

การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์พอสต์ผสมเถ้าชีวมวล



นางสาววรรณชัย สายวาริน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**THE STUDY OF LEACHING OF HEAVY METALS
CONTAMINANT IN CEMENT PASTES
CONTAINING BIOMASS ASHES**

Worawanchai Saiwarin



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2013**

การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์เพื่อผลิตผสมถ้ำชีวมวล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.มงคล จิรวรรณ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วรวรรณชัย สายวาริน : การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์
ผสมเถ้าชีวมวล (THE STUDY OF LEACHING OF HEAVY METALS
CONTAMINANT IN CEMENT PASTES CONTAINING BIOMASS ASHES)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 107 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าชานอ้อยและเถ้า
แกลบที่เป็นวัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสาน อัตราส่วน
การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยและเถ้าแกลบคือร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของ
ปูนซีเมนต์ และผสมกากตะกอนจากโรงงานชุบนิเกิลในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 30 และ 50 โดย
น้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ โดยการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี
ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF), ถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง Scanning Electron
Microscope (SEM) ศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็ง โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการ
รั่วไหลของโลหะหนักโดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

ผลการทดสอบพบว่าเถ้าชานอ้อยและเถ้าแกลบที่ใช้ จัดเป็นวัสดุปอชโซลาน Class F ตาม
ข้อกำหนด ASTM C 618 การทดสอบความสามารถกำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีกาก
ตะกอนโลหะหนักผสม ทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีกากตะกอนโลหะ
หนักผสมอยู่ ทุกช่วงอายุการบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่าก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 โดยน้ำหนักของ
ปูนซีเมนต์ และก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 10 มีกำลังรับ
แรงอัดมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ส่วนการทดสอบการชะ
ละลายของก้อนหล่อแข็ง พบว่าเมื่อผสมกากตะกอนโลหะหนักในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การ
ชะละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น ก้อนหล่อแข็งตัวอย่างที่มีอายุการบ่มนานขึ้นจะมีการชะละลายของ
โลหะหนักน้อยลง ส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่เกิน
มาตรฐานที่ US.EPA กำหนด

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

WORAWANCHAI SAIWARIN : THE STUDY OF LEACHING OF
HEAVY METALS CONTAMINANT IN CEMENT PASTES
CONTAINING BIOMASS ASHES. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
THEERAWAT SINSIRI, Ph.D., 107 PP.

BAGASSE ASH/RICE HUSK ASH/HEAVY METAL/POZZOLANIC/
COMPRESSIVE STRENGTH/LEACHING

This research aims at investigating the leaching characteristics of heavy metals in blended cement paste. Two solidified wastes, Bagasse Ash (BA) and Rice Husk Ash (RHA), were used as pozzolanic replacement materials of ordinary Portland cement. The replacement ratios were 0%, 10 %, 20% and 30% of weight of cement. A plating sludge, containing heavy metals was mixed with blended cement paste at different contents of 0%, 10%, 30% and 50% of weight of the binder. The microstructure and chemical properties of cement, bagasse ash, rice husk ash and sludge are investigated via X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) and Scanning Electron Microscope (SEM). The compressive strength and heavy metal leachability of blended pastes are also examined. The leachability is measured using Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP).

Test results indicated that BA and RHA are classified as Class F Pozzolanic material according to ASTM C618. The compressive strength of the solidified waste mixes significantly decreased compared with the control mixes for all ages. Moreover, it is found that the compressive strengths of BA blended cement pastes at 20% replacement are higher than those at 10% and 30% replacement. Whereas, the

compressive strengths of RHA blended cement pastes at 10% replacement are higher than those at 20% and 30% replacement. The leachability test shows that the leaching concentration decreases as the curing time increases. It was also observed that leaching concentrations of heavy metals from the blended pastes do not exceed the limit specified by US.EPA.



School of Civil Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคล ต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะ แนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวชิรเดช กรรมการ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะ แนวทาง และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา ขอขอบคุณนายชูวิทย์ นาเพีย ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการทำการทดลองและการเขียนวิทยานิพนธ์

คุณณัฐญา กิ่งโคกกรวด และคุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ ที่ช่วยเหลือเกี่ยวกับการติดต่อประสานงานต่าง ๆ

คุณชุลีพร อ้อยยืนยง คุณชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์ คุณปิยะฉัตร สุภวิทยาเจริญกุล คุณปาริชาติ บุญเลิศ พี่เพื่อน และน้องร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษาที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ โดยตลอด

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับสถานที่ดำเนินงานวิจัย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุน ให้โอกาสในการศึกษา และเป็นกำลังใจอันสำคัญยิ่งในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

วรวรรณชัย สายวาริน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฏ

บทที่

1	บทนำ.....	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2	วัตถุประสงค์.....	2
1.3	ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2	ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5	
2.1	ของเสียอันตราย.....	5
2.1.1	คำนิยาม.....	5
2.1.2	แหล่งกำเนิดของเสียอันตราย.....	5
2.2	โลหะหนัก.....	6
2.2.1	แหล่งกำเนิดของสารโลหะหนัก.....	6
2.2.2	การสะสมของโลหะหนัก.....	7
2.2.3	สารพิษจากโลหะหนัก.....	8
2.2.4	โลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	การหล่อแข็งกากของเสียที่เป็นอันตราย.....	11
2.3.1	การหล่อแข็ง.....	11
2.3.2	เทคนิคการหล่อแข็งกากของเสียอันตราย.....	12
2.3.3	คุณสมบัติของสารที่ได้จากการหล่อแข็ง.....	13
2.4	วัสดุยึดประสาน.....	14
2.4.1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	14
2.4.2	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์.....	15
2.4.3	ปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	19
2.4.4	ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	21
2.5	วัสดุพอซโซลาน.....	21
2.5.1	ปฏิกิริยาพอซโซลาน.....	23
2.5.2	เถ้าแกลบ.....	23
2.5.3	เถ้าขานอ้อย.....	24
2.6	การชะละลาย.....	25
2.6.1	ความหมาย.....	25
2.6.2	การวัดความสามารถในการชะละลาย.....	26
2.6.3	ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการชะละลาย.....	27
2.6.4	กลไกการชะละลาย.....	30
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	36
3.1	บทนำ.....	36
3.2	วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.2.1	วัสดุอุปกรณ์.....	36
3.2.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	36
3.2.3	การเตรียมวัสดุสำหรับการทดลอง.....	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	วิธีการทดสอบ	39
3.3.1	การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ.....	39
3.3.2	การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี ของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง.....	40
3.3.3	การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อน โลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง.....	43
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	45
4.1	บทนำ	45
4.2	คุณสมบัติของวัสดุยึดประสานและกากตะกอน	45
4.2.1	คุณสมบัติทางกายภาพ	45
4.2.2	องค์ประกอบทางเคมี	49
4.3	คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง	50
4.3.1	ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์	50
4.3.2	ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์	52
4.3.3	ระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง	52
4.4	กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง.....	54
4.4.1	กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์	54
4.4.2	กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง	55
4.5	การทดสอบการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง.....	59
4.5.1	การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP.....	59
5	สรุปผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	76
5.1	บทนำ	76
5.2	สรุปผลการทดสอบในงานวิจัย	76
5.2.1	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานและกากตะกอนโลหะหนัก.....	76
5.2.2	ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง.....	76
5.2.3	การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด.....	77
5.2.4	การทดสอบการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง.....	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ข้อเสนอแนะ	77
5.3.1 ข้อเสนอแนะในการใช้งาน	77
5.3.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป	77
รายการอ้างอิง	79
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน	83
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	85
ประวัติผู้เขียน.....	107



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์	11
2.2 ค่ามาตรฐานความสามารถในการรับแรงอัดของการหล่อแข็งของเสี้ยนเพื่อการฝังกลบ	14
2.3 ปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ	15
2.4 อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารต่างๆในซีเมนต์เพสต์	17
2.5 การจำแนกชั้นของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM 618-99.....	22
2.6 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ.....	24
2.7 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย	25
2.8 ค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารอันตรายที่ยอมให้มีได้ในสารชะ.....	26
3.1 อัตราส่วนผสมซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก.....	37
4.1 ความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ.....	47
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานและกากตะกอน	49
4.3 ความชื้นเหลวของซีเมนต์เพสต์	50
4.4 ความชื้นเหลวของก้อนหล่อแข็ง.....	51
4.5 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์	52
4.6 ระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง	53
4.7 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์.....	54
4.8 กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง.....	56
4.9 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายนิกเกิล ในสารชะละลายของ ก้อนหล่อแข็ง	60
4.10 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายทองแดง ในสารชะละลายของ ก้อนหล่อแข็ง	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายสังกะสี ในสารชะละลาย ของก้อนหล่อแข็ง	68
4.12 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโครเมียม ในสารชะละลาย ของก้อนหล่อแข็ง.....	72



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ภาพถ่ายขยายโดย SEM ของซีเมนต์เพสต์18
2.2	Monosulphate and Ettringite 20
3.1	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค Particle Size Analyzer..... 39
3.2	เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM).....40
3.3	เครื่องทดสอบความชื้นเหลวปกติ Vicat Apparatus.....42
3.4	เครื่องทดสอบกำลังอัด Compression machine43
3.5	การทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLP44
3.6	เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP).....44
4.1	ภาพวัสดุยึดประสานและกากตะกอน โลหะหนัก.....46
4.2	กราฟแสดงการกระจายตัวอนุภาคของวัสดุ47
4.3	ภาพถ่ายขยายของวัสดุยึดประสานและกากตะกอน โลหะหนัก.....48
4.4	การพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์55
4.5	การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน57
4.6	การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน58
4.7	การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน58
4.8	กราฟแสดงปริมาณการชะละลายนิเกิลที่อายุการบ่ม 7 วัน61
4.9	กราฟแสดงปริมาณการชะละลายนิเกิลที่อายุการบ่ม 28 วัน62
4.10	กราฟแสดงปริมาณการชะละลายนิเกิลที่อายุการบ่ม 60 วัน63
4.11	กราฟแสดงปริมาณการชะละลายทองแดงที่อายุการบ่ม 7 วัน65
4.12	กราฟแสดงปริมาณการชะละลายทองแดงที่อายุการบ่ม 28 วัน66
4.13	กราฟแสดงปริมาณการชะละลายทองแดงที่อายุการบ่ม 60 วัน67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14	กราฟแสดงปริมาณการชะละลายสังกะสีที่อายุการบ่ม 7 วัน69
4.15	กราฟแสดงปริมาณการชะละลายสังกะสีที่อายุการบ่ม 28 วัน70
4.16	กราฟแสดงปริมาณการชะละลายสังกะสีที่อายุการบ่ม 60 วัน71
4.17	กราฟแสดงปริมาณการชะละลายโครเมียมที่อายุการบ่ม 7 วัน73
4.18	กราฟแสดงปริมาณการชะละลายโครเมียมที่อายุการบ่ม 28 วัน74
4.19	กราฟแสดงปริมาณการชะละลายโครเมียมที่อายุการบ่ม 60 วัน75



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing and Materials
XRF	=	X-Ray Fluorescence
SEM	=	Scanning Electron Microscope
TCLP	=	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
ICP	=	Inductively Coupled Plasma Spectroscope
U.S.EPA	=	U.S. Environmental Protection Agency
w/b	=	อัตราส่วนน้ำ/วัสดุยึดประสาน
C-S-H	=	แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต
C-A-H	=	แคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต
Ca(OH) ₂	=	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
CaCO ₃	=	แคลเซียมคาร์บอเนต
C ₂ S	=	ไดแคลเซียมซิลิเกต
C ₃ S	=	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
C ₃ A	=	ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต
C ₄ AF	=	เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์
SiO ₂	=	ซิลิกอนไดออกไซด์
Al ₂ O ₃	=	อลูมินาไตรออกไซด์
OPC	=	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1
BA	=	เถ้าขานอ้อย
RHA	=	เถ้าแกลบ
S	=	กากตะกอนโลหะหนัก

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

OPC100	=	ก้อนซีเมนต์เพสต์ควบคุม
OPCXXS	=	ก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานผสมกากตะกอนโลหะหนัก ร้อยละ <u>XX</u> โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน
OPCXXA	=	ก้อนซีเมนต์เพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย A ร้อยละ <u>XX</u> เป็นวัสดุยึดประสาน
OPCXXAYYS	=	ก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย A ร้อยละ <u>XX</u> เป็นวัสดุยึดประสานผสมกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ <u>YY</u> โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน
C_0	=	ความเข้มข้นของสารพิษก่อนทำการสกัด
C_i	=	ความเข้มข้นของสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด
W_0	=	ปริมาณสารพิษก่อนทำการสกัด
W_i	=	ปริมาณสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด
L	=	ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย หน่วย ร้อยละ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก อันเนื่องมาจากนโยบายทางเศรษฐกิจของประเทศ ช่วงเวลาที่ผ่านมา มีการก่อตั้งและขยายโรงงานอุตสาหกรรมมากมาย ทั้งในนิคมอุตสาหกรรมและที่กระจายอยู่ทั่วประเทศ ส่งผลให้เกิดของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรมในปริมาณมากตามไปด้วย ซึ่งทำให้มีของเสียอันตรายแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมที่เป็นธรรมชาติ และแพร่กระจายไปสู่บ้านเรือน ชุมชน และไปสู่มนุษย์มากยิ่งขึ้น

จากการสำรวจของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งกากของเสียอันตรายที่พบที่มีปริมาณมากที่สุดคือกากตะกอน และของแข็งโลหะหนัก ชนิดของโลหะหนักที่พบมากที่สุดคือ อาร์เซนิก, แคดเมียม, โครเมียม, ไซยาไนต์, ตะกั่ว,ปรอท และสังกะสี ซึ่งมาจากโรงงาน ถลุงโลหะ, ชุบโลหะ, ทำสี, ทำแบตเตอรี่ เป็นต้น โลหะหนักจะรวมตัวกับสารอื่น เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ทำให้มีความเสถียรกว่าโลหะอิสระ เมื่อโลหะที่มีความเป็นพิษรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบอินทรีย์โลหะ (Organometallic Compound) ซึ่งจะมีความเป็นพิษ และสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านทางห่วงโซ่อาหาร ความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิด เป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อมีการสะสมในร่างกาย อาจส่งผลให้พิการหรือเสียชีวิตได้ โลหะหนักบางชนิด เช่น ปรอท แคดเมียม อาร์เซนิก ตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักประเภทที่มีพิษถาวร ซึ่งสามารถสะสมในร่างกายได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกจากของเสีย น้ำเสีย หรือตะกอนเพื่อป้องกันไม่ให้แพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อม ถึงแม้ของเสียอันตรายที่ถูกปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรม จะผ่านการบำบัดกระบวนการต่าง ๆ เพื่อลดความเข้มข้นของสารพิษแล้ว แต่ก็ยังคงมีกากตะกอนตกค้าง ซึ่งจะถูกนำมาตากแห้งเพื่อกำจัดขั้นสุดท้ายต่อไป การกำจัดกากตะกอนในลักษณะนี้ไม่ปลอดภัยต่อผู้เก็บและขนย้าย เนื่องจากโลหะหนักบางชนิดอยู่ในสภาพที่ไม่คงตัว ทำให้มีโอกาสแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดปัญหาต่อไป เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้จำเป็นต้องมีกระบวนการลดความเป็นพิษ หรือกักเก็บกากสารพิษอันตรายไม่ให้แพร่กระจายความเป็นพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยง่าย ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมคือการหล่อแข็งกากของเสียที่เป็นอันตรายให้อยู่ในสภาพที่เสถียร

การหล่อแข็ง (Solidification) เป็นกระบวนการบำบัดชั้นกลาง เพื่อเตรียมของเสียให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมที่จะนำไปกำจัดด้วยวิธีต่างๆต่อไป เช่น การฝังกลบอย่างปลอดภัย ซึ่งใช้ในการบำบัดกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม ตัวอย่างของเสียที่จะนำมาทำให้คงตัว เช่น เศษชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอันตรายประเภทสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยใช้ตัวยึดประสานชนิดต่าง ๆ ตรึงของเสียอันตราย ซึ่งสารอันตรายจะถูกเก็บไว้ในโครงสร้างของตัวยึดประสานด้วยพันธะเคมี และทำให้สารอันตรายอยู่ในสภาพคงตัว ลดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมหลังจากการแข็งตัว จุดประสงค์ของการหล่อแข็ง คือ เพื่อลดความเป็นพิษของสาร ลดอัตราการเคลื่อนตัวของสารอันตราย ลดอัตราการละลาย ลดการชะละลายสารอันตรายสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของการรับแรงอัด และลดการซึมผ่านของของแข็งที่จะนำไปฝังกลบ และเป็นการลดพื้นที่ผิวของเสียที่จะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม เป็นการลดโอกาสที่ของเสียจะแพร่สู่สิ่งแวดล้อม ตัวยึดประสานในการหล่อแข็งที่ใช้มาก ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับวัสดุพอลิเมอร์ เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย ซิลิกา กากตะกอนจากเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ซึ่งการหล่อแข็งทำให้สามารถจัดเก็บได้ง่ายและสะดวกต่อการนำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบอย่างปลอดภัย

ดังที่กล่าวข้างต้นการศึกษาในครั้งนี้จึงนำวัสดุพอลิเมอร์ คือ เถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบ มาใช้ในการทดสอบการเก็บกักสารปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรมของก้อนหล่อแข็ง ตัวอย่างทดสอบร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อให้เกิดประโยชน์ในหลายด้าน คือ สามารถบำบัดโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นกระบวนการที่มีราคาไม่สูงมาก และส่งเสริมการรักษาสิ่งแวดล้อมด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษากำลังรับแรงอัดและการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยวัสดุพอลิเมอร์บางส่วนเป็นวัสดุประสาน ซึ่งสามารถแบ่งวัตถุประสงค์เป็นหัวข้อดังนี้

- 1) ศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบ
- 2) ศึกษาประสิทธิภาพในการลดการชะละลายสาร โลหะหนักของก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาความสามารถในการรับแรงอัด การชะละลาย และประสิทธิภาพในการลดการชะละลายสารโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนด้วยวัสดุพอซโซลานเป็นวัสดุประสาน คือ แทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, และแทนที่ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยผสมกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบโลหะในอัตราส่วนร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ของก้อนหล่อแข็งตัวอย่างที่อายุ 7, 28 และ 60

ทำการศึกษาคุณสมบัติทางด้านกายภาพของวัสดุในงานวิจัย โดยการทดสอบความถ่วงจำเพาะ, ความละเอียด, ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี โดย X-Ray Fluorescence (XRF)

ทำการศึกษาคุณสมบัติทางด้านกายภาพของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็งตัวอย่าง โดยการทดสอบความชื้นเหลือปกติ, การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว และการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทำการทดสอบการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งใช้วิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ทดสอบหาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP)

สถานที่ทำการทดสอบและวิเคราะห์ตัวอย่าง คือ อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ก้อนหล่อแข็งซีเมนต์เพสต์ตัวอย่างทดสอบที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าชานอ้อยและเถ้าแกลบ มีความสามารถในการรับแรงอัด และการเก็บกักสารโลหะหนักได้ดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

2) สามารถลดปัญหาด้านการจัดเก็บและการปนเปื้อนของสารโลหะหนักที่แพร่สู่สิ่งแวดล้อม

3) เป็นแนวทางในการนำวัสดุพอซโซลานมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดกากตะกอนของเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดกากตะกอนของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

4) เป็นการสร้างฐานข้อมูลการวิจัย พัฒนาและใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่มีอยู่อย่างเหมาะสมเพื่อการคิดค้นและพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ๆ ที่เหมาะสมกับการใช้งาน



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ของเสียอันตราย

2.1.1 คำนิยาม

สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ(เดิม) ได้นิยาม “ของเสียที่เป็นอันตราย” ว่าหมายถึง สารหรือวัตถุที่ไม่ใช่หรือใช้ไม่ได้ที่มีส่วนประกอบหรือเจือปนด้วยสารไวไฟ สารกัดกร่อน สารพิษ สารที่สามารถชะล้างได้ สารกัมมันตรังสี และ/หรือสิ่งที่ทำให้เกิดโรค ซึ่งเกิดจากกิจกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรม ชุมชน เกษตรกรรม เมื่อปี พ.ศ.2535 ส่วนคำนิยามที่มีกฎหมายรองรับได้แก่ คำนิยามของกระทรวงอุตสาหกรรมซึ่งใช้ในการควบคุมเฉพาะปัญหามลพิษจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 25 (พ.ศ.2531) ให้คำจำกัดความ “ของเสียอันตราย” ว่าเป็นวัสดุที่ไม่ได้ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นสารไวไฟ กัดกร่อน เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย มีสารพิษปะปน หรือมีตัวทำลายเสื่อมคุณภาพตามรายชื่อที่ระบุไว้บนเป็อน หรือกากตะกอนที่เกิดจากการผลิตหรือเกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียของ โรงงานอุตสาหกรรม

2.1.2 แหล่งกำเนิด

ของเสียอันตรายมีแหล่งกำเนิด 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ แหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม และจากการทำเกษตรกรรม ของเสียอันตรายจากชุมชนที่จำเป็นต้องมีการจัดการเฉพาะ ได้แก่ ของเสียจากโรงพยาบาล เนื่องจากเป็นของเสียที่เป็นแหล่งแพร่เชื้อโรคนชนิดต่างๆ ผู้มนุษย์ได้อย่างมาก ตัวอย่างของเสียจากโรงพยาบาล ได้แก่ เข็มและกระบอกฉีดยา สำลี พลาสเตอร์ สายยางให้อาหาร สายสวนปัสสาวะอุจจาระ สายน้ำเกลือ สายดูดเสมหะ ชิ้นเนื้อส่วนต่างๆ เสมหะ เลือด น้ำในช่องท้อง น้ำในไขสันหลัง เป็นต้น ของเสียอันตรายจากแหล่งเกษตรกรรม ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ของสารปราบศัตรูพืชต่างๆ โดยแหล่งกำเนิดของเสียอันตรายที่สำคัญที่สุดคือ โรงงานอุตสาหกรรม ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่เป็นแหล่งกำเนิดของเสีย ได้แก่ อุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมถลุงโลหะ อุตสาหกรรมผลิตเบตเตอรี อุตสาหกรรมฟอกย้อม อุตสาหกรรมฟอกหนัง เป็นต้น ตัวอย่างของเสียอันตราย ได้แก่ บรรจุภัณฑ์สำหรับสารปราบศัตรูพืชและสารฆ่าแมลงต่างๆ ของเสียที่มีเส้นใยแอสเบสตอสปนเป็อน กากตะกอนที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ เป็นต้น

2.2 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง กลุ่มธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) มีลักษณะเป็นมันวาวสะท้อนแสง เหนียว และสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า และส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition metals ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดิน ดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ

โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ ได้ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกว่าโลหะอิสระได้หลายรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organ metallic Compound) ซึ่งเป็นพิษ หากปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ประกอบกับความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิดเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อมีการสะสมในร่างกายของมนุษย์ อาจมีผลทำให้พิการหรือเสียชีวิตได้ เช่น แบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี เงิน อาร์เซนิก แอนติโมนี เซเลเนียม เทลลูเรียม และปรอท เป็นต้น ในจำนวนนี้ ปรอท แคดเมียม อาเซนิกและตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักที่มีพิษถาวร ไม่สามารถเปลี่ยนรูปตามกาลเวลาและยังสามารถสะสมอยู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ ซึ่งในปัจจุบัน โลหะหนักทั้ง 4 ชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการกำจัดออกจากของเสียก่อนทิ้งเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม

2.2.1 แหล่งกำเนิดของสารโลหะหนัก

แหล่งกำเนิดของสารโลหะหนักที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะที่สำคัญ คือ

1) แหล่งชุมชน โลหะหนักจากชุมชนสามารถปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำได้ง่าย โดยส่วนใหญ่เป็นโลหะหนักที่ปนมากับสิ่งปฏิกูล เช่น ขยะมูลฝอยต่างๆ ซึ่งมีชิ้นส่วนวัสดุที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบอยู่ เช่น กระดาษ สีทาบ้าน ถ่านไฟฉาย หม้อแบตเตอรี่รถยนต์ และเศษภาชนะที่เคลือบด้วยโลหะ เป็นต้น

2) แหล่งอุตสาหกรรม น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ จึงมีโอกาที่โลหะหนักซึ่งปนเปื้อนกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทจะถูกถ่ายเทลงแหล่งน้ำ โดยอาจจะสะสมอยู่ในดินตะกอน และบางส่วนของถูกพัดเคลื่อนย้ายลงสู่ทะเล

โรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้แก่ โรงงานชุบโลหะ โรงงานฟอกย้อมและสิ่งทอ โรงงานฟอกหนัง สัตว์ โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตสารเคมี โรงงานแบตเตอรี่และถ่านไฟฉาย เป็นต้น

3) แหล่งเกษตรกรรม ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีประชากรทำอาชีพเกษตรกรรมอยู่มาก ทำให้การนำยากำจัดศัตรูพืชมาใช้มากด้วย ส่งผลทำให้เกิดมียากำจัดศัตรูพืชตกค้างอยู่ในพื้นที่เกษตรกรรมมาก ทั้งนี้ยากำจัดศัตรูพืชหลายชนิดมีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบอยู่ เช่น ยากำจัดเชื้อรา มีทองแดงเป็นองค์ประกอบอยู่ เป็นต้น ซึ่งยากำจัดศัตรูพืชส่วนใหญ่สลายตัวยาก และสารพิษตกค้างเหล่านี้จะถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำเมื่อเกิดการกัดเซาะหน้าดินโดยน้ำฝน

2.2.2 การสะสมของโลหะหนัก

สารพิษจากโลหะหนัก เมื่ออยู่ในแหล่งน้ำจะสะสมอยู่กับตัวกลาง เช่น ดินตะกอน พืชน้ำ สัตว์น้ำ หรือแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างอิสระได้ในปริมาณต่าง ๆ กัน ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่ปะปนหรือสะสมอยู่ในตัวกลางเหล่านี้สามารถที่จะเปลี่ยนรูปหรือเคลื่อนย้ายไปตามห่วงโซ่อาหารได้ ลักษณะการสะสมและการเคลื่อนย้ายในตัวกลางแต่ละชนิดในแหล่งน้ำสามารถแยกรายละเอียดได้ดังนี้ (โสภภาพรรณ, 2534)

การสะสมของโลหะหนักในน้ำ โลหะหนักที่สะสมในแหล่งน้ำมีทั้งอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และอยู่ในรูปสารแขวนลอย โดยปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำมีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา เนื่องจากความสามารถในการผสมผสานของสารแขวนลอยพวกที่ละลายน้ำแตกต่างกัน โดยพวกที่อยู่ในรูปแขวนลอยจะมีเวลาอยู่ในน้ำยาวนานกว่าพวกที่ละลายน้ำ

การสะสมโลหะหนักในดินตะกอน ส่วนหนึ่งเป็นโลหะหนักที่เกิดจากการสะสมตามธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ การชะล้างพวกเกลือแร่ที่อยู่บนพื้นดินลงสู่แหล่งน้ำ หรือโลหะหนักที่เป็นส่วนประกอบของแร่ที่มีอยู่ในธรรมชาติบริเวณนั้นตามสภาพทางธรณีวิทยา แล้วละลายออกมาปะปนอยู่ในน้ำได้ และอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการใช้และการปล่อยโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำอันเป็นผลมาจากการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ โดยทั่วไปโลหะหนักสามารถเกิดการสะสมอยู่ในดินตะกอนโดยมีปริมาณความเข้มข้นสูงกว่าที่มีอยู่ในน้ำมาก เนื่องจากมีขบวนการเข้ามาเกี่ยวข้องกับทั้งทางด้านเคมี ฟิสิกส์ และชีวภาพ องค์ประกอบในดินตะกอนที่มีผลต่อการสะสมของโลหะหนักได้แก่ พวกคาร์บอนเนต ออกไซด์ของแมงกานีส และเหล็ก ตลอดจนองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่าง ๆ

