การศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติความเป็นวัสดุประสานของตะกอนประปาและขี้เถ้าจากเตาเผาขยะด้วยปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน และการอบไอน้ำ

The Study on the Improvement in Cementitious Properties of Water Treatment Residue and Bottom Ash by Geopolymerization and Autoclave

ทรงสุดา วิจารณ์ [1*]

[1] คณะวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม จังหวัดกรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: songsuda@mut.ac.th*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้ศึกษาความเหมาะสมในการใช้ตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะมาเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควรที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ในสภาวะการบ่มแบบปกติ ตะกอนประปา ขี้เถ้าเตาเผาขยะ และส่วนผสมของวัสดุทั้งสองชนิดซึ่งมีสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต นำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ที่เกิดจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตเข้มข้น 10 M กับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 15 M ขี้เถ้าเตาเผาขยะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันมากกว่าตะกอนประปา เนื่องจากมีความเป็นอสัณฐาน นอกจากนี้การอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 210 °C ความดัน 2 MPa เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมงสามารถทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าเตาเผาขยะอบไอน้ำถึงเกณฑ์ขั้นต่ำร้อยละ 75 ของค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ล้วนตั้งแต่อายุบ่ม 7 วันได้ ในขณะที่การอบไอน้ำไม่มีประสิทธิภาพมากพอในการปรับปรุงสมบัติความเป็นวัสดุประสานของตะกอนประปาได้

คำสำคัญ: ตะกอนประปา, ขี้เถ้าเตาเผาขยะ, จีโอพอลิเมอร์, การอบไอน้ำ

Abstract

This study was conducted to investigate the feasibility in using water treatment sludge (WTS) and bottom ash (BA) from incineration plant as substituted cementitious materials at 10 and 20 percentage by weight of Portland cement (OPC). The pozzolanic reaction between WTS and BA slightly occurred at 28 curing period with normal curing conditions. WTS, BA and their mixtures, sources of aluminosilicate compounds, were precursors in producing geopolymer with alkaline solution of 10 M sodium silicate (Na_2SiO_3) and 15 M sodium hydroxide (NaOH). BA was more reactive in polymerization than WTS because of an amorphous structure. In addition, autoclaving at 210 °C and 2 MPa for 3 hours caused the blended cement and autoclaved BA mortar reaching the minimum 75 percentages of compression strength of pure OPC mortar since the 7 days of curing period whereas autoclaving WTS was not an effective pretreatment for the improvement in cementitious properties.

Keywords: Water treatment sludge, Incineration bottom ash, Geopolymer, Autoclave

1. คำนำ

โรงผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์ ตั้งอยู่อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี สามารถผลิตน้ำประปาได้วันละประมาณ 1,600,000 ลบม.ต่อวัน และเกิดตะกอนประปา (Water treatment sludge, WTS) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปาในปริมาณวันละ 23 ตัน โรงกรองน้ำประปามหาสวัสดิ์จะนำตะกอนประปาไปรีดน้ำ แล้วตากทิ้งไว้ที่ลานตากตะกอน เพื่อลดปริมาตรตะกอนประปาด้วยการระเหยโดยแสงแดด ตะกอนประปาที่ตากแห้งแล้วถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้บ้างเช่น การนำไปถมที่ดิน แต่ปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงทำให้โรงผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์ประสบปัญหาในการหาที่จัดเก็บและการจัดการตะกอนประปาจำนวนมากเหล่านี้ งานวิจัยมากมายได้พยายามศึกษาการนำตะกอนประปามาใช้ประโยชน์ในด้านการนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างเช่น วัสดุปูหลังคา อิฐเซรามิก อิฐมวลเบา งานคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์ เป็นต้น [1] เนื่องจากตะกอนประปามีองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในปริมาณที่มากและหากสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่อุณหภูมิปกติได้ จึงน่าเชื่อว่าเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในบางส่วนได้

นิคมอุตสาหกรรมบางปะอิน ตั้งอยู่ที่ตำบลคลองจิก อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ในปัจจุบันมีโรงงานเปิดดำเนินการทั้งสิ้น 85 โรง การจัดการขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นภายในนิคมอุตสาหกรรม จะทำการแยกขยะอันตรายออกจากขยะมูลฝอยทั่วไป ขยะอันตรายจะถูกจัดเก็บและขนส่งไปกำจัดอย่างถูกวิธีภายนอกนิคมอุตสาหกรรม โดยผู้รับจ้างที่ได้รับใบอนุญาตอย่างถูกต้องตามกฎหมายเท่านั้น นิคมอุตสาหกรรมบางปะอินจะทำการคัดแยกขยะทั่วไปที่ยังมีมูลค่าสามารถแปรใช้ใหม่ได้ ได้แก่ขยะโลหะและขยะพลาสติค ขยะที่แปรใช้ใหม่ได้ถูกเก็บรวบรวมไว้เพื่อรอผู้รับเหมามารับซื้อต่อไป ส่วนขยะเศษอาหารที่เกิดจากการบริโภคของคนงานและพนักงานจะถูกนำไปทิ้งในพื้นที่ภายในนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งจัดเตรียมไว้เพื่อให้เกิดการย่อยสลายของขยะอินทรีย์ให้เป็นปุ๋ยตามธรรมชาติ ขยะทั่วไปและขยะจากการขบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่มีการผสมหรือปนเปื้อนขยะอันตรายรวมกันในปริมาณวันละ 13 ตัน จะส่งไปกำจัดโดยการใช้เตาเผาขยะชนิดระบบไพโรไลติก (Pyrolytic incineration system) ขนาด 500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จำนวน 4 เตา ทำงานวันละ 8 ชั่วโมง ความสามารถในการกำจัดขยะได้สูงสุดได้เตาละ 4 ตันต่อวัน อุณหภูมิภายในห้องเผาขยะแบบไม่ใช้ออกซิเจนควบคุมไม่ให้ต่ำกว่า 700 -

960℃ สำหรับอุณหภูมิภายในห้องเผาควันจะต้องไม่ต่ำกว่า 1,000℃ ปริมาณขี้เถ้าจากเตาเผาขยะ (Bottom ash, BA) เกิดขึ้นในปริมาณร้อยละ 5 ของปริมาณขยะที่ป้อนเข้าสู่เตาเผาขยะในแต่ละวัน ขี้เถ้าจากเตาเผาขยะจะถูกนำไปทิ้งในบ่อพักขี้เถ้าชั่วคราวและพ่นด้วยน้ำเพื่อลดอุณหภูมิ หลังจากนั้นจะถูกขนไปทิ้งยังบ่อฝังกลบขี้เถ้าเตาเผาขยะแบบถาวร ซึ่งเป็นบ่อดินขุดที่มีดินเหนียวบดอัดเป็นวัสดุกันการรั่วซึมตั้งอยู่ภายในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรม จากการตรวจสอบสมบัติน้ำชะขี้เถ้าจากเตาเผาขยะ พบว่าบางช่วงเวลาตรวจพบปริมาณโลหะหนักแคดเมี่ยมในน้ำชะขี้เถ้ามากเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ซึ่งน้ำเสียจากบ่อฝังกลบดังกล่าวจะถูกสูบไปบำบัดที่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางของนิคมอุตสาหกรรมบางปะอิน เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมก่อนระบายสู่ลำรางสาธารณะต่อไป

ปริมาณตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะที่สะสมเพิ่มขึ้นในปริมาณที่มากขึ้นทุกปี และมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดปัญหาในการหาสถานที่ซึ่งเหมาะสมในการจัดเก็บในอนาคต และปัญหาด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะต่างมีองค์ประกอบของออกไซด์บางชนิด คือซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมออกไซด์ ที่เหมือนกับปูนซีเมนต์ แต่มีปริมาณมากน้อยต่างกันด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะนำตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะมาใช้เป็นวัสดุประสาน เป็นทางเลือกในการทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะ ในสภาวะการบ่มแบบปกติ และศึกษาการปรับปรุงสมบัติของตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะในการสังเคราะห์ให้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และการปรับปรุงสมบัติความเป็นวัสดุประสานด้วยการนำไปอบไอน้ำ

2. การออกแบบการทดลองและวิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุทดสอบและการจัดเตรียมวัสดุ

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีการผลิตและใช้งานสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตทั่วไป ทรายที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ได้ถูกนำมาทดสอบหาขนาดคละและค่าโมดูลัสความละเอียดตามวิธีมาตรฐาน ASTM C 136-96a พบว่ามีค่าขนาดคละและค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายอยู่เกณฑ์มาตรฐานที่เหมาะสมในการใช้งานก่อสร้างทั่วไป

ตะกอนประปา (WTS) จากโรงผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์ มีลักษณะคล้ายดินเหนียวที่มีความชื้นน้อย เนื่องจากผ่านกระบวนการรีดเอาน้ำออกไป ตะกอนประปาจะถูกนำมาตากแดดให้แห้ง แล้วเอาเข้าเครื่อง Los Angeles Abrasion เป็นเวลาประมาณ 3 - 4 ชั่วโมงแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งกำหนดไว้ว่าวัสดุปอซโซลานต้องมีร้อยละที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก เมื่อนำตะกอนประปาที่ผ่านตะแกรงขนาด 325 ไปผสมน้ำกลั่นในอัตราส่วนโดยปริมาตรของแข็งต่อของเหลว(S:L) เท่ากับ 1:2 วัดค่า pH ได้เท่ากับ 8.0 ที่อุณหภูมิ 20℃

ขี้เถ้าจากเตาเผาขยะ (BA) ถูกเก็บจากบ่อพักขี้เถ้าชั่วคราวจากเตาเผาขยะทั่วไป มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำปนเทาเข้ม มีความชื้นสูงเนื่องจากมีการฉีดพรมน้ำ ขี้เถ้าเตาเผาขยะถูกอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5℃ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดปริมาณความชื้นก่อนเข้าเครื่อง Los Angeles Abrasion เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C618 เมื่อนำไปผสมน้ำกลั่นในอัตราส่วนโดยปริมาตรของแข็งต่อของเหลว (S:L) เท่ากับ 1:2 วัดค่า pH ได้เท่ากับ 11.0 ที่อุณหภูมิ 20℃

ตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะที่เป็นเถ้าเม็ดละเอียดซึ่งผ่านตะแกรง 325 ถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าร้อยละของปริมาณธาตุโลหะออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบโดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF) แสดงผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ร้อยละโดยน้ำหนักของโลหะออกไซด์วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

ชนิดสารประกอบ	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก	
	ตะกอนประปา	ขี้เถ้าเตาเผาขยะ
SiO_2	53.5	8.59
Al_2O_3	29.7	8.36
Fe_2O_3	7.60	1.56
CaO	2.87	64.78
K_2O	3.20	1.12
Na_2O	0.10	1.05
MgO	1.31	4.09
SO_3	0.20	1.72
สารประกอบอื่น ๆ	6.33	8.73

ตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ทั้งสามชนิดรวมกันมีปริมาณมากถึงร้อยละ 90.8 โดยประมาณ ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ข้อกำหนดทางเคมีของวัสดุปอซโซลานตาม ASTM C618 (ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 70) ปริมาณสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พบในตะกอนประปามีเพียงร้อยละ 2.87 ปริมาณของซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ที่พบในตะกอนประปามีค่าไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618 แต่มีค่าปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไฮดรอกไซด์เทียบเท่า (Na_2O Equivalent) ร้อยละ 3.3 สูงกว่ามาตรฐานสมบัติทางเคมีของวัสดุปอซโซลานต้องไม่เกินร้อยละ 1.5

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าจากเตาเผาขยะทั่วไปของนิคมอุตสาหกรรมบางปะอิน พบปริมาณออกไซด์ของซิลิกา และอะลูมินารวมกันในปริมาณร้อยละ 18.51 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618 ปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไฮดรอกไซด์เทียบเท่า (Na_2O Equivalent) ร้อยละ 2.27 สูงกว่ามาตรฐานสมบัติสารปอซโซลานเล็กน้อย แต่มีปริมาณโลหะออกไซด์ของแคลเซียมสูงถึงเกือบร้อยละ 65 แสดงว่าขี้เถ้าเตาเผาขยะมีสมบัติความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองอยู่บ้าง การที่ปริมาณออกไซด์ของซิลิกาและอะลูมินาในขี้เถ้าจากเตาเผาขยะทั่วไปของนิคมอุตสาหกรรมบางปะอินมีปริมาณน้อยกว่าขี้เถ้าจากเตาเผาจากขยะชุมชนทั่วไป ซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 50 – 85 และปริมาณโลหะออกไซด์ของแคลเซียมในปริมาณไม่เกินร้อยละ 20 [2,3] เนื่องจากมีองค์ประกอบของขยะที่นำเข้าเตาเผาขยะแตกต่างกันซึ่งเป็นผลจากการคัดแยกขยะของชุมชนภายในนิคมอุตสาหกรรมบางส่วนออกไปเพื่อแปรไปใช้ใหม่ และมีการรับขยะจากขบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมบางส่วนไปกำจัดในเตาเผาขยะด้วยกัน

2.2 การออกแบบการทดลองและวิธีการทดสอบ

ในการศึกษาการนำตะกอนประปา และขี้เถ้าจากเตาเผาขยะมาใช้ในงานคอนกรีต ได้ทำการศึกษาการนำตะกอนประปาเพียงอย่างเดียวมาแทนที่ปูนซีเมนต์ การนำขี้เถ้าจากเตาเผาขยะเพียงอย่างเดียวมาแทนที่ปูนซีเมนต์ และศึกษาการนำตะกอนประปามาผสมกับขี้เถ้าเตาเผาขยะในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันมาแทนที่ปูนซีเมนต์ ในการพัฒนากำลังรับ

