

# การใช้ประโยชน์กากตะกอนน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าแทนการใช้ปูนซีเมนต์

## Utilization of Sludge from Power Plant as Cement Substitution

กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์<sup>1\*</sup> ชนกนันท์ บุญรอด<sup>2</sup>, สุนิสา ทิวาพัฒน์<sup>2</sup> และ อารดา อัครวานันท์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ <sup>2</sup>นักศึกษา สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

### บทคัดย่อ

การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงไฟฟ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยใช้กากตะกอน 2 แบบคือ กากตะกอนผึ่งแห้งที่ได้รับมา และ กากตะกอนผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300°C ทำการศึกษาสมบัติกากตะกอน และแปรค่าหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนกับวัสดุผสมในการทำซีเมนต์ก้อน ในการทำซีเมนต์ก้อนชุดควบคุมวัสดุผสมทำจากปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 2.75 ส่วน และน้ำ 0.825 ส่วน โดยน้ำหนัก ส่วนซีเมนต์ก้อนชุดทดลองแปรค่ากากตะกอนตามอัตราส่วนต่างๆเป็น 10, 20 และ 30% เข้าทดแทนปูนซีเมนต์ เมื่อทำการหล่อซีเมนต์ก้อน และทำการบ่มในน้ำประปาจนมีอายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จึงทำการทดสอบค่าการรับกำลังแรงอัด และทดสอบการชะละลายโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) และ ตะกั่ว (Pb) ด้วยวิธีทดสอบการสกัดของเสีย (Waste Extraction Test, WET) และวิธีที่ซีแอลพี (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP) ผลการทดลอง พบว่า ซีเมนต์ก้อนชุดควบคุมและชุดทดลองที่แปรค่า ในน้ำที่บ่มซีเมนต์ก้อนจากกากตะกอนมีค่าพีเอชเป็นเบสช่วง 11 – 12 ทำให้ไม่เกิดการละลายของโลหะหนักออกมา ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอยู่ในช่วง 5 - 7 mS/cm อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทำซีเมนต์ก้อนเมื่อเทียบกับชุดควบคุม คือ 10 % มีค่าการรับกำลังแรงอัดสูงสุดที่ 28 วันเท่ากับ 253.81 Kg/cm<sup>2</sup> ค่าความชื้น 4.73 % เมื่อทดสอบค่าการชะละลายโลหะหนักทุกชนิดมีค่าผ่านมาตรฐานที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และมาตรฐานตามที่ US EPA กำหนด สามารถนำกากตะกอนแห้งอัตราส่วน 10 % เหมาะสมไปประยุกต์ในการผลิตกระถางปลูกต้นไม้ได้

### Abstract

The feasibility of wastewater treatment sludge from the power plant was studied as cement substituted material. The sludge were used as the air dried sample and the oven dried sludge at 300°C. Their properties, then the optimum ratio of cement substituted portion for cement block were determined. In the control set; cement, sand and water ratio were 1, 2.75 and 0.825 (w/w) respectively, while the treatment set, sludge replacing were varied at 10, 20 and 30 %. The blocks were produced and cured in tap water for 7, 14 and 28 days, and tested their compressive strength. The leaching ability of heavy metals, namely, Cd, Cr, Cu and Pb were determined by Waste Extraction Test or WET (according to the standard from the Notification of Ministry of Industry, A.D. 2005) and Toxicity Characteristic Leaching Procedure; TCLP (US EPA method 1311). The results showed that the solution from cement block curing, both of control set, treatment block had basic pH range 11 – 12 and caused reduction of the heavy metal solubility. The solution conductivity range 5 - 7 mS/cm. The 10% dried sludge cement blocks were the suitable ratio compared with the control set which the maximum compressive strength at 28<sup>th</sup> day was 253.81 Kg/cm<sup>2</sup> and 4.73 % moisture. All metal leaching abilities were less than those Notification and US EPA standard. Those optimum ratios, 10 % can be applied to produce cement pot.

**คำสำคัญ** : กากตะกอนจากโรงไฟฟ้า ปูนซีเมนต์ วิธีทดสอบการสกัดของเสีย (WET) ที่ซีแอลพี

**Keywords** : Sludge from Power plant, Cement, WET, TCLP

\*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ [ktkrongk@kmitl.ac.th](mailto:ktkrongk@kmitl.ac.th) โทร. 0 2329 8000 – 8099 ต่อ 6247, 6235

