 3,7 และ 28 วัน ตามลำดับเช่นกัน

จากแนวโน้มของกราฟจะเห็นว่า ทั้งอัตราการดูดซึมน้ำและกำลังอัดจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างสูงในช่วงแรก แต่จะมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อบ่มนานขึ้น โดยเฉพาะค่าอัตราการดูดซึมน้ำที่ลดลงเมื่อบ่ม 28 วัน ตามที่แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ของโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่บ่ม 28 วัน ที่จะเห็นโครงสร้างที่ค่อนข้างเป็นแผ่นทึบและมีรูพรุนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่บ่ม 3 และ 7 วัน ตามที่แสดงในรูปที่ 8 และ 9

ตารางที่ 3 ร้อยละการหดและขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700-900 ºC ในอัตราส่วนร้อยละ 10

ตัวอย่างที่ผสมดินเลนเผา 10%	ร้อยละการขยายตัว		
	บ่ม 3 วัน	บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน
100 ºC	6.25	6.88	5.29
700 ºC	-1.85	0.27	0.27
800 ºC	2.81	1.82	1.82
900 ºC	-0.67	0.66	0.66

ตารางที่ 4 ร้อยละการหดและขยายตัวของตัวอย่างมอร์ต้าร์ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700-900 ºC ในอัตราส่วนร้อยละ 20

ตัวอย่างที่ผสมดินเลนเผา 20%	ร้อยละการขยายตัว		
	บ่ม 3 วัน	บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน
100 ºC	6.25	6.88	5.29
700 ºC	-0.34	0.28	1.13
800 ºC	0.80	1.82	1.86
900 ºC	0.86	1.86	2.07

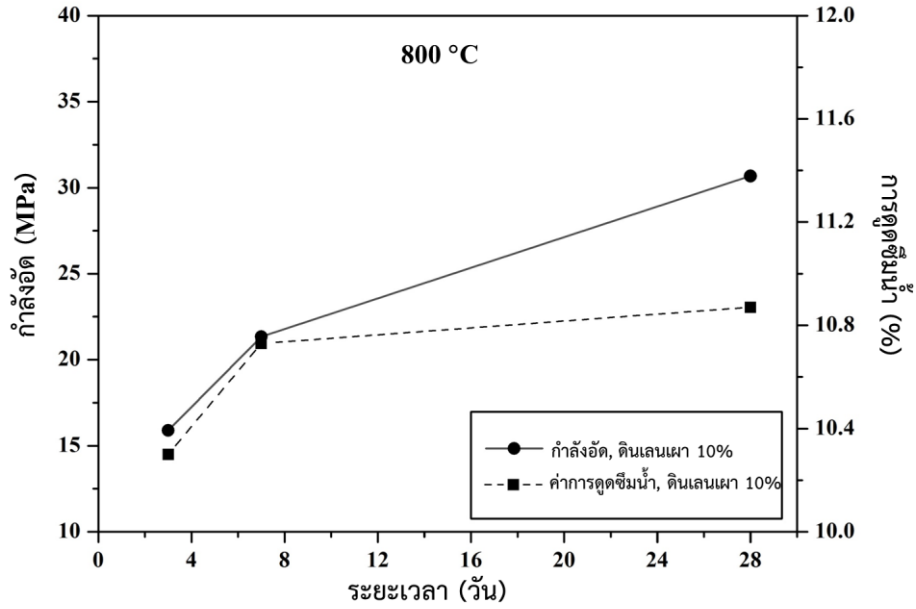
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001

ตารางที่ 5 ร้อยละการดูดซึมน้ำของตัวอย่างมอร์ต้าร์ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700-900 ℃ ในอัตราส่วนร้อยละ 10

ตัวอย่างที่ผสมดินเลนเผา 10%	ร้อยละการดูดซึมน้ำ		
	บ่ม 3 วัน	บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน
100 ℃	11.29	10.57	9.21
700 ℃	10.25	10.87	9.92
800 ℃	10.30	10.73	10.87
900 ℃	10.10	10.48	11.00

