Journal of Community Development Research 2011; 4(2)

การศึกษาการนำวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต

ศุธีรพันธ์ พันธ์เลิศ และ พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล*

Utilization of pozzolan from industrial by-product materials in concrete

Suteerapun Punlert and Pitak Laoratanakul*

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จังหวัดปทุมธานี
National Metal and Materials Technology Center Pathumthani
*Corresponding Author. E-mail address: plaorat@yahoo.com

บทคัดย่อ

ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม 2 แหล่ง คือ ดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และกากตะกอนจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียม มาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต โดยเตรียมวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมให้อยู่ในรูปของสารปอซโซลานสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และใช้สารปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ ซึ่งพบว่าสารปอซโซลานจะเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ให้สารเชื่อมประสานในกลุ่มของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ส่วนกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยสารปอซโซลานร้อยละ 20 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ให้ค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ ตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 สำหรับสารปอซโซลานที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป

คำสำคัญ: แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซลานิก สารปอซโซลาน

Abstract

This paper presents experimentally investigated the effects of using a by-product from metropolitan waterwork plant and aluminium production plant to produce concrete. The pozzolanic reaction determined by pozzolan materials reacted with calcium hydroxide and Portland cement type I was replaced by pozzolan materials from 0 10 20 30 and 40 percent by weight for compressive strength of mortar. The results of pozzolanic reaction of pozzolan materials with calcium hydroxide produced calcium silicate hydrate and calcium aluminate hydrate binder. At curing time 28 days, the strength activity index of mortar replaced 20 percents by pozzolan materials more than 75 percents of standard mortar according to ASTM C 618 for pozzolan materials in concrete.

Keywords: Calcium Hydroxide, Pozzolanic Reaction, Pozzolan Materials

บทนำ

จากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและภัยธรรมชาติในปัจจุบัน พบว่ามีสาเหตุหลักมาจากปัญหาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากเกินไป จนเกิดปัญหาสภาวะโลกร้อนขึ้น ซึ่งการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งมีความต้องการใช้เป็นอย่างมากในแต่ละปี ทำให้ในปัจจุบันได้มีความพยายามในการหาวัสดุชนิดใหม่ที่สามารถทดแทนหรือลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตกันเพิ่มมากขึ้น โดยในปัจจุบันพบว่าสารปอซโซลาน (Pozzolan Materials) สามารถใช้เป็นสารทดแทนปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้ ซึ่งทั่วไปแล้วสารปอซโซลานเป็นสารประกอบจำพวกซิลิเซียส หรือสารประกอบที่มีส่วนผสมระหว่างซิลิเซียสและอลูมินัส สารประเภทนี้จะมีสมบัติความเป็นวัสดุเชื่อมประสานน้อยมากหรือไม่ปรากฏอยู่เลย แต่เมื่อมีสภาวะที่มีความชื้นที่เหมาะสมและทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ที่อุณหภูมิปกติจะได้สารประกอบที่แสดงสมบัติเชื่อมประสานที่ดี ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) เป็นต้น สารปอซโซลานในปัจจุบันมีทั้งที่ได้จากธรรมชาติและจากวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ขี้เถ้าลอย ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้าจากฟางข้าว ซิลิกาฟูม และตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น (ชัย และปริญญา, 2549)

ตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับสารปอซโซลานที่มีการนำไปใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต ได้แก่ งานวิจัยของ Chindaprasirt et al., (2005) พบว่าการใช้ขี้เถ้าลอยจากโรงผลิตไฟฟ้าที่มีการบดละเอียดมากขึ้นจะช่วยให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนงานของ Shannagt & Yeginobali (1995) ได้ใช้หินภูเขาไฟ (Volcanic Tuffs) ที่ผ่านการบดให้มีขนาดใกล้เคียงกันกับปูนซีเมนต์เป็นสารปอซโซลานสำหรับทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต ซึ่งพบว่าที่ระยะเวลาการบ่มมากขึ้นกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับปฏิกิริยาของสารปอซโซลานที่เกิดขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) โดยสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในสารปอซโซลานจะเข้าทำปฏิกิริยากันกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) ระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำเกิดเป็นสารเชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งจากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมทั้ง 2 แหล่ง ได้แก่ ดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (Silt) และกากตะกอนจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียม (Alumina) พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ สารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์ ดังนั้น วัตถุประสงค์ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เพื่อทำการศึกษาปฏิกิริยาและทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตผสมสารปอซโซลาน โดยนำผลจากการศึกษาที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในงานด้านคอนกรีตต่อไป