## 1. บทนำ

ถ่านหินเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจใช้ในการผลิตไฟฟ้า เพื่อตอบสนองความต้องการด้านพลังงานที่เพิ่มมากขึ้น ถ่านหินมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่าเชื้อเพลิงอื่นๆ มีปริมาณสำรองมาก สามารถใช้ได้ไม่ต่ำกว่า 200 ปี และสามารถใช้เทคโนโลยีสะอาดช่วยกำจัดมลพิษจากการใช้ถ่านหินได้ แต่อย่างไรก็ตามโรงไฟฟ้าถ่านหินจำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมมลภาวะทางอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการเผาไหม้ถ่านหินเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดฝนกรดและภาวะโลกร้อนได้ กระบวนการผลิตทำให้เกิดของเสียที่อยู่ในรูปของน้ำเสีย ทั้งจากบริเวณลานกองถ่านหินและอาคารโรงไฟฟ้า ซึ่งน้ำเสียเหล่านี้ถูกนำไปผ่านกระบวนการบำบัดทั้งทางเคมีและชีวภาพ ทำให้เกิดกากตะกอนเป็นจำนวนมาก การนำกากตะกอนกลับมาใช้ประโยชน์อื่นๆจึง เป็นหลักการการลดปริมาณของเสียที่สำคัญรองจากการลดที่แหล่งกำเนิด ข้อเด่นของการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ คือ ลดขั้นตอนการจัดการและให้ผลตอบแทนกลับคืนในสัดส่วนที่สูง และผลประโยชน์ในทางสิ่งแวดล้อมจากการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ รวมทั้งลดความเสี่ยงที่อาจเกิดจากการขนส่งจากกระบวนการแสวงหาทรัพยากร การนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่จึงเป็นแนวทางการจัดการของเสียที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป [1]

ของเสียที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียทั่วไป คือ กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย ในการประยุกต์ใช้ประโยชน์กากตะกอนมีการนำมาใช้ประโยชน์ในหลายรูปแบบ เช่น กากตะกอนอินทรีย์ที่มีค่าความร้อนสูง มีการนำกากตะกอนประเภทนี้มาใช้เป็นเชื้อเพลิง ส่วนกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียจากโรงไฟฟ้า มีสารประเภทอนินทรีย์มาก สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ได้ดี ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์โดยตรง และกากตะกอนที่ผ่านการเผา 300 °C ในการนำมาเป็นวัสดุผสมทดแทนปูนซีเมนต์ เพื่อเพิ่มมูลค่าของกากตะกอนและช่วยลดปริมาณกากของเสียที่ต้องนำไปกำจัดอีกด้วย [1-3]

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- Atomic Absorption Spectrophotometer ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น: AA nalyst 200
- เครื่องชั่งสารความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ: Shimadzu รุ่น: Aux 220
- เครื่องวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค (Mastersizer X) ยี่ห้อ Malvern รุ่น MSX
- เครื่องเขย่าสาร Orbital Shaker ยี่ห้อ Gallenkamp
- อุปกรณ์สำหรับผลิตและทดสอบมอร์ตาร์
- เครื่องทดสอบกำลังอัด ยี่ห้อ TTR-080G รุ่น KC-2000
- ตู้ควบคุมอุณหภูมิ และเครื่องแก้วต่างๆ

### 2.2. วัสดุและสารเคมี

- กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียของโรงไฟฟ้า
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- โพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo ERBA
- เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot H_2O$ ) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo ERBA
- กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc.  $H_2SO_4$ ) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo ERBA
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo ERBA
- สารละลายกรดแอสซิติค ( $CH_3COOH$ ) เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo ERBA
- สารละลายมาตรฐานแคดเมียม โครเมียม ทองแดง และ ตะกั่ว เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Carlo ERBA

### 2.3. การดำเนินงานวิจัย

การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

**ตอนที่ 1** การวิเคราะห์สมบัติกากตะกอน นำกากตะกอนมา 500 กรัมไปผึ่งให้แห้ง โดยการเทกากตะกอนลงบนแผ่นพลาสติก กลิ้งให้ทั่ว เพื่อให้กากตะกอนแห้งอย่างทั่วถึง จากนั้นนำมาบดด้วยครก และร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาดช่อง 2 mm หรือเบอร์ 10 mesh เก็บกากตะกอนที่ได้ไว้ในถุงซิปลาสติกป้องกันการดูดความชื้น กากตะกอนที่ได้แบ่งออกเป็นสองส่วนๆละประมาณ 200 กรัม ส่วนแรกสำหรับทดลองขั้นต่อไป ส่วนที่สองนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็น นำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆทั้ง 2 ส่วน คือ ความชื้น ความเป็นกรด-ด่างหรือค่าพีเอช การนำไฟฟ้า ขนาดของอนุภาค อินทรีย์วัตถุในกากตะกอน ตามวิธีของ Walkley และ Black [4] โลหะหนักในกากตะกอน โดยวิธีทดสอบการสกัดของเสีย (Waste extraction test, WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 [5] และ วิธีทีซีแอลพี (Toxicity characteristic leaching procedure, TCLP) ตามวิธีของ US EPA, 1992. SW-846 Method 1311[6] ส่วนอนินทรีย์วัตถุในกากตะกอน เช่น ซิลิกอน (Si), เหล็ก (Fe), แคลเซียม (Ca) และอลูมิเนียม (Al) โดยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence spectrometry)

**ตอนที่ 2** นำกากตะกอนไปผลิตมอร์ตาร์ โดยมีมอร์ตาร์เป็นของผสมที่ได้จากการผสมวัสดุประสานและมวลรวมเข้าด้วยกัน เมื่อนำไปใช้งานต้องนำไปผสมน้ำให้ขึ้นเหลวตามวัตถุประสงค์ของงาน โดยให้ความชื้นเหลวที่พอเหมาะตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 1776-2542 เมื่อนำกากตะกอนไปทดแทนในส่วนของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ทำซีเมนต์ก้อน โดยแปรค่าทั้งกากตะกอนแห้งและที่ผ่านการเผาในอัตราส่วน 0, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนัก เป็นชุดควบคุม เอ บี ซี ดี และ เอฟ ตามลำดับ