แรงอัดของมอร์ตาร์ กำหนดค่าปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนประปามาและขี้เถ้าเตาเผาขยะในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งอ้างอิงจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งได้มีการศึกษาการใช้ตะกอนประปาโรงกรองน้ำบางเขนเป็นวัสดุประสาน [4] และการใช้ขี้เถ้าจากเตาเผาขยะชุมชนมาเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน [5,6] การนำตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะมาพัฒนาเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์และการปรับปรุงสมบัติความเป็นวัสดุประสานด้วยอุณหภูมิและความดันที่สูงโดยการอบไอน้ำเพื่อเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน มีรายละเอียดของวิธีการศึกษาดังนี้

2.2.1 การศึกษาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างตะกอนประปาและขี้เถ้าจากเตาเผาขยะ

ในการศึกษาอัตราส่วนผสมของตะกอนประปากับขี้เถ้าเตาเผาขยะ (WTS:BA) ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของมอร์ตาร์ที่บ่มในน้ำที่อุณหภูมิปกติ ชุดตัวอย่างมอร์ตาร์ที่เตรียมจากตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะมีทั้งหมด 7 ชุดทดสอบ โดยค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตะกอนประปาต่อขี้เถ้าเตาเผาขยะ (WTS:BA) เท่ากับ 100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, 20:80 และ 0:100 ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุทดสอบ (%B) ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และชุดทดสอบมอร์ตาร์ควบคุมใช้วัสดุประสานปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (OPC100%) อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายขนาดคละมาตรฐานเท่ากับ 1:2.75 ทำการทดสอบการไหลแผ่เพื่อให้ได้ค่าปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสม (ให้ค่าร้อยละการไหลแผ่อยู่ในช่วง 110± 5) แล้วเทส่วนผสมทั้งหมดลงในแบบหล่อตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ขนาด 50 มม. x 50 มม. x 50 มม. หลังจากถอดแบบแล้วทำการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน ทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M – 95

2.2.2 การปรับปรุงสมบัติตะกอนประปาและขี้เถ้าในการเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์

ตะกอนประปาที่ใช้ทดลองเป็นเถ้าละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 325 ส่วนขี้เถ้าเตาเผาขยะจะถูกนำไปล้างน้ำและปรับค่าpH ให้เป็นกลางและอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้งาน การปรับปรุงสมบัติตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะให้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน 1) ศึกษาการปรับปรุงสมบัติตะกอนประปาเพียงอย่างเดียว 2) การปรับปรุงสมบัติขี้เถ้าเตาเผาขยะเพียงอย่างเดียว และส่วนที่ 3) การปรับปรุงสมบัติวัสดุผสมตะกอนประปาและขี้เถ้าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือค่า WTS:BA เท่ากับ 80:20, 50:50 และ 20:80 สารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้เตรียมจากสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่ค่าความเข้มข้น 10 M ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ค่าความเข้มข้น 15 M ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2SiO_3:NaOH) ที่ 3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักคือ 1:2, 2:2 และ 2:1 ปริมาณการเติมสารละลายอัลคาไลน์ในวัสดุทดสอบที่อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง (L:S) 2 ค่า คือ 0.2:1 และ 0.4:1 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาคือที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัสดุตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติเพื่อเป็นจีโอพอลิเมอร์แล้ว จะถูกนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์จะถูกนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบระยะเวลาบ่มจึงนำมาทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 109/C 109M – 95 เปรียบเทียบผลกับมอร์ตาร์ชุดควบคุมที่เป็นปูนซีเมนต์อย่างเดียว (OPC100%) ที่อายุบ่ม 28 วัน

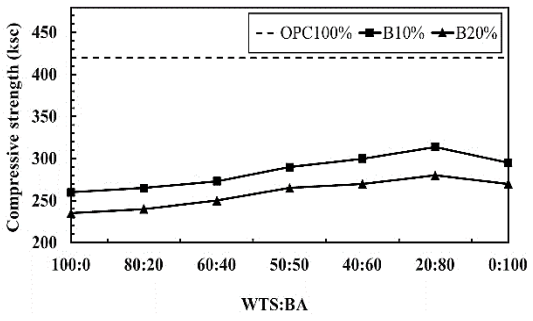
2.2.3 การปรับปรุงสมบัติตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะด้วยการอบไอน้ำ

ตะกอนประปาขนาดเถ้าละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 325 และขี้เถ้าเตาเผาขยะถูกนำมาปรับค่าpH ให้เป็นกลางแล้วนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ± 5°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง การปรับปรุงสมบัติความเป็นวัสดุประสานของตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะโดยการอบไอน้ำแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน คือส่วนที่ 1 ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของตะกอนประปาเพียงอย่างเดียว ส่วนที่ 2 ทำการปรับปรุงสมบัติขี้เถ้าเตาเผาขยะเพียงอย่างเดียว และส่วนที่ 3 ทำการปรับปรุงสมบัติของวัสดุผสมตะกอนประปาและขี้เถ้า (WTS:BA) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดจากผลการศึกษาในหัวข้อ 2.2.1 ศึกษาการปรับปรุงความเป็นวัสดุประสานด้วยการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 210°C ความดัน 2 MPa ระยะเวลาในการอบไอน้ำ 3 และ 6 ชั่วโมง โดยใช้เครื่อง Autoclave 38-3800 series 9901x0019 หลังจากอบไอน้ำตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะถูกนำมาเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มอร์ตาร์จะถูกบ่มในน้ำที่อุณหภูมิปกติเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดเวลานำมาทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 109/C 109M – 95 โดยเปรียบเทียบผลการศึกษากับค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ชุดควบคุมที่เตรียมจากปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (OPC100%) และชุดตัวอย่างมอร์ตาร์ที่เตรียมจากตะกอนประปากับขี้เถ้าที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำมาก่อน

3. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 ผลการศึกษาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างตะกอนประปาและขี้เถ้าจากเตาเผาขยะ

ในการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างตะกอนประปาต่อขี้เถ้าจากเตาเผาขยะ (WTS:BA) ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มากที่สุด โดยทำการทดสอบส่วนผสมที่ 7 อัตราส่วน การแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก (%B) เท่ากับร้อยละ 10 และ 20 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่มในน้ำที่อุณหภูมิปกติเป็นเวลา 28 วัน แสดงผลดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผลของอัตราส่วนผสมระหว่างกากตะกอนประปาต่อขี้เถ้าเตาเผาขยะ (WTS:BA) ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะบ่ม 28 วัน

เมื่อพิจารณาผลการนำตะกอนประปาเพียงอย่างเดียว (WTS:BA =100:0) มาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วันน้อยกว่ามอร์ตาร์ชุดควบคุม และการเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซิเมนต์ด้วยตะกอนประปาจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักยิ่งทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง แสดงว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนประปาเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์และทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานของ

