



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์เฟสผสมเถ้าชานอ้อย

The study of leaching of heavy metals contaminant in cement pastes containing bagasse ashes

วรวรรณชัย สายวาริน¹⁾ ชูวิทย์ นาเพีย²⁾ และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ^{*1)}

Worawanchai Saiwarin,¹⁾ Chuwit Napia²⁾ and Theerawat Sinsiri^{*1)}

¹⁾สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000.

²⁾คณะสังคมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ 33000

Faculty of Arts and Sciences, Sisaket Rajabhat University, Sisaket, Thailand, 33000.

Received July 2013

Accepted January 2014

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโรงชูปโลหะโดยใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุยึดประสาน ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และผสมกากตะกอนโลหะร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การศึกษาครั้งนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานโดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าความชื้นเหลวปกติของเฟส ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ โดยการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF), ถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็ง โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด, การรั่วไหลของโลหะหนักโดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ผลการทดสอบพบว่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกากตะกอนโลหะหนักผสมอยู่ นอกจากนั้นยังพบว่าก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ขณะที่การทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในสารชะมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่ US.EPA กำหนด

คำสำคัญ : เถ้าชานอ้อย กากตะกอนโลหะ ปฏิกริยาปอซโซลาน กำลังรับแรงอัด การชะละลาย

Abstract

This research investigated the properties of solidified wastes using bagasse ash and ordinary Portland cement as binder. Bagasse ash were used to partially replace the ordinary Portland cement at the rate of 0%, 10 %, 20% and 30% by weight respectively. The plating sludge was used at the rate of 0, 10, 20 and 30% by weight of binder. A constant normal consistency was used for all of the mixtures. XRF and SEM were

*Corresponding author Tel.: 0-803-347-718

Email address: sinsiri@sut.ac.th.

performed to investigate the chemical proportion and the particle shape of materials. Compressive strength of solidified wastes leachability of heavy metals was investigated by TCLP. Test results indicated that the compressive strength of all solidified wastes made with 10, 30 and 50 wt.% of plating sludge were dramatically decreased as compared to that without the waste. In addition, the compressive strength of blended cement pastes from 20 wt.% of bagasse ash replacement showed higher strength more than 10 wt.% and 30 wt.% of bagasse ash replacement while concentrations of heavy metals in the leachates after contacting with all cement-based solid wastes did not exceed the limit specified by US.EPA.

Keywords : Bagasse ash, Heavy metal, Pozzolan, Compressive strength, Leaching

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก อันเนื่องมาจากนโยบายทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ส่งผลให้เกิดของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรมในปริมาณมาก โดยของเสียอันตรายกว่า 80% เกิดขึ้นจากกิจกรรมในภาคอุตสาหกรรม โดยประเภทของของเสียอันตรายที่มีมากที่สุดได้แก่ ตะกอนและของแข็งโลหะหนัก ชนิดของโลหะที่พบมากได้แก่ อาร์เซนิก, แคดเมียม, โครเมียม, ไสยาไนต์, ตะกั่ว, พรอท และสังกะสี โดยส่วนมากพบจากโรงงานประเภท ถลุงโลหะ, ชุบโลหะ, ทำสี, ทำแบตเตอรี่ เป็นต้น โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียกว่โลหะอิสระ โดยเฉพาะเมื่อรวมตัวกับสารอินทรีย์กลายเป็นสารประกอบอินทรีย์โลหะ (Organometallic compound) ซึ่งเป็นพิษ สามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตผ่านทางห่วงโซ่อาหาร ความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิด เป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อสะสมภายในร่างกาย โดยอาจมีผลทำให้พิการหรือเสียชีวิต [1]

กระบวนการหล่อแข็ง (Solidification) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการบำบัดกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอันตรายประเภทอินทรีย์ที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยการใช้ตัวยึดประสานในการจำกัดความสามารถในการละลายและเคลื่อนตัวของโลหะหนักโดยพันธะทางเคมี ทำให้สารโลหะหนักอยู่ในสภาพคงตัว ลดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

หลังจากการแข็งตัวแล้ว วัสดุประสานที่ใช้มากได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย ซิลิกา เป็นต้น หลังจากนั้นจึงนำไปบำบัดและจัดการในขั้นตอนต่อไปอย่างถูกวิธี เพื่อลดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม [1,2]