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

### 3.1 สมบัติเบื้องต้นของกากตะกอน

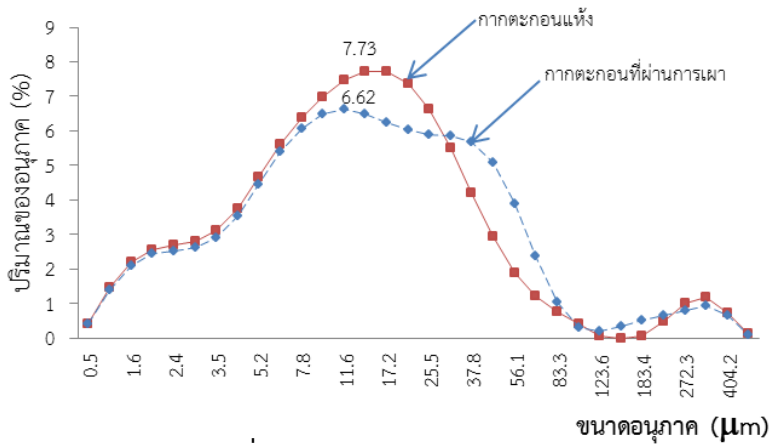
#### 3.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี

กากตะกอนแห้งที่ได้มีลักษณะทั้งเป็นผง และก้อนเล็กๆ สีเทา ไม่มีกลิ่น ส่วนกากตะกอนที่ผ่านการเผาที่ 300 °C มีลักษณะ เป็นผง เบา สีเทาอ่อนกว่ากากตะกอนแห้งที่ได้รับมา และไม่มีกลิ่น ค่าความชื้นของกากตะกอนแห้ง และกากตะกอนที่เผา มีค่า  $12.37 \pm 0.64$  % และ  $8.12 \pm 0.44$  % ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากากตะกอนที่เผาถูกไล่ความชื้น และส่วนที่ระเหยง่ายออกไปได้ ค่าพีเอชของกากตะกอนแห้ง และกากตะกอนที่ผ่านการเผาเท่ากับ  $7.01 \pm 0.03$  และ  $6.43 \pm 0.10$  ตามลำดับ ทำให้เห็นว่าการเผาที่ 300 °C ไม่ได้ช่วยเพิ่มปริมาณโลหะออกไซด์ซึ่งมีฤทธิ์เป็นเบสได้ ทำให้ค่าพีเอชของกากที่ผ่านการเผาไม่เป็นเบสเพิ่ม ส่วนค่าการนำไฟฟ้าของกากตะกอนแห้ง และกากตะกอนที่ผ่านการเผาเท่ากับ  $36.10 \pm 0.56$  และ  $73.5 \pm 0.46$  mS/cm ตามลำดับ ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงแสดงว่ามีองค์ประกอบเป็นสารประกอบอนินทรีย์ละลายน้ำได้ และเกิดการแตกตัวจึงเป็นสารละลายที่นำไฟฟ้า

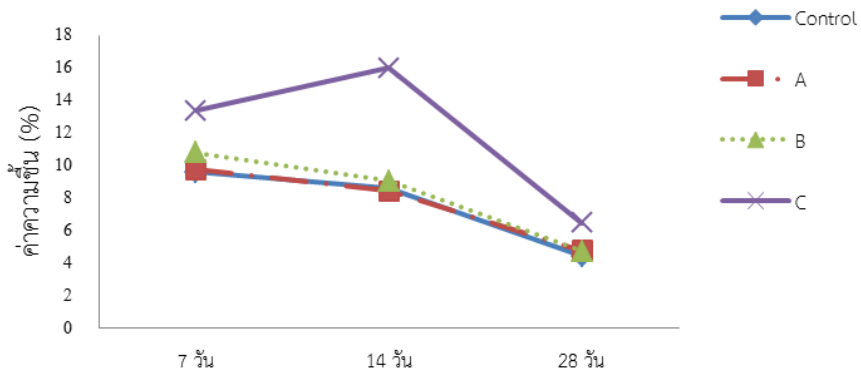
ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของกากตะกอน

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์		ค่ามาตรฐานที่กำหนด [5, 6]
	กากตะกอนแห้ง	กากตะกอนที่ผ่านการเผา	
ความชื้น (%)	12.37 ± 0.64	8.12 ± 0.44	-
พีเอช	7.01 ± 0.03	6.43 ± 0.10	-
การนำไฟฟ้า (mS/cm)	36.10 ± 0.56	73.5 ± 0.46	-
อินทรีย์วัตถุ (%)	2.19 ± 0.06	1.25 ± 0.04	-
แคดเมียม (mg/Kg) TCLP	ND	ND	1
แคดเมียม (mg/Kg) WET	ND	1.51 ± 0.65	1
โครเมียม (mg/Kg) TCLP	9.29 ± 1.59	4.90 ± 1.75	5
โครเมียม (mg/Kg) WET	7.77 ± 0.45	7.05 ± 0.72	5
ทองแดง (mg/Kg) TCLP	9.36 ± 1.01	4.11 ± 0.75	-
ทองแดง (mg/Kg) WET	8.42 ± 0.29	7.10 ± 1.23	25
ตะกั่ว (mg/Kg) TCLP	7.19 ± 2.70	3.39 ± 3.63	5
ตะกั่ว (mg/Kg) WET	6.20 ± 0.46	4.93 ± 0.38	5