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

1. การศึกษาสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

การเตรียมสารปอซโซลานจากวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมทั้ง 2 แหล่ง คือ ดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาและกากตะกอนจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียม โดยใช้เทคนิค Differential Thermal Analysis

(DTA) และ X-ray diffractometer (XRD) ในการศึกษาช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผา (calcined) เพื่อให้ได้สารปอซโซลานที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นทำการบดและคัดขนาดอนุภาคของสารปอซโซลานที่เล็กกว่า 45 ไมครอน ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Mastersizer-S และ X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ตามลำดับ

2. การศึกษาปฏิกิริยาของเพสต์

แบบหล่อชิ้นงานเพสต์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และสูง 4 เซนติเมตร ส่วนผสมในการขึ้นรูปใช้สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารปอซโซลานในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม หลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออกแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความชื้น 98 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้พลาสติกคลุมที่ทั่วชิ้นงาน แล้วศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค XRD ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ

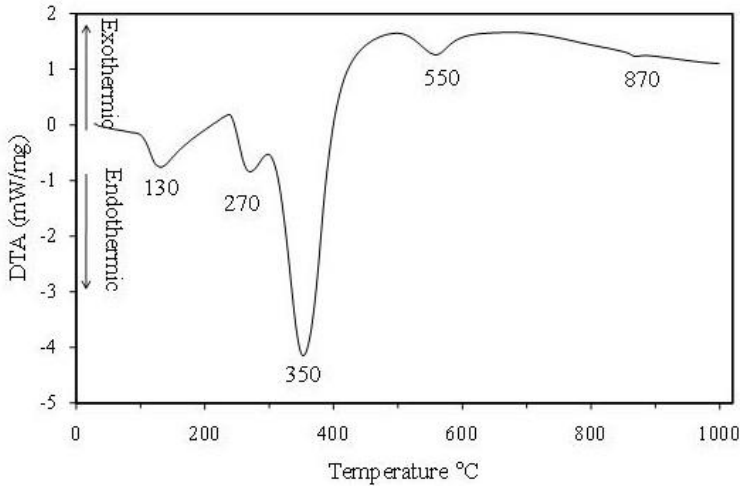
3. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์

ใช้แบบหล่อมอร์ต้าร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร และใช้สารปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก โดยส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานมอร์ต้าร์ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน และทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วน โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C 109 หลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออกแล้วบ่มโดยแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน จากนั้นคำนวณหาค่าดัชนีกำลังรับแรงอัด (Strength Activity Index) ตามมาตรฐาน ASTM C 618