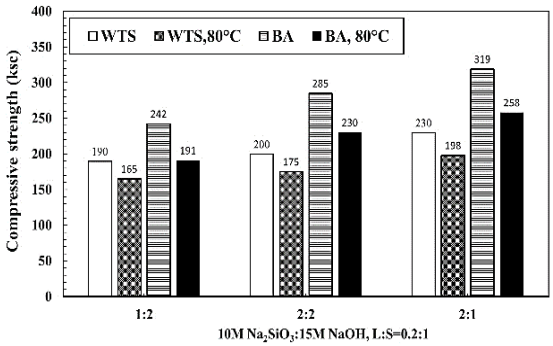
ปูนซีเมนต์น้อยลงไปด้วย แม้ว่าโลหะออกไซด์ของซิลิกาและอะลูมินาซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่พบในตะกอนประปาจากโรงกรองน้ำมหาสวัสดิ์มีปริมาณมากถึงร้อยละ 80 แต่ทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ได้ไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้ตะกอนประปาจากโรงกรองน้ำบางเขนเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ในการพัฒนาค่ากำลังอัดมอร์ตาร์ที่สภาวะบ่มชื้น[4] โครงสร้างของออกไซด์ของซิลิกาและอะลูมินาในตะกอนประปามีความเป็นผลึกสูง การชะละลายด้วย $Ca(OH)_2$ ในสภาวะการบ่มปกติได้ยาก ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานจากปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์ที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ผสมตะกอนประปาจึงมีปริมาณน้อย ไม่สามารถที่จะทดแทนการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์ได้

การนำขี้เถ้าจากเตาเผาขยะเพียงอย่างเดียว (WTS:BA =0:100) มาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่เตรียมจากขี้เถ้าเตาเผาขยะผสมปูนซีเมนต์มีค่าน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วน (OPC100%) การเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซิเมนต์ด้วยขี้เถ้าเตาเผาขยะจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ยิ่งทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลง แสดงว่าความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเองของขี้เถ้าเตาเผาขยะต่ำ ผลิตภัณฑ์ประสานจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างออกไซด์ของซิลิกาและอะลูมินากับ $Ca(OH)_2$ ของขี้เถ้าเตาเผาขยะไม่สามารถทดแทนผลิตภัณฑ์ประสานที่หายไปจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์ได้

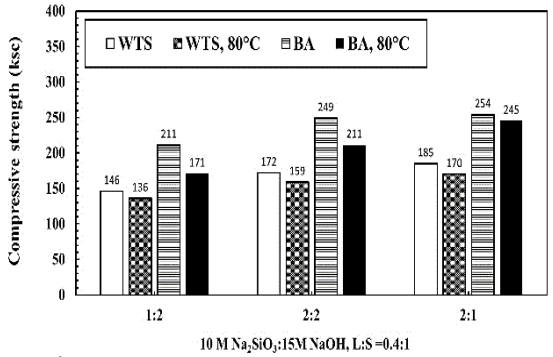
การนำตะกอนประปาผสมกับขี้เถ้าจากเตาเผาขยะที่อัตราส่วนผสม WTS:BA เท่ากับ 80:20, 60:40, 50:50, 40:60 และ 20:80 เพื่อเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 พบว่ามอร์ตาร์ที่เตรียมจากอัตราส่วน WTS:BA เท่ากับ 20:80 เป็นอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุด สามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มากกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนผสมอื่น ๆ แต่ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่เตรียมจากตะกอนประปาผสมขี้เถ้าเตาเผาขยะที่ค่า WTS:BA เท่ากับ 20:80 นี้ยังให้ค่ากำลังรับแรงอัดไม่ถึงร้อยละ 75 ของชุดมอร์ตาร์ควบคุมตามมาตรฐาน ASTM C618 แสดงว่าการนำตะกอนประปาผสมกับขี้เถ้าจากเตาเผาขยะมาใช้เป็นวัสดุประสานทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 20 ไม่สามารถพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ได้เท่ากับมอร์ตาร์ชุดควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (OPC 100%) ในสภาวะของการบ่มในน้ำตามปกติได้ เนื่องจากตะกอนประปาที่ผสมกับขี้เถ้าจากเตาเผาขยะในอัตราส่วนดังกล่าวไม่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานและเกิดผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานได้มากพอที่จะทดแทนผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานที่ลดลงเป็นผลจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้ภายในระยะเวลา 28 วัน

3.2 ผลการศึกษาการปรับปรุงสมบัติตะกอนประปาและขี้เถ้าจากเตาเผาขยะให้เป็นจีโอโพลิเมอร์

การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะให้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เพื่อใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่ค่าความเข้มข้น 10 M ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ค่าความเข้มข้น 15 M ค่า L:S เท่ากับ 0.2:1 และ 0.4:1 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันคือที่อุณหภูมิ 25°C และที่ 80°C แสดงผลดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ผลของค่า Na2SiO3:NaOH และอุณหภูมิต่อค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ค่า L:S เท่ากับ 0.2:1 อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 3 ผลของค่า Na_2SiO_3:NaOH และอุณหภูมิต่อค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ค่า L:S เท่ากับ 0.4:1 อายุบ่ม 28 วัน

จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ผสมตะกอนประปาเพียงอย่างเดียว และจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าเตาเผาขยะเพียงอย่างเดียว ที่ระยะเวลาในการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ได้แก่ค่าอัตราส่วน Na_2SiO_3:NaOH อุณหภูมิที่ใช้บ่มพอลิเมอร์ และค่า L:S ค่าอัตราส่วนผสมของสารละลายอัลคาไลน์ที่เตรียมจาก 10 M Na_2SiO_3: 15 M NaOH เท่ากับ 2:1 เป็นค่าอัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ที่ดีที่สุด ในการทำให้เกิดจีโอพอลิเมอร์ของทั้งตะกอนประปาและขี้เถ้าจากเตาเผาขยะ สารละลาย NaOH ที่เติมลงไปในวัสดุทดสอบจะทำหน้าที่ในการสลายโครงสร้างเดิมของซิลิกาและอะลูมินา ที่มีอยู่ในตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะ ส่วนสารละลาย Na_2SiO_3 จะทำหน้าที่เป็นตัวประสานในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ค่าอัตราส่วน Na_2SiO_3: NaOH เท่ากับ 2:1 เป็นค่าอัตราส่วนที่มีปริมาณสารละลาย Na_2SiO_3 มากกว่าค่าอัตราส่วนอื่นๆ จึงทำให้เกิดการเชื่อมประสานเป็นพอลิเมอร์ได้มากที่สุด สารละลายอัลคาไลน์ที่เตรียมจากค่า Na_2SiO_3: NaOH เท่ากับ 1:2 เป็นอัตราส่วนที่ใช้สารละลาย Na_2SiO_3 น้อยเกินไป ทำให้ความข้นเหลวมีมาก ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานมากเกินไปทำให้จีโอพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยาได้ไม่ดี แข็งตัวได้ช้า ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ Na_2SiO_3: NaOH เท่ากับ 1:2 ที่อายุบ่ม 28 วัน จึงน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนอื่น ๆ [7]

