การศึกษาคุณสมบัติปอซโซลานของเถ้าถ่านหินบิทูมินัส

ขวัญจิตต์ เหมะวิบูลย์[1*] สรัณกร เหมะวิบูลย์[2] และสายรุ้ง อวยพรกชกร[1]

[1]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และ [2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร เมือง พิษณุโลก 65000
[*]E-mail: khuanjitb@nu.ac.th

รับบทความ: 14 ธันวาคม 2560 แก้ไขบทความ: 29 มีนาคม 2561 ยอมรับตีพิมพ์: 11 มิถุนายน 2561

บทคัดย่อ

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีตต่าง ๆ เพื่อทดแทนการใช้ซีเมนต์ การประเมินคุณสมบัติปอซโซลานของเถ้าลอยจึงมีความสำคัญเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีความต้องการผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่ยั่งยืนมากขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติปอซโซลานของเถ้าลอยจากจังหวัดระยองที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัสจากสี่แหล่ง คือ Blair Athol (B), Blair Athol Malavan (BM), Hunter Valley (H) และ Hunter Malavan (HM) จากการศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพพบว่าเถ้าลอยทั้งสี่ชนิดจัดอยู่ในประเภท F และจากการประเมินความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกด้วยการติดตามค่าการนำไฟฟ้าของสารผสมเถ้าลอยในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่า มีความไวในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกระดับเดียวกัน ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ช่วยในการประเมินสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอยที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ ซึ่งสามารถช่วยลดปัญหามลพิษที่เกิดจากการผลิตซีเมนต์และยังช่วยลดปัญหาการกำจัดเถ้าลอย

คำสำคัญ: คุณสมบัติปอซโซลาน เถ้าถ่านหินบิทูมินัส ค่าการนำไฟฟ้า

A Study of the Pozzolanic Property of a Variety of Bituminous Fly Ashes

Khuanjit Hemavibool[1*], Saranagon Hemavibool[2] and Sairoong Ouypornkochagorn[1]

[1]Department of Chemistry, Faculty of Science, and [2]Department of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Naresuan University, Muang, phitsanulok 65000, Thailand
[*]E-mail: khuanjitb@nu.ac.th

Received: 14 December 2017 Revised: 19 March 2018 Accepted: 11 June 2018

Abstract

The pulverized fuel ash or fly ash is commonly used as a substitute for cement within concrete in various applications. Assessment of the pozzolanic property of fly ash is increasingly important because of the need for more sustainable cementitious products. The aims of this research is to investigate the pozzolanic property of Rayong fly ashes which are byproduct from burning four types of pulverized Bituminous coals including Blair Athol (B), Blair Athol Malavan (BM), Hunter Valley (H) and Hunter Malavan (HM). These fly ashes were all classified as a Class F by chemical and physical characterizations. Evaluation of pozzolanic activity of fly ashes was carried out by monitoring of conductivity of fly ash suspensions in calcium hydroxide solution, classifying all fly ashes in same reactivity level. The results from this study would help to evaluate the quality of bituminous fly ashes for use as a cement replacement in order to reduce pollution caused by cement production and solve disposal problems of fly ash.

Keywords: Pozzolanic property, Bituminous fly ash, Conductivity

บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้งานกันแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี ทั้งความแข็งแรง ความทนทาน สามารถรับน้ำหนักได้มาก และหล่อขึ้นรูปร่างต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้ ซึ่งวัสดุหลักที่ทำหน้าที่ยึดประสานคือปูนซีเมนต์ ทำให้ปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้น (Vekariya and Pitroda, 2013) แต่ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้เชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก รวมทั้งได้มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาจำนวนมากที่มีส่วนสำคัญต่อการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Zhang et al., 2014) จึงมีความพยายามลดการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง โดยพัฒนาวัสดุผสมเพิ่มในงานคอนกรีต เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติ