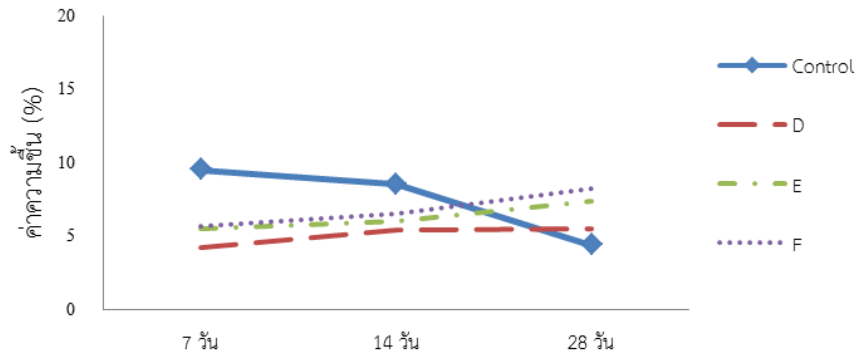
หมายเหตุ ND = ตรวจไม่พบ



รูปที่ 1 ขนาดอนุภาคของกากตะกอน



(ก) กากตะกอนแห้ง และชุดคควคุม



(ข) กากตะกอนที่ผ่านการเผา และชุดควบคุม

รูปที่ 2 ค่าความชื้นของซีเมนต์ก้อน

ตารางที่ 2 องค์ประกอบอนินทรีย์วัตถุในกากตะกอนจากเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์

สารประกอบ	กากตะกอนแห้ง		กากตะกอนที่ผ่านการเผา 300 °C		ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 [3]
	Kcps	%	Kcps	%	
Na <sub>2</sub> O	0.2	1.51	0.1	0.98	-
MgO	0.3	0.953	0.2	0.54	1.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	27.4	10.4	28.6	5.50
SiO <sub>2</sub>	17.5	56.4	21.7	56.8	20.80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1	0.3	0.2	0.34	-
SO <sub>3</sub>	0.4	0.77	0.4	0.5	2.96
K <sub>2</sub> O	4.1	2.19	4.9	2.13	0.55
CaO	2.4	1.4	2.8	1.33	64.97
TiO <sub>2</sub>	5.7	2.63	6.9	2.6	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0.6	0.17	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35	5.23	39.1	4.8	3.16
CuO	3.3	0.3	3.2	0.24	-
ZnO	2.1	0.16	2.8	0.17	-
SrO	8.5	0.2	10.6	0.2	-
ZrO <sub>2</sub>	9.5	0.31	12.1	0.32	-
Compton	-	0.9	-	0.9	-
Rayleigh	-	1.07	-	1.09	-

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของกากตะกอนแห้ง และ กากตะกอนที่ผ่านการเผา พบว่า ขนาดอนุภาคหลักที่มีจำนวนมากของกากตะกอนแห้งอยู่ในช่วงขนาด 15 – 18  $\mu\text{m}$  ประมาณ 7.73 % มีพื้นที่ผิวเฉลี่ย 0.7712  $\text{m}^2/\text{กรัม}$  แต่ขนาดอนุภาคหลักที่มีจำนวนมากของกากตะกอนที่เผาอยู่ในช่วงขนาด 12 – 14  $\mu\text{m}$  ประมาณ 6.62 % มีพื้นที่ผิวเฉลี่ย 0.7314  $\text{m}^2/\text{กรัม}$  ซึ่งขนาดของอนุภาคของกากตะกอนที่ผ่านการเผามีขนาดเล็กกว่าขนาดของกากตะกอนแห้ง

เล็กน้อย เนื่องจากการเผาที่ 300 °C ทำให้ความชื้นในกากตะกอนสามารถระเหยได้ ซึ่งการระเหยของก๊าซอาจทำให้เกิดการแตกหัก ทำให้ขนาดอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป และทำให้พื้นที่ผิวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นด้วย [1]

องค์ประกอบอนินทรีย์วัตถุของกากตะกอนแห้ง และกากตะกอนที่ผ่านการเผา แสดงในตารางที่ 2 พบว่า มีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และองค์ประกอบรอง คือ อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เช่น แคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมอลูมิเนต โดยกากตะกอนแห้งมี  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 56.4 และ 27.4 % ตามลำดับ ส่วนกากตะกอนที่ผ่านการเผามี  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 56.8 และ 28.6 % ตามลำดับ จากผลการศึกษา พบว่า เเปอร์เซ็นต์ของ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ของกากตะกอนที่ผ่านการเผามีมากกว่ากากตะกอนแห้ง ซึ่งจัดว่าสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่มีซิลิเกตต่ำกว่ามาก (1.33 – 1.4 %) จึงอาจทำให้การนำกากตะกอนทั้ง 2 แบบมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งหมดไม่ได้ เนื่องจากองค์ประกอบในกากตะกอนไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้อย่างต่อเนื่อง