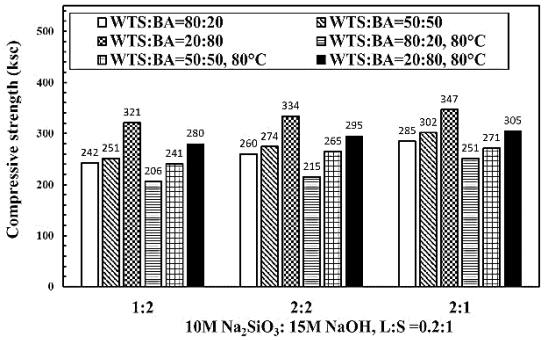
ค่าอัตราส่วน L:S เป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน หากค่า L:S น้อยเกินไป จะทำให้ปริมาณของสารละลายอัลคาไลน์ในส่วนผสมน้อยเกินไป ของแข็งหรือผงอะลูมิโนซิลิเกตไม่ได้สัมผัสกับสารละลายอัลคาไลน์อย่างทั่วถึง จึงถูกกระตุ้นให้ทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์-ไรเซชันได้ไม่ดี ในการศึกษานี้พบว่าค่าอัตราส่วน L:S เพิ่มขึ้นจาก 0.2:1 เป็น 0.4:1 ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลง แสดง

ว่าที่ค่า L:S เท่ากับ 0.4:1 เป็นค่าที่สัดส่วนที่มีสารละลายอัลคาไลน์มากเกินไป การเติมปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ในผงอะลูมิโนซิลิเกตในปริมาณที่มากเกินพอดี จะเกิดการชะล้างซิลิกาและอะลูมินาในตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะในปริมาณที่มากเกินกว่าการรวมตัวเป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ ทำให้มีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาอิสระเหลืออยู่และแทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้าง และไม่ทำปฏิกิริยาเชื่อมประสาน โครงสร้างจึงเกาะกันแบบหลวม ๆ ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง [8-10]

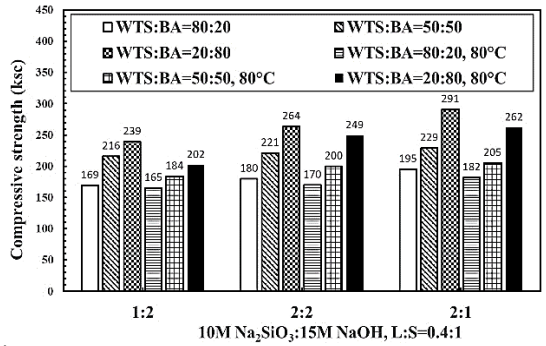
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการบ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน คือการอบแห้งที่อุณหภูมิ 25 °C และที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เกิดจากการบ่มที่อุณหภูมิ 25 °C ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์สูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ได้จากการอบที่อุณหภูมิ 80 °C แม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดี การก่อตัวของพอลิเมอร์เกิดได้เร็วขึ้น โดยเฉพาะในวัสดุที่มีค่าสัดส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูง แต่ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้บ่มวัสดุจะต้องเหมาะสมไม่สูงเกินไป การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะไม่เป็นการเร่งปฏิกิริยา แต่จะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของซิลิกาและอะลูมินาในลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบ อุณหภูมิที่สูงเกินไปยังทำให้ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว และเกิดการแตกร้าวภายในโครงสร้างได้มากกว่าการอบที่อุณหภูมิต่ำ

เมื่อใช้ขี้เถ้าเตาเผาขยะอย่างเดียวมาปรับปรุงสมบัติให้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ที่ค่า Na_2SiO_3:NaOH เท่ากับ 2:1 ค่า L:S เท่ากับ 0.2:1 และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อายุบ่ม 28 วัน เท่ากับ 319 ksc ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดตาม ASTM C-618 คือ ร้อยละ 75 ของชุดมอร์ตาร์ควบคุมที่เป็นปูนซีเมนต์ล้วน (ค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์อายุบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง 28 วัน มีค่าเท่ากับ 411 ksc) ในขณะที่ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เตรียมจากตะกอนประปามีค่าน้อยไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดตาม ASTM C-618 การที่ขี้เถ้าจากเตาเผาขยะสามารถนำมาปรับปรุงให้เป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ดีกว่าตะกอนประปาเป็นเพราะขี้เถ้าเตาเผาขยะเกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิในช่วง 700 – 960°C โครงสร้างซิลิกาและอะลูมินาในขี้เถ้าเตาเผาขยะ จึงมีความเป็นผลึกน้อยกว่าตะกอนประปา สามารถละลายในสารละลายด่างแก่อย่าง NaOH ได้ดีกว่า และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดีกว่าตะกอนประปา แม้ว่าในขี้เถ้าเตาเผาขยะจะมีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาน้อยกว่าในตะกอนประปาอยู่มากก็ตาม การที่จะทำให้ตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ดีขึ้นนั้น จำเป็นต้องทำการศึกษาวิธีการแคลไซด์ตะกอนประปาจาก โรงกรองน้ำมหาสวัสดิ์เพื่อทราบค่าอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม เช่นเดียวกับตะกอนประปาจากโรงกรองน้ำบางเขนคือนำไปเผาอุณหภูมิ 600°C เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง จึงจะเปลี่ยนโครงสร้างจากผลึกให้เป็นอสัณฐาน ที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้มากขึ้น [8]

การนำตะกอนประปามาผสมกับขี้เถ้าเตาเผาขยะที่ค่าอัตราส่วน WTS:BA เท่ากับ 80:20 , 50:50 และ 20:80 มาปรับปรุงให้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้สารละลายด่าง Na_2SiO_3: NaOH ที่ 3 อัตราส่วนคือ 1:2, 2:2 และ 2:1 ค่า L:S เท่ากับ 0.2:1 และ 0.4:1 ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 25 °C และที่ 80 °C แสดงดังรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 ผลของค่า Na_2SiO_3:NaOH และอุณหภูมิต่อค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ตะกอนประปาผสมขี้เถ้าที่ค่า L:S เท่ากับ 0.2:1 อายุบ่ม 28 วัน



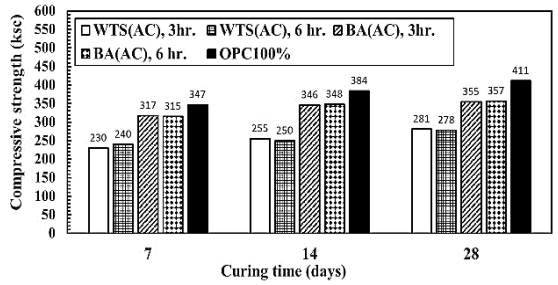
รูปที่ 5 ผลของค่า Na_2SiO_3:NaOH และอุณหภูมิต่อค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ตะกอนประปาผสมขี้เถ้าที่ค่า L:S เท่ากับ 0.4:1 อายุบ่ม 28 วัน