เหมือนเดิมแต่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ให้น้อยลง ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ส่วนใหญ่เป็นวัสดุปอซโซลาน (pozzolanic materials) คือ เป็นวัสดุที่มีซิลิกาหรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก (Bjegovic, 2012) โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่เมื่อมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน (ASTM C618) โดยวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้มาก ได้แก่ เถ้าลอย (fly ash) เถ้าแกลบ (rice husk ash) เถ้าภูเขาไฟ (volcanic ash) ตะกรันจากเตาถลุง (blast furnace slag) และซิลิกาฟูม (silica fume) (Bernal et al., 2015; Jenjirapanya and Krammart, 2016; Samad et al., 2017) การใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากได้คุณสมบัติของคอนกรีตที่ดีขึ้นทั้งด้านกำลังอัด ความทนทาน ลดความเสี่ยงของการแตกร้าว และเพิ่มความแข็งแรงในระยะยาว เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (Kongsook et al., 2013)

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นวัสดุที่มีความละเอียด มีอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย ลักษณะและสมบัติของเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหินที่ใช้และวิธีการเผา ในการผลิตคอนกรีตเมื่อเติมเถ้าลอยลงไปร่วมด้วย จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นในคอนกรีต เริ่มจากไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO\cdot SiO_2$ หรือ C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO\cdot SiO_2$ หรือ C_2S) ในปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO\cdot 2SiO_2$ หรือ CSH) เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ดังในสมการ (1) และ (2)

$$2(3CaO\cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad \text{- - - (1)}$$

$$2(2CaO\cdot SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O + Ca(OH)_2 \quad \text{- - - (2)}$$

ทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้น และจะเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แทรกอยู่ในช่องว่างของคอนกรีต ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic reaction) ดังในสมการ (3) และ (4) ผลผลิตของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \rightarrow 3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O \quad \text{- - - (3)}$$

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \rightarrow 3CaO\cdot 2Al_2O_3\cdot 3H_2O \text{ - - - (4)}$$

เนื่องจากเถ้าลอยมีทั้งผลทางกายภาพ (physical effects) และผลทางเคมี (chemical effects) ต่อสมบัติของคอนกรีต โดยผลทางกายภาพขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และลักษณะพื้นผิวของเถ้าลอย ถ้าลักษณะอนุภาคกลมจะช่วยทำให้คอนกรีตไหลตัวได้ดีขึ้น แต่หากมีความพรุนและมีพื้นที่ผิวสูง จะต้องการน้ำมากขึ้นเพื่อช่วยในการไหลตัว สำหรับผลทางเคมีจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอย โดยการวัดความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกสามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น ความแข็งแรงทางแรงกด (compressive strength)

ที่เวลา 14 และ 28 วัน (Sudhakar and Asha, 2013) การวัดดัชนีการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต (strength activity index) ที่อายุ 7 และ 28 วัน (ASTM C618) การหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่เติมเถ้าลอยที่เวลาต่าง ๆ (Lowe, 2012) การหาปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (thermogravimetric analysis) เป็นเวลา 14 วัน (Baert et al., 2007) และเทคนิควัดค่าการนำไฟฟ้าในการติดตามปฏิกิริยาปอซโซลานิกตั้งแต่ 10–10,000 วินาที (Payá et al., 2001) โดยอาศัยการวัดค่าการนำไฟฟ้าของเถ้าลอยในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป ใช้เป็นตัวแทนผลผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน พบว่า เป็นเทคนิคที่รวดเร็วและสามารถใช้ทำนายระดับความเป็นปอซโซลานของเถ้าลอยได้

ในปัจจุบันเถ้าลอยที่นิยมนำมาใช้งานผสมคอนกรีตได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ แต่ยังมีเถ้าลอยที่ได้จากโรงไฟฟ้าจากแหล่งอื่นที่ได้จากการเผาถ่านหินบิทูมินัส ซึ่งเป็นถ่านหินที่นำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีแหล่งที่มาแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพและเคมี และความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าถ่านหินบิทูมินัส ซึ่งนำเข้ามาจากแหล่งต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นก่อนนำไปใช้ในงานคอนกรีตต่อไป ทำให้สามารถนำเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาเพิ่มมูลค่า ลดปัญหาในการกำจัดทิ้ง และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการการลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุและสารเคมี:

- เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าจังหวัดระยองที่ได้จากการเผาถ่านหินบิทูมินัส 4 แหล่ง คือ Blair Athol (B), Blair Athol Malavan (BM), Hunter Valley (H) และ Hunter Malavan (HM)

- แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกรดวิเคราะห์ (LOBA Chemie, อินเดีย)

- น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

เครื่องมือ:

- เครื่องกวนสารแบบควบคุมอุณหภูมิได้ (hotplate and magnetic stirrer; Heidolph Instrument รุ่น MR Hei-Standard, เยอรมัน)

- เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductometer; Mettler Toledo รุ่น MC226, ไทย)

- เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer, XRF; Bruker รุ่น S8 Tiger, เยอรมัน)

- เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง (brunauer emmett and teller, BET; Micromeritrics รุ่น TriStar II 3020, เยอรมัน)

การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอย:

ศึกษาสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย โดยศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องด้วยการเผา (LOI) ส่วนโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยทำการศึกษาภาพถ่ายขยายโดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

การศึกษาคุณสมบัติปอซโซลานของเถ้าลอย:

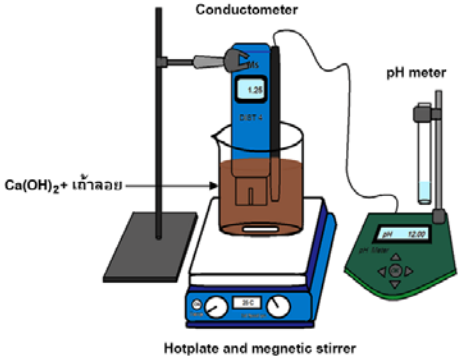
นำสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร ปิดด้วย

กระดาษฟอยล์ให้สนิท นำไปกวนด้วยเครื่องกวนสารแบบควบคุมอุณหภูมิได้ หลังจากอุณหภูมิคงที่ที่ 40 องศาเซลเซียส เริ่มวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย แล้วนำเถ้าลอยใส่ลงในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เริ่มจับเวลาทันที และวัดค่าการนำไฟฟ้า จนครบ 4 ชั่วโมง ดังในภาพที่ 1 ทำการทดลองหาค่า blank โดยใช้น้ำปราศจากไอออนแทนสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณร้อยละการลดลงของค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (% loss conductivity of calcium hydroxide, %LC) ดังในสมการ (5)

$$\%LC = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad - - - (5)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก่อนเติมเถ้าลอย – ค่าการนำไฟฟ้าของ blank ก่อนเติมเถ้าลอย

C คือ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ขณะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เวลาต่างๆ – ค่าการนำไฟฟ้าของ blank ที่เวลาต่าง ๆ



ภาพที่ 1 การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกด้วยเทคนิคการวัดค่าการนำไฟฟ้า

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพและเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอยที่ศึกษาเป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินบิทูมินัสนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีแหล่งที่มาแตกต่างกัน 4 แหล่ง นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray fluorescence spectrometry ได้ผลดังในตาราง 1

ตาราง 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน

องค์ประกอบ	ถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ			
	H	B	HM	BM
SiO_2	64.09	63.14	60.97	60.29
Al_2O_3	23.52	28.27	22.03	27.15
Fe_2O_3	3.95	2.46	5.94	4.36
CaO	1.75	0.98	2.28	1.51
MgO	0.61	0.34	1.49	0.92
SO_3	0.25	0.11	0.37	0.20
Na_2O	0.01	0.02	0.01	0.02
K_2O	0.85	0.58	1.22	0.58
LOI	3.32	2.21	4.10	3.09

จากผลการวิเคราะห์พบว่าทั้ง 4 ชนิด มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) มากกว่าร้อยละ 60 โดยมวลเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมา ได้แก่ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มีค่ามากกว่าร้อยละ 20 และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ปริมาณต่ำ เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยทั้งหมดกับข้อกำหนดการจัดประเภทสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 ในตาราง 2 พบว่า เถ้าลอยทั้งหมดจัดอยู่ในประเภท F การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ 6 และได้ศึกษาลักษณะอนุภาคด้วยเทคนิค scanning electron microscopy ที่กำลังขยาย 500 เท่า ดังในภาพที่ 2 พบว่า ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด ส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลมกลม

บิดเบี้ยวบ้างเล็กน้อย บางส่วนมีลักษณะไม่แน่นอน มีเหลี่ยมมุม มีขนาดต่าง ๆ กันกระจายอยู่อย่างชัดเจน

ตาราง 2 ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไอร์ออนออกไซด์ (Fe_2O_3) ไม่น้อยกว่าร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกินร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น ไม่เกินร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ	10.0	6.0	6.0

การศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกด้วยเทคนิคการวัดค่าการนำไฟฟ้า

การวิจัยนี้ทดสอบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยด้วยการใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยากับเถ้าลอยโดยตรง เป็นตัวแทนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยติดตามปริมาณของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่จากการทำปฏิกิริยากับเถ้าลอย ณ เวลาต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคการวัดค่าการนำไฟฟ้า ร้อยละการลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของค่าการนำไฟฟ้ากับเวลา ผลการทดลอง (ภาพที่ 3) พบว่าในช่วงแรก เถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัส H มีความ สามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เร็วที่สุด แต่ในระยะยาวเถ้าลอย B H และ HM มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกใกล้เคียงกัน ขณะที่เถ้าลอย BM มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่ำกว่าชนิดอื่นเพียงเล็กน้อย ซึ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ทดแทนซีเมนต์จัดว่าเถ้าลอยทั้ง 4 ชนิด มีความไวในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกระดับเดียวกัน

สรุปผลการทดลอง

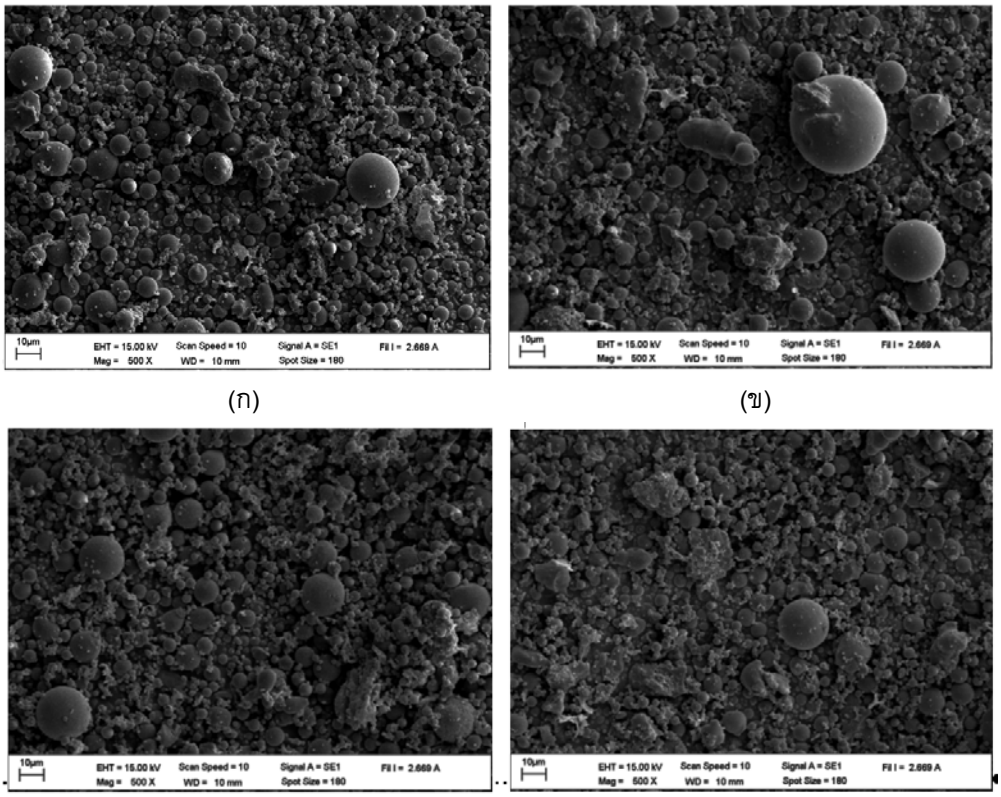
จากการศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพ พบว่า เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินบิทูมินัสนำเข้าจากต่างประเทศทั้ง 4 แหล่ง มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน และจัดประเภทสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 อยู่ในประเภท F และจากการเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคนิคการวัดค่าการนำไฟฟ้า พบว่า เถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัสทั้ง 4 แหล่งนี้มีสมบัติเป็นปอซโซลานที่ใกล้เคียงกัน สามารถนำไปใช้งานได้ดีไม่แตกต่างกัน