การวิเคราะห์อินทรีย์วัตถุในกากตะกอนแห้ง และกากตะกอนที่ผ่านการเผาเท่ากับ  $2.19 \pm 0.06$  และ  $1.25 \pm 0.04$  % ซึ่งอยู่ในช่วงที่มีอินทรีย์วัตถุค่อนข้างต่ำถึงปานกลาง ในการใช้อุณหภูมิที่ 300 °C ซึ่งไม่สามารถกำจัดอินทรีย์วัตถุให้หมดไปได้ แต่ทำให้สลายตัวได้เพียงบางส่วน แต่ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่มีถือว่าไม่มีผลกระทบต่อการแข่งขันตัวของซีเมนต์ก้อน สำหรับปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนแห้ง และกากตะกอนที่ผ่านการเผา ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี ทีซีแอลพี และวิธี WET มีปริมาณแคดเมียม, โครเมียม, ทองแดง และตะกั่วดังตารางที่ 1 จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนต่ำกว่าเกณฑ์ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม และ US EPA กำหนด [5,6]

## 3.2 สมบัติของซีเมนต์ก้อน

### 3.2.1 สมบัติทางกายภาพ

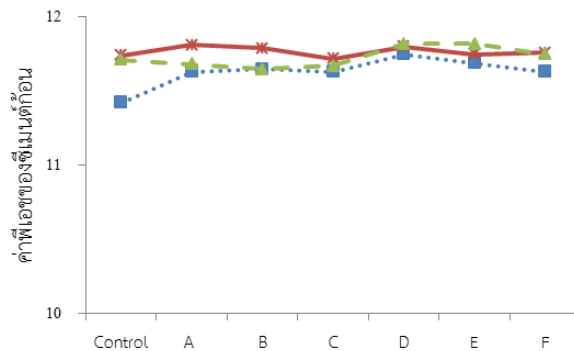
การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความชื้นของซีเมนต์ก้อนพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนทดแทนปูนซีเมนต์ส่งผลให้ซีเมนต์ก้อนที่ผลิตได้มีความชื้นเพิ่มมากขึ้นทั้งกากตะกอนแห้งและกากตะกอนที่ผ่านการเผาเมื่อเทียบกับการทำชุดควบคุมที่ใช้ซีเมนต์โดยตรง จากกราฟรูปที่ 2 เมื่อซีเมนต์ก้อนมีอายุในการบ่มครบ 7 วัน ชุด C ซึ่งมีปริมาณกากตะกอนแห้งผสมอยู่ 30 % มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นสูงสุด เมื่อเทียบกับชุด บี และชุด เอ ตามลำดับ เช่นเดียวกับชุด D, E และ F ในกราฟรูปที่ 3 เนื่องจากในช่วงอายุในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ปริมาณกากตะกอนที่เพิ่มมากขึ้นอาจเกิดโพรง รูพรุน ทำให้ซีเมนต์ก้อนมีการดูดซึมน้ำเข้าภายในเพิ่มได้มากขึ้น แต่เมื่อทำการบ่มนานวันมากขึ้น อัตราการดูดซึมน้ำเข้าสู่ซีเมนต์ก้อนลดน้อยลง สำหรับค่าพีเอชของน้ำที่ใช้บ่มซีเมนต์ก้อนมีค่าเป็นเบส ไม่แตกต่างกันมากในช่วง 7, 14 และ 28 วัน และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำบ่มซีเมนต์ก้อน มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในซีเมนต์ก้อนดังรูปที่ 3 แสดงถึงมีส่วนที่ละลายออกมาได้ลดลง

### 3.2.2 สมบัติเชิงกล

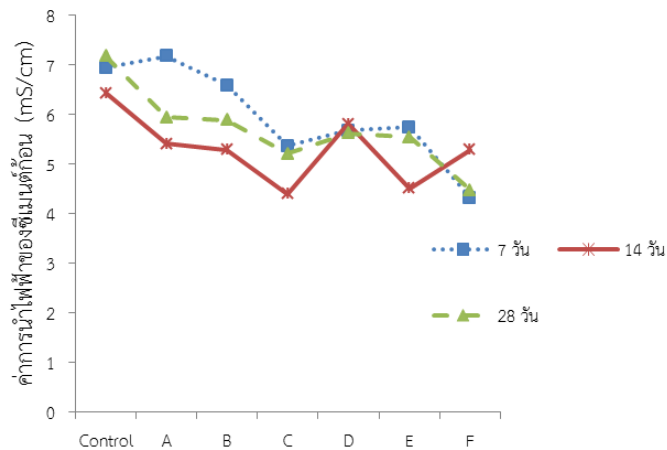
จากการทดสอบการรับกำลังแรงอัดของซีเมนต์ก้อน พบว่า การเพิ่มปริมาณกากตะกอนทั้งไม่เผาหรือแบบเผาจาก 0 % เป็น 10, 20 และ 30 % มีผลทำให้ค่าการรับกำลังแรงอัดลดลง โดยที่ซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการบ่มที่ 7 และ 14 วัน ทุกชุดการทดลองมีค่าการรับกำลังแรงอัดน้อยกว่าชุดควบคุม แต่ซีเมนต์ก้อนชุด เอ ที่ผ่านการบ่มที่ 28 วัน เมื่อเทียบกับชุดควบคุมมีค่าการรับกำลังแรงอัดได้ถึง  $253.81 \pm 11.99 \text{ Kg/cm}^2$  (n=3) ค่าความชื้น 4.73 % ซึ่งมากกว่าชุดควบคุม และผ่านเกณฑ์กำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐาน [10] ดังรูปที่ 4 เนื่องจากการเพิ่มปริมาณกากตะกอนเข้าไปในส่วนผสม กากตะกอนสามารถกระจายทั่วบนผิวของปูนซีเมนต์ ซึ่งมีผลในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดช่องว่างภายในโครงสร้างซีเมนต์ก้อนมากขึ้น เป็นผลให้ค่าการรับกำลังแรงอัดลดน้อยลง เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้นสามารถทำให้ซีเมนต์ก้อนมีค่าการรับกำลังแรงอัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้อย่างต่อเนื่อง ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันช่วยอุดช่องว่างภายในโครงสร้าง ทำให้