การสะสมของโลหะหนักในพืชน้ำ โดยดูดซับจากน้ำโดยตรง ซึ่งพืชน้ำจะไม่สามารถควบคุมปริมาณโลหะหนักในตัวเองได้ ปริมาณการสะสมจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลาย หรือแขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นสำคัญ รวมถึงอายุของพืชน้ำด้วย ทั้งนี้พืชน้ำต่างชนิดกันก็จะมีการสะสมของปริมาณโลหะหนักแตกต่างกัน

การสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำ สัตว์น้ำส่วนใหญ่ได้รับสารพิษโลหะหนักเข้าไปด้วยการกินอาหารในลักษณะต่าง ๆ ตามชนิดของสัตว์น้ำนั้น การสะสมของโลหะหนักโดยการดูดซึมจากน้ำเข้าไปโดยตรงเป็นไปได้ น้อยมาก การสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำจะเพิ่มขึ้นตามลำดับการบริโภค

2.2.3 สารพิษจากโลหะหนัก

แคดเมียม (Cadmium)

ในธรรมชาติแคดเมียมจะเป็นธาตุที่อยู่ร่วมกับสังกะสีและตะกั่ว ดังนั้นแคดเมียมเป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำเหมืองแร่และถลุงแร่ตะกั่วและสังกะสี สำหรับแคดเมียมนิยมนำมาทำอัลลอยและเคลือบโลหะต่าง ๆ ให้ขาวเป็นเงาหรือมีสีบรอน ใช้ทำน้ำมันเครื่องยนต์ทำสี ใช้ทำให้เกิดแสงฟลูออเรสเซนต์ รวมทั้งยังนำมาทำแบตเตอรี่นิเกิลแคดเมียม ใช้ทำโพลีไวนิลพลาสติก ใช้ฉาบโลหะเครื่องไฟฟ้า เช่น ลวดสายไฟฟ้า ในทางยาใช้แคดเมียมทำเป็นยาฆ่าจุลินทรีย์และยาฆ่าแมลง แคดเมียมเข้าสู่ร่างกายโดยทางเดินอาหารและทางเดินหายใจแล้ว ไปสะสมในตับและไตเป็นส่วนใหญ่ การจับถ่ายแคดเมียมในคนนั้น แคดเมียมจะถูกขับออกทางปัสสาวะ

ความเป็นพิษเกิดจากแคดเมียม ไปแทนที่สังกะสีในกระบวนการของเอนไซม์บางอย่างทำให้เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้ อาการพิษที่เกิดจากแคดเมียมมีทั้งแบบฉับพลันและเรื้อรัง อาการพิษเฉียบพลันอันเกิดจากการสูดดมควันของแคดเมียมออกไซด์เข้าไปประมาณ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีอาการแพ้พิษเกิดขึ้นได้ทันที ได้แก่ จมูกและคออักเสบ เยื่อจมูก ปวด และหลอดลมถูกทำลาย แน่นหน้าอก หายใจขัด ไอมีเลือด ปอดบวมและตายได้ ส่วนอาการเรื้อรังอันเกิดจากการสูดดมผงฝุ่นแคดเมียมหรือรับประทานจะทำให้เกิดโรคที่เรียกว่า อีไต-อีไต โดยผู้ป่วยจะมีอาการปวดร้าวตามข้อตามกระดูก

ตะกั่ว(Lead)

ตะกั่ว เป็นโลหะหนักที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางได้แก่ ใช้ทำแผ่นธาตุในแบตเตอรี่ ใช้หุ้มสายไฟฟ้าแรงสูงที่ฝังใต้ดินเพื่อกันความผุกร่อน ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสม ใช้ในอุตสาหกรรมสีและสารปราบศัตรู เป็นต้น

สารตะกั่วสามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยขบวนการธรรมชาติและเกิดจากการกระทำของมนุษย์ โดยส่วนใหญ่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ และการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ระบบทางเดินหายใจ ระบบทางเดินอาหาร โดยตะกั่วปนเปื้อนในน้ำดื่มและอาหาร และทางผิวหนังหรือจากการสัมผัส เมื่อสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะไปจับกับเม็ดเลือดแดง นอกจากนั้นไปอยู่ที่เนื้อเยื่ออ่อน เช่น ตับ ไต หัวใจ และปอด ร้อยละ 90 ของสารตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะถูกเก็บสะสมที่กระดูก สารตะกั่วที่ไม่ถูกดูดซึมไว้จะถูกขับถ่ายออกมา

กับอาการ การเกิดพิษเนื่องจากสารตะกั่ว แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การเกิดพิษแบบเฉียบพลัน และแบบเรื้อรัง ซึ่งทั้ง 2 แบบ เกิดได้จากทั้งสารตะกั่วอนินทรีย์และสารตะกั่วอินทรีย์ การเกิดพิษจากสารตะกั่วอนินทรีย์ พิษแบบเฉียบพลัน มักจะพบน้อย เกิดในรายที่รับประทานสารตะกั่วหรือหายใจเอาฝุ่นละอองของสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่มาก ส่วนใหญ่จะมีอาการทางประสาท เช่น หงุดหงิด นอนไม่หลับ คลุ้มคลั่ง เกิดความคิดสับสนและวิกลจริต เนื่องจากสมองถูกทำลาย ในปากจะมีรสหวานคล้ายกับอมโลหะในปาก คอแห้ง กระจายน้ำ ปวดท้องอย่างรุนแรงบริเวณสะดือ มีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียนท้องผูก ปัสสาวะไม่ออก เม็ดโลหะถูกทำลาย ความดันโลหิตลดลง ตัวเย็น ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ กล้ามเนื้ออ่อนเพลีย มือเท้าเป็นตะคริว มีอาการแข็งขี้มึนประสาทสัมผัสผิดปกติ ไตถูกทำลาย อาจตายได้ภายใน 1 หรือ 2 วัน ส่วนพิษแบบเรื้อรัง ชนิดนี้ผู้ป่วยได้รับสารตะกั่วทีละน้อยค่อย ๆ สะสมในร่างกาย มักมีอาการอ่อนเพลีย เหนื่อยหน่าย เบื่ออาหาร ท้องผูก ขี้มึน กระสับกระส่าย อาเจียนเป็นบางครั้ง ปวดศีรษะ เป็นตะคริวบริเวณท้องเป็นระยะ ๆ ซีด โลหิตจาง ไม่มีความรู้สึกทางเพศ ประจำเดือนขาด พบสารตะกั่วบริเวณเหงือก มีลักษณะเป็นเส้น (Lead Line) รายที่เป็นมาก ๆ จะมีอาการทางระบบประสาทเข้ามาร่วมด้วยอัมพาตที่กล้ามเนื้อมือและเท้า

ปรอท (Mercury)

ในสภาวะปกติปรอทบริสุทธิ์จะมีสถานะเป็นของเหลวสีเงิน สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ปรอทจากธรรมชาติและโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จะสะสมตัวในสิ่งแวดล้อมและเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ในที่สุดก็จะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์แล้ว ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้

ความเป็นพิษของปรอท แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือพิษปรอทเฉียบพลัน เมื่อรับประทานปรอทเข้าไปเป็นปริมาณมาก จะทำให้ปากเป็นแผลพุพองอักเสบและมีเลือดออก เกิดอาการปวดท้องและอาเจียน และถ้ามีสารปรอทเข้าถึงลำไส้จะทำให้ปวดลำตัวและถ่ายเป็นเลือด อาการแพ้พิษปรอทอย่างเฉียบพลันอาจทำให้ผู้ป่วยเสียชีวิตได้ทันที ส่วนพิษปรอทเรื้อรัง เกิดขึ้นเมื่อผู้ป่วยได้รับพิษของสารปรอททีละเล็กละน้อย และเข้าไปสะสมในร่างกายทำให้ผู้ป่วยรู้สึกมีรสโลหะในปาก เหงือกและปากอักเสบ อ่อนเพลียเบื่ออาหาร ปรอทจะทำอันตรายต่อระบบประสาทส่วนกลางทำให้ผู้ป่วยมีอาการเคลื่อนไหวสั่นกระตุก อาการสั่นกระตุกจะเริ่มที่มือก่อนและต่อมาจึงเกิดขึ้นที่ใบหน้า แขนและขา อาจทำให้เป็นอัมพาตได้ ทำให้ระบบประสาทเกี่ยวกับการได้ยินและการมองเห็นสูญเสียไป ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางจิตใจ ความจำเสื่อม ในบางรายจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านพฤติกรรมและบุคลิกลักษณะ รวมทั้งมีอาการตกใจง่าย มีความรู้สึกเศร้าสลดและชอบทะเลาะวิวาท นอกจากนี้พิษปรอทยังก่อให้เกิดโรคมินามาตะ

สังกะสี (Zinc)

สังกะสีเป็นโลหะที่แข็งสีขาวเงินอมฟ้า ละลายได้ดีในกรดแก่และด่างแก่ เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก คือ ไฮดรอกไซด์ของโลหะประเภทนี้ หากละลายในกรดจะทำให้เกิดแคทไอออน Zn^{2+} หากละลายในเบสจะทำให้เกิด $Zn(OH)_2$ จะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อย ๆ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจนถึงพีเอชค่าหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุด และเมื่อพีเอชสูงขึ้นกว่าจุดต่ำสุดนี้แล้ว โลหะแอมโฟเทอริกจะละลายน้ำได้มากขึ้น

การปนเปื้อนของสังกะสีในน้ำเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำลงสู่แหล่งน้ำ โดยไม่มีการบำบัดหรือบำบัดไม่ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง หรือจากการทิ้งยา เครื่องสำอาง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากสังกะสีก็จะถูกน้ำชะล้างโดยน้ำฝนลงสู่แหล่งน้ำ ในที่สุดสังกะสีก็สามารถเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารและเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ การเข้าสู่ร่างกายทางการกินจะกีดก่ร่อนทางเดินอาหารส่วนต้นได้แก่ หลอดอาหารและกระเพาะอาหาร เมื่อร่างกายได้รับเกลือของสังกะสีที่ละลายน้ำได้ดีโดยการกินเป็นปริมาณ 675-2,280 พีพีเอ็ม จะทำให้มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ร่างกายขาดน้ำ ปวดท้องรุนแรง เลือดต่ำ และเสียชีวิตในที่สุด การได้รับเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจเอาฝุ่นของสังกะสีเข้าไปในปริมาณ 1-5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะเกิดอาการปอดบวม มีไข้หนาวสั่น หายใจขัด ปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ ส่วนการสัมผัสกับฝุ่นของสังกะสีทางผิวหนัง ทำให้เกิดการอุดตันของต่อมไขมัน กลายเป็นตุ่มใส ๆ ขึ้นมา มีอาการแดงและคัน ถ้าเกาจะอักเสบและกลายเป็นตุ่มหนองได้

2.2.4 โลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างโลหะกับปูนซีเมนต์สามารถแบ่งได้ 4 กลุ่ม คือ การดูดซับ (sorption) การตกผลึก (precipitation) การรวมเข้าในโครงผลึกของสารประกอบซีเมนต์ และการเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบของปูนซีเมนต์แล้วเกิดเป็นสารประกอบใหม่ (จิราภรณ์ นิจันทร์พันธ์, 2543) พฤติกรรมของโลหะแต่ละตัวในระบบซีเมนต์ (cementitious system) ทั้งก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับโลหะมีอิทธิพลอย่างมากไม่เพียงแต่เฉพาะคุณภาพหรือคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังมีผลต่อเนื่องไปยังขั้นอื่นๆ อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น ความเสถียรของโลหะหนักที่รวมตัวกับปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ผสมจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ แต่เมื่อนำปูนซีเมนต์ไปผสมน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีผลในเรื่องความเสถียรของโลหะหนักโดยเฉพาะความสามารถในการชะละลายในขณะใช้งานและสิ้นอายุการใช้งาน ด้วยเหตุนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสถานะภาพของโลหะหนักหลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสิ่งที่น่าศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถหาวิธีในการป้องกันหรือกำจัดโลหะหนักในการปฏิบัติงานจริง โลหะหนักที่อยู่ในปูนซีเมนต์นอกจากจะส่งผล

กระทบต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์เองแล้วสารเจือปนเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพในระยะยาว

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์ (Dalton, J. และคณะ, 2004)

โลหะหนัก	ผลกระทบต่อการผลิตซีเมนต์และคุณสมบัติของซีเมนต์
สารหนู	โดยทั่วไปจะรวมเข้าไปในเม็ดปูน ไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์
โครเมียม	ลดความหนืดของปูนซีเมนต์เหลว สามารถลดอุณหภูมิของการจัดรูปเป็น C_3S ถ้ามีมากกว่าร้อยละ 3 และมีผลกระทบต่อความสามารถในการเผา และการเกิดปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในเม็ดปูนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะถ้ามีปริมาณโลหะสูง (ร้อยละ 2.5-5 โดยน้ำหนัก) มากกว่าในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ทองแดง	ผลกระทบขึ้นอยู่กับการจัดรูป (ออกไซด์ เกลือ หรือซัลไฟด์)
ตะกั่ว	เป็นโลหะหนักที่ระเหยได้ สามารถสะสมในเม็ดปูน โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบถ้ามีปริมาณน้อยกว่า 70 ส่วนต่อล้านส่วน
ปรอท	เป็นโลหะหนักที่ระเหยได้ง่าย สามารถหลุดออกมาจากที่ดักจับก๊าซได้ ปริมาณเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้เกิดผลกระทบต่อการผลิตปูนซีเมนต์ได้
สังกะสี	การจัดรูปที่แตกต่างกันสามารถทำให้เกิดผลกระทบที่แตกต่างกัน ปริมาณที่เพิ่มขึ้นในเตาเผา จะลดความพรุนของเม็ดปูนและลดความสามารถในการบด มีผลกระทบต่อความสามารถในการเผา และปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในเม็ดปูนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะถ้ามีปริมาณโลหะสูง (ร้อยละ 2.5-5 โดยน้ำหนัก) มากกว่าในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
วานาเดียม	เมื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้นในเตาเผา จะลดความพรุนของเม็ดปูน และลดความสามารถในการบด

2.3 การหล่อแข็งกากของเสียที่เป็นอันตราย

2.3.1 การหล่อแข็ง (Solidification)

การหล่อแข็ง คือ กระบวนการที่นำกากของเสียอันตรายที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วมาทำให้อยู่ในรูปของแข็ง โดยมีวัสดุประสานชนิดต่างๆเป็นตัวยึดประสาน ซึ่งเป็นการตรึงสารอันตรายเหล่านั้นไว้ในโครงผลึกของของแข็ง โดยวิธีทางกายภาพและเคมี เพื่อลดการเคลื่อนที่ของสารอันตรายไม่ให้เกิดการสัมผัสหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม ของเสียอันตรายที่สามารถนำมาหล่อแข็ง

ได้ต้องไม่ละลายน้ำ ไม่ร่วงไว้ต่อปฏิกิริยาเคมี และเมื่อถูกตรึงอยู่ในโครงสร้างของก้อนหล่อแข็งแล้วไม่สามารถซึมผ่านออกมาภายนอกได้

จุดประสงค์ของการหล่อแข็งคือ เพื่อลดความเป็นพิษของสาร ลดอัตราการเคลื่อนตัวของสารอันตราย ลดอัตราการละลาย การชะละลายสารอันตรายออกสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งเพื่อเพิ่มความแข็งแรง การรับแรงอัด และลดการซึมผ่านของของแข็งที่จะนำไปฝังกลบ นอกจากนี้การหล่อแข็งยังเป็นการลดพื้นที่ผิวที่ของเสียสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม เป็นการลดโอกาสที่ของเสียจะกระจายสู่สิ่งแวดล้อม

2.3.2 เทคนิคการหล่อแข็งกากของเสียอันตราย (Pojasek, 1980)

1) Cement-Based Techniques

เป็นการหล่อแข็งกากตะกอนที่ใช้ซีเมนต์เป็นตัวยึดประสาน เป็นกระบวนการตรึงกากของเสียทางเคมี เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของการหล่อแข็ง จึงเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ ผสมร่วมกับซีเมนต์ เมื่อปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลานผสมกับน้ำจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนและมีค่าพีเอชสูง ทำให้โลหะหนักที่อยู่ในส่วนผสมอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์หรือเกลือคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำ อีออนของโลหะอาจเข้าไปเกาะอยู่ในโครงผลึกของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งมีผลต่อการรั่วซึม โดยไปลดการซึมผ่านของสารละลายเข้าไปในเนื้อก้อนหล่อแข็ง

2) Lime-Based Techniques

เป็นการใช้ปูนขาวผสมกากตะกอนของเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก กลไกการทำให้คงตัวเป็นการเปลี่ยนรูปโลหะอิสระเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ทั้งสามารถสะเทินของเสียที่เป็นกรดได้ นอกจากการเติมปูนขาวโดยตรงแล้ว วัสดุอื่นที่สามารถใช้แทนปูนขาวได้ทั้งยังมีคุณสมบัติและกลไกในการทำปฏิกิริยาใกล้เคียงกันได้แก่ เถ้าลอย และเถ้าจากการเผาซีเมนต์ การใช้วัสดุนี้จึงเป็นการนำเอาของเสียจากเตาเผากลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง วิธีการนี้เป็นการใช้ปูนขาวผสมกากตะกอนของเสีย โดยอาจเพิ่มสารผสมที่มีส่วนประกอบของซิลิกา เช่น เถ้าลอยหรือเถ้าแกลบ เมื่อเปรียบเทียบกับกรหล่อแข็งด้วย Cement-Based พบว่าก้อนแข็งที่ได้จาก Lime-Based ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ดีกว่าและมีความสามารถในการรับแรงอัดได้น้อยกว่า

3) Thermoplastic Techniques

เป็นการหล่อแข็งที่ใช้ บิทูเมน พาราฟิน หรือ โพลีเอธิลีน ผสมกับกากตะกอนของเสียที่แห้ง ณ อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะทำให้ส่วนผสมหลอมเหลวเข้ากับกากตะกอน

เมื่อปล่อยให้อุณหภูมิตกลงจึงได้ก้อนหล่อแข็งซึ่งมีคุณสมบัติต้านทานต่อความชื้นได้ดี ปกติมักใช้กับกากกัมมันตรังสี ไม่สามารถใช้กับสารอินทรีย์หรือสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง

4) Organic polymer Techniques

เป็นการหล่อแข็งโดยการนำสารอินทรีย์โมโนเมอร์เติมลงไปของเสียที่ต้องการทำให้คงตัว แล้วผสมให้เข้ากันจากนั้นจึงเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการรวมตัวของโมโนเมอร์กลายเป็นโพลิเมอร์อยู่ในรูปของแข็งซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ ของเสียจะถูกจับไว้ในโครงสร้างโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้น ของเสียที่นำมาทำให้คงตัวโดยวิธีนี้อาจอยู่ในรูปของแข็งหรือกึ่งของแข็งก็ได้ วิธีการนี้เหมาะสำหรับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ และไม่เหมาะสมสำหรับของเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะ เนื่องจากโลหะละลายได้ดีในกรดแก่ ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น โลหะบางส่วนจึงไม่ถูกจับไว้ในโครงสร้างของโพลิเมอร์แต่ละลายปนออกมากับตัวเร่งปฏิกิริยา

5) Encapsulation Techniques

เป็นการหล่อแข็งโดยทำให้กากตะกอนแห้งจับกันเป็นก้อนแล้วเคลือบด้วยสาร โพลิเมอร์ สารที่ห่อหุ้มนี้มีความแข็งแรงทนทานต่อน้ำ และสภาพแวดล้อมได้ดี

6) Self- Cementing Techniques

ใช้กับกากของเสียที่มีการปนเปื้อนของซัลเฟต ซัลไฟด์ และมีสารแคลเซียม 8-10% ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์คล้ายปูนพลาสเตอร์

7) Glassification

เป็นการนำของเสียมาผสมกับซิลิกาหรือทรายแก้วแล้วให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงถึง 1,600 °C ทำให้เกิดการหลอมตัวแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจนเกิดเป็น โครงสร้างคล้ายแก้วซึ่งมีความคงตัวสูงมาก ของเสียอันตรายจะถูกจับอยู่ในผลึกแก้วและไม่สามารถถูกชะละลายสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้ วิธีการนี้ต้องใช้เครื่องมือที่มีเทคนิคสูงมากและมีราคาแพง จึงเหมาะสำหรับการหล่อแข็งของเสียที่มีความเป็นอันตรายสูง เช่น ของเสียกัมมันตรังสีซึ่งมีระดับรังสีสูงมาก

2.3.3 คุณสมบัติของสารที่ได้จากการหล่อแข็ง

กากของเสียที่ทำการหล่อแข็งแล้วควรมีลักษณะดังนี้ (Peratt, G.L., และคณะ, 1992)

1) กากของเสียที่อยู่ในก้อนหล่อแข็งต้องอยู่ในรูปไม่ละลายน้ำและไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา

2) การรั่วไหลของกากของเสียในก้อนหล่อแข็ง เมื่อนำกากตะกอนไปทำการหล่อแข็งสารที่ถูกตรึงอาจแยกตัวออกจากโครงสร้างของก้อนหล่อแข็งได้ในขณะที่นำไปฝังกลบแล้ว จะทำให้เกิดการปนเปื้อนในพื้นดินและแหล่งน้ำใต้ดินอาจมีโอกาสปะปนกระจายไปสู่แหล่งธรรมชาติได้ในภายหลัง

3) ความสามารถรับแรงอัด เมื่อนำก้อนหล่อแข็งไปทำการฝังกลบเพื่อความปลอดภัยและป้องกันมิให้ก้อนหล่อแข็งเกิดการแตกร้าว เพราะอาจเป็นสาเหตุทำให้ของเสียอันตรายที่ถูกตรึงไว้ภายในมีโอกาสสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น ทำให้เกิดการรั่วไหลของสารพิษออกมาปนเปื้อนสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นก้อนหล่อแข็งจึงต้องมีความสามารถรับแรงอัดได้มาตรฐานสำหรับการฝังกลบ ซึ่งโดยทั่วไปมาตรฐานกำลังรับแรงอัดต่ำสุดของก้อนหล่อแข็งที่สามารถนำไปฝังกลบจะต้องมากกว่า 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 3.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (American Society for Testing and Materials, 1997)

ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานความสามารถในการรับแรงอัดของการหล่อแข็งของเสียเพื่อการฝังกลบ (Metha, J.L., และคณะ, 1995)

ชนิดของหลุมฝังกลบ	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)
หลุมฝังกลบแบบถูกสุขลักษณะ (Sanitary Landfill)	3.15
หลุมฝังกลบแบบควบคุม (Control Landfill)	10
หลุมฝังกลบแบบมั่นคง (Secured Landfill)	3.5

2.4 วัสดุยึดประสาน

2.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) หมายถึง สารซีเมนต์ที่ได้จากการผสมกันของสารจำพวกแคลเซียมหรือวัสดุจำพวกหินปูนกับดินเหนียวและ/หรือซิลิกา, อะลูมินา หรือสารจำพวกออกไซด์ของเหล็กและนำไปเผาด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมจนเกิดปฏิกิริยาเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงนำไปบดให้ละเอียด ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ ไฮดรอกซิลแคลเซียมซิลิเกต (Hydraulic calcium silicates)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภทตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบวัสดุอเมริกา (ASTM: American Society for Testing and Materials) ดังนี้

ประเภทที่ 1 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement หรือ Standard Portland Cement) ปูนชนิดนี้เป็นชนิดมาตรฐานสำหรับงานก่อสร้างปกติทั่วไป เช่น งานคอนกรีตเสริมเหล็กในงานอาคาร สะพาน ถนน สนามบิน และอื่นๆ

ประเภทที่ 2 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้กับงานประเภทที่ต้องการทนต่อเกลือซัลเฟตได้บ้างพอสมควร เช่น งานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีต, กำแพงกันดิน หรือบริเวณที่โดนน้ำเค็มเป็นครั้งคราวไม่ตลอดไป

ประเภทที่ 3 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็วหรือให้กำลังเร็ว (High Early Strength Portland Cement) เหมาะกับงานที่ต้องใช้เร่งด่วน เช่น ถนนที่มีการจราจรคับคั่ง, ลานบิน ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังเร็วมาก ในช่วงอายุ 24 ชั่วโมง จะมีความแข็งแรงเท่ากับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 3 วัน และอายุ 7 วัน จะเท่ากับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อายุ 28 วัน เป็นต้น

ประเภทที่ 4 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษที่มีอัตราความร้อนต่ำขณะเดียวกันก็ให้กำลังเพิ่มขึ้นช้าๆ เหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างเขื่อน และงานที่ใช้คอนกรีตหลามาก ๆ

ประเภทที่ 5 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง เหมาะสำหรับการก่อสร้างในบริเวณใกล้ทะเล หรือใช้กับงานโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณที่มีดินเค็ม ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีระยะเวลาของการแข็งตัวช้ากว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

2.4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , ซึ่งรวมกันเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซีเมนต์ และออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , Ti_2O , P_2O_5 และยิปซัม เมื่อออกไซด์หลักรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด จะเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิด คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S), ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.3 ปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ (Conner, 1990)

Composition	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V
Tricalcium silicate C_3S	45	44	53	28	38
Dicalcium silicate C_2S	27	31	19	49	43
Tricalcium aluminate C_3A	11	5	11	4	4
Tetracalcium aluminoferrite C_3AF	8	13	9	12	9
Free CaO	0.5	0.4	0.7	0.2	0.5
CaSO_4	3.1	2.8	4.0	3.2	2.7

เมื่อเม็ดปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้สารประกอบเกิดขึ้นใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2),

แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตหรือ เอททริงไทต์ (Ettringite) และสารประกอบอื่นอีกไม่มาก นอกจากนี้ซีเมนต์เพสต์ยังประกอบด้วยเม็ดปูนซีเมนต์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา, โพรงคาปิลลารี (Capillary Pore), และโพรงอากาศ (Air Void) ด้วย

โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นของแข็ง, ช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ (Voids) และน้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว

1) ของแข็ง ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) เป็นสารที่ทำให้กำลังกับคอนกรีต มีปริมาณมากที่สุดภายในซีเมนต์เพสต์ คือ มีอยู่ประมาณร้อยละ 50-70, แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์มีอยู่ประมาณร้อยละ 10-15, แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารที่เหลือ ซึ่งแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์มีอยู่ประมาณร้อยละ 20-25 โดยปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ และอนุภาคปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดก็ยังคงมีอยู่ในซีเมนต์เพสต์ด้วย

2) ช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ได้แก่ ช่องว่างคาปิลลารี (Capillary Voids) คือ ช่องว่างที่ไม่ถูกอุดด้วยส่วนที่เป็นของแข็ง และโพรงอากาศ (Air Voids) คือ ช่องว่างอากาศ

3) น้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว (Hydrate Cement Paste, HCP) น้ำที่อยู่ใน HCP สามารถอยู่ได้หลายรูปแบบ การแบ่งแยกรูปแบบของน้ำที่อยู่ใน HCP แบ่งโดยดูที่ความยากง่ายในการเคลื่อนน้ำออกจาก HCP ซึ่งน้ำสามารถออกจาก HCP เมื่อได้รับความร้อน ซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสถานะแข็งประกอบไปด้วยสารต่างๆ ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ การสูญเสียน้ำในซีเมนต์เพสต์จะส่งผลทำให้ซีเมนต์เพสต์มีการหดตัว (Shrinkage) น้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้วสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ตามความยากง่ายในการกำจัดออกไป ดังนี้

- น้ำที่สามารถระเหยได้ง่าย (Water Vapour) เป็นน้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่ของซีเมนต์เพสต์ น้ำประเภทนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้นในอากาศ และอุณหภูมิ