ประเทศไทยมีการปลูกอ้อยเป็นจำนวนมากเพื่อป้อนสู่โรงงานผลิตเป็นน้ำตาล [3] เมื่อนำอ้อยไปสกัด น้ำอ้อยออกจะเหลือขานอ้อยซึ่งถูกนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อใช้ภายในโรงงานกลายเป็นเถ้าขานอ้อยในปริมาณมากซึ่งเป็นของเหลือทิ้งและต้องการพื้นที่ในการกำจัดและจัดการมาก มีนักวิจัยหลายท่านศึกษาคุณสมบัติของเถ้าขานอ้อย โดยพบว่าเถ้าขานอ้อยที่ละเอียดมีความเป็นปอซโซลานที่ดี และการทำปฏิกิริยาของเถ้าขานอ้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกอนออกไซด์ที่ไม่เป็นผลึก สิ่งเจือปน ขนาดอนุภาค และความละเอียด [4-8]

ดังที่กล่าวข้างต้นการศึกษาในครั้งนี้จึงนำวัสดุปอซโซลาน คือ เถ้าขานอ้อย มาใช้ในการทดสอบการเก็บกักสารปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรมของก้อนหล่อแข็งตัวอย่างทดสอบร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อให้เกิดประโยชน์ในหลายด้าน คือ สามารถบำบัดโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นกระบวนการที่มีราคาไม่สูงมาก และส่งเสริมการรักษาสิ่งแวดล้อมด้วย

2. ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาความสามารถในการรับแรงอัด และการชะละลายสารโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนด้วยวัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุประสาน คือ แทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยผสมภาคตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบโลหะในอัตราส่วนร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

3. วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 เถ้าขานอ้อย จากโรงงานผลิตน้ำตาลจังหวัด สุพรรณบุรี เนื่องจากมีการปลูกอ้อยเป็นจำนวนมาก และสะดวกต่อการขนย้ายของผู้วิจัย

3.1.3 ภาคตะกอนของเสียปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานชุบโลหะ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เนื่องจากมีโรงงานประเภทโรงงานชุบโลหะเป็นจำนวนมาก และสะดวกต่อการขนย้ายของผู้วิจัย

3.2 การเตรียมวัสดุ

ทำการบดเถ้าขานอ้อยด้วยเครื่องบดให้มีขนาดเล็ก ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ช่องเปิด 75 ไมโครเมตร) อบภาคตะกอนของเสียให้แห้ง จากนั้นทำการบดให้มีขนาดเล็ก ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (ช่องเปิด 9 ไมโครเมตร)

3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

OPC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

BA หมายถึง เถ้าขานอ้อย

S หมายถึง ภาคตะกอนของเสียโลหะหนัก

OPC10BA, OPC20BA, OPC30BA หมายถึง การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าขานอ้อยในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก

OPCXA10S, OPCXA30S, OPCXA50S หมายถึง การผสมภาคตะกอนของเสียในอัตราร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ โดย X คือ อัตราส่วนของเถ้าขานอ้อย

3.4 อัตราส่วนผสม

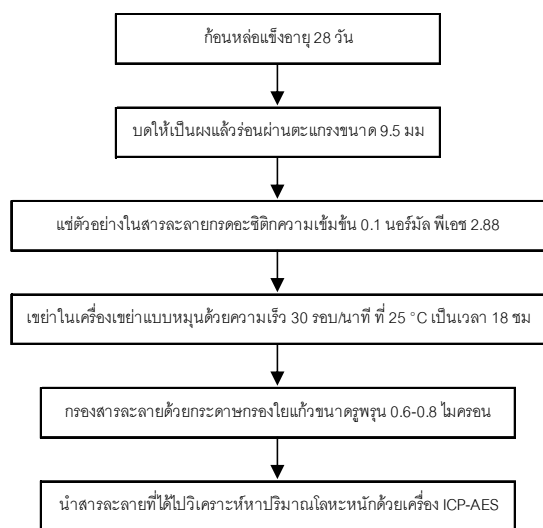
ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และผสมภาคตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ดังแสดงในตารางที่ 1 ทำการหล่อตัวอย่างทดสอบโดยใช้แบบทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม ตามมาตรฐาน ASTM C 109 [9] หลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมงจึงทำการถอดแบบออก และบ่มตัวอย่างโดยการนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง จนครบอายุทดสอบที่ 7, 28 และ 60 วัน