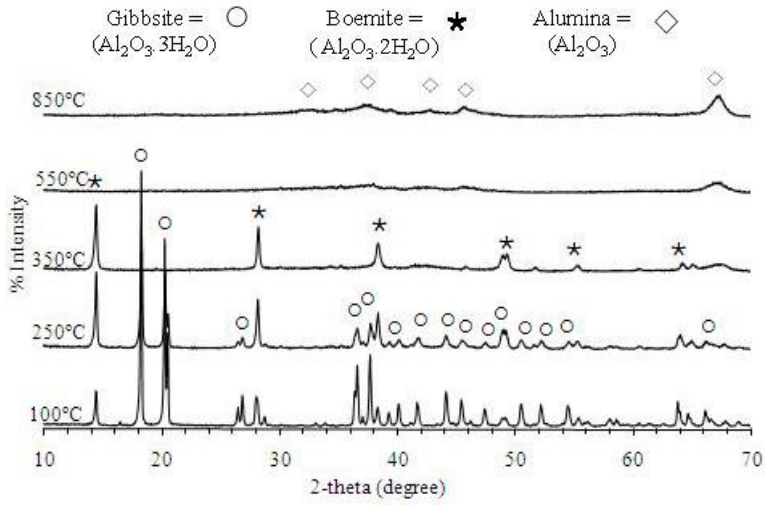
ผลการศึกษา

1. การเตรียมสารปอซโซลาน

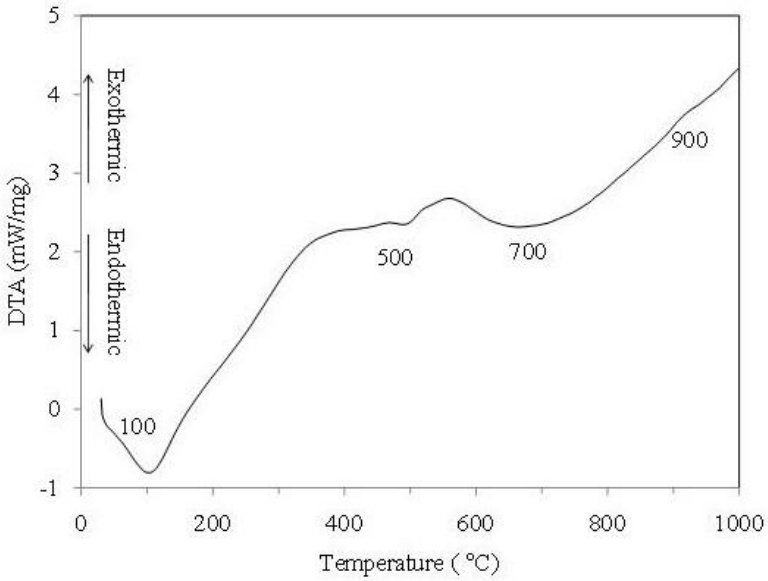
จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาสารปอซโซลานพบว่า กากตะกอนจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียมเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสและโครงสร้างในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 560 - 870 องศาเซลเซียส (รูปที่ 1) กิบบ์ไซต์ ($Al_2O_3.3H_2O$) ในช่วงเริ่มต้นจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นอสัณฐานของอลูมิเนียมออกไซด์และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความเป็นผลึกของอลูมิเนียมออกไซด์จะเพิ่มสูงขึ้น สังเกตได้จากความเข้มของพีคที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2) ดังนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมสารปอซโซลานจากกากตะกอนจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียม คือ 550 องศาเซลเซียส ส่วนดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาพบว่าอุณหภูมิส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างน้อยมาก (รูปที่ 3 และ 4) ดังนั้น จึงเลือกใช้ดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาที่อุณหภูมิห้องเป็นสารปอซโซลานในการศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิก



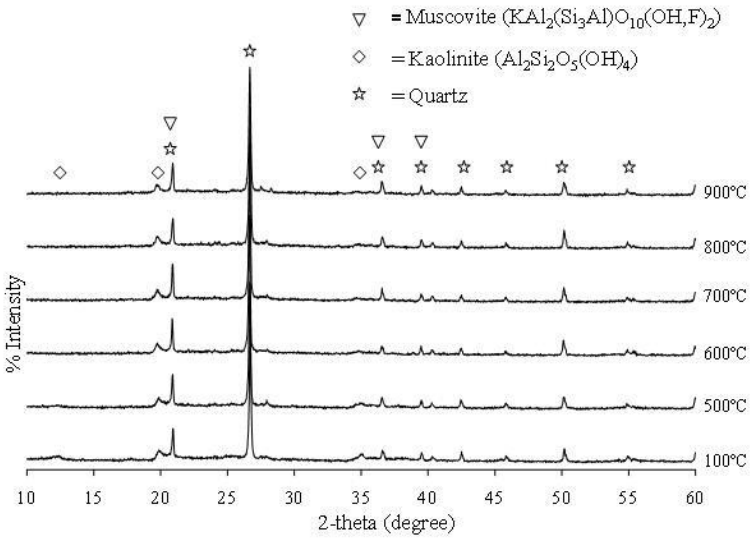
รูปที่ 1 กราฟ DTA จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของกากตะกอนจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียม



รูปที่ 2 กราฟ XRD จากการวิเคราะห์เฟสของกากตะกอนจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 100, 250, 350, 550 และ 850 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 กราฟ DTA จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา



รูปที่ 4 กราฟ XRD จากการวิเคราะห์เฟสของดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 100, 500, 600, 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส

2. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี

จากการศึกษาพบว่าสารปอซโซลานที่เตรียมจากกากตะกอนโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียม มีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ อลูมิเนียมออกไซด์ มากถึงร้อยละ 96 (ตารางที่ 1) ส่วนดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา มีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งจะรวมตัวกันอยู่ในรูปของ Kaolinite และ Muscovite (รูปที่ 4) ส่วนปูนซีเมนต์จะมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งจะรวมตัวกันอยู่ในรูปของไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$) และไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$) ซึ่งสารประกอบต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่แตกต่างกัน (ชัชวาล, 2536)