- น้ำคาปิลลารี (Capillary Water) คือ น้ำที่อยู่ในช่องว่างขนาดใหญ่กว่า 5 นาโนเมตร ซึ่งเป็นน้ำอิสระจากอิทธิพลของแรงดึงดูด (Attractive Force) ของของแข็งที่อยู่ในเพสต์ จากพฤติกรรมดังกล่าวสามารถแบ่งน้ำคาปิลลารีได้ 2 ชนิด ชนิดที่ 1 น้ำในช่องว่างที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร เรียกน้ำดังกล่าวว่าน้ำอิสระ (Free Water) เมื่อนำน้ำอิสระออกจากเพสต์แล้วจะไม่ทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลง ส่วนน้ำชนิดที่ 2 เป็นน้ำที่เกิดจากแรงตึงคาปิลลารี (Capillary Tension) ในช่องว่างขนาด 5-50 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อน้ำชนิดนี้ระเหยออกไปจะส่งผลทำให้ซีเมนต์เกิดการหดตัว

- น้ำที่ถูกดูดซับ (Adsorbed Water) คือ น้ำที่อยู่ใกล้กับผิวสัมผัสของของแข็งซึ่งถูกยึดไว้ด้วยแรงดึงดูด (Attractive Force) ของของแข็งที่อยู่ในเพสต์ โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับอยู่รอบๆผิวสัมผัสของของแข็งในเพสต์ เรียกแรงยึดเหนี่ยวนี้ว่าแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) น้ำในส่วนนี้จะเรียงตัวกันไม่เกิน 5 โมเลกุล (ความหนาแน่นไม่เกิน 1.3 นาโนเมตร) น้ำส่วน

นี้ถูกขับออกโดยทำให้เพสต์แห้งเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าประมาณร้อยละ 30 การสูญเสีย น้ำในส่วนนี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัว

- น้ำระหว่างชั้น (Interlayer Water) เป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของ C-S-H เนื่องจาก โครงสร้างของ C-S-H มีลักษณะเป็นชั้นๆ โดยแรงดึงดูดแต่ละชั้นเป็นแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน น้ำ ส่วนนี้อยู่ใน Gel Pore ของซีเมนต์เพสต์ (มีขนาดเล็กกว่า 2.6 นาโนเมตร) น้ำส่วนนี้ถูกยึดไว้ อย่าง แข็งแรงโดยผิวของของแข็งในช่องว่าง การกำจัดน้ำในส่วนนี้ต้องใช้ความร้อนสูงและความชื้น สัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 11% โครงสร้างของ C-S-H จะหดตัวเมื่อสูญเสียน้ำดังกล่าวไป

- น้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี (Chemically Combined Water) เป็นน้ำที่เป็น ส่วนประกอบของผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Product) น้ำในส่วนนี้นำไปใช้ในการทำ ปฏิกิริยาทางเคมี การกำจัดน้ำในส่วนนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000°C เพื่อให้ซีเมนต์เพสต์และน้ำ สลายตัวไปเป็นสารอื่นหรือที่เรียกว่าการสลายตัวของสาร (Decomposition) เช่น การสลายตัวของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ CaO กับน้ำ (H₂O)

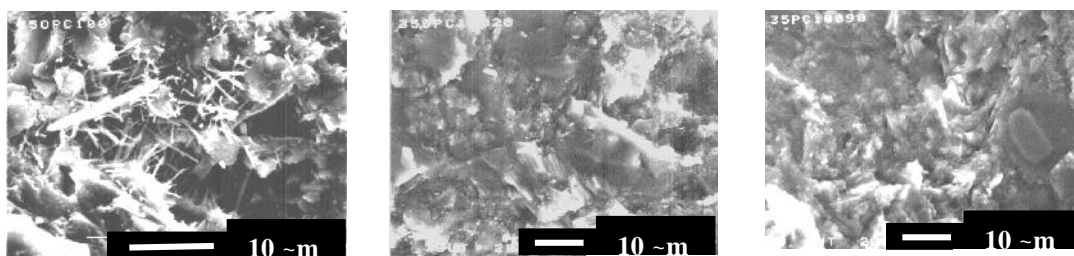
เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100-400°C ปริมาณน้ำประเภทต่างๆ ใน ซีเมนต์เพสต์จะระเหยไป แต่เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นระหว่าง 400-1,000°C สารประกอบต่างๆในซีเมนต์เพสต์จะสลายตัวไปเป็นสารประกอบอื่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำลง หรือเป็นธาตุดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.4 อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารต่างๆ ในซีเมนต์เพสต์ (ธีรวัฒน์ และ กณะ 2548)

ลำดับที่	อุณหภูมิ (°C)	ปฏิกิริยา
1	100	น้ำในช่องว่างระเหย
2	180	การสลายตัวของ C-S-H
3	350	การสลายตัวของ C-S-H
4	400	การสลายตัวของ C-S-H
5	600	การสลายตัวของ Ca(OH) ₂
6	700	การสลายตัวของ CaCO ₃

รูปที่ 2.1 แสดงภาพถ่ายขยายโดย SEM ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7, 28, และ 90 วัน ตามลำดับ พบว่าที่อายุ 7 วัน (รูปที่ 2.1a) โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์มีช่องว่างหรือ โพร่งมาก พบเอททริงไคต์มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายเข้าไปในช่องว่าง ที่

อายุ 28 วัน (รูปที่ 2.1b) ผลผลิตไฮดรชันประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต, แคลเซียมไฮดรอกไซด์, แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ และส่วนประกอบย่อยอื่นอีกไม่มาก ขยายเข้าไปในโพรงหรือช่องว่างมากขึ้นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้น โดยเฉพาะที่อายุ 90 วัน (รูปที่ 2.1c) ซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่แน่นยิ่งขึ้น



(a) อายุ 7 วัน

(b) อายุ 28 วัน

(c) อายุ 90 วัน

รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายขยายโดย SEM ของซีเมนต์เพสต์ (ซีรวัตน์ และคณะ 2548)

โดยทั่วไปซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยโพรงอากาศ (Air Voids) โพรงคาпилลารี (Capillary Pores) และโพรงเจล (Gel Pores)

1) โพรงอากาศ (Air Voids) โดยทั่วไปโพรงอากาศมีรูปร่างค่อนข้างกลมในระหว่างการผสมคอนกรีตทำให้เกิดโพรงอากาศ (Entrapped Air Voids) ซึ่งอาจมีขนาดใหญ่ถึง 3 มิลลิเมตร และถ้าใส่สารผสมเพิ่มชนิดสารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Admixture) เข้าไปในคอนกรีตทำให้เกิดโพรงอากาศขนาดเล็กกระจายในซีเมนต์เพสต์ระหว่างการผสมเรียกโพรงอากาศชนิดนี้ว่า Entrained Air Voids มีขนาดอยู่ในช่วง 50-200 ไมโครเมตร โพรงอากาศที่ใหญ่และจำนวนมาก ทำให้กำลังรับแรงลดลงและทำให้การซึมผ่านเร็วและง่ายขึ้น

2) โพรงคาпилลารี (Capillary Pores) เป็นส่วนของช่องว่างของน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์ มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมไม่แน่นอน (Irregular Shape) ปริมาตรและขนาดของโพรงคาпилลารีขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และการเกิดปฏิกิริยา ในอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำ ($w/c < 0.35$) โพรงคาпилลารีมีขนาดอยู่ในช่วง 10-50 นาโนเมตร ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูง ($w/c > 0.50$) โพรงคาпилลารีมีขนาดใหญ่ถึง 3-5 ไมโครเมตร โพรงคาпилลารีที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตรมีผลต่อกำลังและการซึมผ่านของคอนกรีต ส่วนโพรงคาпилลารีที่มีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร ส่งผลต่อการหดตัวและการคืบของคอนกรีต

3) โพร่งเจล (Gel Pores) เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของซีเมนต์เจล เป็นโพร่งที่มีขนาดเล็กมาก คือ มีขนาดต่ำกว่า 10 นาโนเมตร โดย Powers คำนวณว่าโพร่งเจลระหว่างโครงสร้างของ C-S-H มีขนาดเฉลี่ย 18°A ($1^{\circ}\text{A} = 10^{-10}$ เมตร) Feldman and Seredar พบว่าช่องว่างระหว่างโครงสร้างของ C-S-H มีขนาดตั้งแต่ 5 ถึง 25°A โพร่งเจลมีผลน้อยมากต่อกำลังและการซึมผ่าน แต่จะมีผลต่อการหดตัวและการคืบของคอนกรีต

2.4.3 ปฏิกริยาไฮเดรชัน (พินซุกรณ, 2546)

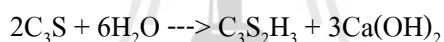
ปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ผลที่ได้ก็จะแตกต่างกันในช่วงแรกของปฏิกริยาตามชนิดของสารประกอบของปูนซีเมนต์ดังนี้

1) ปฏิกริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำ ปฏิกริยากับน้ำก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสาน ดังสมการ



หรือ



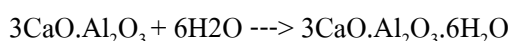
หรือ



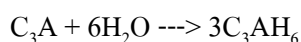
C-S-H ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันไป โดยจะขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ C-S-H ที่ได้จะทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นวุ้น (Gel) มีสมบัติเป็นตัวประสานเหนียวคล้ายกาว ก่อแข็งตัว และเกาะยึดแน่นกับวัสดุผสม สำหรับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากปฏิกริยาจะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนและการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ อาจทำปฏิกริยาต่อกับวัสดุที่มีธาตุซิลิกาและอะลูมิเนียมผสมอยู่ เช่น วัสดุปอซโซลาน

2) ปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)

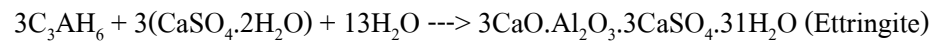
ปฏิกริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ



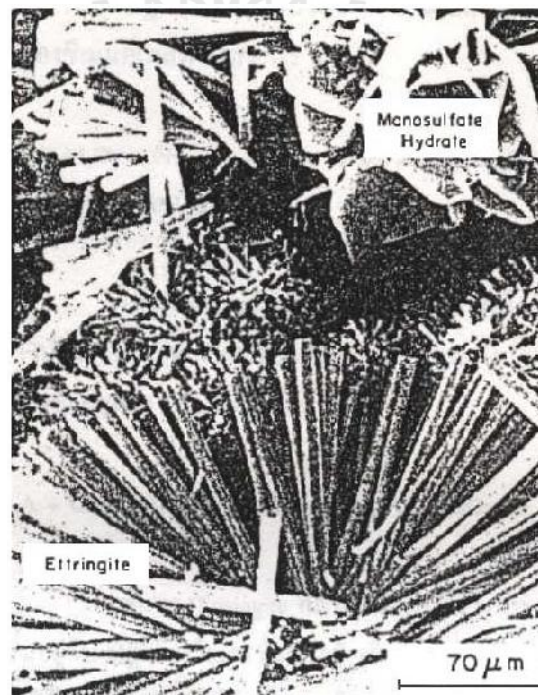
หรือ



เพื่อหวังไม่ให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วจนเกินไป จึงใส่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะไปทำ ปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการ



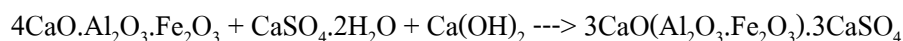
เราจะเรียก แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ว่า Ettringite โดยชั้นของ Ettringite จะหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซัลไฟต์เกิดเป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้ไปหยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite ก็จะทำให้เกิดแรงดันที่มากจากการเพิ่มปริมาณของของแข็ง ซึ่งแรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A ขึ้นมาอีก แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาก็จะเกิด Ettringite ใหม่เข้ามาแทนที่โดยจะไปหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A อีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่งไอออนซัลเฟตมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite ก็จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 Monosulphate and Ettringite (นระ, 2520)

3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดยจะทำ ปฏิกิริยากับยิบซัม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายเข็มของซัลโฟอะลูมินेटและซัลโฟเฟอไรต์ ดังสมการ



2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (ประทีป, 2539)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ปัจจัยดังกล่าว คือ

1) อายุของเพสต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดมากที่สุดในช่วงแรก และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป จนถึงช่วงสิ้นสุดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้การพัฒนาความสามารถในการรับแรงอัดในช่วงแรกมีมาก และค่อยๆลดลง

2) องค์ประกอบของซีเมนต์ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน

3) ความละเอียดของซีเมนต์ พบว่าซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำได้มากเป็นผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในช่วงแรกของปฏิกิริยา

4) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยพบว่าในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะยังไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่จะพบว่าในช่วงหลัง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง จะทำให้ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและดีกรีการเกิดปฏิกิริยาลดลง

5) อุณหภูมิ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์

2.5 วัสดุปอซโซลาน

ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ว่าหมายถึง วัสดุที่มีธาตุซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานนั้นมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอที่จะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับด่าง เช่นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดี เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

ประเภทของวัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) คือวัสดุที่เกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น วัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ ดินขาว (Metakaolin) และหินพูน (Pumicite) เป็นต้น

2) วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) คือวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัสดุดิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ซิลิกาฟูม ถ้ำถ่านหิน ถ้ำถ่านหิน เป็นต้น

ตามมาตรฐาน ASTM C618-99 ได้จำแนกวัสดุปอซโซลานเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1) Class N ได้แก่สารปอซโซลาน ที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) เช่น วัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ และหินพูน (Pumicite) เป็นต้น

2) Class F ได้แก่สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) คือวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัสดุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว หินเชล (Shale) หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ถ้ำถ่านหิน เป็นต้น

3) Class C ได้แก่สารปอซโซลานสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัสดุดิบ เช่นเดียวกับ Class F แต่มีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน คือมีคุณสมบัติเหมือนปูนซีเมนต์ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดแรงยึดประสานได้เลย ได้แก่ถ้ำถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือ ซับบิทูมินัส (Subbituminous)

ตารางที่ 2.5 การจำแนกชั้นของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM 618-99

คุณสมบัติทางเคมี Chemical Properties	ชั้นของวัสดุปอซโซลาน		
	N	F	C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (min, %)	70	70	50
SO ₃ (max, %)	4	5	5
MgO (max, %)	5	5	5
Na ₂ O (max, %)	1.5	1.5	1.5
Loss of Ignition (max, %)	10	12	6
Moisture Content (max, %)	3	3	3
Pozzolanic Index (min, %)	75	75	75
water requirement (max, %)	115	105	105

2.5.1 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน(Pozzolanic Reaction) จะเกิดขึ้นเมื่อสารองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน คือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพื่อที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์ กล่าวคือปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยสารที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) สามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



ค่า x , y และ z ในสมการ (a) และ q , r และ s ในสมการ (b) เป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน สารประกอบ C-S-H และ C-A-H นอกจากจะช่วยให้เพิ่มกำลังให้กับคอนกรีตแล้ว ยังช่วยให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตลดลงตามไปด้วย

2.5.2 เถ้าแกลบ (จิตตินี, 2546 และ ศิริรักษา, 2548)

เถ้าแกลบ เป็นวัสดุที่ได้จากการเผาแกลบที่เหลือทิ้งจากการสีข้าว โดยแกลบหรือเปลือกข้าวที่เหลือจากการสีข้าวจะมีประมาณ 20 % โดยน้ำหนักของข้าวเปลือก และเนื่องจากประเทศไทยมีการปลูกข้าวตลอดทั้งปีทำให้มีเปลือกข้าวและแกลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงสีข้าวเป็นจำนวนมาก โดยข้าวเปลือก 1 ตัน (1000 กิโลกรัมข้าวเปลือก) จะให้แกลบประมาณ 240 กิโลกรัม ปัจจุบันมีการนำแกลบและเถ้าแกลบมาใช้ประโยชน์ต่างๆ เช่น การนำแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบก้อนอิฐ และใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า การนำเถ้าแกลบมาเป็นส่วนผสมในการทำอิฐหรือใช้ผสมกับวัสดุอื่นๆ ในการทำเตาไฟ ทำให้ทนความร้อนได้ดียิ่งขึ้น เป็นต้น เถ้าแกลบจะประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ หากทำการเผาแบบเปิดโดยไม่มีการควบคุมสภาวะให้เหมาะสมจะได้เถ้าแกลบที่มีอัตราส่วนของซิลิกาในรูปผลึกที่ไม่ไวในการทำปฏิกิริยา แต่หากเผาแบบปิดโดยทำการควบคุมอุณหภูมิ และเวลาให้เหมาะสม จะให้เถ้าประมาณ 20% โดยน้ำหนัก และเถ้าแกลบจะให้ซิลิกาที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานสูง และมีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำเถ้าแกลบมาใช้ประโยชน์ โดยพบว่าถ้านำแกลบข้าวไปเผาที่อุณหภูมิ 450°C นาน 4 ชั่วโมง จะพบว่า เถ้าแกลบมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์

และเหล็กออกไซด์รวมกันถึง ร้อยละ 93.76 ขององค์ประกอบทั้งหมด นอกจากองค์ประกอบหลักดังกล่าวแล้ว เถ้าแกลบยังมีส่วนประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และโพแทสเซียมออกไซด์อยู่ด้วย องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบแสดงไว้ในตารางที่ 2.4.

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ (บวรจักร และคณะ 2538)

องค์ประกอบ	เถ้าแกลบ (%)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	93.15
อลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	0.41
เหล็กออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	0.20
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.41
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.45
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.08
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	2.31
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้	2.77

2.5.3 เถ้าขานอ้อย (สุชีรา, 2548 และ วิทวัส, 2551)

เถ้าขานอ้อย เป็นวัสดุที่ได้จากการเผาขานอ้อยซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำตาล โดยขานอ้อยหลังจากกระบวนการหีบอ้อยนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาไหม้ ความร้อนที่ได้นำไปผลิตพลังงานไอน้ำ โคนไอน้ำที่ผลิตได้นำไปใช้ประโยชน์ในสองส่วนหลักใหญ่ในกระบวนการผลิตน้ำตาล คือใช้ไอน้ำในการขับเคลื่อนเพื่อสร้างพลังงานกลในการหีบอ้อย ส่วนที่สองใช้ในการขับเคลื่อนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในโรงงาน

ส่วนประกอบทางเคมี ที่สำคัญของเถ้าขานอ้อย ได้แก่ SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, และ CaO ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้มีความแตกต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งที่มาของเถ้าขานอ้อย แต่ส่วนใหญ่ผลรวมของออกไซด์หลักร้อยละ โดยน้ำหนัก อยู่ในปริมาณ 60-75 สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca (OH)₂) แล้วเกิด แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(C-S-H)ซึ่งคือปฏิกิริยาปอซโซลาน จากการศึกษาของนักวิจัยหลายท่านพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยมีค่าแตกต่างกันดังนี้

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำซานอ้อย

สารประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	สุวิมลและอาทิมา (2547)	สุเมธ เตชะกุลวิโรจน์ (2546)	กฤษณ์ จารุทะวัย (2545)
CaO	10.63	7.26	3.63
SiO ₂	62.60	51.96	67.94
Al ₂ O ₃	3.46	1.37	4.75
Fe ₂ O ₃	-	0.82	1.61
LOI	20.17	33.17	16.16

2.6 การชะละลาย (Comer, 1990)

2.6.1 ความหมาย

เมื่อน้ำใต้ดินหรือน้ำผิวดิน สัมผัสหรือผ่านของเสีย น้ำจะซึมผ่านเข้าไปทำให้ของเสียบางส่วนละลายออกมา ซึ่งสามารถวัดอัตราการละลายได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การชะละลาย (Leaching) โดยเรียกน้ำว่า สารชะ เรียกน้ำปนเปื้อนที่ผ่านออกมาว่า leachate และเรียกความสามารถของของเสียในการถูกชะว่า ความสามารถในการชะละลาย (Leachability)

การชะละลาย คือ อัตราที่องค์ประกอบที่อันตราย หรือองค์ประกอบที่ไม่ต้องการ เคลื่อนที่จากของเสีย และผ่านไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยผ่านทาง leachate โดยปกติแล้วอัตรานี้จะวัดและแสดงในรูปของความเข้มข้นขององค์ประกอบดังกล่าวใน leachate กล่าวคือ การชะละลายของสารพิษอาจบอกในรูปของความสามารถในการชะละลาย ซึ่งมีกประเมินได้จากการเปรียบเทียบความเข้มข้นขององค์ประกอบดังกล่าวใน leachate กับในของเสียเริ่มต้น ซึ่งจะสามารถบอกถึงสัดส่วนขององค์ประกอบที่ละลายออกมาระหว่างการทดสอบ ซึ่งก็เป็นการวัดความสามารถในการชะละลายนั่นเอง

นั่นคือ ความสามารถในการชะละลาย (L) เท่ากับ ความเข้มข้นของสารพิษที่ออกมา จากตัวอย่างหลังการสกัด (C_i) หารด้วยความเข้มข้นของสารพิษเริ่มต้น (C₀)

$$L = C_i / C_0$$

โดยที่ L = ความสามารถในการชะละลาย (มิลลิกรัม/กรัม)

C₀ = ความเข้มข้นของสารพิษก่อนทำการสกัด

C_i = ความเข้มข้นของสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด

หรือ ความสามารถในการชะละลาย (L) เท่ากับ ปริมาณสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด (W_i) หารด้วยปริมาณสารพิษก่อนทำการสกัด (W_0)

$$L = W_i / W_0$$

โดยที่ W_0 = ปริมาณสารพิษก่อนทำการสกัด (กรัม)

W_i = ปริมาณสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด (มิลลิกรัม)

ตารางที่ 2.8 ค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารอันตรายที่ยอมรับได้ในสารชะ

Hazardous Waste Number	Contaminant	Maximum concentration (mg/L)
D004	Arsenic	5.00
D005	Barium	100.00
D006	Cadmium	1.00
D007	Chromium	5.00
D008	Lead	5.00
D009	Mercury	0.20
D010	Selenium	1.00
D011	Silver	5.00
D012	Eldrin	0.02
D013	Lindane	0.04
D014	Methoxychlor	10.00
D015	Toxaphen	0.50
D016	2,4 - D	10.00
D017	2,4,5-TP Silver	1.00

ที่มา US. Environmental Protection Agency

2.6.2 การวัดความสามารถในการชะละลาย

เนื่องจากการทดสอบความคงทนของผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องใช้เวลานาน จึงต้องใช้วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้ผลเร็ว ในสหรัฐอเมริกา วิธีการทดสอบของเสียอันตรายสำหรับการฝังกลบที่ได้รับการยอมรับทางด้านสิ่งแวดล้อมคือ วิธี EP Tox และวิธี TCLP

วิธีการทดสอบส่วนใหญ่เป็นกระบวนการแบบ batch ซึ่งของเสียจะสัมผัสกับสารจะเป็นช่วงเวลาหนึ่ง โดยเขย่าส่วนผสมอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้สมดุลทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการบดตัวอย่างก่อนทำการสกัด หลังจากการสกัดและแยกของเหลวออกจากของแข็งแล้วนำไปวิเคราะห์ห้องค์ประกอบต่าง ๆ ใน leachate วิธีการทดสอบส่วนใหญ่ใช้อัตราส่วนสารระเหยต่อของเสียเป็น 20 : 1 เพื่อให้ได้ความเข้มข้นสูงสุดขององค์ประกอบใน leachate ประมาณ 5 % ขององค์ประกอบในของเสียเริ่มต้น สารระเหยที่ใช้ในการทดสอบส่วนใหญ่จะเป็นกรดอะซิติก หรือบัพเฟอร์ หรือบางวิธีจะเป็นน้ำปราศจากไอออน ค่าพีเอชสุดท้ายของ leachate จะขึ้นอยู่กับความเป็นเบสของของเสีย เนื่องจากค่าพีเอชสุดท้ายเป็นปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมการชะละลายของโลหะ วิธี TCLP จึงออกแบบมาให้เลียนแบบสภาวะของการชะละลายในหลุมฝังกลบจริง โดยใช้สารระเหยเป็นกรดอะซิติกเนื่องจากในหลุมฝังกลบจะเกิดการกรดอินทรีย์ขึ้นระหว่างการสลายตัวของสารอินทรีย์ ดังนั้นจุดประสงค์ของการใช้กรดอะซิติกเป็นสารระเหยก็คือ เพื่อเลียนแบบกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นนั่นเอง

2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการชะละลาย

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการชะละลายแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

1) ปัจจัยเกี่ยวกับวิธีการทดสอบ

- พื้นที่ผิวของของเสีย สภาวะในการทดสอบการชะละลายของก้อนห่อแข็งของเสียควรจะคล้ายคลึงกับสภาวะในหลุมฝังกลบมากที่สุด แต่ในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถเป็นไปได้ ดังนั้นวิธีการทดสอบส่วนใหญ่จึงใช้การเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวอย่างโดยการบดเพื่อให้การทดสอบมีความถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามผู้ทดสอบจะต้องตระหนักว่าวิธีการบดตัวอย่างนั้นเราไม่สามารถควบคุมได้เพียงพอ เนื่องจากการบดสามารถกำหนดขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดได้ แต่ไม่สามารถกำหนดขนาดที่เล็กที่สุดและการกระจายของขนาดได้ ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้จึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเหล่านั้นด้วย

- เทคนิคและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเขย่า วิธีการทดสอบส่วนมากจะใช้การเขย่าเพื่อให้ถึงสมดุลระหว่างของเสียและสารระเหยเร็วขึ้น วิธี EP Tox ไม่ได้กำหนดไว้ทั้งเทคนิคและอุปกรณ์ที่ใช้ เพียงแต่การเขย่าจะต้องไม่ทำให้เกิดการแยกชั้น และจะต้องแน่ใจว่าผิวหน้าของตัวอย่างทั้งหมดสัมผัสกับสารละลายที่ใช้สกัดอยู่ตลอดเวลา ส่วนวิธี TCLP กำหนดให้ใช้อุปกรณ์ในการเขย่าแบบหมุนรอบ อย่างไรก็ตามเทคนิคการเขย่าอาจจะทำให้เกิดขัดแย้งกับสภาวะจริงในหลุมฝังกลบบ้าง เนื่องจากโดยปกติแล้วในหลุมฝังกลบสารระเหยที่หรือไหลเข้ามาอยู่รอบอนุภาคของของเสีย

- ธรรมชาติของการชะ ตามหลักการแล้วการชะควรจะเหมือนกับสภาวะจริงในหลุมฝังกลบ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเป็นไปได้ เนื่องจากค่าพีเอชและองค์ประกอบของสารระเหยเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และมักจะไม่สามารถทราบความถูกต้องของค่าเหล่านั้น ดังนั้นแนวทางของวิธี

ทดสอบในปัจจุบันจะใช้สารชะที่รุนแรง มีค่าพีเอชต่ำปานกลาง เช่น สารชะของวิธี EP Tox และวิธี TCLP

สารชะที่ใช้จะต้องสามารถหาได้ทุกวันในห้องปฏิบัติการ เช่น รีเอเจนต์ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ และเป็นสารที่เตรียมได้ง่าย ตัวอย่างสารชะ ได้แก่ กรดคาร์บอนิก (น้ำที่อิ่มตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์), กรดอะซิติก หรืออะซิเตตบัฟเฟอร์

- อัตราส่วนของสารชะต่อของเสีย ไม่มีอัตราส่วนใดที่สามารถเป็นตัวแทนสำหรับสถานะจริงในหลุมฝังกลบที่ทุกเวลาใด ๆ ได้ ของเสียโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการบำบัดด้วยวิธีหล่อแข็งจะมีองค์ประกอบที่เมื่อละลายน้ำจะทำให้เกิดไอออน และแรงดึงดูดระหว่างไอออน ซึ่งมีผลทำให้ความสามารถในการชะละลายขององค์ประกอบดังกล่าวลดลงเมื่ออัตราส่วนของสารชะต่อของเสียต่ำ ดังนั้นอัตราส่วนที่สูงกว่าจึงเหมาะสมมากกว่า