โครงสร้างของซีเมนต์ก้อนมีความแข็งแรงมากขึ้น [3, 7] ดังนั้นในการใช้กากตะกอนทดแทนปูนซีเมนต์จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาการบ่มนานถึง 28 วันให้ได้สมบัติการรับกำลังแรงอัดที่ดี

ในการหล่อซีเมนต์ก้อน การผสมส่วนผสมต่างๆ เกิดปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบทางเคมีในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ หรือปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว ผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate: C-S-H) ร้อยละ 50 – 90 โดยปริมาตรซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวประสาน และแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $[Ca(OH)_2]$  ประมาณร้อยละ 20 – 25 โดยปริมาตร ทำให้ซีเมนต์ก้อนสามารถก่อตัวได้ และเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งชนิดใหม่ที่มีสมบัติในการรับแรงอัดได้ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในส่วนผสมนั้น โดยปริมาณความร้อนส่วนใหญ่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3-S$ ) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2-S$ ) ที่คายความร้อนสูงเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลต่อการรับแรงอัด [3] ทำให้อุณหภูมิภายในส่วนผสมสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก ถ้ามีความแตกต่างของอุณหภูมิมากสามารถทำให้เกิดรอยร้าวได้ และส่งผลให้การรับแรงอัดลดลง ในการใช้กากตะกอนในส่วนผสม สามารถช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนในส่วนผสมทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ปริมาณของทั้ง  $C_3-S$  และ  $C_2-S$  ลดลงด้วย จึงหวังให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลง ส่งผลให้มีการคายความร้อนจากปฏิกิริยาลดลง ไม่เกิดรอยแตกร้าว ช่วยทำให้ซีเมนต์ก้อนมีความแข็งแรงมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกากตะกอนที่เพิ่มเข้าไป



(ก) ค่าพีเอช



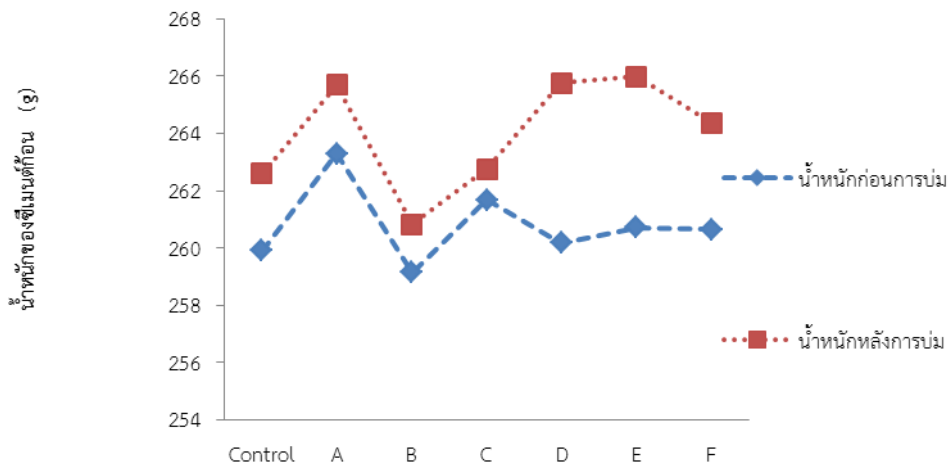
(ข) ค่าการนำไฟฟ้า

รูปที่ 3 ค่าพีเอช และ ค่าการนำไฟฟ้าของซีเมนต์ก้อนที่บ่มระยะเวลาต่างๆ

### 3.2.3 สมบัติทางเคมี

ในการบ่มซีเมนต์ก้อนโดยใช้น้ำประปาพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปลักษณะผิวหน้าของน้ำมีฝุ่นบางๆเป็นฝ้าลอยอยู่เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ในบรรยากาศสามารถละลายลงในน้ำที่ใช้บ่ม และทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่มีในซีเมนต์ก้อน เกิดแคลเซียมคาร์บอเนต( $\text{CaCO}_3$ ) ที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอย สีขาวขุ่นลอยอยู่บนผิวน้ำ