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และกากตะกอนโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียม

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์	ดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา	กากตะกอนโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียม
Al_2O_3	4.96	24.50	96.95
CaO	66.61	1.17	-
SiO_2	21.30	59.76	0.99
SO_3	2.72	0.59	0.07
Fe_2O_3	3.10	8.21	-
MgO	1.81	1.12	-
Na_2O	0.21	0.35	1.98

3. ผลการวิเคราะห์ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

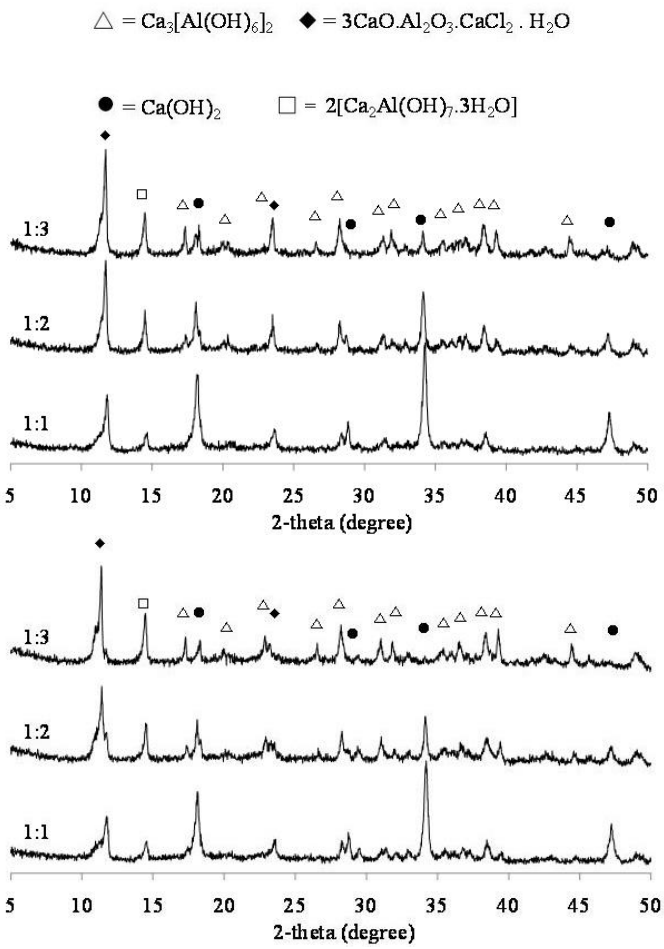
ที่ระยะเวลาบ่มเพสต์ 37 และ 28 วัน พบว่าพีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงตามลำดับ (รูปที่ 5 และ 6) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ ในสารปอซโซลาน ซึ่งทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) และสารละลายมีค่าพีเอช (pH) เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการแตกตัวเป็นอิออนของไฮดรอกไซด์ (OH^-) ดังสมการ 1. เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และสารประกอบอื่น ๆ แตกตัวเป็นอิออนชนิดต่าง ๆ เช่น Ca^{2+}, OH^-, O^{2-} และ $[Al(OH)_4]^-$ เป็นต้น และเมื่อค่าพีเอชเหมาะสมคือเท่ากับหรือมากกว่า 12.5 จะทำให้อิออนชนิดต่าง ๆ ทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารประกอบและตกตะกอนเป็นของแข็ง เช่น สารเชื่อมประสานแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต และสารเชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังสมการ 2. - 4. (Caijun & Robert, 2000)

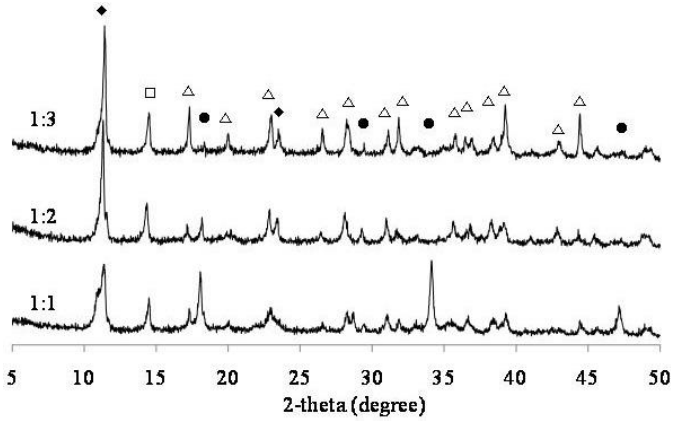
$$Ca(OH)_2 + H_2O \longrightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$$ **สมการ 1.**

$$2[Al(OH)_4]^- + 4Ca^{2+} + 6H_2O + 6OH^- \longrightarrow 2[Ca_2Al(OH)_7.3H_2O]$$ **สมการ 2.**