- จำนวนครั้งในการชะ วิธีทดสอบบางวิธี เช่น Multiple Extraction Procedure (MEP) ของเสียจะถูกสกัดด้วยสารชะเพียงครั้งเดียว แต่บางวิธีถูกออกแบบมาเพื่อให้ใกล้เคียงธรรมชาติที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบส่วนมาก นั่นคือ มีการเปลี่ยนสารชะใหม่อย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยทั่วไปสันนิษฐานว่าสารที่ถูกชะออกมาครั้งแรกจะมีความเข้มข้นขององค์ประกอบสูงสุด เพราะสารชะสัมผัสกับความเข้มข้นสูงสุดบนผิวหน้าของของเสีย แต่อย่างไรก็ตามในกรณีของโลหะไม่จำเป็นต้องเป็นเช่นนี้เสมอ ปัจจุบันวิธีการทดสอบส่วนใหญ่จะใช้การชะครั้งเดียว

- ระยะเวลาในการสัมผัส มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของเวลาพบว่า ค่าที่ยอมรับได้ในเกือบทุกสถานการณ์เป็น 24 ชั่วโมง วิธีทดสอบส่วนใหญ่จึงใช้ค่านี้เป็นมาตรฐาน แต่ปัจจุบัน EPA ดัดแปลงระยะเวลาสำหรับวิธี TCLP โดยการลดเวลาในการทดสอบเป็น 18 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าไม่มีผลกระทบต่ออัตราการทดสอบมากนัก

- อุณหภูมิ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการละลายขององค์ประกอบต่าง ๆ โดยที่อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ความลึก สถานที่ และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบ ซึ่งในการทดสอบไม่สามารถทราบสถานะเหล่านี้ได้ ดังนั้นอุณหภูมิมาตรฐานที่ใช้กันปกติสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการคือ $20^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ เช่น มาตรฐานของวิธี TCLP เป็น $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$

- การปรับพีเอช ตัวแปรที่สำคัญที่สุดในการทดสอบด้วยวิธี EP Tox คือ กระบวนการปรับพีเอช วิธีนี้จะรักษาพีเอชไว้ที่ $5.0 + 0.2$ แต่เนื่องจากอัตราการเติมกรดอะซิติก 0.5 นอร์มัล เพื่อปรับพีเอชนั้นไม่ได้มีการกำหนดไว้จึงทำให้เกิดการแปรปรวนได้อย่างมาก ความสามารถในการละลายของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะไฮดรอกไซด์ค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอช และจะแตกต่างกันไปตามชนิดของโลหะ วิธี TCLP จึงมีการปรับปรุงให้ไม่

มีการปรับพีเอช โดยการใช้สารชะเป็นกรดอะซติก หรือบัฟเฟอร์ขึ้นอยู่กับความเป็นเบสของของเสีย

การควบคุมพีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการประเมินความสามารถในการชะละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับ โลหะ ควรจะบันทึกค่าพีเอชสุดท้ายของสารชะเมื่อสิ้นสุดการทดสอบไว้เสมอ เพราะว่าเป็นค่าที่มักจะใช้ตัดสินว่าของเสียเป็นไปตามมาตรฐานบังคับสำหรับโลหะหรือไม่

- การแยกสารที่สกัดได้ โลหะหลายชนิดสามารถคงอยู่ในของเสียและในสารผสมของของเสียกับสารชะในสถานะคอลลอยด์ จึงมีการใช้กระบวนการกรองเพื่อแยกคอลลอยด์เหล่านี้ ออก แต่ไม่ได้ต้องทำเสมอ ถ้าสารที่สกัดได้ขุ่นจึงต้องกรอง เพราะว่าการกรองก็ใช้เวลาช่วงหนึ่ง ดังนั้นถ้าใช้เวลานานของเสียก็ยิ่งสัมผัสกับสารชื่อนานขึ้น

- การวิเคราะห์ การวิเคราะห์ leachate ที่ได้ขึ้นอยู่กับเทคนิคของผู้วิเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้ด้วย

2) ปัจจัยเกี่ยวกับของเสีย

- การควบคุมพีเอช การควบคุมพีเอชมีความสำคัญมาก ถ้าสถานะในการหล่อแข็งไม่มีการควบคุมพีเอชที่เพียงพออาจจะมีผลต่อความสามารถในการชะละลายของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์บางชนิด โดยปกติแล้วการหล่อแข็งต้องการสถานะที่พีเอชสูง เพราะโลหะไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการละลายต่ำที่สุดในช่วงพีเอช 7.5 – 11 แต่อย่างไรก็ตามโลหะบางชนิด เช่น โครเมียม มีคุณสมบัติเป็นแอมโฟเทอริกซึ่งมีความสามารถในการละลายสูงกว่าทั้งที่พีเอชต่ำและพีเอชสูง นอกจากนี้โลหะทุกชนิดไม่ได้มีค่าความสามารถในการละลายต่ำที่สุดที่พีเอชช่วงเดียวกัน ดังนั้นสถานะในการหล่อแข็งจึงยอมให้เป็นพีเอชใด ๆ ได้

- การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ การมีตัวออกซิแดนท์และตัวรีดิวซ์ที่แรงอยู่จะสามารถเปลี่ยนวาเลนซ์ของโลหะซึ่งมีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะนั้น ตัวอย่างเช่น โครเมียม

- ปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ ปฏิกิริยาการตกตะกอนของโลหะในรูปไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต ซัลไฟด์ซัลไฟเกต และอื่น ๆ รวมถึงในรูปสารเชิงซ้อน นอกจากนี้ก็อีกปฏิกิริยาหนึ่งที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยาคีเลชัน (chelation) ที่มักจะเกิดขึ้นในดิน ซึ่งจะช่วยการชะละลายโดยการเกิดสารเชิงซ้อนแอนไอออนิกที่ละลายน้ำจากแคทไอออนของโลหะ แต่อย่างไรก็ตามลิแกนด์อินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น พอลิเมอร์ และกรดอิมิก อาจจะช่วยการตรึงโดยการดูดซับบนอนุภาคของของแข็ง

2.6.4 กลไกการชะละลาย (สุธาทิพย์, 2545)

ก้อนหล่อแข็งของเสียมเป็นของแข็งที่มีรูพรุนซึ่งอิมด้วยน้ำ ประกอบด้วยเฟสของแข็งหนึ่งเฟสหรือมากกว่า ช่องว่างของอากาศ และเฟสของเหลวที่เรียกว่าสารละลายในรูพรุน (pore solution) ทั้งหมดอยู่ในสมดุลเคมี เมื่อของแข็งสัมผัสสภาวะการชะละลายสมดุลจะถูกรบกวนทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของสารนั้น ๆ ระหว่างของแข็งและสารละลายที่ใช้ในการชะละลาย ซึ่งจะเกิดฟลักซ์โดยมวลระหว่างผิวหน้าของของแข็งและสารละลาย ทำให้เกิดการแพร่ (bulk diffusion) ในของแข็งทั้งก้อน โดยที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาระหว่างของแข็งและละลาย

กลไกย่อยหลายแบบเป็นกลไกที่เกิดขึ้นในของแข็ง ที่ผิวของของแข็ง และในสารละลาย (bulk leachant)

ก) การละลาย (Solubilization)

สำหรับการชะละลายขององค์ประกอบต่าง ๆ ชั้นแรกองค์ประกอบนั้นต้องละลายในสารละลายที่อยู่ในรูพรุนของของแข็ง หรือสารละลายในสารละลายที่ซึมผ่านเข้าไปในของแข็ง สารบางตัวละลายช้ากว่าตัวอื่น ๆ เพราะอัตราการละลายถูกควบคุมโดยความสามารถในการละลาย และโดยความเข้มข้นในสารละลายที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของของแข็ง

สำหรับกรณีของการหล่อแข็ง ของแข็งมักจะสัมผัสกับน้ำใต้ดิน อัตราการละลายจะถูกควบคุมโดยการแพร่ของโมเลกุลของสารที่ละลายน้ำ ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดตอนแรกอัตราการละลายจะถูกจำกัดโดยจำนวนไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีอยู่ หลังจากนั้นจะถูกจำกัดโดยการแพร่ขององค์ประกอบของของเสียม เพราะว่าการแพร่ของไฮโดรเจนไอออนจะเร็วกว่าอนุภาคอื่น ๆ มาก

ข) การเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง (Transport Through the Solid)

ภายในก้อนหล่อแข็งของเสียม การเคลื่อนที่อาจจะเกิดโดยการนำ (convection) หรือการแพร่ ก้อนหล่อแข็งของเสียมส่วนมากมีความสามารถในการซึมผ่านต่ำ ดังนั้นการเคลื่อนที่แบบการนำอาจจะไม่สำคัญทั้งในการทดสอบการชะละลาย และในสภาวะจริง การแพร่จึงเป็นกระบวนการเดียวที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง

ค) การแพร่ผ่านชั้นที่ถูกชะ (Diffusion Through the Leached Layer)

เนื่องจากองค์ประกอบที่ละลายน้ำจำนวนมากถูกชะจากของแข็งที่ไม่ละลายน้ำทำให้เกิดชั้นที่ถูกชะ (Leached Layer) ขึ้นในของแข็งภายใต้สภาวะที่พีเอชต่ำ ทั้งไฮโดรเจนไอออนและองค์ประกอบที่สามารถถูกชะได้จะแพร่ผ่านชั้นนี้ ในทางตรงกันข้ามจากที่ทราบว่ายอัตราการชะละลายในชั้นที่ถูกชะถูกจำกัดโดยการแพร่ขององค์ประกอบ เพราะไฮโดรเจนไอออนแพร่เร็วกว่าตัวอื่น ๆ ชั้นที่ถูกชะนี้จึงไม่ได้เป็นตัวจำกัดอัตราการชะละลายทั้งหมดในกระบวนการชะละลาย เพราะเมื่อองค์ประกอบถูกชะออกมาชั้นที่ถูกชะก็อาจจะกลายเป็นมีรูพรุนมากขึ้นเมื่อเทียบกับ

ของแข็งที่ไม่ได้ถูกชะ ดังนั้นการแพร่ของโมเลกุลในสารละลายที่อยู่ในรูพรุนจะกลายเป็นปัจจัยที่เป็นตัวจำกัดอัตราการชะละลายด้วย

ง) การเคลื่อนที่ผ่านชั้นที่กั้นระหว่างของแข็งกับของเหลว (Transport Through the Solid-Liquid Boundary Layer)

ชั้นที่ของแข็งเชื่อมต่อกับของเหลวอาจจะทำให้เกิดสภาวะที่จำกัดสำหรับการชะละลายเหมือนกันในปรากฏการณ์ไฟฟ้าเคมี ความเร็วที่ระบบเข้าสู่สมดุลมักจะถูกจำกัดโดยความหนาและธรรมชาติของชั้นที่กั้นอยู่

จ) การเคลื่อนที่ทั้งหมดในการชะ (Bulk Transport in Liquid Leachant)

เมื่อระบบเข้าใกล้สมดุล อัตราการชะละลายจะลดลงตามความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างเฟสของแข็งและเฟสสารละลาย จนเข้าใกล้ศูนย์ ปรากฏการณ์นี้อาจจะเกิดขึ้นในหลุมฝังกลบที่อึดตัว แต่ไม่มีการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน ซึ่งจะมีผลต่อความเข้มข้นสูงสุดที่จะเป็นไปได้ขององค์ประกอบใน leachate แต่อัตราการชะละลายทั้งหมดอาจจะต่ำกว่าระบบที่มีการเคลื่อนที่ในอีกทางหนึ่งน้ำใต้ดินที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจะทำให้องค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ดีในของแข็งที่มีรูพรุนมีอัตราการชะละลายเร็วมาก

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2545 นิตยา เรืองฤทธิ์ ทำการทดลองหล่อแข็งกากตะกอนโรงชุบโลหะประเภทสังกะสี-ไซยาไนด์ โดยใช้เถ้าแกลบทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน คือใช้เถ้าแกลบแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และแปรผันปริมาณของกากตะกอนโลหะในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ในการหล่อก้อนตัวอย่างทดสอบ โดยหล่อก้อนทดสอบเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ซึ่งประยุกต์มาจาก ASTM D1633-96 แล้วทำการศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัด, ระยะเวลาก่อตัวและการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสีย จากการทดสอบ พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักนั้น จะให้ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ชุดควบคุมที่อายุบ่มตั้งแต่อายุ 7 วัน สำหรับก้อนหล่อแข็งที่มีกากตะกอน ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ทุกอายุการบ่ม มีค่าการรับกำลังอัดเกินค่ามาตรฐาน สำหรับการฝังกลบแบบปลอดภัย ยกเว้นก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีกากตะกอนโลหะในอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เป็นที่น่าสังเกตว่า เถ้าแกลบส่งผลโดยลดระยะเวลาการก่อตัวเริ่มและสุดท้าย แต่ส่งผลไม่รุนแรงเท่ากากตะกอนโลหะ การทดสอบความสามารถในการกักเก็บโลหะหนักโดยวิธี TCLP นั้นการรั่วไหลของสังกะสี เหล็ก และ โครเมียมไม่เกินค่ามาตรฐาน

ในปี ค.ศ. 2003 Qian และคณะ ทำการศึกษาการก่อตัวและการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีโลหะหนักสังกะสี โดยการพัฒนากำลังรับแรงอัดขึ้นอยู่กับปริมาณของสังกะสีที่มีอยู่ในก้อนหล่อแข็ง โดยที่ 0.5% ของสังกะสี จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง 10-20% และที่ 2% ของสังกะสี มีกำลังรับแรงอัดที่ 7-14 วันเท่ากับ 2-3 MPa และที่ 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 9.5 MPa ส่วนการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP พบว่าเกิดการรั่วไหลของสังกะสี มากในช่วงวันแรกและค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ส่วนที่ 2% ของสังกะสี ที่ 28 วัน ยังมีค่าการรั่วไหลมากเกินค่ามาตรฐาน แต่ในความเป็นจริงแล้วสังกะสี มากกว่า 99.99% ถูกตรึงอยู่ในก้อนหล่อแข็ง เนื่องจาก 2% ของสังกะสี มีปริมาณสูงถึง 60,000 ppm ที่มีอยู่ในก้อนหล่อแข็งด้วยกลไกการห่อหุ้มอนุภาคทางกายภาพ (physical encapsulation) ทำให้สามารถตรึงสังกะสี ไว้ได้ในความเข้มข้นสูงส่วนกลไกทางเคมีนั้น ซึ่งถือเป็นกลไกที่สำคัญนั้นเกี่ยวข้องกับการก่อตัวของ Zinc silicate gel ซึ่งไม่ละลายน้ำ, การเคลื่อนตัวของสังกะสี เข้าไปใน C-S-H และการตกตะกอนของ calcium zincate ซึ่งไม่ละลายน้ำ ทำให้เกิดการตรึงสังกะสีอยู่ใน ก้อนหล่อแข็งและส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดและการรั่วไหลของสังกะสี

ในปี พ.ศ. 2548 สุชีรา กุลชนะประสิทธิ์ ทำการศึกษาผลกระทบของเถาซานอ้อยต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยการนำเถาซานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาล นำมาอบด้วยเครื่องอบอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จนอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 2 เถาซานอ้อยได้ถูกนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0,10,20,30 และ 50 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า คุณสมบัติทางเคมีของเถาซานอ้อยมีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 80 และค่า LOI ร้อยละ 22.75 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ของเถาซานอ้อยที่เพิ่มขึ้น ที่อายุการบ่ม 3 และ 7 วัน แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปที่อายุการทดสอบ 28 และ 90 วันมีแนวโน้มสูงขึ้นมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมทุกอัตราส่วน ยกเว้นอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียง และสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในทุกอายุการบ่ม ความชื้นเหลือปกติ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย การขยายตัว การหดตัวเมื่อแห้งมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของเถาซานอ้อยการต้านทานกรดซัลฟูริกพิจารณาจากการสูญเสียของน้ำหนัก และค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์หลังแช่กรดซัลฟูริก พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ด้วยเถาซานอ้อยทำให้การต้านทานกรดซัลฟูริกดีขึ้น การสูญเสียน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดน้อยลงตามปริมาณการแทนที่ในทุกระยะเวลา

ในปี 2548 ธชพล ณ นคร ศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดและการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกาคตะกอนโลหะหนักที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถาแกลบดำเป็นวัสดุ

ยึดประสาน โดยใช้การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบดำที่มีปริมาณร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักและแปรเปลี่ยนกากตะกอนในอัตราร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าก่อนหล่อแข็งที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบดำปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักให้ค่ากำลังอัดสูงสุดหลังจากอายุการบ่ม 28 วันขึ้นไป โดยมีความสามารถในการรับแรงอัด สูงกว่าก่อนหล่อแข็งที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบดำที่อายุการบ่ม 28 56 91 วัน นอกจากนี้เมื่อปริมาณกากตะกอนโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการ รับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักลดลง เมื่อทำการทดสอบการรั่วไหลของโลหะ หนักจากก้อนหล่อแข็งด้วยวิธี Multiple Extraction Procedure (MEP) พบว่าเมื่อแทนที่ก้อนหล่อ แข็งด้วยกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของสารละลายของ ทองแดง เหล็ก โครเมียม แคลเซียม และสังกะสี มีค่าเท่ากับ 0.247 2.348 0.346 0.006 และ 0.389 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ซึ่งไม่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

ในปี พ.ศ. 2548 วรางคณา ใจมั่น ศึกษาวิธีทดสอบการชะละลายที่มีผลต่อการรั่วไหลของ โลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก โดยใช้เถ้าแกลบที่เตรียมโดยการเผาเถ้าที่ อุณหภูมิ 650^oซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปูนขาวเป็นวัสดุยึดประสานที่อัตราส่วน 50:50 และ 55:45 และแปรเปลี่ยนปริมาณกากตะกอนโลหะหนักในอัตราร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ใน สภาวะที่มีการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีค่า alkali modulus 3.0 ในอัตราร้อยละ 0 และ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักวัสดุยึดประสาน จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30-32^oซ) และบ่มที่อุณหภูมิ 50^oซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและบ่มต่อที่อุณหภูมิห้องหลัง จากนั้น ความสามารถในการชะโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสียทดสอบโดยวิธี Multiple Extraction Procedure (MEP) และ Dynamic Leach Test (DLT) ที่ใช้สารละลายฟลักซ์สังเคราะห์ที่ มีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 เป็นสารชะละลาย จากการทดลองพบว่า พีเอชของสารชะละลายมีการ เปลี่ยนแปลงหลังจากสัมผัสกับทุกตัวอย่างโดยเพิ่มขึ้นจาก 3 ไปอยู่ในช่วง 10.75-12.35 ในรอบแรก ของการสกัด และเพิ่มไปอยู่ในช่วง 10.49-11.40 ในรอบที่ 10 ของการสกัดด้วยวิธี MEP ในขณะที่ การสกัดด้วยวิธี DLT พีเอชของสารชะละลายเพิ่มขึ้นจาก 3 ไปอยู่ในช่วง 3.22-8.57 หลังจากสัมผัส กับทุกตัวอย่างเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเพิ่มไปอยู่ในช่วง 8.74-9.95 หลังจากสัมผัสกับทุกตัวอย่างเป็น เวลา 42 วัน โดยการรั่วไหลของแคลเซียม ตะกั่ว และโครเมียมเมื่อทดสอบโดยวิธี MEP อยู่ในช่วง 0.02-0.16, 0.02-0.19 และ 0.06-0.26 มก./ล. ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อทดสอบด้วยวิธี DLT อยู่ในช่วง 0.01-0.13, 0.02-0.17 และ 0.05-0.21 มก./ล. ตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่าการทดสอบการรั่วไหล ของโลหะหนักโดยวิธี MEP มีการรั่วไหลของโลหะหนักออกจากก้อนหล่อแข็งของเสียสูงกว่าวิธี

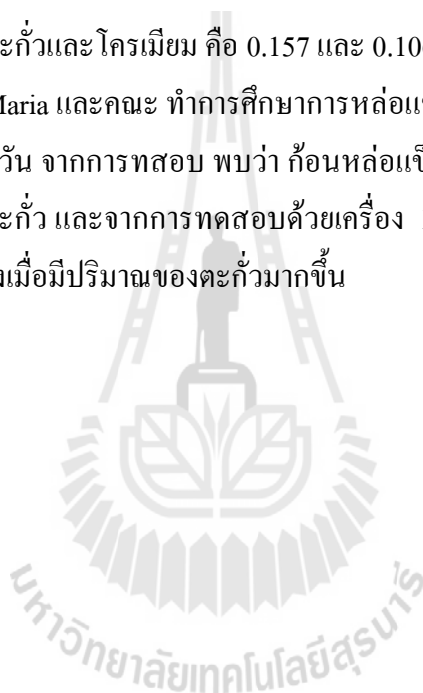
DLT ทั้งนี้อาจเนื่องจากการทดสอบด้วยวิธี MEP มีการบดลดขนาดของตัวอย่างทำให้พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับสารชะละลายเพิ่มขึ้น

ในปี 2549 นายยุทธพงษ์ พิจารโชติ ศึกษาความสามารถในการรับแรงอัด ความสามารถในการเก็บกักโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และศึกษาก้อนหล่อแข็งที่ผ่านการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดและความสามารถเก็บกักโลหะหนักแล้วฝังกลบที่หลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย โดยการนำเถ้าลอยลิกไนต์ปริมาณ ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และกากตะกอนสังกะสีจากโรงชุบโลหะ ปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก แล้วทำการหล่อแข็งในแบบหล่อทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร สำหรับทดสอบหาความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็ง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร สูง 2.5 เซนติเมตร สำหรับทดสอบหาความสามารถในการเก็บกักโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง จากนั้นทำการบ่มที่ระยะเวลา 3, 7 และ 14 วัน เมื่อบ่มก้อนหล่อแข็งตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วนำมาทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา และทดสอบความสามารถในการเก็บกักโลหะหนักเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ผลที่ได้คือความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็ง ผ่านเกณฑ์มาตรฐานขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา ทุกอัตราส่วนที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความสามารถเก็บกักโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ยกเว้น ก้อนหล่อแข็งที่มีกากตะกอนสังกะสีร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอยลิกไนต์ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยสามารถนำก้อนหล่อแข็งที่ผ่านการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดและความสามารถเก็บกักโลหะหนักแล้ว ฝังกลบที่หลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย

ในปี พ.ศ. 2549 สรวิศ ม่วงมิตร ศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการหล่อก้อนหล่อแข็งเถ้ากั้นเตาเผามูลฝอยติดเชื้อ และหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหล่อก้อนหล่อแข็งระหว่างเถ้ากั้นเตากับวัสดุประสานในอัตราส่วนที่แตกต่างกันซึ่งได้ศึกษา 2 กรณี คือกรณีเถ้ากั้นเตาครั้งที่ร้อยละ 10 และกรณีวัสดุประสานมีอัตราส่วนคงที่ที่ร้อยละ 70:30 แล้วทำการทดสอบตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมว่าด้วยการกำจัดสารอันตราย ผลการศึกษาพบว่า เถ้าชานอ้อยสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ และกรณีอัตราส่วนของเถ้ากั้นเตาครั้งที่ ร้อยละ 0 แล้วเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนวัสดุประสานระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าชานอ้อย เริ่มต้นที่ ร้อยละ 50:50, 60:40, 70:30, 80:20 และ 90:10 พบว่าทุกอัตราส่วนผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงาน

อุตสาหกรรม ทั้งกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่นและปริมาณความเข้มข้นของตะกั่ว (Pb) และ โครเมียม (Cr) ในน้ำสกัดก้อนหล่อแข็งโดยมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ตามปริมาณเถ้าขานอ้อยที่ลดลง และ วัสดุประสานที่ร้อยละ 50:50 จะให้ ประสิทธิภาพดีที่สุด ในการลดปริมาณความเข้มข้นของการชะละลายตะกั่ว 0.026 มิลลิกรัม/ลิตร และ โครเมียม 0.081 มิลลิกรัม/ลิตร กรณีอัตราส่วนของวัสดุประสานคงที่ ที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 70 กับเถ้าขานอ้อยร้อยละ 30 แล้วเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเถ้าก้นเตา ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 พบว่าทุกอัตราส่วนผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่นของก้อนหล่อแข็งโดยมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่ลดลง และเถ้าก้นเตาที่ร้อยละ 10 จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในการลดปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและ โครเมียม คือ 0.157 และ 0.106 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2010 Maria และคณะ ทำการศึกษาการหล่อแข็งตะกั่วโดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ที่อายุ 7 และ 28 วัน จากการทดสอบ พบว่า ก้อนหล่อแข็งที่มีตะกั่วสามารถรับแรงอัดได้ต่ำกว่าก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีตะกั่ว และจากการทดสอบด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) พบว่าความเข้มข้นของ Ca ลดลงเมื่อมีปริมาณของตะกั่วมากขึ้น



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุพอซโซลานคือ เถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบ ด้วยการหล่อแข็ง ในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพของตัวอย่าง โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เถ้าขานอ้อย เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก

ส่วนที่ 2 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบ เป็นวัสดุยึดประสานและผสมกากตะกอนของเสียจากโรงงานชุบโลหะ

ส่วนที่ 3 ศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราช้าง
- 2) เถ้าขานอ้อย จากบริษัท ด่านช้าง ไบโอดีเอ็นเอรียี จำกัด จังหวัด สุพรรณบุรี
- 3) เถ้าแกลบ จากบริษัท เอ.ที. ไบโอฟาวเวอร์ จำกัด
- 4) กากตะกอนของเสีย จากบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

จำกัด มหาชน (จากโรงงานชุบโลหะ)

- 5) น้ำประปา
- 6) กรดอะซีติก
- 7) กรดไนตริก

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมี วิธี X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)
- 2) เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM)
- 3) เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค Particle Size Analyzer
- 4) ชุดทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)
- 5) เครื่องทดสอบ Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP)
- 6) เครื่องทดสอบความขึ้นเหลวปกติ Vicat Apparatus
- 7) เครื่องทดสอบกำลังอัด Compression machine
- 8) ตู้อบปรับอุณหภูมิได้
- 9) ตู้คูความชื้น
- 10) ชุดตะแกรงร่อน
- 11) เครื่องผสมซีเมนต์
- 12) แบบหล่อก้อนตัวอย่าง ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร

3.2.3 การเตรียมวัสดุสำหรับการทดลอง

วัสดุยึดประสาน

นำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เถ้าชานอ้อย และเถ้าแกลบ มาทำการบดด้วยเครื่องบดให้มีขนาดเล็ก แล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 200 นำไปเก็บไว้ในถังที่ปิดสนิทเพื่อใช้ตลอดการทดลอง

กากตะกอนโลหะหนัก

นำกากตะกอนโลหะหนักมาอบ แล้วบดให้มีขนาดเล็ก นำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เก็บไว้ในถังที่ปิดสนิท เพื่อใช้ตลอดการทดลอง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็งกากตะกอน โลหะหนัก

ร้อยละของวัสดุยึดประสาน			ร้อยละ กากตะกอน โลหะหนัก (S)	อัตราส่วนน้ำ/ วัสดุยึดประสาน (w/b)	สัญลักษณ์
ปูนซีเมนต์ (OPC)	เถ้าชานอ้อย (BA)	เถ้าแกลบ (RHA)			
100	-	-	-	0.26	OPC100
			10	0.27	OPC10S
			30	0.31	OPC30S
			50	0.37	OPC50S

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็งกาบตะกอนโลหะหนัก (ต่อ)

ร้อยละของวัสดุยึดประสาน			ร้อยละ กาบตะกอน โลหะหนัก (S)	อัตราส่วนน้ำ/ วัสดุยึดประสาน (w/b)	สัญลักษณ์
ปูนซีเมนต์ (OPC)	เถ้าขานอ้อย (BA)	เถ้าแกลบ (RHA)			
90	10	-	-	0.33	OPC10BA
			10	0.35	OPC10BA10S
			30	0.39	OPC10BA30S
			50	0.47	OPC10BA50S
80	20	-	-	0.36	OPC20BA
			10	0.37	OPC20BA10S
			30	0.42	OPC20BA30S
			50	0.49	OPC20BA50S
70	30	-	-	0.40	OPC30BA
			10	0.41	OPC30BA10S
			30	0.46	OPC30BA30S
			50	0.53	OPC30BA50S
90	-	10	-	0.34	OPC10RHA
			10	0.35	OPC10RHA10S
			30	0.40	OPC10RHA30S
			50	0.47	OPC10RHA50S
80	-	20	-	0.37	OPC20RHA
			10	0.39	OPC20RHA10S
			30	0.43	OPC20RHA30S
			50	0.51	OPC20RHA50S
70	-	30	-	0.41	OPC30RHA
			10	0.43	OPC30RHA10S
			30	0.47	OPC30RHA30S
			50	0.54	OPC30RHA50S

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

การทดสอบความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าชานอ้อย เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทดสอบตามมาตรฐาน ATM C 188 โดยค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุ ต่อน้ำหนักของน้ำ ที่มีปริมาตรเท่าวัสดุนั้น ปริมาตรของวัสดุที่ต้องการทดสอบ จะหาได้จากการ แทนที่น้ำมันก๊าด (Kerosene) ด้วยวัสดุที่ต้องการทดสอบในขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier Flask)

การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาค

วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าชานอ้อย เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer)



รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค Particle Size Analyzer

การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี

โดยการนำผงตัวอย่างมาบดในครกบดสาร (Ceramic or agate mortar) เพื่อให้ตัวอย่างเป็นผงที่ละเอียดขึ้น และมีขนาดของเม็ดผงใกล้เคียงกัน ทาตัวอย่างลงบนเทปด้านที่เป็นกาบบนแผ่นเฟรมที่เตรียมไว้ ใช้พู่กันที่สะอาดเกลี่ยผงตัวอย่างให้ติดบนเทปเป็นชั้นบางอย่างสม่ำเสมอ ทำความสะอาดแผ่นตัวอย่างให้เรียบร้อย ตรวจสอบความสม่ำเสมอของแผ่นตัวอย่างใช้เทปกาวปิดทับตัวอย่าง เพื่อกันไม่ให้ผงหลุดออกจากแผ่นเฟรม จากนั้นนำไปทดสอบ ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
 โดยการนำผงตัวอย่างมาโรยบนแท่นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 ซม. ที่ติดแผ่นกาว 2 หน้า เตรียมไว้แล้ว โดยให้ผงตัวอย่างติดแผ่นกาวเป็นแผ่นบาง ๆ จากนั้นนำไปเป่าด้วยลมออกซิเจนเพื่อให้ผงตัวอย่างหลุดออกให้เหลือเพียงชั้นเดียว นำแท่นตัวอย่างไปอบด้วยแสงไฟเพื่อไล่ความชื้น แล้วนำแท่นตัวอย่างไปเคลือบด้วยอิมอนทองคำ หลังจากนั้นจึงนำไปถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ 3.2 เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง

การเตรียมตัวอย่างก้อนซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง

การเตรียมตัวอย่างทดสอบซีเมนต์เพสต์ด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยวัสดุปอซโซลาน และผสมกากตะกอนของเสียดในอัตราส่วนดัง

ถ้าชานอ้อย ร้อยละ 10, 20 และ 30 และถ้าแกลบ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ทำหน้าที่เป็นวัสดุยึดประสาน และผสมกากตะกอนของเสียดจากโรงชุบโลหะในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน

การทดสอบความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์

โดยใช้เครื่องมือไวแคต (Vicat Apparatus) เป็นวิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่พอเหมาะสำหรับเพสต์ โดยพิจารณาจากการจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.