จากน้ำประปาที่ใช้บ่มอายุในการบ่ม 7 วัน ค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้นจากเดิม เนื่องจากองค์ประกอบภายในซีเมนต์ก้อนมีการละลายออกมาได้ เกิดเป็น  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จึงมีผลทำให้ค่าพีเอชเป็นเบส และที่อายุในการบ่ม 14 และ 28 วัน ค่าพีเอชของน้ำลดลงเพราะอัตราในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  กับ  $\text{H}_2\text{CO}_3$  จากการละลายของ  $\text{CO}_2$  ในบรรยากาศเกิดเป็น  $\text{CaCO}_3$  ลดลง ทำให้  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในน้ำที่บ่มลดลงและเนื่องจากฝ้าของ  $\text{CaCO}_3$  กั้นการละลายของ  $\text{CO}_2$  ลงในน้ำบ่มช่วง 14 – 28 วันได้ ทำให้ ค่าพีเอชไม่ลดลงมากเท่ากับในช่วง 7 วันแรก



รูปที่ 4 น้ำหนักซีเมนต์ก้อนก่อนบ่มและหลังบ่ม

ค่าการดูดซึมน้ำ จากกราฟรูปที่ 4 น้ำหนักของซีเมนต์ก้อนหลังบ่มเพิ่มขึ้นจากเดิมทุกชุดการทดลอง โดยเฉพาะชุด ดี, อี และ เอฟ ที่มีส่วนผสมของกากตะกอนที่ผ่านการเผา ซึ่งมีช่วงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมากกว่าชุด เอ, บี และ ซี ที่มีส่วนผสมของกากตะกอนแห้ง เนื่องจากกากตะกอนที่ผ่านการเผามีส่วนของน้ำที่ระเหยออกไป ทำให้ชุด ดี, อี และ เอฟ ดูดซึมน้ำได้มากกว่าชุดกากตะกอนแห้ง ซึ่งน้ำที่ดูดซึมเข้าไปมีส่วนทำให้เกิดการกัดเซาะของน้ำภายในซีเมนต์ก้อน และเพิ่มอัตราการละลายของสารต่างๆ ที่อยู่ภายในซีเมนต์ก้อนได้

สำหรับปริมาณโลหะหนักในซีเมนต์ก้อน ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี ทีซีแอลพี และวิธี WET มีปริมาณแคดเมียม, โครเมียม, ทองแดง และตะกั่ว พบว่า ทุกชุดการทดลองมีผลของความเข้มข้นจากการชะละลายโลหะหนักผ่านค่ามาตรฐานของสารอันตราย ประเภทสารอินทรีย์ สำหรับการทดสอบด้วยวิธี WET ที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และผ่านค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบด้วยวิธี ทีซีแอลพี ตามที่ US EPA กำหนด



ตารางที่ 2 ค่าการรับกำลังแรงอัดซีเมนต์ก้อน

การทดลอง	ค่ากำลังแรงอัด (Kg/cm <sup>2</sup> ) $\bar{X} \pm SD$ (n = 3)			ค่ากำลังแรงอัดมาตรฐาน* (Kg/cm <sup>2</sup> )		
	บ่ม 7 วัน	บ่ม 14 วัน	บ่ม 28 วัน	บ่ม 7 วัน	บ่ม 14 วัน	บ่ม 28 วัน
ชุดควบคุม	203.78 ± 10.53	232.58 ± 19.80	246.87 ± 14.80	150	-	210
เอ (A)	184.75 ± 12.62	218.47 ± 8.56	253.81 ± 11.99			
บี (B)	133.04 ± 8.48	149.34 ± 5.76	205.48 ± 23.13			
ซี (C)	80.63 ± 0.84	99.90 ± 2.22	124.42 ± 8.03			
ดี (D)	174.94 ± 3.72	183.64 ± 10.07	207.01 ± 13.29			
อี (E)	153.51 ± 9.98	166.27 ± 3.65	176.81 ± 12.55			
เอฟ (F)	79.77 ± 3.35	100.72 ± 2.16	103.96 ± 5.99			

หมายเหตุ \*ค่ามาตรฐานสำหรับมอร์ตาร์ที่ผลิตจากซีเมนต์ประเภท 5 ที่มีความทนซัลเฟตสูง [10]

### 3.3 การผลิตกระถางซีเมนต์

จากการทดสอบค่าการรับกำลังแรงอัด พบว่า การเพิ่มกากตะกอนแห้งในการทดแทนปูนซีเมนต์ที่ปริมาณกากตะกอนแห้ง 10 % หรือชุด เอ มีค่าการรับกำลังแรงอัดสูงสุด และผ่านเกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐาน จึงใช้อัตราส่วนกากตะกอนแห้งที่ 10 % มาทำการทดลองผลิตกระถาง โดยแบ่งเป็น 2 ชุด คือ ชุดควบคุม โดยมีส่วนผสมคือ ปูน 1,500 กรัม ทราย 4,125 กรัม และน้ำ 1,237.50 mL และชุดทดลอง โดยมีส่วนผสมคือ ปูน 1,350 กรัม กากตะกอนแห้ง 150 กรัม ทราย 4,125 กรัม และน้ำ 1,237.50 mL เมื่อครบเวลาจึงนำออกจากแบบหล่อ จากการทดลองผลิตกระถางพบว่า ต้องรอเวลาให้ตัวกระถางแห้งเป็นเวลานาน 48 ชั่วโมงแล้วจึงแกะออกจากแบบหล่อ เมื่อแกะกระถางออกจากแบบหล่อแล้วกระถางที่ได้ไม่มีการแตกรอยร้าว