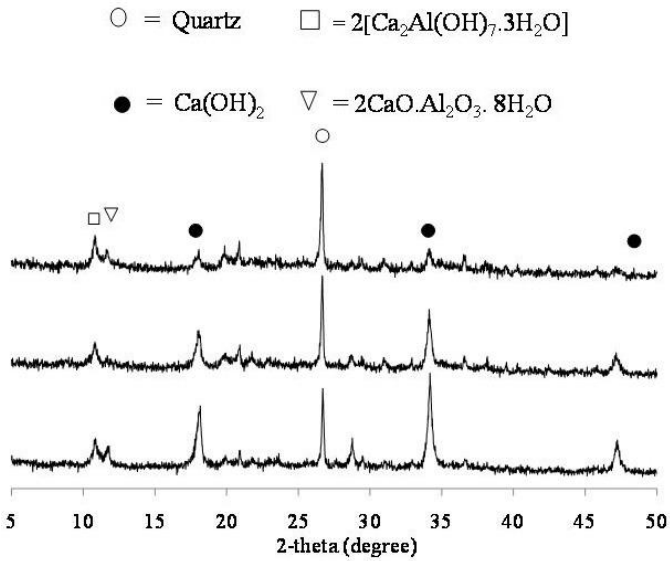
$$Ca_2[Al(OH)_5]_2.3H_2O + 2[Ca_2Al(OH)_7.3H_2O] \longrightarrow 2(Ca_3[Al(OH)_6]_2) + 9H_2O$$ **สมการ 3.**

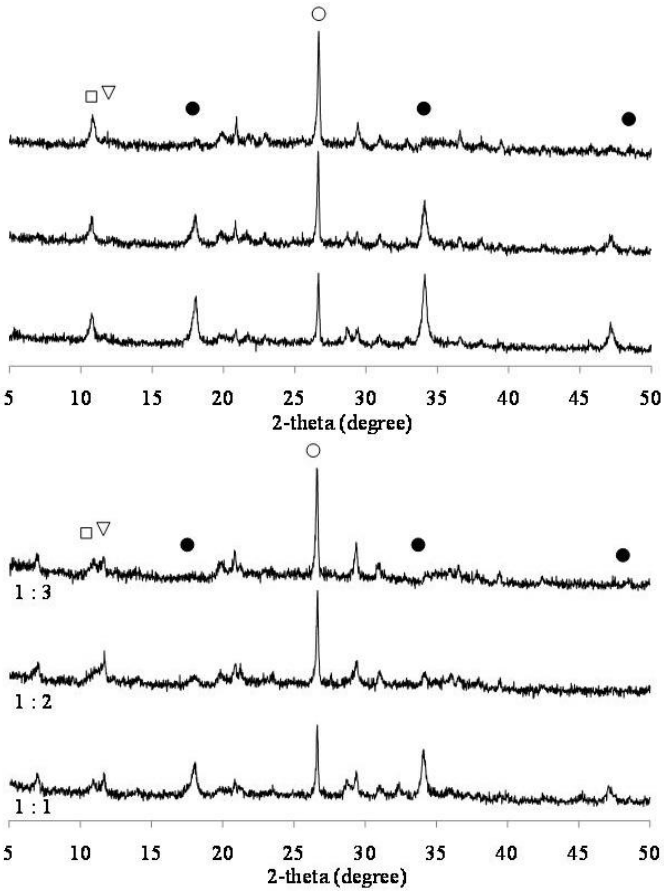
$$Y[SiO(OH)_3]^- + XCa^{2+} + (Z - X - Y)H_2O + (2X - Y)OH^- \longrightarrow C_X - S_Y - H_Z$$ **สมการ 4.**





รูปที่ 5 กราฟ XRD จากการวิเคราะห์เฟสของชิ้นงานเพสต์ที่มีส่วนผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และกากตะกอนจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียมในสัดส่วน 1:1 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน (บน) 7 วัน (กลาง) และ 28 วัน (ล่าง)