เป็นระยะ 10 ± 1 มม. ในเวลา 30 วินาที ตาม ASTM C 187 ซึ่งวิธีการผสมเพสต์เป็นไปตาม ASTM C 305

โดยใช้เครื่องมือไวแคท (Vicat Apparatus) เป็นวิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่พอเหมาะสำหรับเพสต์ โดยพิจารณาจากการจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เป็นระยะ 10 ± 1 มม. ในเวลา 30 วินาที ตาม ASTM C 187 ซึ่งวิธีการผสมเพสต์เป็นไปตาม ASTM C 305 โดยการนำส่วนผสมที่ออกแบบไว้ผสมด้วยเครื่อง (Mechanical Mixer) ขั้นตอนดังนี้

- 1) นำใบตี (Paddle) และอ่าง (Bowl) ที่แห้ง ติดตั้งลงบนตำแหน่งของเครื่องผสม
- 2) ใส่น้ำผสมลงในอ่าง แล้วเติมวัสดุยึดประสานและกากตะกอนโลหะหนักลงไปในน้ำ ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วินาที ให้น้ำถูกดูดซึม
- 3) เริ่มผสมในความเร็วต่ำ (140 ± 5 rpm) เป็นเวลา 30 วินาที หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 วินาที ระหว่างนี้ให้ทำการกวาดเอาเพสต์ที่ติดอยู่ข้างๆ อ่างลงไปให้อ่างให้หมด
- 4) เริ่มผสมด้วยความเร็วปานกลาง (285 ± 10 rpm) เป็นเวลา 150 วินาที
- 5) รีบทำการก่อแบบตัวอย่างที่ได้เป็นก้อนบอลด้วยมือที่สวมถุง และทำการโยนไปมาระหว่างมือทั้งสองเป็นจำนวน 6 ครั้ง รักษาระยะระหว่างมือทั้งสองประมาณ 150 มิลลิเมตร จากมือข้างหนึ่งไปอีกข้างหนึ่ง
- 6) กดก้อนบอลที่ได้ลงในแบบกรวย โดยวางก้อนบอลไว้บนฝ่ามือแล้วสวมกรวยในด้านที่กว้างลงไป ทำการใส่ตัวอย่างลงในแบบให้เต็ม เอาส่วนที่เกินออกโดยการปาดด้วยฝ่ามือ
- 7) วางกรวยด้านที่กว้างกว่าลงบนแผ่นกระจก ปาดส่วนที่เกินออกจากขอบด้านบน ด้วยเกรียงที่มีขอบคมหนึ่งครั้ง ระวังอย่ากดลงบนเพสต์
- 8) ตั้งแบบให้อยู่ใต้เครื่องมือไวแคทและนำเอาพลัดเกอร์ด้านที่ใหญ่มาวางตะที่ผิวของเพสต์และขีดสกรู
- 9) ตั้งค่าตัวชี้ที่เครื่องที่ได้ (Movable indicator) ไปที่ค่าขีดศูนย์ที่ด้านบนของสเกล ซึ่งเป็นค่าตั้งต้น (Initial reading)
- 10) ปลดอพลัดเกอร์ลงมาภายในเวลา 30 วินาทีหลังจากที่ผสมเสร็จ เครื่องจะต้องไม่มีการสั่นในระหว่างที่ทำการทดสอบ บันทึกค่าพลัดเกอร์ที่จมลงไปนซีเมนต์เพสต์หลังจากที่ปลดอพลัดเกอร์ลงไปเป็นระยะเวลา 30 วินาที เพสต์จะมีความชันเหลวปกติเมื่อพลัดเกอร์จมลงไปเป็นระยะ 10 ± 1 มิลลิเมตร จากผิวด้านบน ภายในระยะเวลา 30 วินาทีหลังปลดอพลัดเกอร์ ททำการลองทดสอบหลายๆ ครั้ง โดยเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ใช้ผสม จนกระทั่งได้ค่าความชันเหลวปกติ



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบความขึ้นเหลวปกติ Vicat Apparatus

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว

ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลาย ตาม ASTM C 191 โดยใช้ปริมาณน้ำที่พอเหมาะจากการทดสอบความขึ้นเหลวปกติ ซึ่งการก่อตัวระยะต้นคือระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. ในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจนทำให้เข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงด้วยน้ำหนักของตัวเองได้

การทดสอบกำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง

นำก้อนซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็งที่ได้จากการหล่อตัวอย่างในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน ที่เตรียมไว้ไปทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C109 ด้วยเครื่องทดสอบรับแรงอัดโดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำก้อนหล่อแข็งวางบนแท่นของเครื่องมือบริเวณกึ่งกลางของก้อน
- 2) กดน้ำหนักลงบนก้อนหล่อแข็ง โดยใช้อัตราการเพิ่มน้ำหนักคงที่ 20 ± 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- 3) อ่านค่าน้ำหนักที่กดลงสู่ก้อนหล่อแข็งสูงสุดที่หน้าปัดแสดงผลของเครื่องทดสอบ
- 4) บันทึกผลน้ำหนักของแรงกดสูงสุดที่อ่านได้

5) นำผลของน้ำหนักที่อ่านค่าได้คำนวณความสามารถในการรับแรงอัด

$$\text{ความสามารถในการรับน้ำหนัก} = \frac{\text{น้ำหนักที่กดสูงสุด}}{\text{พื้นที่หน้าตัด}} \quad (3.1)$$

หน่วยที่ใช้แสดงผล คือ กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตร

ในการทดลองจะทำซ้ำ 3 ก้อนตัวอย่างของแต่ละส่วนผสม เพื่อป้องกันความผิดพลาดจากการทดลอง



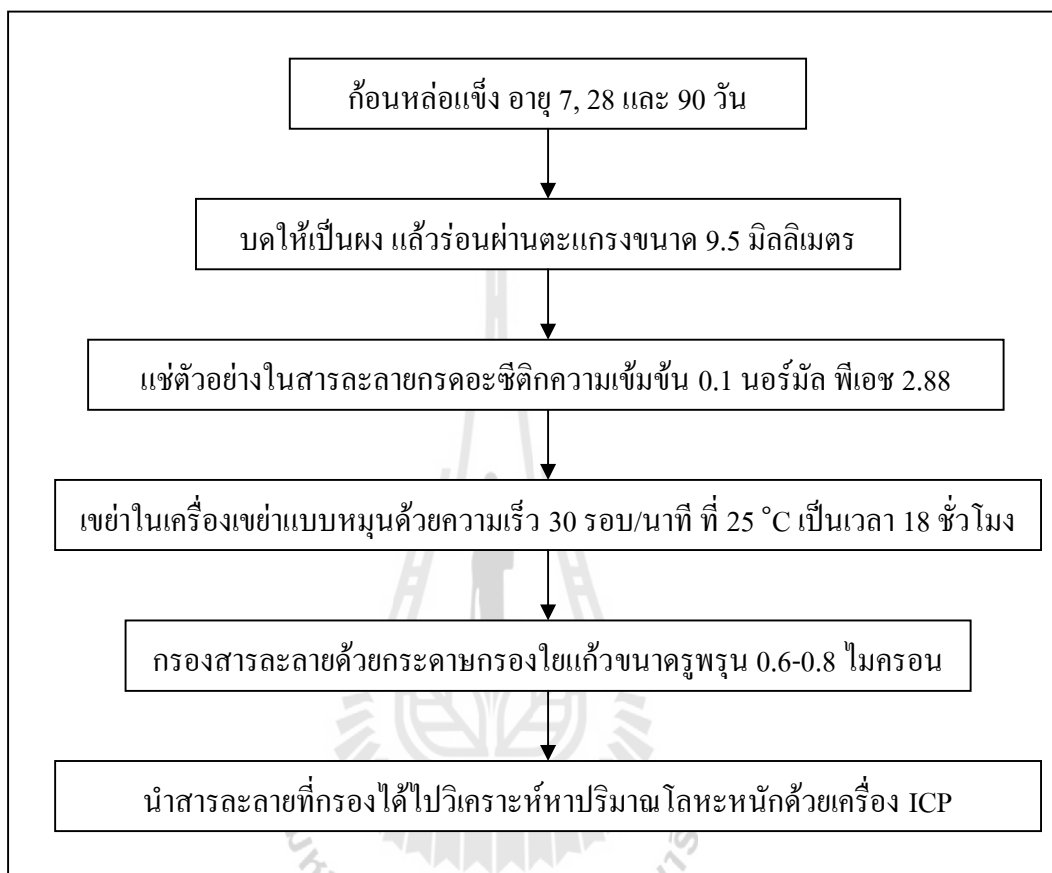
รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบกำลังอัด Compression machine

3.3.3 การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง

1) การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

นำก้อนหล่อแข็งตัวอย่างที่บ่มเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 90 วัน มาบดให้เป็นผงละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 9.5 มิลลิเมตรหรือน้อยกว่า จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2.88 โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักของของแข็งต่อปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 1 : 20 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุนที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 °C กรองสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษ

กรองใยแก้วขนาดรูพรุน 0.6-0.8 ไมครอน หลังจากนั้นนำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP



รูปที่ 3.5 การทดสอบการชะละลาย โดยวิธี TCLP ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP)

บทที่ 4

ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งจากตะกอนโลหะหนักที่นำจากตะกอนของเสียจากโรงงานชุบโลหะมาใช้ในการหล่อแข็ง โดยมีวัสดุยึดประสานเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับเถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบ ก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และผสมจากตะกอนโลหะหนักจากโรงงานชุบโลหะในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ทำการบ่มก้อนตัวอย่างที่อายุ 7 28 และ 60 วัน จึงนำก้อนหล่อแข็งมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

4.2 คุณสมบัติของวัสดุยึดประสานและจากตะกอน

4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

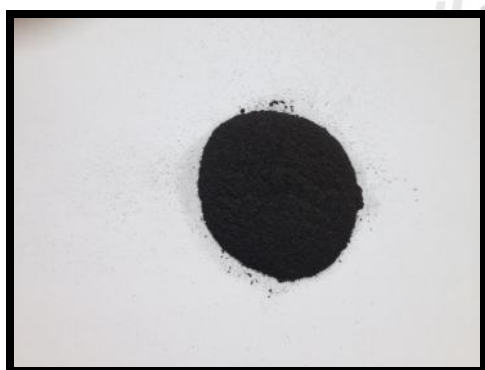
การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยคือ เถ้าขานอ้อย เถ้าแกลบ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นวัสดุยึดประสาน และจากตะกอนโลหะ จากรูปที่ 4.1 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะเป็นผงเม็ดละเอียดและมีสีเทา ดังรูปที่ 4.1 (ก.) เถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อยมีลักษณะเป็นเถ้าสีดำ เมื่อทำการเตรียมวัสดุคือนำมาอบและบดแล้วทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 75 ไมครอน (#200) จึงลักษณะเป็นเม็ดผงที่มีสีดำ แต่จะสังเกตเห็นว่าเถ้าแกลบจะมีสีดำเข้มกว่าเถ้าขานอ้อยเล็กน้อย โดยเถ้าแกลบจะมีสีดำสนิท ส่วนเถ้าขานอ้อยนั้นจะมีสีดำอ่อน ดังรูปที่ 4.1 (ข.) และ รูปที่ 4.1 (ค.) ส่วนจากตะกอนโลหะหนักเมื่อนำมาจากโรงงานมีลักษณะคล้ายดินเหนียว ก่อนข้างขึ้น มีสีเขียวอมเทาและกลิ่นเหม็น เมื่อทำการเตรียมวัสดุคือนำมาอบและบดแล้วทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 150 ไมครอน (#100) จึงมีลักษณะเป็นผงสีเขียวอมเทา ดังรูปที่ 4.1 (ง.)



(ก.) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข.) เถ้าแกลบ



(ค.) เถ้าขานอ้อย



(ง.) กากตะกอนโลหะหนัก

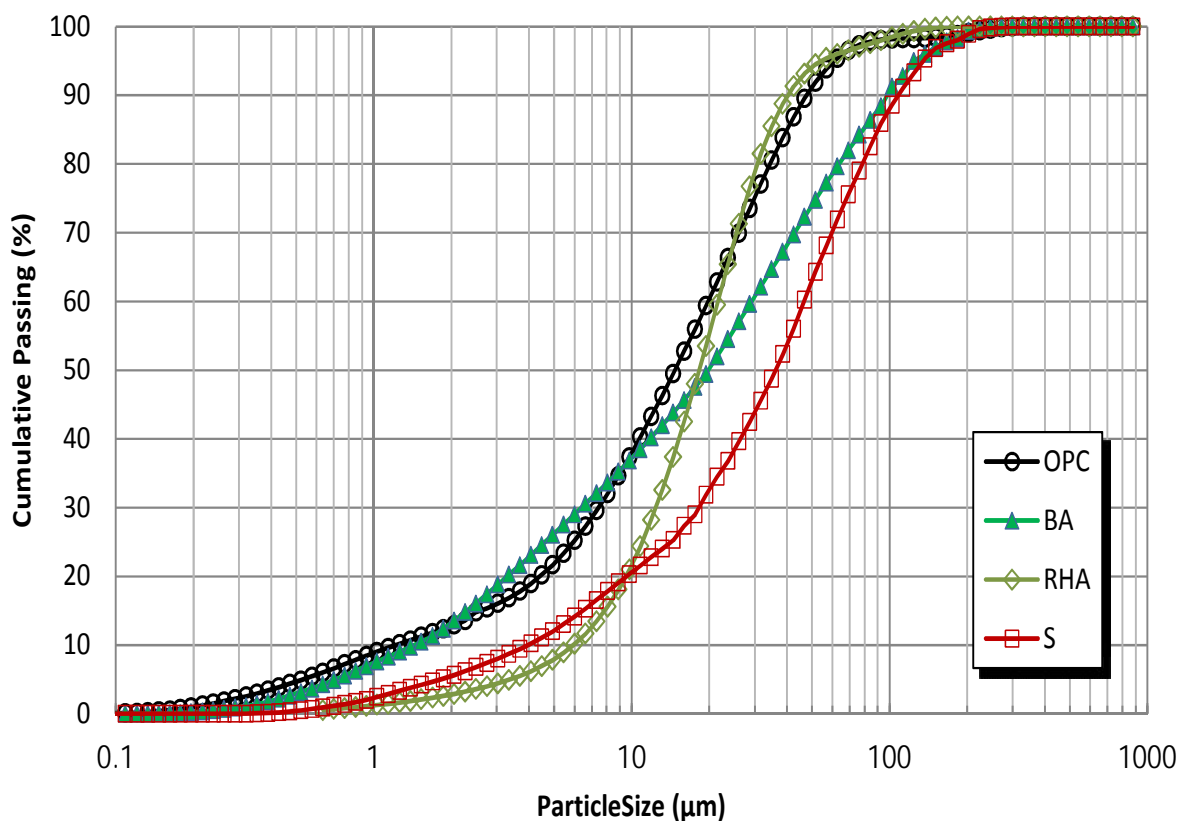
รูปที่ 4.1 ภาพวัสดุยึดประสานและกากตะกอนโลหะหนัก

จาก ตารางที่ 4.1 ผลทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ คือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14.35 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 3,870 ตารางเซนติเมตร/กรัม เถ้าขานอ้อย มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.16 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 19.85 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 3,010 ตารางเซนติเมตร/กรัม เถ้าแกลบ มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.00 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 18.28 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 3,260 ตารางเซนติเมตร/กรัม และกากตะกอนโลหะหนัก มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.79 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 36.95 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 2,100 ตารางเซนติเมตร/กรัม และมีการกระจายตัวของ

อนุภาควัสดุดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ

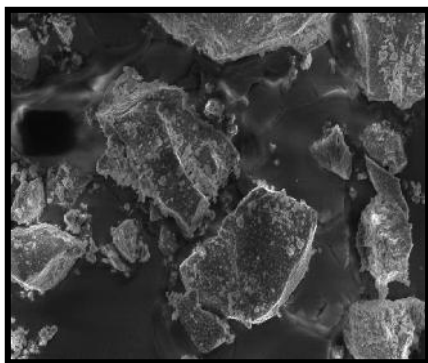
วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย d_{50} (ไมครอน)	พื้นที่ผิวจำเพาะ ($\text{ชม.}^2/\text{กรัม}$)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3.15	14.35	3,870
เถ้าขาน้อย	2.16	19.85	3,010
เถ้าแกลบ	2.00	18.28	3,260
กากตะกอนโลหะหนัก	1.79	36.95	2,100



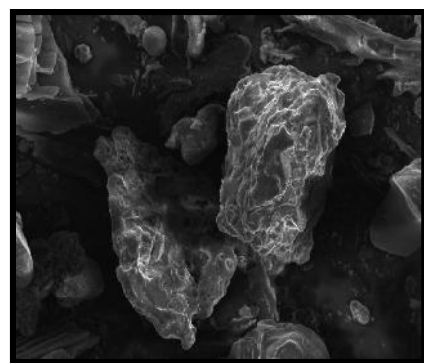
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการกระจายตัวอนุภาคของวัสดุ

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

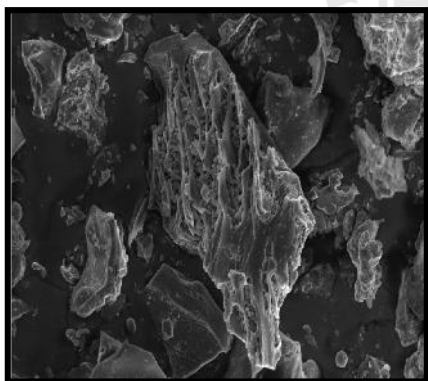
พบว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมและมีผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) เถ้าขานอ้อยมีรูปร่างมนไม่เรียบผิวขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) เถ้าแกลบมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม มีผิวขรุขระมีลักษณะเป็นโพรงในเนื้อวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ค) และกากตะกอนของเสียโลหะหนักมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมมนเล็กน้อย ผิวขรุขระ และมีเนื้อแน่น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ง)



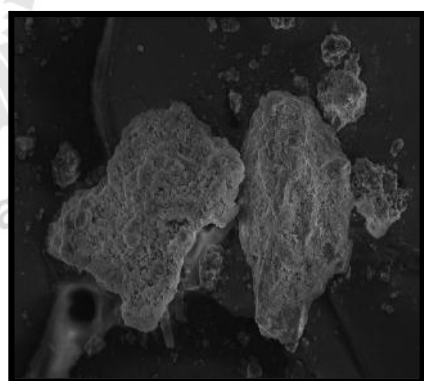
(ก) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์



(ข) เถ้าขานอ้อย



(ค) เถ้าแกลบ



(ง) กากตะกอนโลหะหนัก

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายของวัสดุยึดประสานและกากตะกอนโลหะหนัก

4.2.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เถ้าขานอ้อย เถ้าแกลบ และกากตะกอนของเสียโลหะหนัก โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกาไดออกไซด์ (SiO₂) มีค่าเท่ากับ 66.96 และ 19.85 ตามลำดับ เถ้าขานอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสารประกอบออกไซด์หลักที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂), อลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al₂O₃) และ เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) มีค่าเท่ากับ 58.15 13.57 และ 4.18 ตามลำดับ และเถ้าแกลบมีสารประกอบออกไซด์หลักที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂), อลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al₂O₃) และ เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) มีค่าเท่ากับ 84.42 0.51 และ 0.36 ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีหลักของเถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบ คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂), อลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al₂O₃) และ เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) รวมกันแล้วมากกว่าร้อยละ 70, ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) น้อยกว่าร้อยละ 4 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ต่ำกว่า 10 ดังนั้นเถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบที่นำมาใช้จัดเป็นวัสดุปอชโซลานใน Class F ตามข้อกำหนด ASTM C 618 สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca (OH)₂) แล้วเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ซึ่งคือปฏิกิริยาปอชโซลาน

กากตะกอนของเสียปนเปื้อนโลหะหนักสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นกากตะกอนของเสียจากโรงงานชุบโลหะ ประกอบไปด้วยออกไซด์โลหะหนัก คือ นิกเกิล ทองแดง สังกะสี และโครเมียม โดย นิกเกิล (Ni) มีความเป็นพิษ ซึ่งอาจทำให้เกิดมะเร็งทางเดินหายใจเพราะไปทำลายการสังเคราะห์ดีเอ็นเอ ทำให้เซลล์ตายและมีผลอักเสบ ทองแดง (Cu) เมื่อได้รับในปริมาณมากเป็นระยะเวลานานจะทำให้ร่างกายอ่อนแออยู่ตลอดเวลาและกล้ามเนื้อแข็งเกร็ง สังกะสี (Zn) เมื่อได้รับในปริมาณมากเป็นระยะเวลานานจะทำให้ระบบภูมิคุ้มกันลดลง โครเมียม (Cr) เป็นสารที่เป็นพิษและก่อมะเร็ง โดยการทดสอบค่าโลหะหนักเหล่านี้มีผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานและกากตะกอน

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในวัสดุยึดประสานและกากตะกอน			
	OPC	BA	RHA	S
SiO ₂	19.85	58.15	84.42	6.86
Al ₂ O ₃	4.49	13.57	0.51	5.55
Fe ₂ O ₃	3.56	4.18	0.36	0.03
CaO	66.96	6.58	2.16	24.41
MgO	1.36	0.18	0.59	-
Na ₂ O	-	-	-	-

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานและกากตะกอน (ต่อ)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในวัสดุยึดประสานและกากตะกอน			
	OPC	BA	RHA	S
K ₂ O	0.34	4.94	2.33	-
SO ₃	2.46	0.62	0.11	-
NiO	-	-	-	38.85
CuO	-	-	-	14.08
ZnO	-	-	-	9.29
CrO	-	-	-	0.43
Other	-	3.14	2.39	-
LOI	0.98	8.64	7.13	0.5

4.3 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง

4.3.1 ความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความชื้นเหลือปกติจากการทดสอบ โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความชื้นเหลือปกติของ OPC100, OPC10BA, OPC20BA, OPC30BA, OPC10RHA, OPC20RHA และ OPC30RHA มีค่าเท่ากับ 26.7, 33.6, 35.9, 39.6, 33.8, 37.2 และ 40.95 ตามลำดับ จะพบว่าค่าความชื้นเหลือปกติมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเถ้าชานอ้อยกับเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนผสม เนื่องจากเถ้าชานอ้อยกับเถ้าแกลบทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 4.3 ความชื้นเหลือของซีเมนต์เพสต์

ตัวอย่าง	ความชื้นเหลือปกติ (ร้อยละ)
OPC100	26.70
OPC10BA	33.60
OPC20BA	35.90
OPC30BA	39.60
OPC10RHA	33.80
OPC20 RHA	37.29
OPC30 RHA	40.95

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความชื้นเหลือปกติจากการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบค่าความ

ชั้นเหลวปกติของอัตราส่วนที่มีกากตะกอนของเสียโลหะหนักผสมอยู่ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในอัตราส่วนผสม ค่าความชื้นเหลวปกติจะมีค่ามากขึ้น โดยกากตะกอนทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 4.4 ความชื้นเหลวของก้อนหล่อแข็ง

ตัวอย่าง	ความชื้นเหลวปกติ (ร้อยละ)
OPC10S	27.50
OPC30S	31.20
OPC50S	36.80
OPC10BA10S	35.10
OPC10BA30S	39.40
OPC10BA50S	46.55
OPC20BA10S	37.42
OPC20BA30S	41.80
OPC20BA50S	49.35
OPC30BA10S	41.18
OPC30BA30S	45.60
OPC30BA50S	53.26
OPC10RHA10S	35.36
OPC10RHA30S	39.60
OPC10RHA50S	46.76
OPC20RHA10S	38.84
OPC20RHA30S	42.97
OPC20RHA50S	50.45
OPC30RHA10S	42.60
OPC30RHA30S	46.89
OPC30RHA50S	54.65

4.3.2 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

จากการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย พบว่าซีเมนต์เพสต์ OPC100 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย เท่ากับ 98.34 นาที และ 143.34 นาที ตามลำดับ ส่วนซีเมนต์เพสต์ OPC10BA OPC20BA OPC30BA OPC10RHA OPC20RHA และ OPC30RHA ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น้อยลง เป็นผลทำให้ปริมาณไตรแคลเซียมซัลเฟตลดลง จึงเป็นสาเหตุให้เวลาการก่อตัวของเพสต์ที่ผสมเถ้าขานน้อยและได้แก่กลบนานกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