จากผลการศึกษาพบว่าการปรับปรุงสมบัติของวัสดุผสมของตะกอนประปากับขี้เถ้าเตาเผาขยะให้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์เกิดได้ดีเมื่อใช้สารละลายอัลคาไลน์ที่อัตราส่วน Na_2SiO_3: NaOH เท่ากับ 2:1 ค่า L:S เท่ากับ 0.2:1 และการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 25 °C มากกว่าที่อุณหภูมิ 80 °C ซึ่งผลการศึกษาในตอนนี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ใช้ตะกอนประปาเพียงอย่างเดียว และขี้เถ้าเตาเผาขยะเพียงอย่างเดียวมาปรับปรุงสมบัติให้เป็นจีโอพอลิเมอร์ จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เตรียมจากวัสดุผสม WTS:BA เท่ากับ 20:80 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เตรียมจากค่าอัตราส่วนอื่น ๆ โดยเมื่อใช้ค่าอัตราส่วน Na_2SiO_3: NaOH เท่ากับ 2:1 ค่า L:S เท่ากับ 0.2:1 และทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันที่อุณหภูมิ 25 °C ได้ค่ากำลังรับแรงอัดคิดเป็นร้อยละ 84 ของค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ชุดควบคุม การที่อัตราส่วนผสมที่ค่า WTS:BA เท่ากับ 20:80 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าที่อัตราส่วน 50:50 และ 80:20 ตามลำดับ เป็นเพราะที่อัตราส่วน WTS:BA เท่ากับ 20:80 มีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาในรูปที่เป็นอสัณฐานจากขี้เถ้าเตาเผาขยะมากกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ จึงเกิดการละลายใน NaOH ได้ดีกว่าและทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดีกว่า แม้ว่าจะมีปริมาณโดยรวมของออกไซด์ซิลิกาและอะลูมินาน้อยกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ ก็ตาม

3.3 ผลการศึกษาการปรับปรุงสมบัติตะกอนประปาและขี้เถ้าจากเตาเผาขยะด้วยการอบไอน้ำ

การศึกษาการพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ผสมตะกอนประปาอบไอน้ำ และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าเตาเผาขยะอบไอน้ำ โดยตะกอนประปาที่ผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 210°C ความดัน 2 MPa เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (WTS(AC),3 hr.) และ 6 ชั่วโมง (WTS(AC),6 hr.) ขี้เถ้าเตาเผาขยะที่ผ่านการอบไอน้ำที่สภาวะ

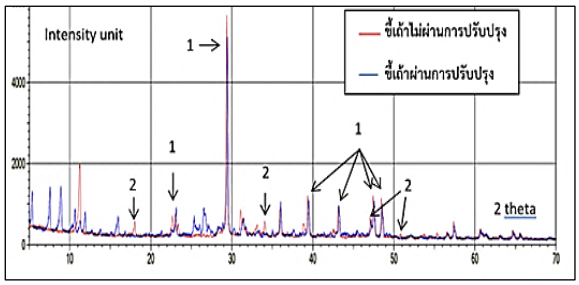
เช่นเดียวกันกับตะกอนประปาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (BA(AC),3 hr.) และ 6 ชั่วโมง (BA(AC), 6 hr.) ก่อนนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ ทำการบ่มมอร์ตาร์ในน้ำที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 7, 14, และ 28 วัน เปรียบเทียบผลกับมอร์ตาร์ชุดควบคุมที่เตรียมจากปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (OPC100%) แสดงผลดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมตะกอนประปาอบไอน้ำและมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าอบไอน้ำเป็นระยะเวลา 3 และ 6 ชั่วโมง

การนำตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะมาปรับปรุงสมบัติด้วยการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 210°C ความดัน 2 MPa ก่อนนำมาผสมปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าการนำวัสดุทดสอบมาอบไอน้ำเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือ 6 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์แตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นการอบไอน้ำนานถึง 6 ชั่วโมง จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่มีประโยชน์เท่าที่ควร มอร์ตาร์ที่เตรียมจากการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยขี้เถ้าเตาเผาขยะปรับปรุงสมบัติด้วยการอบไอน้ำ (BA(AC)) ให้ค่ากำลังรับแรงอัดตั้งแต่ 7 – 45 วัน มากกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ตะกอนประปาอบไอน้ำ (WTS(AC)) ในปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน ระยะเวลาในการอบไอน้ำเท่ากัน แสดงว่าการอบไอน้ำทำให้ขี้เถ้าเตาเผาขยะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างให้เป็นวัสดุประสานได้ดีกว่าตะกอนประปา

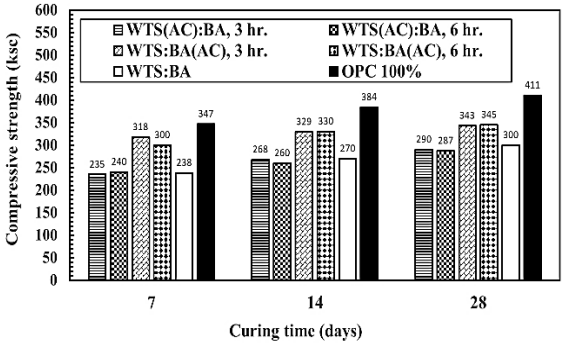
เมื่อนำขี้เถ้าเตาเผาขยะที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยการปรับค่า pH ให้เป็นกลางและทำการอบไอน้ำ 3 ชั่วโมง กับขี้เถ้าเตาเผาขยะที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) โดยใช้เครื่อง SHIMADZU/Japan รุ่น XRD-6100 แสดงผลดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 องค์ประกอบทางเฟสของขี้เถ้าเตาเผาขยะที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยการอบไอน้ำ 3 ชั่วโมง (1= Calcite และ 2 = Portlandite)

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD โดยเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเฟสของขี้เถ้าที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติเปรียบเทียบกับขี้เถ้าที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติแล้ว พบสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นผลึกของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต($CaCO_3$) ในรูปแคลไซด์ (Calcite) ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่ $Ca(OH)_2$ ในขี้เถ้าเตาเผาขยะที่ถูกกองทิ้งไว้เป็นเวลานาน ได้ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ พีคของผลึกแคลไซด์ในตำแหน่ง 2-theta (deg.) เท่ากับ 23.06, 29.40 และ 39.420 ของขี้เถ้าที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติมีความสูงลดลงจากเดิม เป็นผลจากการปรับลดค่า pH ของขี้เถ้าเตาเผาขยะ พีคของผลึกของ $Ca(OH)_2$ ในรูป portlandite ในตำแหน่ง 2-theta(deg.) เท่ากับ 18.06 และ 34.10 ของขี้เถ้าที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติมีความสูงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับขี้เถ้าที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติ ในขี้เถ้าที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติพบผลึกของสารประกอบที่ไม่เหมือนกับขี้เถ้าที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติที่ 2-theta (deg.) เท่ากับ 5.51°, 7.65°, 10.40°,11.96°, 15.79°, 25.55°, 26.57° และ 27.15° ซึ่งยังไม่สามารถระบุชนิดของสารประกอบที่พบได้ ค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าอบไอน้ำมีค่าสูงใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วน คือคิดเป็นร้อยละ 90, 91 และ 86 ของชุดมอร์ตาร์ควบคุมที่ระยะบ่มเท่ากับ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