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสม

Binder		S (%)	Symbol
OPC (%)	BA (%)		
100	-	-	OPC100
		10	OPC10S
		30	OPC30S
		50	OPC50S
90	10	-	OPC10BA
		10	OPC10BA10S
		30	OPC10BA30S
		50	OPC10BA50S
80	20	-	OPC20BA
		10	OPC20BA10S
		30	OPC20BA30S
		50	OPC20BA50S
70	30	-	OPC30BA
		10	OPC30BA10S
		30	OPC30BA30S
		50	OPC30BA50S

3.5 การทดสอบการชะละลาย

นำก้อนหล่อแข็งที่ต้องการทดสอบมาทุบให้มีขนาดเล็ก นำไปบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มม. ทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) โดยนำตัวอย่างแช่ในสารละลายกรดอะซิติก แล้วนำเข้าเครื่องเขย่าแบบหมุน กรองสารละลายแล้วนำไปวิเคราะห์ผล [10,11] ตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผังการทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLP

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

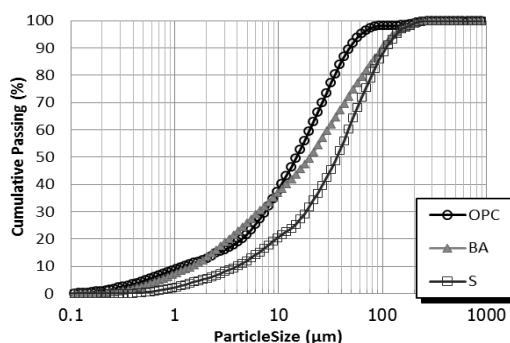
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, แก้วชานอ้อย และกากตะกอนของเสี้ยน พบว่าแก้วชานอ้อย และกากตะกอนของเสี้ยน มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และกากตะกอนของเสี้ยนมีค่าต่ำที่สุด คือ 1.79 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แก้วชานอ้อย และกากตะกอนของเสี้ยนเท่ากับ 14.3, 19.8 และ 36.9 ไมครอน ตามลำดับ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และแก้วชานอ้อยมีขนาด

ใกล้เคียงกัน ส่วนกากตะกอนของเสี้ยนมีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นเท่ากับ 3,870 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซึ่งมีค่ามากที่สุด ส่วนแก้วชานอ้อยและกากตะกอนของเสี้ยนมีค่าเท่ากับ 3,010 และ 2,100 ตารางเซนติเมตร/กรัม ตามลำดับ ดังแสดงตามตารางที่ 2 และการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, แก้วชานอ้อย และกากตะกอนของเสี้ยนดังรูปที่ 2

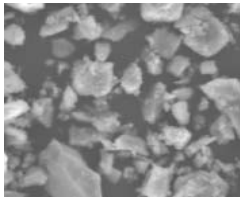
ตารางที่ 2 ความถ่วงจำเพาะ, ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิว

Chemical composition (%)	OPC	BA	S
Specific gravity	3.15	2.16	1.79
Mean Particle size d_{50} (μm)	14.3	19.8	36.9
Surface area (cm^2/g)	3,870	3,010	2,100

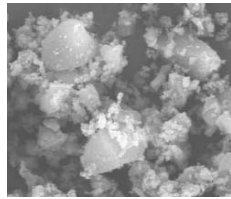


รูปที่ 2 การกระจายตัวของอนุภาค

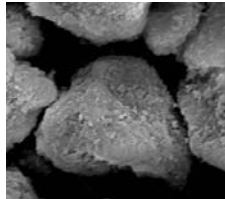
ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมและมีผิวขรุขระ แก้วชานอ้อย มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมเล็กน้อยและมีผิวขรุขระ เช่นเดียวกับกากตะกอนของเสี้ยน คือมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมเล็กน้อย ผิวขรุขระ และมีเนื้อแน่น ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ [12]



(ก) ซีเมนต์



(ข) เถ้าขาน้อย



(ค) กากตะกอนโลหะ

รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุโดย SEM

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เถ้าขาน้อย และกากตะกอนของเสีย โดยเถ้าขาน้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสารประกอบออกไซด์หลักที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3) และ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันแล้วมากกว่าร้อยละ 70, ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) น้อยกว่าร้อยละ 4 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ต่ำกว่า 10 ดังนั้นเถ้าขาน้อยที่นำมาใช้จัดเป็นวัสดุปอซโซลานใน Class F ตามข้อกำหนด ASTM C 618 [13] สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แล้วเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(C-S-H) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาปอซโซลาน [14]