ตัวอย่าง	เวลา (นาที)	
	ระยะก่อตัวเริ่มต้น	ระยะก่อตัวสุดท้าย
OPC100	98.34	143.34
OPC10BA	100.53	145.49
OPC20BA	102.36	146.42
OPC30BA	105.55	148.13
OPC10RHA	101.46	144.60
OPC20 RHA	104.39	146.18
OPC30 RHA	106.14	149.47

4.3.3 ระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง

จากตารางที่ 4.6 พบว่า ก้อนหล่อแข็งที่มีอัตราส่วนผสมของกากตะกอนเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใส่กากตะกอนมากขึ้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น้อยลง ไตรแคลเซียมซัลเฟตและไดแคลเซียมซัลเฟตซึ่งเป็นองค์ประกอบในปูนซีเมนต์ที่สามารถทำปฏิกิริยาเมื่อรวมกับน้ำแล้วก่อให้เกิดแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตทำให้เกิดการแข็งตัวนั้นมีปริมาณลดลง

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง

ตัวอย่าง	เวลา (นาที)	
	ระยะก่อตัวเริ่มต้น	ระยะก่อตัวสุดท้าย
OPC10S	103.31	145.85
OPC30S	109.57	147.52
OPC50S	118.34	149.86
OPC10BA10S	104.53	146.95
OPC10BA30S	110.44	148.97
OPC10BA50S	119.58	151.21
OPC20BA10S	106.26	148.58
OPC20BA30S	112.50	150.12
OPC20BA50S	121.25	152.82
OPC30BA10S	110.48	151.63
OPC30BA30S	116.69	153.67
OPC30BA50S	125.37	155.47
OPC10RHA10S	106.15	149.35
OPC10RHA30S	113.09	148.48
OPC10RHA50S	121.54	150.50
OPC20RHA10S	107.56	149.76
OPC20RHA30S	115.23	151.49
OPC20RHA50S	122.30	153.24
OPC30RHA10S	111.65	152.25
OPC30RHA30S	118.31	154.84
OPC30RHA50S	129.49	156.46

4.4 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง

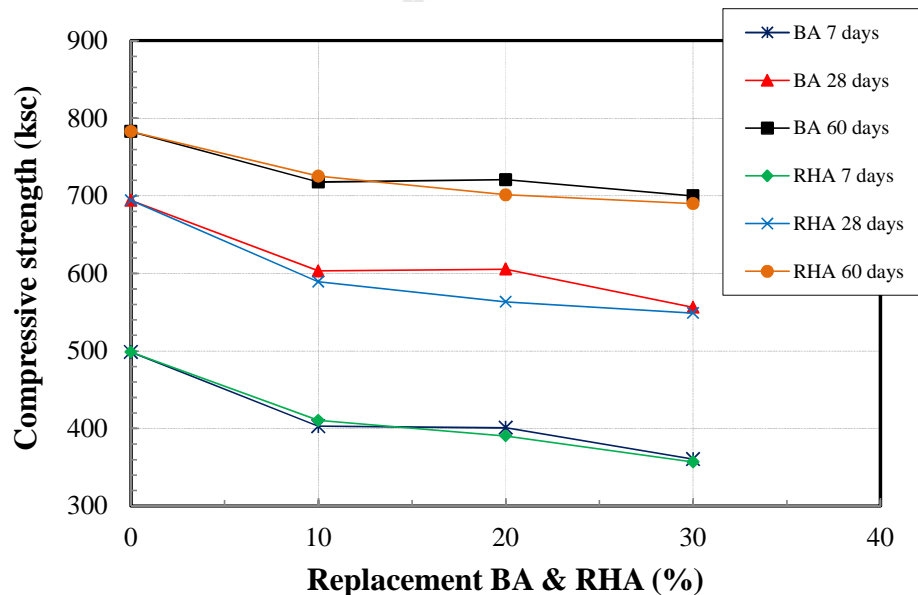
4.4.1 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 4.7 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบ ค่ากำลังอัดที่ได้นั้นมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง และในช่วงแรกการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบยังไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ก้อนหล่อแข็งจะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยกำลังรับแรงอัดที่อายุ 60 วัน ของ OPC10BA, OPC20BA, OPC30BA, OPC10RHA, OPC20 RHA และ OPC30 RHA มีค่าเท่ากับ 717.89, 720.98, 700.09, 725.40, 701.26 และ 689.87 ksc ตามลำดับ และกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุ 60 วันคือ OPC100 เท่ากับ 783.09 ksc การแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 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

ตารางที่ 4.7 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด, กก./ซม. ² (ร้อยละเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม)		
	7 วัน	28 วัน	60 วัน
OPC100	498.61 (100.00)	694.10 (100.00)	783.09 (100.00)
OPC10BA	402.80 (80.78)	603.41 (86.93)	717.89 (91.67)
OPC20BA	400.90 (80.40)	605.68 (87.26)	720.98 (92.07)
OPC30BA	360.49 (72.30)	556.27 (80.14)	700.09 (89.40)
OPC10RHA	410.65 (82.36)	589.17 (84.88)	725.40 (92.63)
OPC20 RHA	390.48 (73.31)	563.25 (81.15)	701.26 (89.55)
OPC30 RHA	356.96 (71.59)	549.01 (79.10)	689.87 (88.10)

จากรูปที่ 4.4 กราฟการพัฒนากำลังอัดเปรียบเทียบระหว่างการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อยและเถ้าแกลบร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ พบว่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานสูงกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยและเถ้าแกลบทุกอายุการบ่ม ก้อนหล่อที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยพบว่าการแทนที่ร้อยละ 20 ให้กำลังอัดสูงกว่าการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 และก้อนหล่อที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบพบว่าการแทนที่ร้อยละ 10 ให้กำลังอัดสูงกว่าการแทนที่ร้อยละ 20 และ 30 อายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.4 การพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

4.4.2 กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง

ตารางที่ 4.8 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งทดสอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย เถ้าชานอ้อยและเถ้าแกลบร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุประสาน และผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าก้อนหล่อแข็งมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนของเสียในอัตราส่วนผสมมากขึ้น เช่น OPC10S, OPC30S และ OPC50S ที่อายุ 60 วันมีค่า 508.59, 100.25 และ 10.56 ksc เนื่องจากปริมาณกากตะกอนของเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของวัสดุยึดประสานในส่วนผสมลดลง ซึ่งจะ ทำให้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้น้อย จึงทำให้กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียบางอัตราส่วนมีกำลัง

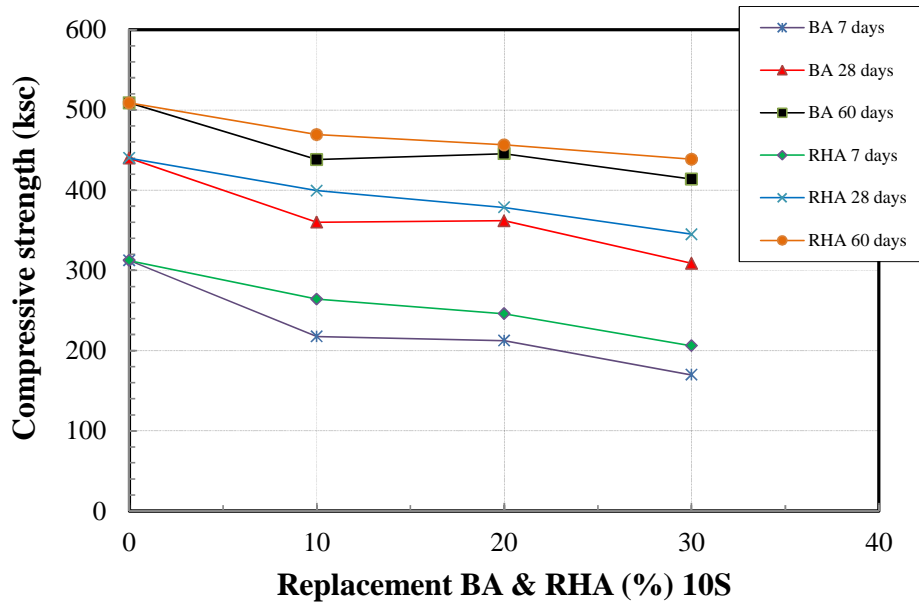
อัดค้ำ

ตารางที่ 4.8 กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)			ค่ามาตรฐาน (กก./ซม. ²)
	7 วัน	28 วัน	90 วัน	
OPC10S	312.42	439.87	508.59	10
OPC30S	71.98	90.13	100.25	10
OPC50S	7.83	9.92	10.56	10
OPC10BA10S	217.46	359.89	438.02	10
OPC10BA30S	50.39	72.62	86.64	10
OPC10BA50S	5.95	7.68	8.89	10
OPC20BA10S	212.36	361.88	445.28	10
OPC20BA30S	50.41	73.21	87.94	10
OPC20BA50S	5.69	7.72	8.93	10
OPC30BA10S	169.84	308.89	413.76	10
OPC30BA30S	36.94	62.25	78.59	10
OPC30BA50S	4.21	6.29	7.63	10
OPC10RHA10	264.24	399.27	469.15	10
OPC10RHA30	56.51	77.32	93.63	10
OPC10RHA50	6.05	8.02	9.56	10
OPC20RHA10	245.86	378.59	456.25	10
OPC20RHA30	51.38	71.86	87.89	10
OPC20RHA50	5.32	7.28	6.59	10
OPC30RHA10	205.96	345.00	438.51	10
OPC30RHA30	41.29	67.38	83.54	10
OPC30RHA50	4.51	6.59	7.85	10

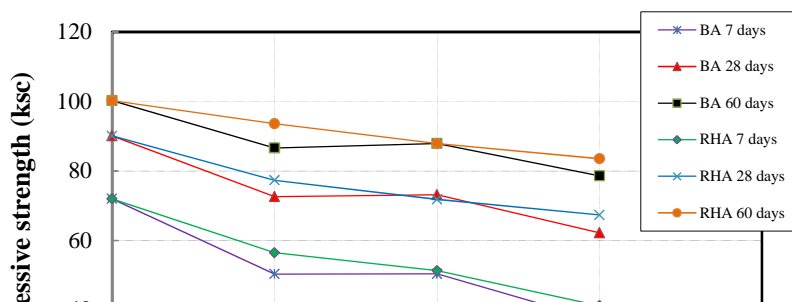
จากรูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อน

หล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวสูงกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยและเถ้าแกลบทุกอายุการบ่ม การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าเถ้าชานอ้อย และการเพิ่มปริมาณกากตะกอนจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง



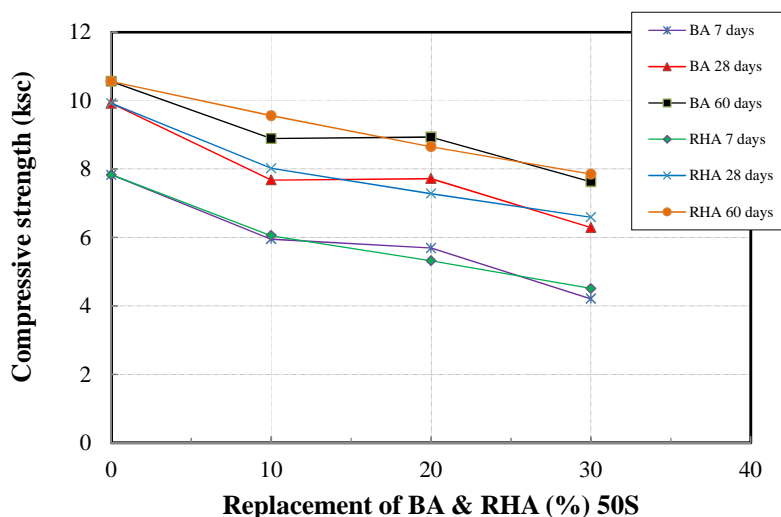
รูปที่ 4.5 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวสูงกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยและเถ้าแกลบทุกอายุการบ่ม การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าเถ้าชานอ้อย และการเพิ่มปริมาณกากตะกอนจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง



รูปที่ 4.6 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวสูงกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยและเถ้าแกลบทุกอายุการบ่ม การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าเถ้าชานอ้อย และการเพิ่มปริมาณกากตะกอนจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง



รูปที่ 4.7 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

จากรูปกราฟที่ 4.5 4.6 และ 4.7 แสดงปริมาณการเติมกากตะกอนโลหะหนักที่

อัตราส่วนร้อยละ 10 30 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งทดสอบจะลดลง และกำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อายุ 7 28 และ 60 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับพบว่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้น

4.5 การทดสอบการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง

4.5.1 การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP

นำก้อนหล่อแข็งที่ผ่านการทดสอบความสามารถรับกำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน มาทำการบดและร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 100 เพื่อนำมาทดสอบความสามารถในการชะละลายโลหะหนักโดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

จากการทดลองพบว่าการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งที่เติมกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 50 จะสูงกว่าการเติมกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 30 และ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน และการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งที่เติมกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 30 สูงกว่าการเติมกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานมีปริมาณการชะละลายของโลหะหนักต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียว และก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณการชะละลายของโลหะหนักลดลง ประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักนิเกิลจะสูงขึ้นตามอายุของก้อนหล่อแข็ง แต่ประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักจะต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในก้อนหล่อแข็งทดสอบ

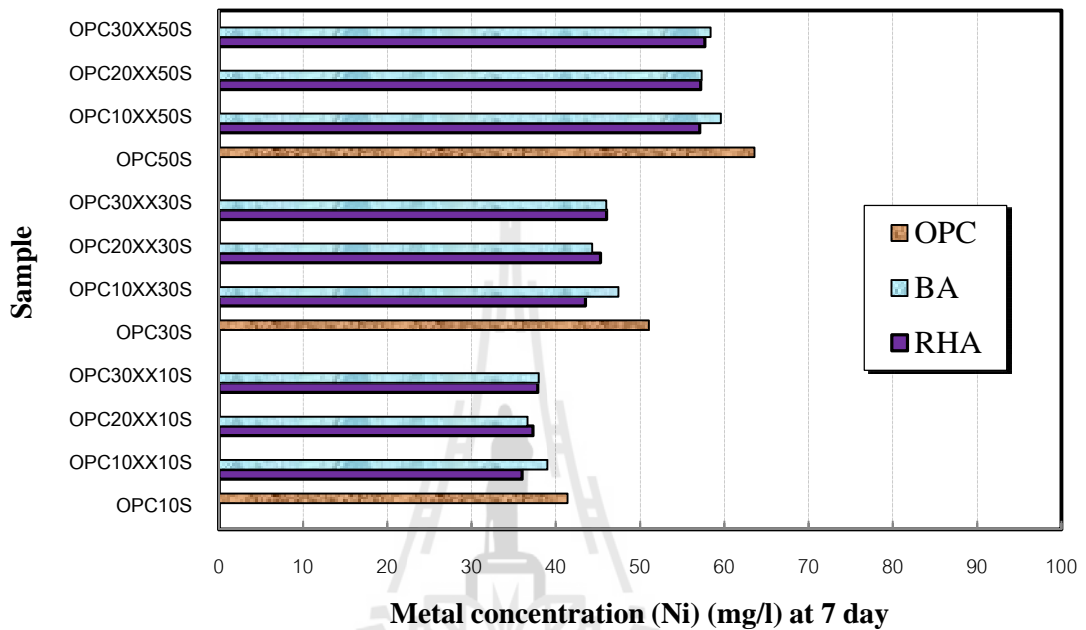
จากตารางที่ 4.9 พบว่า สารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่อายุการบ่ม 28 วัน ก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 10 30 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีค่าความเข้มข้นของนิเกิล 34.35 48.65 และ 62.46 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 74.32 67.05 และ 54.10 ตามลำดับ ในขณะที่สารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยร้อยละ 10 20 และ 30 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักอัตราส่วนเดียวกัน มีค่าความเข้มข้นของนิเกิลน้อยกว่าที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียว ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายนิเกิล ในสารชะละลายของก้อนหล่อแข็ง

ตัวอย่าง	pH	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย, ร้อยละ)		
		อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 90 วัน
Plating sludge (S)	7.83	114.29 (00.00)	114.29 (00.00)	114.29 (00.00)
OPC10S	12.15	41.38 (63.79)	34.35 (74.32)	22.70 (80.14)
OPC30S	11.94	51.03 (55.35)	48.65 (67.05)	31.56 (72.39)
OPC50S	11.76	63.60 (44.35)	62.46 (54.10)	47.36 (58.56)
OPC10BA10S	11.86	39.04 (65.84)	25.24 (77.92)	18.33 (83.96)
OPC10BA30S	11.71	47.44 (58.49)	33.98 (70.27)	27.64 (75.82)
OPC10BA50S	11.62	59.60 (47.85)	48.71 (57.38)	43.30 (62.11)
OPC20BA10S	11.98	36.66 (67.92)	23.86 (79.91)	17.13 (85.01)
OPC20BA30S	11.84	44.30 (61.24)	32.69 (73.15)	25.49 (77.70)
OPC20BA50S	11.69	57.33 (49.84)	45.93 (59.81)	41.32 (63.85)
OPC30BA10S	11.75	38.00 (66.75)	24.54 (78.53)	17.59 (84.61)
OPC30BA30S	11.64	45.99 (59.76)	33.12 (70.58)	27.26 (76.15)
OPC30BA50S	11.57	58.38 (48.92)	46.68 (59.16)	42.36 (62.94)
OPC10RHA10S	11.85	36.02 (68.48)	20.87 (81.74)	16.13 (85.89)
OPC10RHA30S	11.76	43.49 (61.95)	30.98 (72.89)	24.94 (78.18)
OPC10RHA50S	11.68	57.06 (50.07)	45.62 (60.08)	41.24 (63.92)
OPC20RHA10S	11.78	37.28 (67.38)	22.62 (80.21)	16.65 (85.43)
OPC20RHA30S	11.65	45.26 (60.40)	31.73 (72.24)	25.24 (77.92)
OPC20RHA50S	11.53	57.19 (49.96)	46.14 (59.63)	41.69 (63.52)
OPC30RHA10S	11.69	37.86 (66.87)	23.03 (79.85)	17.20 (84.95)
OPC30RHA30S	11.62	46.01 (59.74)	32.31 (71.73)	25.88 (77.36)
OPC30RHA50S	11.54	57.68 (49.53)	47.02 (58.86)	41.85 (63.38)

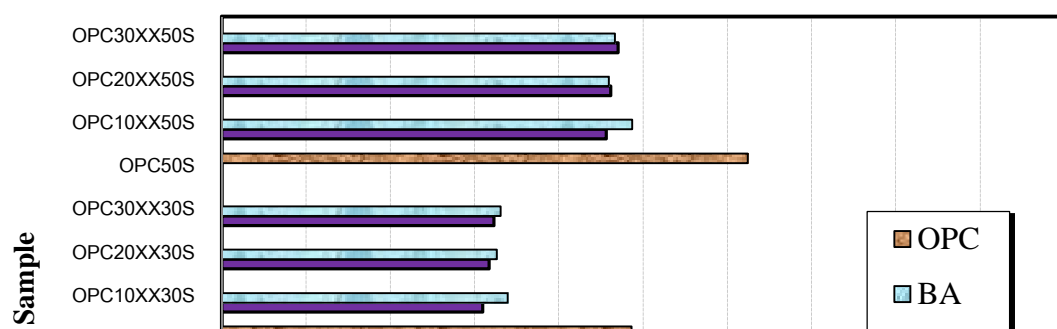
จากรูปที่ 4.8 พบว่าการชะละลายโลหะหนักที่เกิดขึ้นที่อายุการบ่ม 7 วัน ก่อนหล่อแข็ง ทดสอบที่ใช้เถาขานอ้อยและเถาแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์จะมีการชะละลายของ

โลหะหนักน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักที่เกิดของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วม สูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว



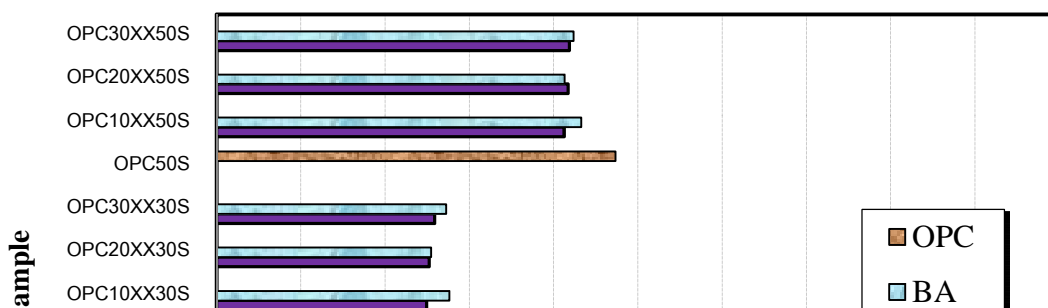
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงปริมาณการชะละลายนิเกิลที่อายุการบ่ม 7 วัน

จากรูปที่ 4.9 พบว่าการชะละลายโลหะหนักที่เกิดที่อายุการบ่ม 28 วัน ก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์จะมีการชะละลายของโลหะหนักน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักที่เกิดของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วม สูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และการเพิ่มปริมาณโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งทดสอบจะทำให้การชะละลายโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักเกิดลดลง



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงปริมาณการชะละลายนิเกิลที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 4.10 พบว่าการชะละลายโลหะหนักนิเกิลที่อายุการบ่ม 60 วัน ก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ยังคงมีการชะละลายของโลหะนิเกิลน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเช่นเดียวกับที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสาร โลหะหนักนิเกิลของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และการเพิ่มปริมาณโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งทดสอบจะทำให้การชะละลาย โลหะหนักนิเกิลเพิ่มขึ้น คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสาร โลหะหนักนิเกิลลดลง เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงปริมาณการชะละลายนิเกิลที่อายุการบ่ม 60 วัน

จากรูปกราฟที่ 4.8 4.9 และ 4.10 เมื่อเปรียบเทียบการชะละลายโลหะหนักนิเกิลที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นปริมาณการชะละลายของโลหะนิเกิลจะลดลง คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักนิเกิลเพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.10 พบว่าประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักทองแดงสูงขึ้นตามอายุของก้อนหล่อแข็ง แต่ประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักจะต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในก้อนหล่อแข็ง

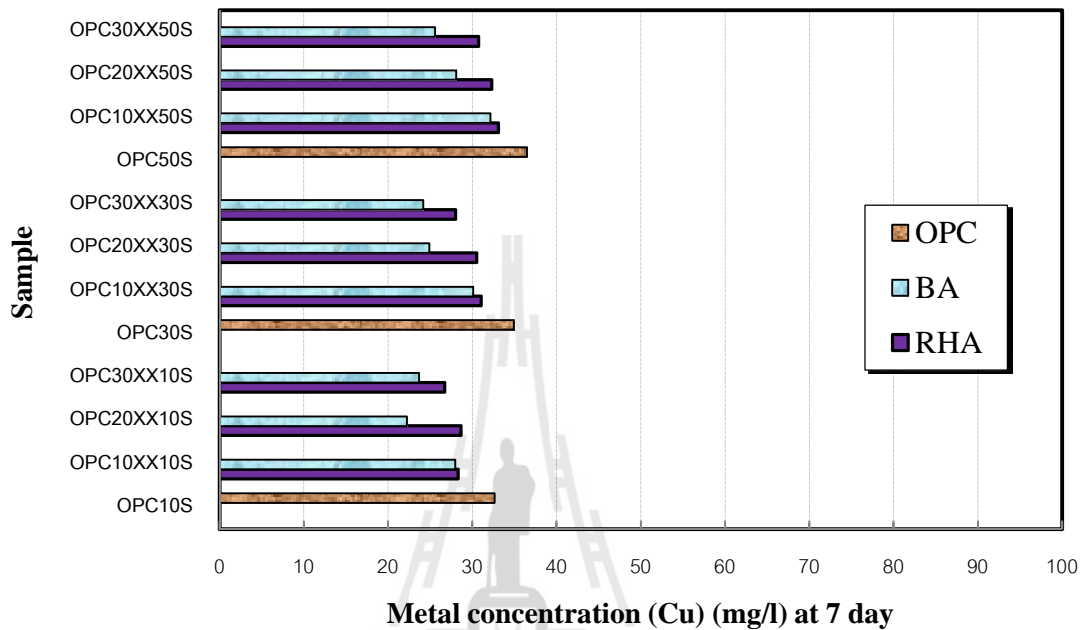
จากการทดลองพบว่าสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 10 30 และ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าความเข้มข้นของทองแดง 19.17 23.68 และ 25.83 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 73.83 70.04 และ 67.37 ตามลำดับ ในขณะที่สารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยร้อยละ 10 20 และ 30 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักอัตราส่วนเดียวกัน มีค่าความเข้มข้นของนิเกิลน้อยกว่าที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียว ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายทองแดง ในสารชะละลายของก้อนหล่อแข็ง

ตัวอย่าง	pH	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย, %)		
		อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 90 วัน
Plating sludge (S)	7.83	79.15 (00.00)	79.15 (00.00)	79.15 (00.00)
OPC10S	12.15	32.69 (58.70)	19.71 (73.83)	18.21 (76.99)
OPC30S	11.94	34.96 (55.83)	23.68 (70.04)	21.60 (72.71)
OPC50S	11.76	36.52 (53.86)	25.83 (67.37)	24.36 (69.22)
OPC10BA10S	11.86	27.98 (64.65)	14.41 (81.80)	10.75 (86.42)
OPC10BA30S	11.71	30.13 (61.93)	17.13 (78.36)	13.99 (82.33)
OPC10BA50S	11.62	32.17 (59.35)	19.98 (74.76)	17.35 (78.08)
OPC20BA10S	11.98	22.27 (71.86)	8.93 (89.98)	3.89 (95.08)
OPC20BA30S	11.84	24.92 (68.51)	11.29 (85.74)	7.80 (90.14)
OPC20BA50S	11.69	28.13 (64.46)	13.54 (80.79)	12.64 (84.03)
OPC30BA10S	11.75	23.71 (70.05)	9.02 (88.86)	4.15 (94.76)
OPC30BA30S	11.64	24.19 (69.44)	11.55 (86.17)	7.30 (90.78)
OPC30BA50S	11.57	25.61 (67.64)	14.98 (82.89)	10.42 (86.83)
OPC10RHA10S	11.85	28.33 (64.21)	14.79 (81.32)	11.49 (85.48)
OPC10RHA30S	11.76	31.07 (60.74)	18.04 (77.21)	14.97 (81.09)
OPC10RHA50S	11.68	33.10 (58.18)	21.22 (73.19)	18.65 (76.44)
OPC20RHA10S	11.78	28.68 (63.76)	14.47 (81.72)	11.00 (86.10)
OPC20RHA30S	11.65	30.53 (61.43)	17.33 (78.11)	14.38 (81.83)
OPC20RHA50S	11.53	32.32 (59.16)	19.81 (74.97)	17.30 (78.14)
OPC30RHA10S	11.69	26.74 (66.21)	13.09 (83.46)	9.09 (88.52)
OPC30RHA30S	11.62	28.03 (64.58)	15.08 (80.95)	13.58 (82.84)
OPC30RHA50S	11.54	30.75 (61.15)	18.43 (76.71)	15.94 (79.86)