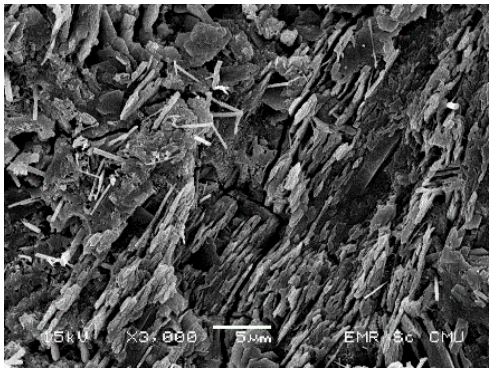
ตารางที่ 6 ร้อยละการดูดซึมน้ำของตัวอย่างมอร์ต้าร์ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเผาที่อุณหภูมิ 100 และ 700 - 900 ℃ ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างที่ผสมดินเลนเผา 20%	ร้อยละการดูดซึมน้ำ		
	บ่ม 3 วัน	บ่ม 7 วัน	บ่ม 28 วัน
100 ℃	11.71	10.58	9.21
700 ℃	10.56	9.3	11.57
800 ℃	10.89	10.60	11.71
900 ℃	10.58	11.69	11.52

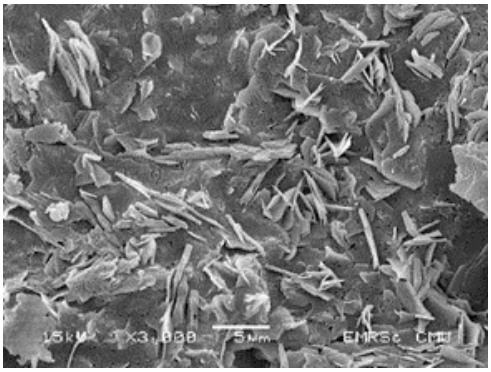


รูปที่ 7 กราฟกำลังอัด และการดูดซึมน้ำของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานที่ผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 800 ℃ ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

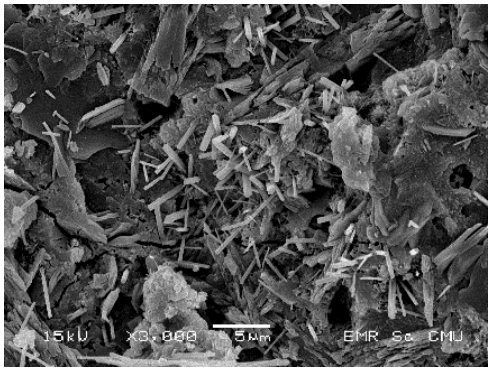
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001



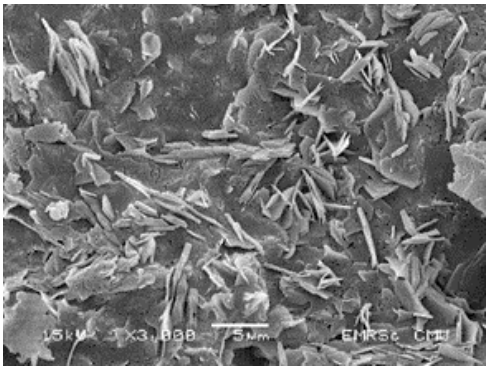
3 วัน



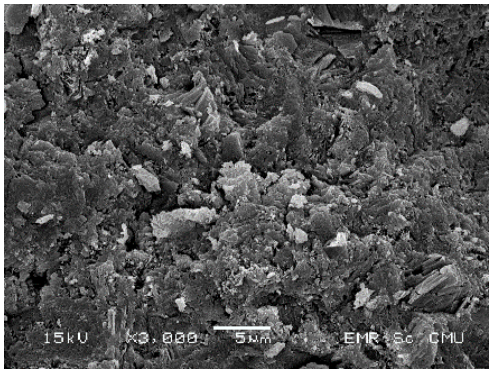
3 วัน



7 วัน

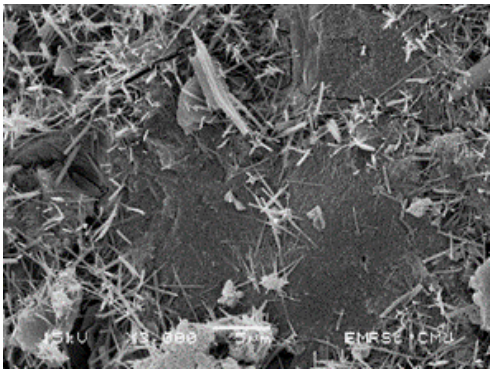


7 วัน



28 วัน

รูปที่ 8 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาบ่ม 3 7 และ 28 วัน