การนำวัสดุผสมระหว่างตะกอนประปากับขี้เถ้าเตาเผาขยะที่อัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดจากผลการทดลองในตอนที่ 3.1 คือ WTS:BA เท่ากับ 20:80 มาปรับปรุงสมบัติความเป็นวัสดุประสานด้วยการอบไอน้ำ และนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ส่งผลต่อการพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่มต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 8 ผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยตะกอนประปาไม่อบไอน้ำผสมกับขี้เถ้าเตาเผาขยะอบไอน้ำ WTS:BA (AC) ที่ผ่านการอบไอน้ำเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและ 6 ชั่วโมงให้ผลไม่แตกต่างกันมาก และให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ชุดควบคุม ตั้งแต่ที่ระยะบ่ม 7 วันขึ้นไป การนำตะกอนประปาไปอบไอน้ำ 3 ชั่วโมงก่อนผสมกับขี้เถ้าเตาเผาขยะที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำ (ชุดตัวอย่างมอร์ตาร์ WTS(AC):BA, 3 hr.) และตะกอนประปาที่ผ่านการอบไอน้ำ 6 ชั่วโมงก่อน



รูปที่ 8 ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมตะกอนประปาและขี้เถ้าอบไอน้ำเป็นระยะเวลา 3 และ 6 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ชุดควบคุม

นำมาผสมกับขี้เถ้าเตาเผาขยะที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำ (WTS(AC):BA, 6 hr.) ให้ค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ใกล้เคียงกับค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่เตรียมจากตะกอนประปาที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำและขี้เถ้าไม่ผ่านการอบไอน้ำ (WTS:BA) ที่ระยะบ่ม 7, 14 และ 28 วัน และการเพิ่มระยะเวลาในการอบไอน้ำของตะกอนประปาจาก 3 ชั่วโมงเป็น 6 ชั่วโมง ไม่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นแต่อย่างใด แสดงว่าการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 210°C ความดัน 2 MPa ไม่สามารถทำให้ตะกอนประปามีความเป็นวัสดุประสานได้ดีขึ้นเท่าที่ควร และไม่สามารถพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดได้ถึงร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุมได้ องค์ประกอบทางเฟสของตะกอนประปาจะมีผลึกซิลิกาออกไซด์ในรูปของควอทซ์และผลึกของดินเหนียวเค-โอลิไนต์ ซิลิกาออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกจะสามารถทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ในอุณหภูมิมากกว่า 100 °C หรือสภาวะการบ่มด้วยไอน้ำได้ดีกว่าซิลิกาที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน[8,11,12] แต่ค่าสัดส่วน $CaO:SiO_2$ ควรมีค่าใกล้เคียง 1:1 ซิลิกาถึงจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ $Ca(OH)_2$ แล้วเกิดสารประกอบ CSH เช่น tobermolite และ xenotlite ที่เป็นผลิตภัณฑ์

เชื่อมประสานที่ทำให้มอร์ตาร์มีโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น หากสัดส่วน $CaO:SiO_2$ ไม่เหมาะสมจะเกิดผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน CSH เช่นผลึกของ α ไดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (αC_2SH) ซึ่งมีลักษณะเป็นเจลที่มีความพรุนสูง ซึ่งทำให้โครงสร้างซีเมนท์เพสต์ไม่แข็งแรง [13,14] ในตะกอนประปาโรงกรองน้ำมหาสวัสดิ์มีสัดส่วน $CaO:SiO_2$ น้อยมาก ดังนั้นการนำขี้เถ้าเตาเผาขยะมาผสมกับตะกอนประปาในอัตราส่วนที่เหมาะสม WTS:BA เท่ากับ 20:80 เป็นการเพิ่มปริมาณ CaO และทำให้ค่าสัดส่วน $CaO:SiO_2$ เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้มอร์ตาร์ที่ใช้ตะกอนประปาผสมกับขี้เถ้าเตาเผาขยะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ากว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ตะกอนประปาอบไอน้ำเพียงอย่างเดียว

4. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในการนำตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะซึ่งเป็นของเสียมาปรับปรุงสมบัติในด้านความเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ในงานคอนกรีต สามารถสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในอนาคต โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ในการศึกษาสมบัติความเป็นวัสดุประสานของตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 – 20 โดยน้ำหนัก พบว่าการนำตะกอนประปามาผสมกับขี้เถ้าเตาเผาขยะในอัตราส่วน WTS:BA เท่ากับ 20:80 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้สูงกว่าการใช้ตะกอนประปาเพียงอย่างเดียวหรือขี้เถ้าเตาเผาขยะเพียงอย่างเดียว แต่ค่ากำลังรับแรงอัดยังไม่สูงถึงร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วน แสดงว่าตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะไม่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกันได้ดีเท่าที่ควรที่สภาวะการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง

2) ผลการศึกษาสมบัติความเป็นวัสดุประสานของตะกอนประปาในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 – 20 โดยน้ำหนัก ในการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่สภาวะการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง พบว่าตะกอนประปาไม่สามารถเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ แม้ว่าในตะกอนประปาจะมีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาอยู่มาก แต่ความเป็นผลึกของสารประกอบทำให้การชะละลายใน $Ca(OH)_2$ ได้ไม่ดี จึงเกิดผลิตภัณฑ์ประสานได้น้อย

3) ในการศึกษาการปรับปรุงสมบัติตะกอนประปาให้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ที่เตรียมจาก 10 M Na_2SiO_3: 15 M NaOH ที่สัดส่วน Na_2SiO_3: NaOH เท่ากับ 2:1 ค่า L:S เท่ากับ 0.2:1 และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นวัสดุประสานของตะกอนประปาได้ เนื่องจากความเป็นผลึกของซิลิกาจึงชะละลายใน NaOH ได้น้อย ควรศึกษาวิธีการที่จะเปลี่ยนโครงสร้างซิลิกาในตะกอนประปาจากโรงกรองน้ำมหาสวัสดิ์ ให้เป็นอสัณฐานเช่นการทำแคลไซด์ก่อนนำไปใช้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์

4) การนำตะกอนประปามาอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 210°C ความดัน 2 MPa เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ไม่สามารถพัฒนาความเป็นวัสดุประสานของตะกอนประปาให้ดีขึ้นได้ ซิลิกาที่มีโครงสร้างแข็งแรงเป็นผลึกเช่นตะกอนประปาจากโรงกรองน้ำมหาสวัสดิ์ ควรนำไปศึกษาการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในงานมอร์ตาร์ที่บ่มในอุณหภูมิสูงกว่า 100°C หรือมอร์ตาร์อบไอน้ำมากกว่าการนำมาเป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ในสภาวะบ่มที่อุณหภูมิและความดันปกติ