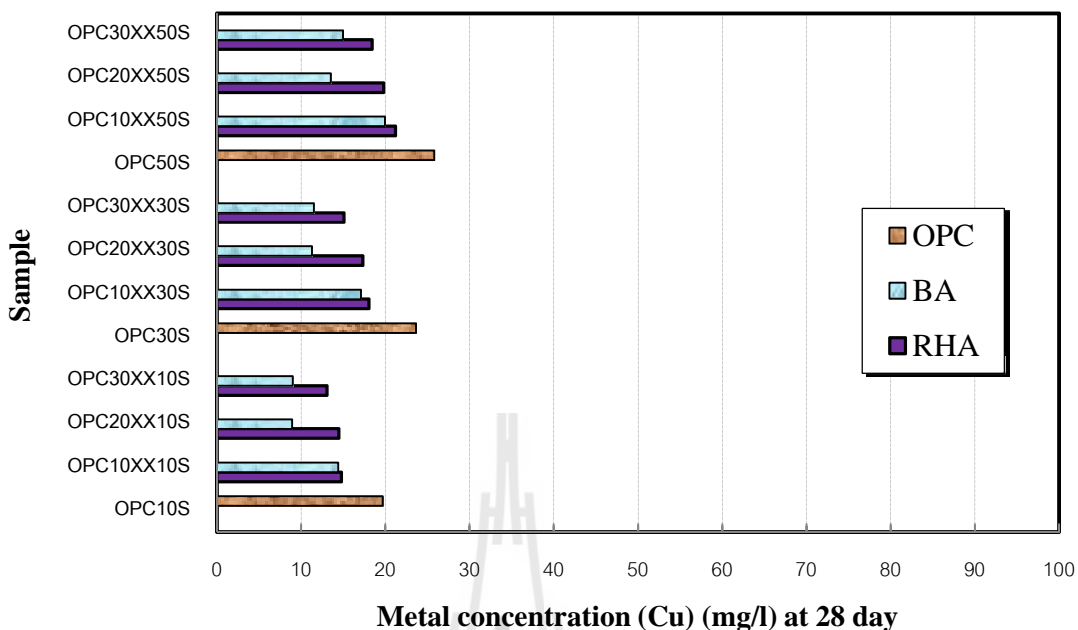
จากรูปที่ 4.11 พบว่าการชะละลายโลหะหนักทองแดงที่อายุการบ่ม 7 วัน ก่อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เก้าชานอ้อยและเก้ากลมเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์จะมีการชะ

ละลายของโลหะทองแดงน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักทองแดงของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว



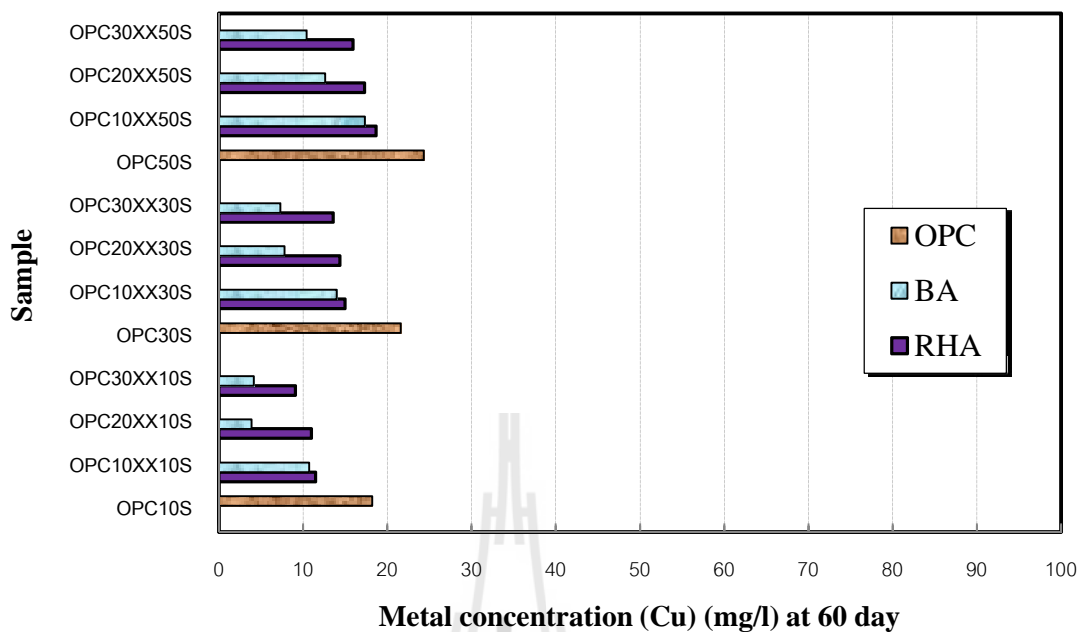
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงปริมาณการชะละลายทองแดงที่อายุการบ่ม 7 วัน

จากรูปที่ 4.12 พบว่าการชะละลายโลหะหนักทองแดงที่อายุการบ่ม 28 วัน ก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์จะมีการชะละลายของโลหะทองแดงน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักทองแดงของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และการเพิ่มปริมาณโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งทดสอบจะทำให้การชะละลายโลหะหนักทองแดงเพิ่มขึ้น คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักทองแดงลดลง



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงปริมาณการชะละลายทองแดงที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 4.13 พบว่าการชะละลายโลหะหนักทองแดงที่อายุการบ่ม 60 วัน ก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ยังคงมีการชะละลายของโลหะทองแดงน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเช่นเดียวกับที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักทองแดงของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และการเพิ่มปริมาณโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งทดสอบจะทำให้การชะละลายโลหะหนักทองแดงเพิ่มขึ้น คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักทองแดงลดลง เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงปริมาณการชะละลายทองแดงที่อายุการบ่ม 60 วัน

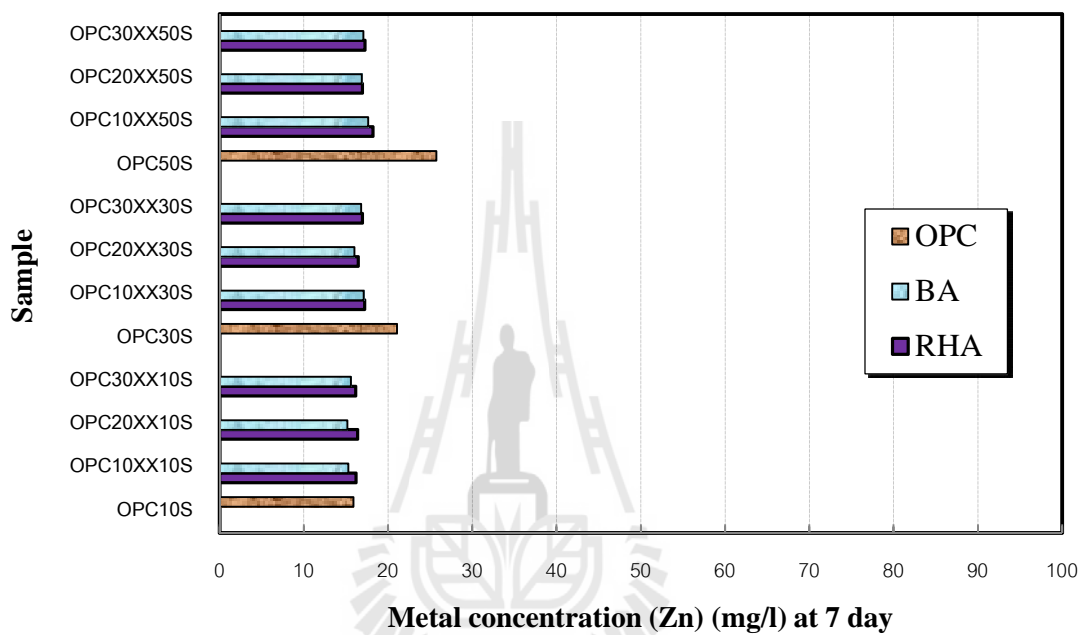
จากรูปกราฟที่ 4.11 4.12 และ 4.13 เมื่อเปรียบเทียบการชะละลายโลหะหนักทองแดงที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นปริมาณการชะละลายของโลหะทองแดงจะลดลง คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักทองแดงเพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.11 พบว่าสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 10 30 และ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าความเข้มข้นของสังกะสี 14.17 22.00 และ 24.83 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 75.04 61.24 และ 56.27 ตามลำดับ ในขณะที่สารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าขานอ้อยและเถ้าลอยร้อยละ 10 20 และ 30 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักอัตราส่วนเดียวกัน มีค่าความเข้มข้นของสังกะสีน้อยกว่าที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียว ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายสังกะสี ในสารชะละลายของ
ก้อนหล่อแข็ง

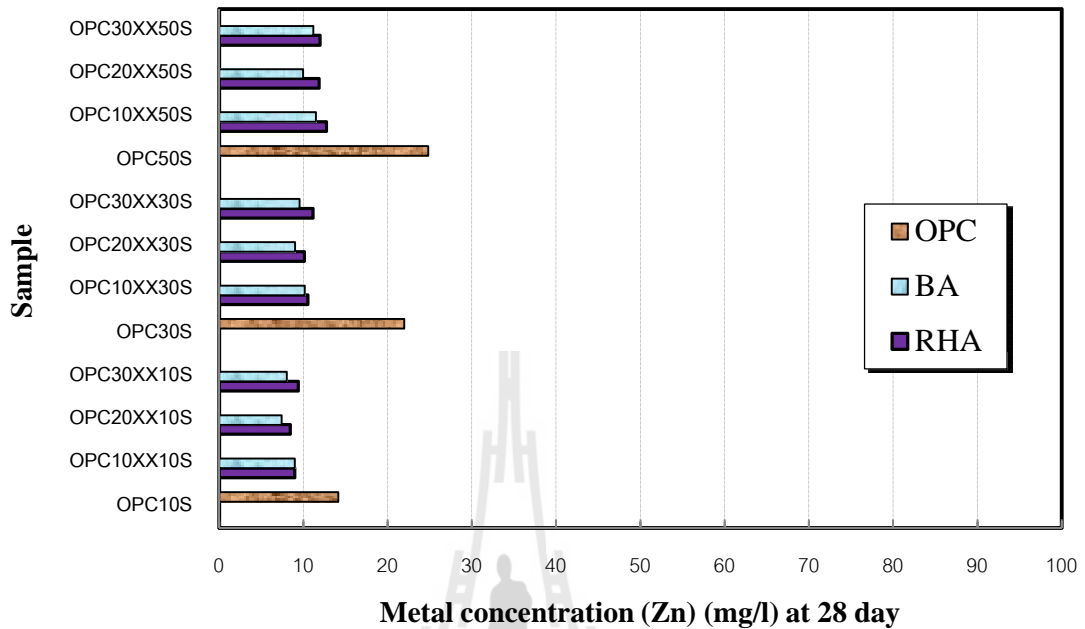
ตัวอย่าง	pH	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย, %)		
		อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 90 วัน
Plating sludge (S)	7.83	79.15 (00.00)	79.15 (00.00)	79.15 (00.00)
OPC10S	12.15	15.90 (71.98)	14.17 (75.04)	11.74 (79.32)
OPC30S	11.94	21.09 (62.85)	22.00 (61.24)	20.10 (64.60)
OPC50S	11.76	25.75 (54.64)	24.83 (56.27)	23.56 (58.50)
OPC10BA10S	11.86	15.31 (73.04)	9.00 (84.15)	7.32 (87.10)
OPC10BA30S	11.71	17.14 (69.81)	10.15 (82.12)	8.95 (84.24)
OPC10BA50S	11.62	17.64 (68.93)	11.50 (79.75)	9.83 (82.69)
OPC20BA10S	11.98	15.19 (73.25)	7.43 (86.92)	5.69 (89.98)
OPC20BA30S	11.84	16.03 (71.76)	9.01 (84.13)	7.34 (87.07)
OPC20BA50S	11.69	16.89 (70.24)	9.98 (82.42)	8.87 (84.38)
OPC30BA10S	11.75	15.60 (72.52)	8.05 (85.82)	6.59 (88.40)
OPC30BA30S	11.64	16.83 (70.35)	9.57 (83.15)	8.38 (85.23)
OPC30BA50S	11.57	17.07 (69.94)	11.20 (82.35)	9.07 (84.02)
OPC10RHA10S	11.85	16.18 (71.50)	8.95 (84.24)	7.48 (86.82)
OPC10RHA30S	11.76	17.21 (69.68)	10.52 (81.47)	9.44 (83.38)
OPC10RHA50S	11.68	18.21 (67.92)	12.75 (77.54)	11.04 (80.55)
OPC20RHA10S	11.78	16.38 (71.15)	8.44 (85.13)	6.56 (88.45)
OPC20RHA30S	11.65	16.47 (70.99)	10.12 (82.17)	7.65 (86.52)
OPC20RHA50S	11.53	16.97 (70.10)	11.85 (79.12)	10.16 (82.10)
OPC30RHA10S	11.69	16.17 (71.51)	9.40 (83.45)	7.25 (87.23)
OPC30RHA30S	11.62	16.95 (70.14)	11.14 (80.37)	8.64 (84.78)
OPC30RHA50S	11.54	17.24 (69.63)	11.97 (78.92)	9.13 (83.91)

จากรูปที่ 4.14 พบว่าการชะละลายโลหะหนักสังกะสีที่อายุการบ่ม 7 วัน ก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์จะมีการชะละลายของโลหะสังกะสีน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักสังกะสีของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว



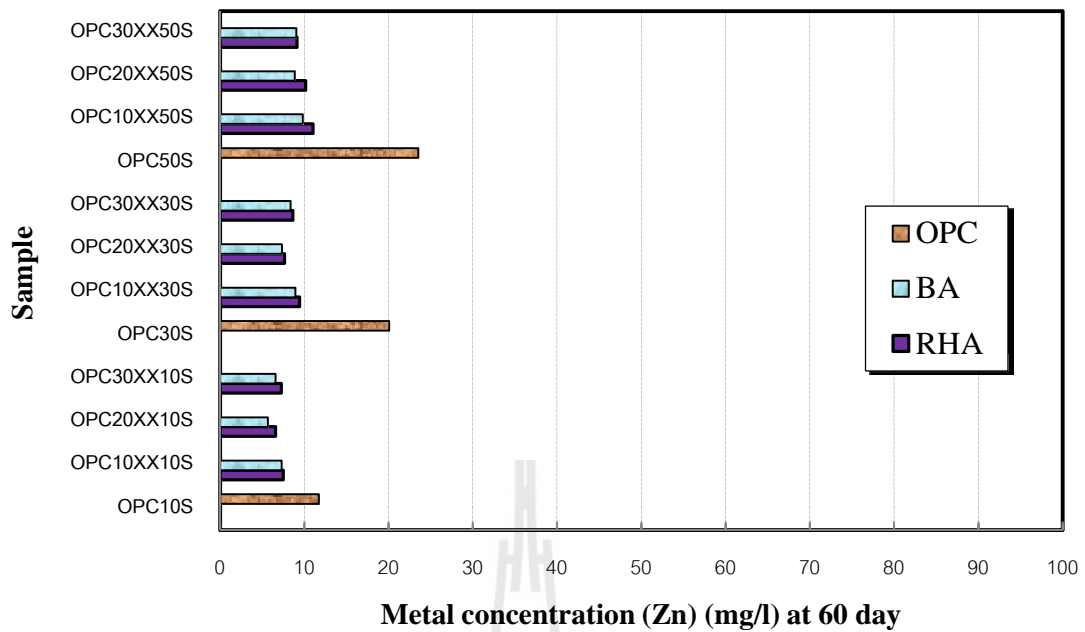
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงปริมาณการชะละลายสังกะสีที่อายุการบ่ม 7 วัน

จากรูปที่ 4.15 พบว่าการชะละลายโลหะหนักสังกะสีที่อายุการบ่ม 28 วัน ก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์จะมีการชะละลายของโลหะสังกะสีน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักสังกะสีของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และการเพิ่มปริมาณโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งทดสอบจะทำให้การชะละลายโลหะหนักสังกะสีเพิ่มขึ้น คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักสังกะสีลดลง



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงปริมาณการชะละลายสังกะสีที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 4.16 พบว่าการชะละลายโลหะหนักสังกะสีที่อายุการบ่ม 60 วัน ก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ยังคงมีการชะละลายของโลหะสังกะสีน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเช่นเดียวกับที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักสังกะสีของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และการเพิ่มปริมาณโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งทดสอบจะทำให้การชะละลายโลหะหนักสังกะสีเพิ่มขึ้น คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักสังกะสีลดลง เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงปริมาณการชะละลายสังกะสีที่อายุการบ่ม 60 วัน

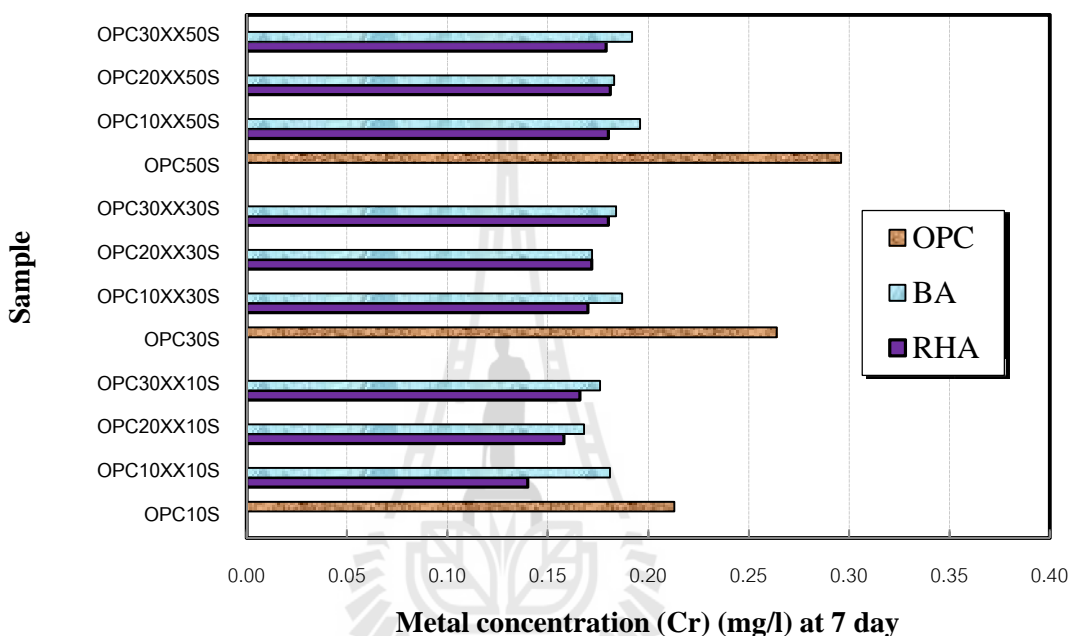
จากรูปกราฟที่ 4.14 4.15 และ 4.16 เมื่อเปรียบเทียบการชะละลายโลหะหนักสังกะสีที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นปริมาณการชะละลายของโลหะสังกะสีจะลดลง คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักสังกะสีเพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.12 พบว่าประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักโครเมียมสูงขึ้นตามอายุของก้อนหล่อแข็ง แต่ประสิทธิภาพการลดการชะละลายโลหะหนักโครเมียมจะต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในก้อนหล่อแข็ง ดังแสดงบนตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโครเมียม ในสารชะละลายของ
ก้อนหล่อแข็ง

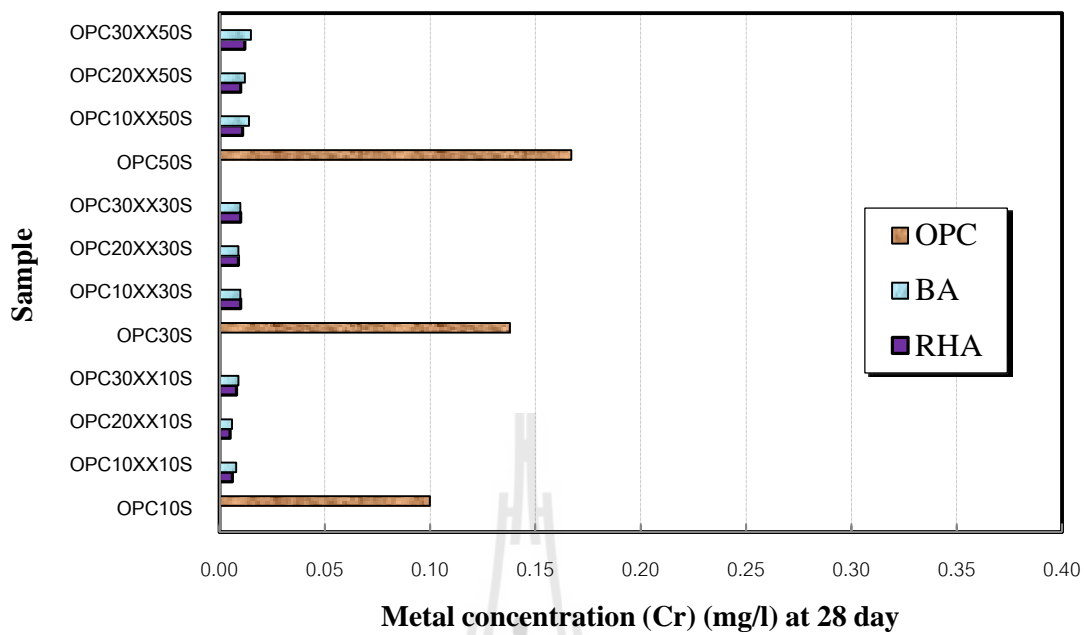
ตัวอย่าง	pH	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย, ร้อยละ)		
		อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 90 วัน
Plating sludge (S)	7.83	0.750 (00.00)	0.750 (00.00)	0.750 (00.00)
OPC10S	12.15	0.213 (79.60)	0.100 (95.67)	0.025 (96.73)
OPC30S	11.94	0.264 (72.80)	0.138 (90.60)	0.066 (91.25)
OPC50S	11.76	0.296 (68.53)	0.167 (86.733)	0.109 (85.46)
OPC10BA10S	11.86	0.181 (83.87)	0.008 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC10BA30S	11.71	0.187 (83.07)	0.010 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC10BA50S	11.62	0.196 (81.87)	0.014 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC20BA10S	11.98	0.168 (85.60)	0.006 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC20BA30S	11.84	0.172 (85.07)	0.009 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC20BA50S	11.69	0.183 (83.60)	0.012 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC30BA10S	11.75	0.176 (84.53)	0.009 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC30BA30S	11.64	0.184 (83.47)	0.010 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC30BA50S	11.57	0.192 (82.40)	0.015 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC10RHA10S	11.85	0.140 (85.33)	0.006 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC10RHA30S	11.76	0.170 (85.33)	0.010 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC10RHA50S	11.68	0.180 (84.00)	0.011 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC20RHA10S	11.78	0.158 (86.67)	0.005 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC20RHA30S	11.65	0.172 (85.33)	0.009 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC20RHA50S	11.53	0.181 (84.00)	0.010 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC30RHA10S	11.69	0.166 (86.67)	0.008 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC30RHA30S	11.62	0.180 (84.00)	0.010 (100.00)	0.000 (100.00)
OPC30RHA50S	11.54	0.179 (80.00)	0.012 (100.00)	0.000 (100.00)

จากรูปที่ 4.17 พบว่าการชะละลายโลหะหนักโครเมียมที่อายุการบ่ม 7 วัน ก่อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์จะมีการชะละลายของโลหะโครเมียมน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักโครเมียมของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว



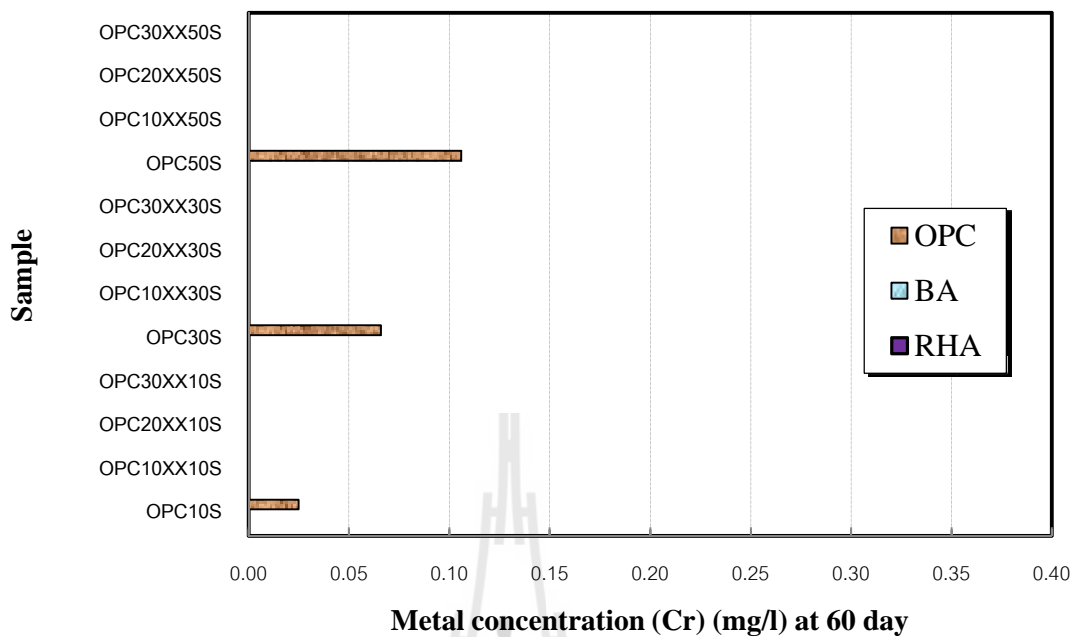
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงปริมาณการชะละลายสังกะสีที่อายุการบ่ม 7 วัน

จากรูปที่ 4.18 พบว่าการชะละลายโลหะหนักโครเมียมที่อายุการบ่ม 28 วัน ก่อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์จะมีการชะละลายของโลหะโครเมียมน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักโครเมียมของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และการเพิ่มปริมาณโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งทดสอบจะทำให้การชะละลายโลหะหนักโครเมียมเพิ่มขึ้น คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักโครเมียมลดลง



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงปริมาณการชะละลายสังกะสีที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 4.19 พบว่าการชะละลายโลหะหนัก โครเมียมที่อายุการบ่ม 60 วันของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ไม่มีการชะละลายของโลหะ โครเมียม ส่วนก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเช่นเดียวมามีปริมาณการชะละลายโลหะ โครเมียมน้อยมาก



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงปริมาณการชะละลายสังกะสีที่อายุการบ่ม 60 วัน

จากรูปกราฟที่ 4.17 4.18 และ 4.19 เมื่อเปรียบเทียบการชะละลายโลหะหนักโครเมียมที่อายุการบ่ม 7 28 และ 60 วัน พบว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นปริมาณการชะละลายของโลหะสังกะสีจะลดลง คือประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักสังกะสีเพิ่มขึ้น

เมื่อปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลานผสมกับน้ำจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนและมีค่าพีเอชสูง ทำให้โลหะหนักที่อยู่ในส่วนผสมอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์หรือเกลือคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำ อีออนของโลหะอาจเข้าไปเกาะอยู่ในโครงผลึกของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งมีผลต่อการรั่วซึม โดยไปลดการซึมผ่านของสารละลายเข้าไปในเนื้อก้อนหล่อแข็ง

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

5.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนัก จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสาน ศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ใช้เถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสานในอัตราส่วนที่กำหนด และเปรียบเทียบคุณสมบัติ

5.2 สรุปผลการทดสอบในงานวิจัย

จากผลการศึกษาการชะละลายก้อนหล่อแข็งกาบตะกอน โลหะหนักที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุยึดประสาน ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยเถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ผสมกาบตะกอนโลหะหนักจากโรงงานชุบนิเกิลในอัตราส่วนร้อยละ 10 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานและกาบตะกอนโลหะหนัก

จากการทดลองพบว่า องค์ประกอบทางเคมีหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ แคลเซียมออกไซด์ และซิลิกาไดออกไซด์ ส่วนองค์ประกอบทางเคมีหลักของเถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบ คือ ซิลิกาไดออกไซด์ ส่วนโลหะหนักที่พบในกาบตะกอนจากโรงงานชุบนิเกิล คือ ออกไซด์ของโลหะหนัก นิกเกิล ทองแดง สังกะสี และโครเมียม

5.2.2 ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง

จากการทดลอง พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการหล่อก้อนหล่อแข็งมีค่าไม่เท่ากันโดยเพิ่มขึ้นมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมเนื่องมาจากอนุภาคของวัสดุยึดประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นวัสดุปอชโซลานที่มีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวสูง และภาคในอนุภาคมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้ดูดซึมน้ำได้ดี ในขณะที่การเพิ่มอัตราส่วนของกาบตะกอนทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพราะการใส่กาบตะกอนมากขึ้นทำให้ปริมาณ

วัสดุอัดประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบ) น้อยลงและโลหะหนักในกากตะกอนยังยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วย

5.2.3 การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด

การทดสอบกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียในอัตราร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 60 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มตัวในแต่ละอัตราส่วนผสม และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสมที่อายุการบ่มเท่ากัน เนื่องจากปริมาณกากตะกอนของเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของวัสดุอัดประสานในส่วนผสมลดลง ซึ่งจะทำให้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้น้อย จึงทำให้กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักบางอัตราส่วนมีกำลังอัดลดลง ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานของUS.EPA จะต้องมากกว่า 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อสามารถนำก้อนหล่อแข็งของเสียไปฝังกลบอย่างปลอดภัย

5.2.4 การทดสอบการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง

การทดสอบด้วยวิธี TCLP พบว่าสารละลายที่สกัดได้มีค่าความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ไม่สูงนักเมื่อเปรียบเทียบกับปรมาณตั้งต้น คือประสิทธิภาพในการลดการชะละลายอยู่ในระดับสูง ส่วนโครเมียม ค่าความเข้มข้นของการชะละลายต่ำกว่า 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นไปตามตามมาตรฐานที่ US.EPA กำหนดไว้ เนื่องจากค่าพีเอชของสารละลายที่สกัดได้มีค่าสูงขึ้นจนอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการตรึงโลหะไฮดรอกไซด์ และทำให้ไฮดรอกไซด์มีความเสถียรมากขึ้นและมีความสามารถในการละลายลดลง หรือกล่าวได้ว่า ความสามารถในการกักเก็บสารโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งสูง จึงทำให้ความเข้มข้นของโลหะไฮดรอกไซด์ในสารละลายที่สกัดได้มีค่าต่ำ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะในการใช้งาน

1) ในการนำไปใช้งานในการบำบัดกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมควรมีการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณกากตะกอน องค์ประกอบต่าง ๆ เสียก่อนเพื่อนำมาพิจารณาในการเลือกเทคนิคในการหล่อแข็งและเลือกใช้วัสดุอัดประสานที่เหมาะสมต่อไป

5.3.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

1) ควรศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักจากแหล่งอื่นเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการหล่อแข็งด้วยวิธีนี้ เพราะภาคตะกอนโลหะหนักแต่ละแหล่งมีปริมาณและประเภทของโลหะหนักที่แตกต่างกัน

2) ควรศึกษาแนวทางการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุปอชโซลานชนิดอื่นๆ เพื่อให้ได้วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการหล่อแข็ง



รายการอ้างอิง

- กฤษณา ผากานนท์ (2537). การกำจัดกากตะกอนนิกเกิลจากกระบวนการชุบโลหะโดยวิธี **Solidification**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จักรพันธ์ วงษ์พา (2546). การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อเป็นวัสดุพอลิโซลาน. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิตติณี เจริญจิตต์(2546). การหล่อแข็งกากตะกอนชุบโลหะโดยการกระตุ้นวัสดุยึดประสานประเภท **ปูนขาว และซีเมนต์** ด้วยสารเคมี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิตรพล พฤกษ์ภัทรกุล (2547). การจัดการกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิราภรณ์ นิจันท์พันธุ์ (2543). การศึกษาการดูดซับซัลไฟด์ในน้ำทิ้งโดยใช้ซีโอไลต์. โครงการงาน วิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2542). **ซิลิกาฟุ้ง**. โยธาสาร ฉบับเดือน ตุลาคม.
- ชาตินัย โคนาวิทย์ (2544). การหล่อแข็งกากตะกอนโรงชุบโลหะโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ **ผสมซิลิกาฟุ้งควบแน่นและตะกรันเตาหลอมเหล็ก**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชูวิทย์ นาเพีย (2554). การศึกษาการชะละลายก่อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ปูนซีเมนต์ **และวัสดุพอลิโซลานเป็นวัสดุยึดประสาน**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ธชพล ณ นคร (2548). สมบัติของก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ **และเถ้าแกลบดำเป็นวัสดุยึดประสาน**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธีรวัฒน์ สีนศิริ, ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2547). ผลกระทบของความ **ละเอียดเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัด ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงในซีเมนต์เพสต์**. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.