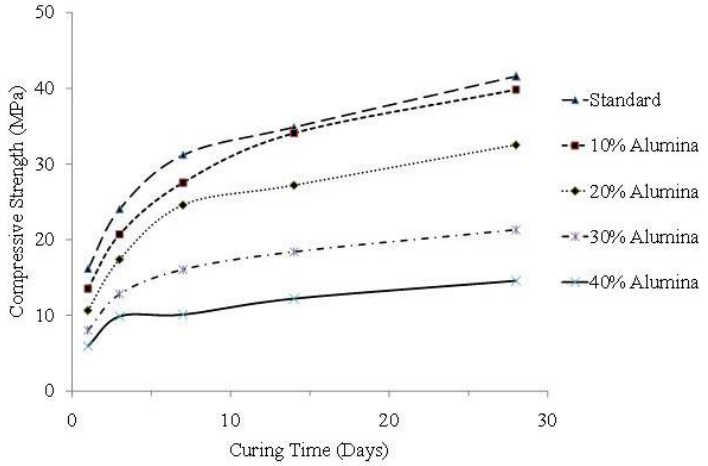


รูปที่ 6 กราฟ XRD จากการวิเคราะห์เฟสของเพสต์ที่มีส่วนผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาในสัดส่วน 1:1 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน (บน) 7 วัน (กลาง) และ 28 วัน (ล่าง)

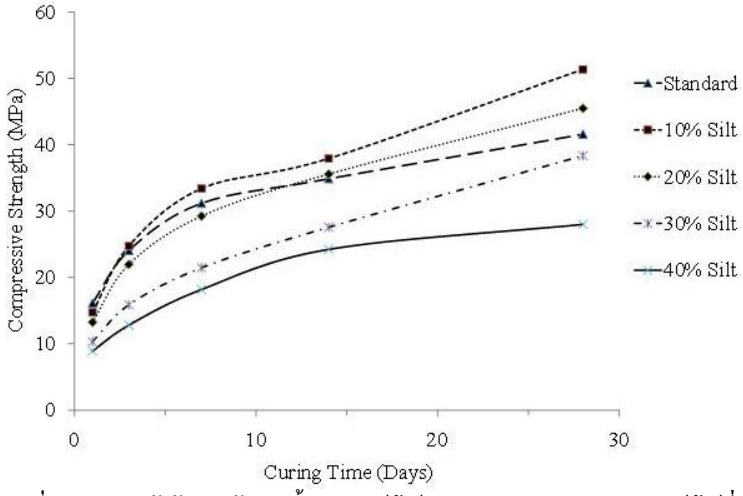
4. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

มอร์ต้าร์ที่แทนที่ปริมาณของปูนซีเมนต์ด้วยสารปอซโซลานจากกากตะกอนโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียมร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 จะให้ค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐานและมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา เนื่องมาจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ลดลงทำให้การเกิดสารเชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลง ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นพบว่าจะเกิดสารเชื่อมประสานแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งมีความสามารถในการรับกำลังอัดที่ต่ำกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสารปอซโซลานจากดินตะกอนโรงผลิตน้ำประปาพบว่าให้ผลตรงกันข้าม เนื่องจากให้สารเชื่อมประสาน

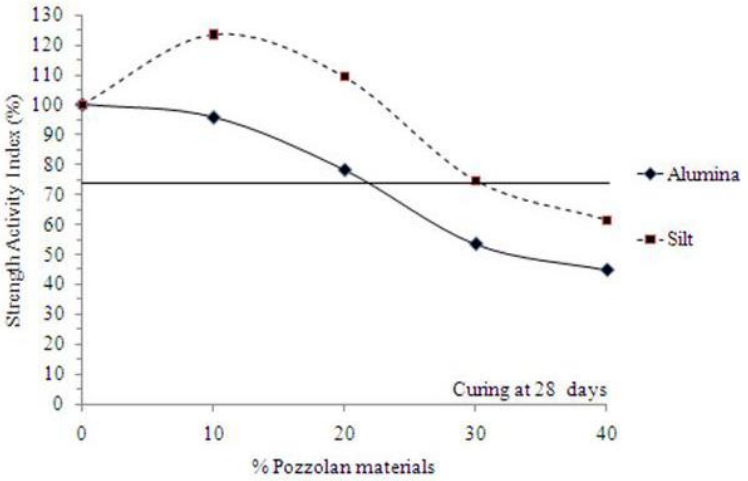
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีกำลังอัดสูงกว่า ซึ่งผลจากการนำสารปอซโซลานทั้ง 2 แหล่งมาใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ พบว่าการแทนที่ด้วยสารปอซโซลานที่ร้อยละ 20 จะให้ค่าดัชนีกำลังอัดของชิ้นงานมอร์ต้าร์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์มาตรฐาน ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ซึ่งค่าที่ได้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 618 ของสารปอซโซลานสำหรับงานคอนกรีต