5) จากผลการศึกษาในการนำขี้เถ้าเตาเผาขยะมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 – 20 โดยน้ำหนัก ในการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่สภาวะการบ่มชื้น พบว่าขี้เถ้าจากเตาเผาขยะในนิคมอุตสาหกรรมบางปะอิน มีองค์ประกอบของ CaO สูง แต่มีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาน้อย ทำให้ความเป็นวัสดุซีเมนต์ในตัวเองต่ำ จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ไม่ดีเท่าที่ควร และไม่สามารถที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้

6) การปรับปรุงสมบัติของขี้เถ้าเตาเผาขยะ และวัสดุผสมของตะกอนประปาและขี้เถ้าเตาเผาขยะให้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ที่เตรียมจาก 10 M Na_2SiO_3: 15 M NaOH ที่สัดส่วน Na_2SiO_3: NaOH เท่ากับ 2:1 ค่า L:S เท่ากับ 0.2:1 และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าการใช้วัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์คือขี้เถ้าเตาเผาขยะอย่างเดียว และตะกอนประปาผสมกับขี้เถ้าเตาเผาขยะที่อัตราส่วน WTS:BA เท่ากับ 20:80 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์เฉลี่ยสูงกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ชุดควบคุม อย่างไรก็ตาม ควรทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์ที่ค่าอื่น ๆ ผลของปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิบ่มที่ต่ำกว่า 80°C และระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มพอลิเมอร์ศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ระยะบ่มต่ำกว่า 28 วัน และควรศึกษาผลของอัตราส่วนผสมต่อสมบัติทางกลด้านอื่น ๆ ด้วย

7) การปรับค่า pH ให้เป็นกลางร่วมกับการอบไอน้ำที่ 210°C ความดัน 2 MPa เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง สามารถปรับปรุงสมบัติของขี้เถ้าเตาเผาขยะให้เป็นวัสดุประสานในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ดีกว่าขี้เถ้าเตาเผาขยะที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสมบัติ การศึกษาวิจัยเพิ่มเติมทางโครงสร้างทางจุลภาคของขี้เถ้าเตาเผาขยะที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติ และโครงสร้างทางจุลภาคของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เพื่ออธิบายถึงปฏิกิริยาทางเคมี และชนิดของผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ขึ้นได้

8) การศึกษาในรายละเอียดขององค์ประกอบและความผันแปรขององค์ประกอบขยะที่นำเข้าสู่เตาเผา อุณหภูมิที่ทำการเผาไหม้ ผลของการจัดเก็บและการลดอุณหภูมิในบ่อพักขี้เถ้าต่อสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบของขี้เถ้า จะสามารถอธิบายถึงสมบัติทางกลของมอร์ตาร์ เมื่อนำขี้เถ้าเตาเผาขยะไปใช้เป็นวัสดุประสานทดแทนปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางในการศึกษาถึงวิธีการกระตุ้นให้ขี้เถ้าเตาเผาขยะกลับมามีโครงสร้างเป็นอสัณฐานมากขึ้น และยังทำให้ทราบถึงแนวทางในการลดการปนเปื้อนแคดเมียมในขี้เถ้าเตาเผาขยะนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งจะช่วยทำให้เกิดความเป็นไปได้ในการนำขี้เถ้าเตาเผาขยะมาใช้ในงานคอนกรีตได้มากขึ้นและบรรเทาปัญหาสิ่งแวดล้อมให้ลดลงได้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] Gomes, S.C., Zhou J.L., Li, W. and Long, G. (2019). Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, pp.148 -159.

[2] Gupta, G., Datta, M. and Guntari, R. (2019). Feasibility of reuse of bottom ash from MSW waste to energy plants in India: Towards a Sustainable Geoenvironment. *Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics*, 1, pp. 344 -350.

[3] Filipponi, P., Polettini, A., Pomi, R. and Sirini, P. (2003). Physical and mechanical properties of cement based products containing incineration bottom ash. *Waste Management*, 23, pp. 145 – 156.

[4] จตุพล ตั้งประกาศิต, ศิวกร อ่างทอง และ พนมศักดิ์ คงจีน (2559). ผลกระทบของการใช้เถ้าถ่านหิน ทรายบดละเอียด ตะกอนประปาแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัด การหดตัวแบบแห้งและการหดตัวแบบออโตจีนัส ของคอนกรีต. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 2, หน้า 69-78.

[5] Lin, K.L. and Lin, D.F. (2006). *Hydration characteristics of municipal solid waste incinerator bottom ash slag as a pozzolanic material for use in cement*. Cement and Concrete Composites. 28(9), pp. 817 – 823.

[6] Juric, B., Hanzic, L., Ilic, R. and Samec, N. (2006). *Utilization of municipal solid waste bottom ash and recycled aggregate in concrete*. Waste Management. 26(12), pp. 1436 – 1442.

[7] Thumbumrung, P. (2015). *The Characteristics Study of Geopolymer material from Kaolin, Palm Ash and Concentrated Latex Waste Sludge.* M.Eng.Thesis, Prince of Songkla University, Thailand.

[8] อนุรัตน์ ภูวานดำ (2560). *การพัฒนาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์จากกากดินตะกอนประปา*.รายงานการวิจัยรหัสโครงการ SUT7-708-58-12-63, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ประเทศไทย

[9] Chareerat, T., Anansaksiri, A. and Chindaprasirt, P.(2006). Synthesis of high calcium fly ash and calcined kaolin geopolymer motar. *International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer,* Khon Kaen, Thailand, 24 – 25 May 2006, pp. 327 -335.

[10] Sukmak, P., Horpibulsuk, S. and Shen, S.L(2013). Strength development in clay fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, pp. 566 – 574.

[11] Jupe, A.C., Wilkinson, A. P., Luke, k. and Funkhouser, G.P. (2008). Class H cement hydration at 180^{o}C and high pressure in the presence of added silica. *Cement and Concrete Research*, 38(5), pp. 660-666.

[12] Luke, K. (2004). Phase studies of pozzolanic stabilized calcium silicate hydrates at 180^{o}C. *Cement and Concrete Research*, 34(9), pp. 1725–1732.

[13] Alawad, O.M., Alhozaimy, A., Jaafar, M.S., Aziz, F. N. A. and Al-Negheimish, A. (2015). Effect of autoclave curing on the microstructure of blended cement mixture incorporating ground dune sand and ground granulated blast furnace slag. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(3), pp. 381-390.

[14] Grabowski, E. and Gillott, J.(1989).Effect of replacement of silica flour with silica fume on engineering properties of oilwell cements at normal and elevated temperatures and pressures. *Cement and Concrete Composites*, 27, pp. 333-344.