28 วัน

รูปที่ 9 ภาพ SEM ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 800 °C อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก บ่ม 3, 7 และ 28 วัน ซึ่งให้กำลังอัดสูงสุด 30.68 MPa

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001

3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย SEM

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา กับตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผา 800 ºC ในอัตราส่วนร้อยละ 10 บ่ม 3, 7 และ 28 วัน ซึ่งให้กำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างที่ทดลองทั้งหมด ในตัวอย่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเมื่อบ่ม 3 วัน มีลักษณะที่เป็นแผ่นผลึกหนาซ้อนกัน เมื่อบ่ม 7 วัน จะเห็นแท่งเอททริงไกต์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อบ่ม 28 วัน จะเกิดเป็นแผ่นหนาทึบขึ้นแต่ในขณะที่ตัวอย่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานผสมดินเลนเผา 800 ºCผสมดินเลนเผาร้อยละ 10 จะสังเกตว่า ในการบ่ม 3 และ 7 วันแรกนั้นจะเห็นแท่งเอททริงไกต์น้อยมากและเพิ่มมากขึ้นเมื่อบ่ม 28 วัน และเริ่มจะเห็นโครงสร้างที่เป็นแผ่นทึบ และพบมีรูพรุนที่มากกว่า ด้วยโครงสร้างแบบนี้น่าจะส่งผลต่อค่าของกำลังอัดที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

4. บทสรุป

จากผลการวิเคราะห์และทดสอบทั้งหมดพบว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาผสมดินเลนเผาที่อุณหภูมิ 700–900 ºC มีกำลังอัดที่เป็นไปตาม มอก.849-2556 และมีค่าการดูดซึมน้ำ และการขยายตัวต่ำ แสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ที่จะนำดินเลนจากบ่อดักตะกอนในเหมืองแม่เมาะที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700-900 ºC ผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยเฉพาะตัวอย่างดินเลนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 ºC ซึ่งให้กำลังอัดสูงสุดในการวิจัยนี้มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เหมืองแม่เมาะที่สนับสนุนทุนวิจัยนี้ และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้ใช้ ห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือในการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Pompasit, Pozzolan, Department of Science Service, 2002, Review Article, 1-2.

[2] H. Yanguatin, J.Tobón and J. Ramírez, Pozzolanic reactivity of kaolin clays, a review, Revista Ingenierta de Construction, 2017, 32(2), 13-24.

[3] TIS 849-2556, Portland Pozzolan Cement, 2013. (inThai)

[4] J. Sangsuwan and P. Yoddamrong, Mechanical properties of pozzolans material lightweight concrete by binary blend system, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thesis, Thailand, 2017. (inThai)

[5] J.A. Becerra-Duitama and D. Rojas-Avellaneda, Pozzolans: A review, Journal of Engineering and Applied Science Research, 2022, 49(4) 495-504.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.11.001

[6] A. Leeanansaksiri, W. Phochan and T. Pongnum, Development of interlocking lightweight cement block from sludge ash mixed pozzolan material, Engineering Journal of Research and Development, 2020, 31(1), 135-143.

[7] P. Satiman, P. Punrattanasin, S. Pattanapairoj and T. Kongsomboon, Behavior of adsorption and desorption of heavy metals on bentonite clay mixed with cement and pozzolanic materials by column leaching test, Engineering Journal of Research and Development, 2020, 31(2), 57-59.

[8] A. Shukla, N. Gupta, A. Gupta, R. Goel and S. Kumar, Natural pozzolans a comparative study: A review, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 804, 012040.

[9] T. Cheewaket, N. Tonglom, A. Tessoongnren and W. Chalee, Effect of calcium hydroxide solution on compressive strength of mortar using high volume fly ash as a binder, The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2021, 31(2), 278-287. (inThai)

[10] TIS 15 (12)-2525, Portland Cement, 1982. (inThai)

[11] ASTM C109/C109M-02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), 2020.

[12] S. Boonjaeng, Pozzolanic reaction and geopolymerization reaction of various kinds of clays and combustion ashes, Thesis, Chiang Mai University, Thailand, 2016.