รูปที่ 7 กราฟกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานมอร์ต้าร์มาตรฐาน (standard) และมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยกากตะกอนจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียม ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 8 กราฟกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานมอร์ต้าร์มาตรฐาน (standard) และมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่ระยะเวลาบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 9 กราฟดัชนีกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยกากตะกอนจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียม และดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาประปา ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

อภิปรายผลการศึกษา

กากตะกอนจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียมเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสและโครงสร้างในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ โดยเฉพาะที่ช่วงอุณหภูมิ 560-870 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างอสัณฐานเกิดขึ้น ซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยพบว่า ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 และ 28 วัน พีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงตามลำดับเมื่อเทียบกับการบ่มที่ระยะเวลา 3 วัน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับอลูมิเนียมออกไซด์ เกิดเป็นสารเชื่อมประสานกลุ่มของแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (สมการ 1. - 3.) ส่วนสารปอซโซลานที่เตรียมจากดินตะกอนโรงผลิตน้ำประปา จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเช่นเดียวกันแต่จะให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารเชื่อมประสานในกลุ่มของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (สมการ 1. และ 4.) ซึ่งช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานได้ดีกว่า ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานมอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยสารปอซโซลานจากดินตะกอนโรงผลิตน้ำประปาร้อยละ 10 และ 20 จะช่วยเพิ่มค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่ามอร์ต้าร์มาตรฐาน และเมื่อเปรียบเทียบกับการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 ด้วยสารปอซโซลานที่เตรียมจากกากตะกอนโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียม พบว่าค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดจะลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่แตกต่างกัน ซึ่งสารเชื่อมประสานในกลุ่มของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะมีข้อดี คือ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงและเพิ่มความแน่นตัวในคอนกรีตช่วยให้คอนกรีตมีความทนทานเพิ่มขึ้น ส่วนสารเชื่อมประสานกลุ่มแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตพบว่าจะให้กำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่า แต่จะมีข้อดีอื่น ๆ เช่น การต้านทานต่อคลอไรด์ การทนต่ออุณหภูมิใช้งานที่สูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ระยะเวลาในการก่อตัวที่รวดเร็ว เป็นต้น (Karen L. S. et al., 1999)

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาวิจัยทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานิกและกำลังรับแรงอัด พบว่าสารปอซโซลานจากวัสดุเหลือทิ้งทั้ง 2 แหล่งมีผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่แตกต่างกัน ดังนั้น การนำไปประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตจึงเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่าสารปอซโซลานที่ได้จากกากตะกอนโรงผลิตน้ำประปาสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตโครงสร้างทั่วไปได้ ไม่เกินร้อยละ 20 ส่วนสารปอซโซลานที่ได้จากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอลูมิเนียมไม่เหมาะสำหรับงานโครงสร้างรับแรงทั่วไป แต่อาจนำไปประยุกต์ใช้ในงานเฉพาะด้านได้ เช่น ใช้ทำกำแพงหรือส่วนที่ไม่รับแรงกดสูง ใช้ในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง และใช้ในบริเวณที่มีปริมาณคลอไรด์สูง เช่น ตามชายฝั่งทะเล เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้สามารถประสบผลสำเร็จได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่าน สำหรับการให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ทั้งจากหน่วยงานภายในศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบและวิเคราะห์ผลในงานวิจัย จนสามารถทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งจึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2536). *คอนกรีตเทคโนโลยี* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2549). *ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต* (พิมพ์ครั้งที่ 3). ขอนแก่น: ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

American society for testing and materials. (1995). ASTM C 109/C 109M-95: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm.] cube Specimens). *Annual book of ASTM standards*, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 68-72.

American society for testing and materials. (1995). ASTM C 618-94a: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzzolan for use as a meineral admixture inportland cement concrete. *Annual book of ASTM standards*, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 304-306.