รูปที่ 5 กระถางจากซีเมนต์ธรรมดา และกระถางซีเมนต์ที่ผลิตจากอัตราส่วนของกากตะกอนแห้ง 10 %

### 3.4 การวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิต

จากการทดลองใช้กากตะกอนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ พบว่า ปริมาณกากตะกอนที่เหมาะสมคือ 10 % เมื่อนำมาวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิต การใช้กากตะกอนปริมาณ 1 ตันเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้เป็นจำนวน 3,000 บาท โดยคิดจากปูนซีเมนต์ถุงละ 150 บาท หนัก 50 กิโลกรัม (ราคา ณ เดือนกันยายน 2555) และถือว่าไม่มีต้นทุนจากการใช้กากตะกอน ซึ่งกากตะกอน 1 ตันสามารถผลิตกระถางได้ประมาณ 20,000 ใบ

#### 4. สรุป

ผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากตะกอนสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ได้ เนื่องจากองค์ประกอบของกากตะกอนมีความคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์โดยเฉพาะในด้านองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ และด้วยองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุที่มีปริมาณน้อย มีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ได้ ขนาดอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวเล็กมาก และเมื่อเป็นเบสช่วยในการตรึงโลหะหนักไว้ได้ ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด (Cd, Cr, Cu, และ Pb) ในซีเมนต์ก้อน พบว่า เมื่อนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ ค่าการชะละลายโลหะหนักของทุกชุดการทดลองมีปริมาณต่ำ และมีค่าชะละลายผ่านมาตรฐานของสารอันตรายประเภทสารอนินทรีย์สำหรับการทดสอบด้วยวิธี WET ที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และผ่านค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบด้วยวิธี ทีซีแอลพี ตามที่ US EPA กำหนด

อัตราส่วนที่เหมาะสมในการหล่อซีเมนต์ก้อน คือ ชุดเอ ซึ่งมีอัตราส่วนของวัสดุผสม ปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนแห้ง ต่อทรายต่อน้ำ เท่ากับ 0.9 : 0.1 : 2.75 : 0.825 ชุดเอ ให้ค่าการรับกำลังแรงอัดที่ 28 วันผ่านเกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐาน และมีปริมาณโลหะหนักที่ทำการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี WET และวิธี ทีซีแอลพี ผ่านค่ามาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และ US EPA กำหนด ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนของกากตะกอน และระยะเวลาในการบ่มซีเมนต์ก้อนมีความสัมพันธ์กับค่าการรับกำลังแรงอัด เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนต่อปูนซีเมนต์มีผลทำให้ค่าการรับกำลังแรงอัดลดน้อยลง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มมีผลทำให้ค่าการรับกำลังแรงอัดเพิ่มขึ้น กากตะกอนที่นำมาศึกษาไม่จัดว่าเป็นกากของเสียอันตราย ดังนั้นจึงเป็นวัสดุทางเลือกในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ทั้งประหยัดพลังงานจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยตรง และ ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้เช่นกัน

##### 4.1 ข้อเสนอแนะ

1. ในการนำกากตะกอนไปผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ควรมีการทดสอบสมบัติรวมทั้งการนำไปใช้ของผลิตภัณฑ์นั้นๆ และศึกษาการชะละลายโลหะหนักในผลิตภัณฑ์ด้วยวิธี WET และวิธี ทีซีแอลพี
2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม ในการนำกากตะกอนผลิตเป็นกระถางปลูกพืช เพื่อศึกษาผลกระทบของโลหะหนักที่อาจมีต่อการเจริญเติบโตพืชในระยะยาว

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้รับการสนับสนุนและความอนุเคราะห์กากตะกอนจากโรงไฟฟ้าของบริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์จำกัด ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2552. คู่มือแนวทางการจัดการของเสียหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว. กรุงเทพฯ: สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2552.
- คมกริช น่วมจิตร, เชาวลิต เนตรสกุล และ ธนากร ประทุมเกตุ. 2548. การศึกษาและพัฒนาอิฐบล็อกจากกากตะกอนน้ำตาล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วีระชาติ ตั้งจิรภัทร. 2555. การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี.

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และ การวิเคราะห์ เพื่อตรวจ  
รับรองมาตรฐานสินค้า. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน.
- กระทรวงอุตสาหกรรม 2548. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว  
พ.ศ. 2548 ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 123 ตอนพิเศษ 11 ง.
- US EPA 1994. SW-846 Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods.
- ประภัสสร มณีรัตน์ 2551, การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุ  
ประสาน วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและ  
สิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Lin, D.F. and Weng, C.H. 2001. "Use of sewage sludge ash as brick material." *Journal of  
Environmental Engineering*. 127(10): 922-927.
- Weng, C.H. et al. 2003. "Utilization of sludge as brick materials." *Advances in Environmental  
Research*. 7(2003): 679-685.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1- 2547 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ.