กิตติกรรมประกาศ

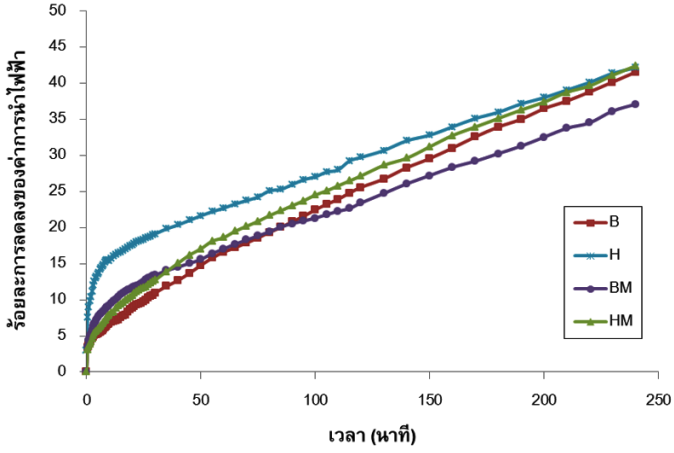
ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทำวิจัย และเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีงบประมาณ 2559

เอกสารอ้างอิง

ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete Published By: ASTM International (ASTM) Published Date: December 15, 2017.



ภาพที่ 2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าลอยชนิด (ก) H (ข) B (ค) HM และ (ง) BM



ภาพที่ 3 ร้อยละการลดลงของค่าการนำไฟฟ้าของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับเถ้าลอยชนิดต่าง ๆ

Baert, G., Driessche, I. V., Hoste, S., de Schutter, G., and de Belie, N. (2007) Interaction between the pozzolanic reaction of fly ash and the hydration of cement. In **The 12th International Congress on the Chemistry of Cement**. Montreal, Canada.

Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Mejía de Gutiérrez, R., and Provis, J. L. (2015). Performance at high temperature of alkali–activated slag pastes produced with silica fume and rice husk ash based activators. **Materials de Construcción** 65(318): 1–10.

Bjegovic, D., Stirmer, N., and Serdar, M. (2012). Durability properties of concrete with blended cements. **Materials and Corrosion** 63 (12): 1087–1096.

Jenjirapanya, S., and Krammart, P. (2016). A study on properties of cementitious material using industrial waste. **Journal of Industrial Technology** 12(2): 77–86. (in Thai)

Kongsook, M., Hemavibool, S., Tongaroonsri, S., and Tangtermsirikul, S. (2013). Effect of binders on shrinkage cracking behavior of concrete. **RMUTP Research Journal, The 5th Rajamangala University of Technology National Conference** (Special Issue): 588–598.

Lowe, R. (2012). **Pozzolanic Properties of Biomass Fly Ash**. Master of Science Thesis (Civil Engineering). USA: Clemson University.

Payá, J., Borrachero, M. V., Monzó, J., Peris-Mora, E., and Amahjour, F. (2001). Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity. **Cement and Concrete Research** 31: 41–49.

Samad, S., Shah, A. and Limbachiya. M.C. (2017). Strength development characteristics of concrete produced with blended cement using ground granulated blast furnace slag (GGBS) under various curing conditions. **Sadhana** 42(7): 1–11.

Sudhakar, M. R., and Asha, K. (2013). Role of fly ash pozzolanic reactions in controlling fluoride release from phosphogypsum. **Journal of Materials in Civil Engineering** 25(8): 999–1005.

Vekariya, M. S., and Pitroda, P. (2013). Bacterial concrete: New era for construction industry. **International Journal of Engineering Trends and Technology** 4(9): 4128–4137.

Zhang, J., Liu, G., Chen, B., Song, D., Qi, J. and Liu, X. (2014). Analysis of CO_2 emission for the cement manufacturing with alternative raw materials: A LCA-based framework. **Energy Procedia** 61: 2541–2545.