กากตะกอนของเสียปูนเปื้อนโลหะหนักสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นกากตะกอนของเสียจากโรงงานชุบโลหะ ประกอบไปด้วยออกไซด์โลหะหนัก คือ นิเกิล ทองแดง สังกะสี และโครเมียม โดย นิเกิล (Ni) มีความเป็นพิษ ซึ่งอาจทำให้เกิดมะเร็งทางเดินหายใจเพราะไปทำลายการสังเคราะห์ดีเอ็นเอ ทำให้เซลล์ตายและมีผลอักเสบ ทองแดง (Cu) เมื่อได้รับในปริมาณมากเป็นเวลานานจะทำให้ร่างกายอ่อนแออยู่ตลอดเวลาและกล้ามเนื้อแข็ง

เกร็ง สังกะสี (Zn) เมื่อได้รับในปริมาณมากเป็นระยะเวลานานจะทำให้ระบบภูมิคุ้มกันต้านทานลดลง โครเมียม (Cr) เป็นสารที่เป็นพิษและก่อมะเร็ง ซึ่งมีค่าดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของ OPC, BA และ S

Chemical composition (%)	OPC	BA	S
SiO_2	19.85	58.15	6.86
Al_2O_3	4.49	13.57	5.55
Fe_2O_3	3.56	4.18	0.03
CaO	66.96	6.58	24.41
MgO	1.36	0.18	-
Na_2O	-	-	-
K_2O	0.34	4.94	-
SO_3	2.46	0.62	-
NiO	-	-	38.85
CuO	-	-	14.08
ZnO	-	-	9.29
CrO	-	-	0.43
Other	-	3.14	-
LOI	0.98	8.64	0.5

4.3 ความชื้นเหลือปกติ

ตารางที่ 4 แสดงค่าความชื้นเหลือปกติจากการทดสอบ โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความชื้นเหลือปกติของ OPC100, OPC10BA, OPC20BA และ OPC30BA มีค่าเท่ากับ 26.7, 33.6, 35.9 และ 39.6 ตามลำดับ จะพบว่าค่าความชื้นเหลือปกติมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเถ้าขาน้อยเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนผสมเนื่องจากเถ้าขาน้อยทำให้อัตราส่วนผสมมีความต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความชื้นเหลือปกติของอัตราส่วนที่มีกากตะกอนของเสียโลหะหนักผสมอยู่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในอัตราส่วนผสม ค่าความชื้นเหลือปกติจะมีค่ามากขึ้น โดยกากตะกอนทำให้อัตราส่วนผสมมีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 4 ค่าความชื้นเหลวปกติ

Binder		S (%)	ความชื้นเหลวปกติ (ร้อยละ)
OPC (%)	BA (%)		
100	-	-	26.7
		10	27.5
		30	31.2
		50	36.8
90	10	-	33.6
		10	35.1
		30	39.4
		50	46.5
80	20	-	35.9
		10	37.4
		30	41.8
		50	49.3
70	30	-	39.6
		10	41.1
		30	45.6
		50	53.2

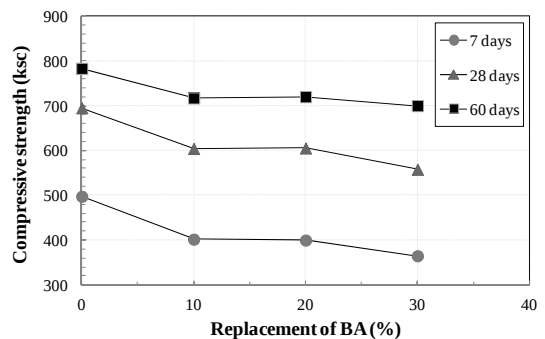
4.4 ผลการทดสอบของกำลังอัด

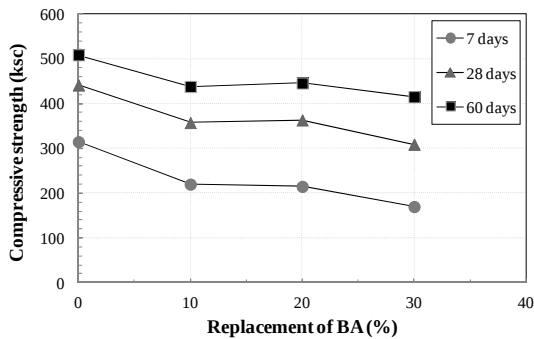
รูปที่ 4 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขาน้อยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าขาน้อย ค่ากำลังอัดที่ได้นั้นมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากในช่วงแรกการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าขาน้อยยังไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมาก[10,11] และเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ก้อนหล่อแข็งจะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยกำลังรับแรงอัดที่อายุ 60 วัน ของ OPC10BA, OPC20BA และ OPC30BA มีค่าเท่ากับ 717, 720 และ 700 ksc ตามลำดับ และกำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ OPC100 เท่ากับ 783 ksc การแทนที่ด้วยเถ้าขาน้อย

ในอัตราส่วนร้อยละ 20 จะมีกำลังอัดดีกว่าการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 คือ มีค่าเท่ากับ 400 ksc 605 ksc และ 720 ksc ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน โดยคิดเป็น 80.4%, 87.2% และ 92.0% เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุเดียวกัน

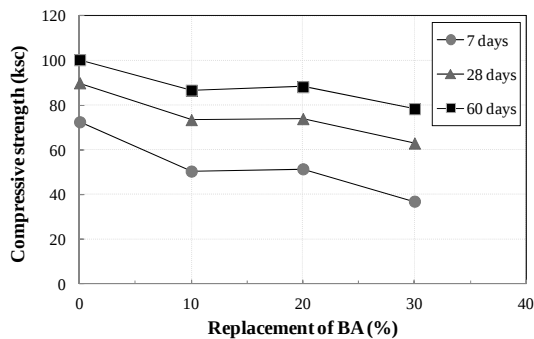
รูปที่ 5, 6 และ 7 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งทดสอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย เถ้าขาน้อยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุประสาน และผสมภาคตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าก้อนหล่อแข็งมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณภาคตะกอนของเสียในอัตราส่วนผสมมากขึ้น เช่น OPC10S, OPC30S และ OPC50S ที่อายุ 60 วันมีค่า 508.59, 100.25 และ 10.56 ksc เนื่องจากปริมาณภาคตะกอนของเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของวัสดุยึดประสานในส่วนผสมลดลง ซึ่งจะทำให้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้น้อย [12]จึงทำให้กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมภาคตะกอนของเสียบางอัตราส่วนมีกำลังอัดต่ำ

มาตรฐานกำลังรับแรงอัดต่ำสุดของก้อนหล่อแข็งที่สามารถนำไปฝังกลบ จะต้องมากกว่า 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 3.15 ksc [15]

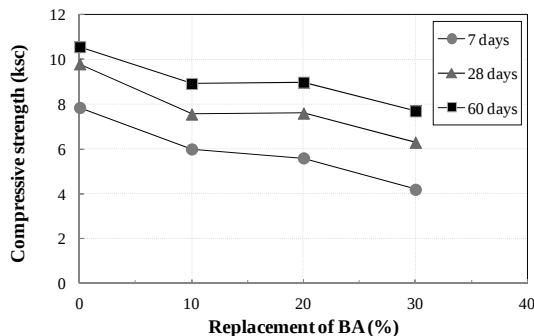
**รูปที่ 4** กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เฟสค์ (10S)



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เฟสค์ (30S)



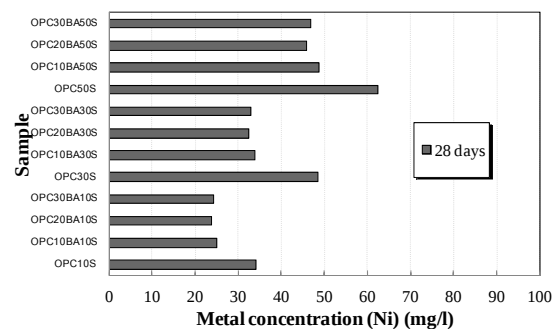
รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เฟสค์ (50S)

4.5 การวิเคราะห์การชะละลายของก้อนหล่อแข็ง

จากการทดลอง พบว่าปริมาณโลหะหนักที่พบในสารชะละลายมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของกากตะกอนเพิ่มมากขึ้น และที่อัตราส่วนกากตะกอนเท่ากัน ปริมาณการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียวมีปริมาณการชะละลายโลหะหนักสูงกว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุยึดประสานร่วม

เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์สามารถยึดตรึงโลหะหนักได้โดยขบวนการทางกายภาพและเคมี และเมื่อมีการเติมเถ้าขานอ้อยในส่วนผสมทำให้มีปริมาณสารประกอบซิลิกาเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระที่ได้จากการบวกรวมไฮเดรชันระหว่างการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ทำให้ได้สารประกอบซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน จึงสามารถตรึงโลหะไว้ได้ดีขึ้น

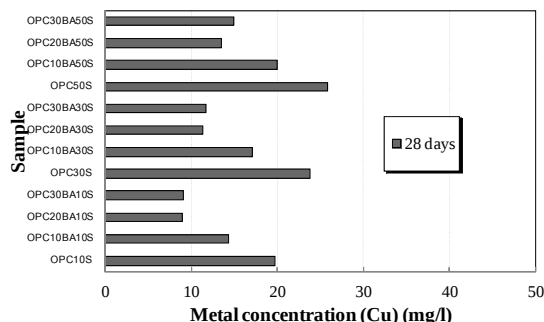
จากรูปที่ 8 แสดงปริมาณการชะละลายของโลหะหนักนิกเกิล (Ni) ของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อัตราส่วนกากตะกอนเท่ากัน ปริมาณการชะละลายนิกเกิลของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียว มีปริมาณการชะละลายนิกเกิลสูงกว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุยึดประสานร่วม โดยก้อนหล่อ OPC50S มีค่าการชะละลายสูงที่สุดคือ 62.46 มิลลิกรัม/ลิตร ดังรูป



รูปที่ 8 การชะละลายของนิกเกิล (Ni)

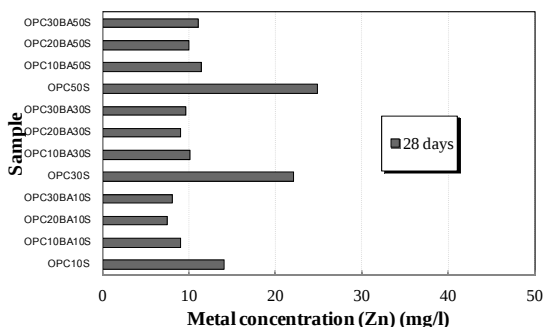
จากรูปที่ 9 แสดงปริมาณการชะละลายของโลหะหนักทองแดง (Cu) ของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อัตราส่วนกากตะกอนเท่ากัน ปริมาณการชะละลายทองแดงของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียวมีปริมาณการชะละลายทองแดงสูงกว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุยึดประสานร่วม โดยก้อน

หล่อ OPC50S มีค่าการชะละลายสูงที่สุดคือ 25.83 มิลลิกรัม/ลิตร ดังรูป



รูปที่ 9 การชะละลายของทองแดง (Cu)

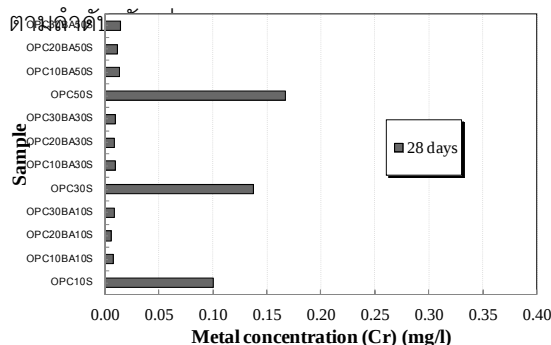
รูปที่ 10 แสดงปริมาณการชะละลายของโลหะหนักสังกะสี (Zn) ของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อัตราส่วนกากตะกอนเท่ากัน ปริมาณการชะละลายสังกะสีของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียว มีปริมาณการชะละลายสังกะสีสูงกว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้ก้อนหล่อที่ใช้เถ้าขาน้อยเป็นวัสดุยึดประสานร่วม โดยก้อนหล่อ OPC50S มีค่าการชะละลายสูงที่สุดคือ 24.83 มิลลิกรัม/ลิตร ดังรูป



รูปที่ 10 การชะละลายของสังกะสี (Zn)

รูปที่ 11 แสดงปริมาณการชะละลายของโลหะหนักโครเมียม (Cr) ของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อัตราส่วนกากตะกอนเท่ากัน ปริมาณการชะละลายโครเมียมของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียว มีปริมาณการชะละลายโครเมียมสูงกว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขาน้อยเป็นวัสดุยึดประสานร่วม โดยก้อนหล่อ OPC50S มีค่าการชะละลายสูงที่สุดคือ 0.10, 0.14 และ 0.17 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน



รูปที่ 11 การชะละลายของโครเมียม (Cr)

จากรูป พบว่า ปริมาณการชะละลายของโครเมียมอยู่ในเกณฑ์ของ US EPA คือ มีการชะละลายของโครเมียมน้อยกว่า 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร

ผลการชะละลายโลหะหนักนิกเกิล ทองแดง สังกะสี และโครเมียมในก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุยึดประสาน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของซูวิทย์ นาเพีย [16] พบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยผลการชะละลายปริมาณโลหะหนักมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของกากตะกอนเพิ่มมากขึ้น และการใช้วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุยึดประสานร่วมทำให้มีการชะละลายโลหะหนักลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียว

5. สรุป

จากผลการศึกษากำลังรับแรงอัดและการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะที่ใช้

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุยึดประสาน สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) ก้อนหล่อแข็งที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยจะมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และการแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 20 มีกำลังรับแรงอัดได้ดีกว่าการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 โดยน้ำหนัก

(2) เมื่อมีปริมาณกากตะกอนโลหะหนักเพิ่มขึ้น ปริมาณกากตะกอนจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง โดยค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งส่วนใหญ่มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกำลังรับแรงอัดต่ำสุดของก้อนหล่อแข็งที่สามารถนำไปฝังกลบ คือ จะต้องมีย่านค่ามากกว่า 3.15 ksc

(3) ปริมาณการชะละลายของก้อนหล่อแข็งมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนโลหะ และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อย ส่งผลให้ก้อนหล่อแข็งมีปริมาณการชะละลายต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียว

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้ และสาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย และผู้ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยครั้งนี้ทุกท่าน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Napia C, Sinsiri T, Jaturapitakkul C, Chindaprasit P. Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder. Waste Management 2012; 32: 1459-1467.
- [2] Na nagara T. Properties of the Solidified Heavy Metal Sludge Using Portland Cement and Black Husk Ash as Solidification Binder. [Master of Science]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2548.
- [3] Kulchanaorasi S. Influences of Bagasse Ash on Properties of Portland Cement Mortar. [Master of science in Industrial Education]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2548.
- [4] Martirena Hernandez J F, Middendorf B, Gehrke M, Budelmann H. Use of waste of sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: Study of the reaction, Cement and Concrete Research 1998; 28: 1525-1536.
- [5] Singh N B, Singh V D, Rai S. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement, Cement and Concrete Research 2000; 30: 1485-1488.
- [6] Paya J, Monzo J, Borrachero M V, Diaz-Pinzon L, Ordonez L M. Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production, Journal of Chemical Technology and Biotechnology 2002; 77: 321-325.
- [7] Cordeiro G O, Toledo Filho R D, Tavares L.M. and Fairbairn E.M.R., Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars, Cement and Concrete Composites 2008; 30: 410-418.

- [8] Vilar-Cocina E, Frias M, Valencia-Morales E. Sugar cane wastes as pozzolanic materials: Application of mathematical model, *ACI Materials: Application of mathematical Journal* 2008; 105: 258-264.
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM C 109: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. Annual Book of ASTM Standards. 2001.
- [10] Li X D, Poon C S, Sun H, Lo I M C, Kirk DW. Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials. *Journal of Hazardous Materials A* 2001; 82: 215–230.
- [11] Asavapisit S, Naksrichum S, Harnwajanawong N. Strength, leachability and microstructure characteristics of cement-based solidified plating sludge. *Cement and Concrete Research* 2005; 35: 1042–1049.
- [12] Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C, Sinsiri T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites* 2005; 27: 425–428.
- [13] American Society for Testing and Materials. ASTM C 618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. Annual Book of ASTM Standards. 2001.
- [14] Sinsiri T, Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C. Effect of Fly Ash on Pore Size and Microstructure of Hardened Blended Cement Paset. The Frist Asian Concrete Federation (ACF) Conference. 2 2548: 64-82.
- [15] American Society for Testing and Materials. ASTM D 4843-88; Standard test method for wetting and drying test of solid wastes. Annual book of ASTM standards. 1997.
- [16] Napia C. The study of leaching on the solidified heavy metal sludge using cement and pozzolanic materials as binders. [Doctor of Philosophy of Engineering in Civil Engineering]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2011.