- ธีรวัฒน์ สตินศิริ, ชูวิทย์ นาเพีย และ ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2550). ผลกระทบของซีโพลิตต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12 จังหวัดพิษณุโลก วันที่ 2-4 พฤษภาคม.
- ธีรวัฒน์ สตินศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ (2548). ผลกระทบของเถ้านหินต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของเพสต์. สัมมนาวิชาการเรื่อง การนำเถ้านหินในประเทศไทยมาใช้ในการคอนกรีต ครั้งที่ 2 : 64-82.
- ประทีป เลียงเพ็ชร (2539). การหล่อแข็งกากตะกอนตะกั่วโดยใช้ปูนซีเมนต์ ขี้เถ้าแกลบและขี้เถ้าลอย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร(2528). ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้านหินแม่เมาะ. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2549). Cement Pozzolan and Concrete. บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.
- พจนีย์ ขุมมมงคล และ สิรินทรเทพ เต้าประยูร (2539). รายงานฉบับสมบูรณ์เรื่อง การบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีการหล่อแข็ง ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พวงรัตน์ ขจิตวิชานุกุล และเอกชัย ทวีกิจวานิช (2548). ผลของโลหะหนักที่มีต่อเฟสของเม็ดปูนในซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับของเสียอันตราย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10 จังหวัดชลบุรี วันที่ 2-4 พฤษภาคม. : ENV-74-79.
- พิเชษฐ์ อธิภาคย์ (2542). การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานถลุงแร่สังกะสีโดยใช้ปูนซีเมนต์และฝุ่นทรายดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พิณชุกรณ์ ชอบเที่ยงธรรม (2546). การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบโครเมียมด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์และฝุ่นทรายดำ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มัลลิกา ปัญญาคะโป (2542). เอกสารประกอบวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม เรื่องของเสียอันตราย. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ฤทัยรัตน์ แพรอด (2548). ลักษณะทางกายภาพและชนิดของโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- วราภรณ์ คุณาวนากิจ (2536). คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยลิกไนต์. เอกสารประกอบการสัมมนา เรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์. สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. : 2-1 ถึง 2-15.
- วิทวัส ทิพย์พิริยพงศ์ (2551). ผลกระทบของเถ้าขานอ้อยที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา ต่างกันต่อกำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศรินภา ม้าเมือง (2548). การตรึงกากตะกอนโลหะหนักโดยการกระตุ้นเถ้าเคลือบด้วยสารเคมีและความร้อน : ความสามารถในการชะโลหะหนัก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุรชาติย์ อินทรวงศ์ (2545). การเปรียบเทียบวิธีทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุยึดประสาน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- โสภภาพรณ จิรนิติชัย (2534). ปริมาณตะกั่ว ทองแดง แคดเมียมและสังกะสีในน้ำและดินตะกอนจากชั้นคุณภาพลุ่มน้ำต่าง ๆ ของลุ่มน้ำแม่กลอง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- American Society for Testing and Materials. 1997. **ASTM Designation D 4843-88 Standard test method for wetting and drying test of solid wastes**, in "Annual book of ASTM standard, section 4, Vol.04.01, Philadelphia.
- American Society for Testing and Materials. 2001. **ASTM C618-00 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Concrete**, Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, Philadelphia. 310-313.
- Cook, D.J., **Rice Husk Ash, Cement replacement materials**, pp.170-195.
- Davis, L.M. and David, A.C. 1991. **Introduction to environmental engineering**, Singapore, McGraw-Hill. Pp 650-653, 700-701.
- Jong, H.Y. 1990. **Solidification of laboratory waste by using ordinary Portland cement and rice husk ash cement**, Thesis, Master of engineering, Environmental program, Asian institute of technology, pp.78.
- Jong, H.Y., 1990, **Solidification of laboratory waste by using ordinary portland cement and**

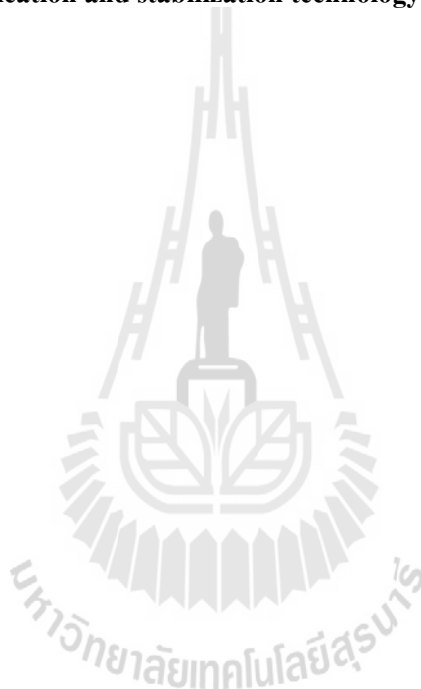
rice husk ash cement, Master of Engineering Thesis, Environmental Program, AIT, Bangkok, 78 Pages.

Mindess, S. and Young, J. F. 1981. Concrete, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.

Peratt, G.L., Ballesteros, F.C. and Cepeda, M.L. 1992. "**Treatment and disposal of heavy metal waste using cementitious solidification**," PACIFIC BASIN, Conf. On Hazardous waste, 16 p.

Pojasek, R.B. 1980. **Chemical engineering**, New York, McGraw-Hill, pp.307-311.

Wiles, C.C. 1990. **Solidification and stabilization technology**, U.S.EPA, USA.



ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน



การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักตามมาตรฐาน ASTM D 5198-92 ซึ่งเป็นวิธี Nitric Acid Digestion of Solid Waster ส่วนกากตะกอนที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือกากตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการชุบโลหะ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักของกากตะกอนที่บดละเอียดแล้ว 5 ± 0.01 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ (flask)
2. เติม กรดไนตริกเข้มข้น 25 มิลลิลิตรลงในขวด flask คนให้เข้ากัน
3. ทำแบลงค์ (blank) ด้วย กรดไนตริกเข้มข้น 25 มิลลิลิตร โดยไม่มีกากตะกอนที่ต้องการวิเคราะห์
4. วางขวด flask ลงบน เครื่องทำความร้อน (hot plate) แล้วปิดด้วยกระจกนาฬิกา จากนั้นตั้งอุณหภูมิของ hot plate ให้อยู่ที่ $90-95$ °C แล้วให้ความร้อนแก่ ขวด flask เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เขย่าเป็นครั้งคราวเพื่อล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ด้านข้างขวด flask ลงไป
5. หลังจากนั้นนำขวด flask ออกจาก hot plate ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วจึงเติมน้ำปราศจากไอออน 50 มิลลิลิตร ลงในขวด flask และล้างส่วนที่ติดอยู่ด้านข้างขวด flask ลงไปด้วย แล้วจึงเขย่าเพื่อให้เข้ากัน
6. กรองสารที่ได้ในขวด flask โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 40 ลงในขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) โดยชะสารละลายที่เหลือในขวด flask ด้วยน้ำปราศจากไอออน และปรับปริมาตรสารละลายในขวด volumetric flask ให้เท่ากับ 200 มิลลิลิตร
7. นำสารละลายที่ได้ในขวด volumetric flask ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP

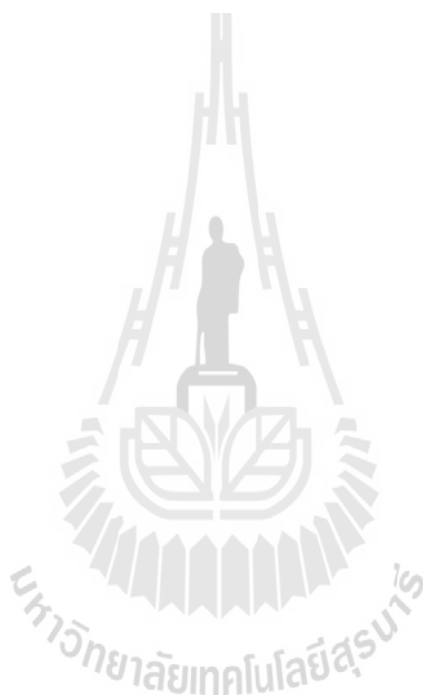
The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. At the top, it features a stylized tower or spire. Below this, a central figure stands on a pedestal. The base of the emblem is a circular border containing the university's name in Thai script: "มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี".

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

- วรวรรณชัย สายวาริน, ชูวิทย์ นาเพีย และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. (2553). การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกาทะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยและซิลิกาฟูมเป็นวัสดุยึดประสาน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6 (Annual Concrete Conference 6)
- วรวรรณชัย สายวาริน, ชูวิทย์ นาเพีย และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. (2557). การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์พสต์ผสมเถ้าขานอ้อย. วิศวกรรมสาร ม.ข. (accepted)



การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
เถ้าลอยและซิลิกาฟูมเป็นวัสดุยึดประสาน

LEACHING OF HEAVY METALS FROM THE SOLIDIFIED WASTES USING
ORDINARY PORTLAND CEMENT FLY ASH AND SILICA FUME AS BINDER

วรารจชัย สายวาริน(Worawanchai Saiwarin)¹

ชววิทย์ นาเพีย (Chuwit Napia)²

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (Theerawat Sinsiri)³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²นักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโรงชุบ โดยใช้เถ้าลอย และซิลิกาฟูมผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุยึดประสาน ในอัตราส่วนการแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และผสมกากตะกอนในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.40 ทำการศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็ง โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด, การรั่วไหลของโลหะหนักโดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), คุณสมบัติทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF), ถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และทดสอบหาความพรุนโดยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) ผลการทดสอบพบว่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีกากตะกอนโลหะหนักในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีกากตะกอนโลหะหนักผสมอยู่ และพบว่าก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซิลิกาฟูมมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ส่วนการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในสารชะมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่ US.EPA กำหนด ในขณะที่ผลของภาพขยายพื้นผิวของก้อนหล่อแข็งด้วย SEM และความพรุนของก้อนหล่อแข็งด้วย MIP พบว่าก้อนหล่อแข็งมีความหนาแน่น และปริมาตรโพรงทั้งหมดของก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของกากตะกอนเพิ่มขึ้น

ABSTRACT : This research investigated the properties of solidified wastes using fly ash, silica fume and ordinary Portland cement as binder. Silica fume and fly ash were used to partially replace the ordinary Portland cement at the rate of 10 % and 30% by weight respectively. The plating sludge was used at the rate of 40, 50 and 60% by weight of binder. The water to binder (w/b) ratio of 0.40 was used for all mixtures. Compressive strength of solidified wastes was investigated. Moreover, leachability of heavy metals was determined by TCLP; XRF were used for testing the chemical

properties. Fractured surface was studied by SEM, and the pore size distribution was studied by MIP. Test results indicated that the compressive strength of blended cement composites increased with increasing curing duration but at a decreasing rate. Compressive strength of blended cement from which Portland cement was replaced by 10 wt.% of silica fume gave higher strength than that replaced by fly ash. Compressive strength of all solidified wastes made with 40, 50 and 60 wt.% of plating sludge were dramatically decreased as compared to that without the waste. Quality of solidified waste made with blended cement was better than that made with ordinary Portland cement. It was also observed that concentrations of heavy metals in the leachates after contacting with all cement-based solid wastes did not exceed the limit specified by US.EPA. SEM and MIP results revealed that the pore size of solidified wastes increased with increasing plating sludge.

KEYWORDS : Leaching, Heavy Metal, Solidified wastes, Fly ash, Silica fume

1. บทนำ

ของเสียอันตรายที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม แม้ว่าจะผ่านกระบวนการบำบัดเพื่อลดความเข้มข้นของสารพิษแล้ว แต่จะยังคงเหลือกากตะกอนที่ต้องนำไปบำบัดต่อไป และเนื่องจากโลหะหนักบางชนิดมีสภาพไม่คงตัว ทำให้มีโอกาสแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดปัญหาได้ เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้จำเป็นต้องมีกระบวนการลดความเป็นพิษ หรือ กักเก็บกากสารพิษอันตรายไม่ให้แพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย การหล่อแข็ง (Solidification) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ตัวยึดประสานชนิดต่างๆ ครึ่งของเสียอันตราย ซึ่งสารอันตรายจะถูกเก็บไว้ในโครงสร้างของตัวยึดประสานด้วยพันธะเคมีและทำให้สารอันตรายอยู่ในสภาพคงตัว ลดโอกาสการแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม ตัวยึดประสานที่ใช้มากที่สุดได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย ซิลิกาฟุ้ง ตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ซึ่งการหล่อแข็งทำให้สามารถจัดเก็บกักก่อนหล่อแข็งได้ง่ายและสะดวกต่อการนำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบอย่างปลอดภัย [1]

เถ้าลอย เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้น จึงนิยมนำเถ้าลอยมาใช้ในงานคอนกรีตเพราะเถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุ ซิลิกา, อลูมิเนียม และเหล็ก ซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม และเนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็ก และส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปแทรกในช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหิน หรือทราย ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นและลักษณะทรงกลมของเถ้าลอยจะช่วยให้คอนกรีตมีการลื่นไหลได้ดีขึ้น [2]

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต Silicon Metal และ Ferrosilicon Alloy เป็นกระบวนการรีดักชันเปลี่ยน ควอร์ต (SiO_2) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอน (Si) ด้วยวิธีการหลอมไฟฟ้า (Electric Arc) ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000°C ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO_2 ซึ่งต่อมาจะถูกออกซิไดซ์ (Oxidize) และกลั่นตัว (Condense) ที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็ก

หลายๆของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ลงไป โดยทั่วไปซิลิกาฟูมจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง 25 ม²/ก (โดยวิธี Nitrogen Absorption) มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่า เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟูมที่เล็กมากๆจึงมีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ทำให้ซิลิกาฟูมเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็ว ปัญหาของซิลิกาฟูมที่พบบ่อยเมื่อใช้ในคอนกรีต คือต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิม สาเหตุเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆของซิลิกาฟูมจึงมีการใช้น้ำที่ค่อนข้างสูงในการเคลือบผิวหน้า [3] (ซิลิกาฟูมที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีขนาดอนุภาคใหญ่ดังแสดงในตารางที่ 1 เนื่องจากเป็นแบบ Condensed Silica Fume)

2. วัตถุประสงค์

ศึกษาความสามารถในการกักเก็บสารปนเปื้อนโลหะหนักและความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซิลิกาฟูมและเถ้าลอยตามอัตราส่วนที่กำหนด

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (มาตรฐาน ASTM C150)
2. ซิลิกาฟูม
3. เถ้าลอย
4. กากตะกอนของเสียจากโรงชุมชนกิล
5. น้ำประปา

3.2 การเตรียมวัสดุ

นำกากตะกอนของเสียจากโรงชุมชนกิลมาอบให้แห้ง จากนั้นทำการบดให้มีขนาดเล็ก ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (รูเปิด 9 ไมครอน)

3.3 อัตราส่วนผสม

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย ซิลิกาฟูม ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสาน (เนื่องจากอัตราส่วนนี้สามารถทำงานหรือผสมได้สะดวก) และผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วน ระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 หล่อตัวอย่างก้อนหล่อแข็ง รูปลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม ตามมาตรฐาน ASTM C 109 หลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบออก และทำการบ่ม โดยการนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบเมื่ออายุครบ 7, 28 และ 90 วัน

3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย

OPC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

SI หมายถึง ซิลิกาฟูม

10SI หมายถึง การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซิลิกาฟูมในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

FA หมายถึง เถ้าลอย

30FA หมายถึง การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยในอัตราร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

S หมายถึง กากตะกอนของเสีย

40S, 50S, 60S หมายถึง การผสมกากตะกอนของเสียใน อัตราร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

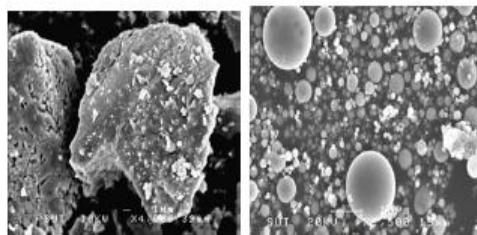
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ซิลิกาฟุ่ม, เถ้าลอย และกากตะกอนของเสีย ซึ่งพบว่าซิลิกาฟุ่ม, เถ้าลอย และกากตะกอนของเสีย มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และจากการนำตัวอย่างไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และกากตะกอนของเสีย มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และมีเนื้อแน่น ดังแสดงในภาพที่ 1 ก. และ ง. ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาภาพที่ 1 ข. และ ค. คือเถ้าลอย และ ซิลิกาฟุ่ม ตามลำดับ พบว่า มีรูปร่างกลมมน ผิวเรียบ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ OPC, SI, FA และ S เท่ากับ 14.12, 25.35, 20.13 และ 34.81 ไมครอน ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ย

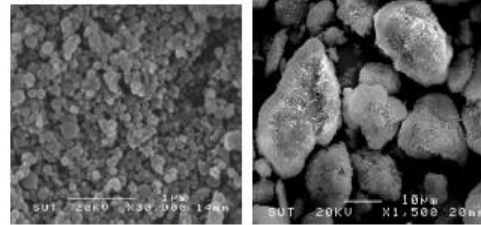
Samples	Specific Gravity	Mean Particle Size, d50 (micron)
OPC	3.15	14.12
SI	2.24	25.35
FA	2.21	20.13
S	2.14	34.81

(หมายเหตุ : ซิลิกาฟุ่มที่ใช้เป็นแบบ Condensed Silica Fume)



(ก) ซีเมนต์

(ข) เถ้าลอย



(ค) ซิลิกาฟุ่ม

(ง) กากตะกอน

ภาพที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุโดย SEM

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, ซึ่งรวมกันเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก และออกไซด์รอง ได้แก่ MgO, Na₂O, Ti₂O, P₂O₅ และยิปซั่ม เมื่อออกไซด์หลักรวมตัวกันในช่วงการเกิดปูนเม็ด จะเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิด คือ ไครแคลเซียมซิลิเกต (C₃S), ไคแคลเซียมซิลิเกต (C₂S), ไครแคลเซียมอะลูมิเนต (C₃A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C₄AF) เมื่อเม็ดปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้สารประกอบเกิดขึ้นใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต(C-A-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂), แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ เอททริงไกต์ (Ettringite) และสารประกอบอื่นอีกไม่มาก

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ่มคือ SiO₂ ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ คือพร้อมทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซิลิกาฟุ่มที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักมี SiO₂ ที่สูงมากคือมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O และออกไซด์อื่นๆ ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ SiO₂ ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป หากนำค่าออกไซด์

ของซิลิกาฟูมมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์และเถ้า
ถ่านหิน พบว่ามีองค์ประกอบที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก

องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยคือ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อม ขณะเผา ดังนั้น ASTM C 618 จึงแยกเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C โดยเถ้าลอย Class F มี ปริมาณ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดย น้ำหนัก และเถ้าลอย Class C มีปริมาณออกไซด์ดังกล่าว ระหว่างร้อยละ 50 – 70 โดยน้ำหนัก [4]

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางเคมีโดยการทดสอบ XRF ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย ส่วนตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติทางเคมีโดยการทดสอบ XRF ของกากตะกอนของเสีย

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของ OPC, SI, FA

วัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี (%)									
	ตัวอย่าง	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
ปูนซีเมนต์		19.85	4.49	3.56	66.96	1.36	-	0.34	2.46	0.98
ซิลิกาฟูม		94.88	0.73	1.34	0.99	-	-	1.42	-	0.64
เถ้าลอย		43.87	26.33	10.81	12.69	1.23	-	1.10	2.74	1.23

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนของเสีย

วัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี (%)									
	ตัวอย่าง	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	NiO	CuO	ZnO	CrO	LOI
กากตะกอน		5.53	3.78	-	25.32	40.88	13.08	10.33	0.64	0.44

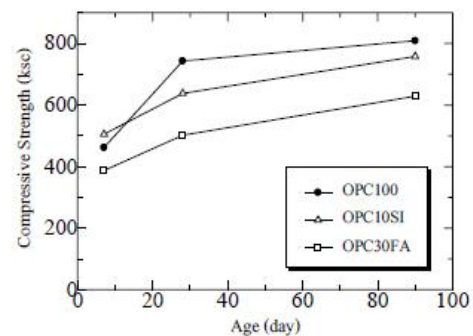
4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของก้อนตัวอย่าง

ตารางที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซิลิกาฟูม และเถ้าลอย ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 โดย น้ำหนักตามลำดับ ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน พบว่า เมื่อมี การแทนที่ด้วยซิลิกาฟูม กำลังอัดในระยะเริ่มต้นของ ก้อนตัวอย่างจะเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับก้อนซีเมนต์

เพสต์ควบคุม และการแทนที่ด้วยเถ้าลอยจะมีกำลังอัด น้อยกว่าการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูม ดังแสดงในภาพที่ 2 ที่ เป็นเช่นนี้ อาจเนื่องมาจากสารองค์ประกอบที่ใช้ทำ ปฏิกิริยาของซิลิกาฟูมสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าเถ้า ลอย

ตารางที่ 4 กำลังอัดของก้อนซีเมนต์เพสต์

Samples	Compressive Strength (ksc.) - (Percentage, %)		
	7 Days	28 Days	90 Days
OPC100	462 (100)	743 (100)	809 (100)
OPC10SI	505 (109.3)	638 (86.0)	758 (93.7)
OPC30FA	387 (83.9)	502 (67.6)	629 (77.8)



ภาพที่ 2 กำลังอัดของก้อนซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 5 กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง

Samples	Compressive Strength (kg/cm ²)		
	7-day	28-day	90-day
OPC40S	9	13	15
OPC50S	6	10	12
OPC60S	5	8	11
OPC10SI40S	47	127	146
OPC10SI50S	18	28	35
OPC10SI60S	10	13	15
OPC30FA40S	9	11	19
OPC30FA50S	8	10	13
OPC30FA60S	5	5	11

ตารางที่ 5 แสดงค่ากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสม กาก ตะกอนของเสียในอัตราร้อยละ 40, 50 และ 60 โดย น้ำหนักของ วัสดุประสานที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ระยะเวลาการบ่มตัวในแต่ละอัตราส่วนผสม และจะมีค่า ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม เนื่องจาก ปริมาณกากตะกอนของเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วน ของวัสดุยึดประสานในส่วนผสมลดลง ซึ่งจะทำได้ ทำให้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ จาก ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้น้อย [5] จึง ทำให้กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของ เสียบางอัตราส่วนมีกำลังอัดต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ความสามารถในการรับแรงอัดของการหล่อแข็งของเสีย เพื่อการฝังกลบ ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานจะต้องมากกว่า 10 กก./ซม² [6]

4.3 ปริมาตรและการกระจายตัวของโพรงของก้อนหล่อ แข็ง

ตารางที่ 6 จากการทดลองด้วยเครื่อง MIP พบว่า ปริมาณโพรงทั้งหมด (Total Porosity) และพื้นที่โพรง ทั้งหมด (Total Pore Area) มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ปริมาณ โพรงทั้งหมดของเพสต์ที่ผสมเถ้าลอย, ซิลิกาฟุ่ม ทุก อัตราส่วนการแทนที่มีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ เนื่องมาจากช่องว่างที่สูงขึ้นระหว่างอนุภาคของวัสดุและ รูพรุนในอนุภาคบางส่วนของวัสดุที่นำมาแทนที่ แต่ถ้า พิจารณาขนาดเฉลี่ยของโพรง (Average Pore) ใน ระยะเวลาพบว่า มีขนาดเล็กลง เมื่อมีการแทนที่ด้วยวัสดุ ปอชโซลานที่มีอนุภาคขนาดเล็ก อันเนื่องมาจากรูพรุน ในอนุภาคของวัสดุปอชโซลานและอนุภาคขนาด บางส่วนช่วยอุดช่องว่างของโพรงได้ดี ทำให้โครงสร้าง ของโพรงแน่นขึ้น และอนุภาคของวัสดุปอชโซลานที่มี

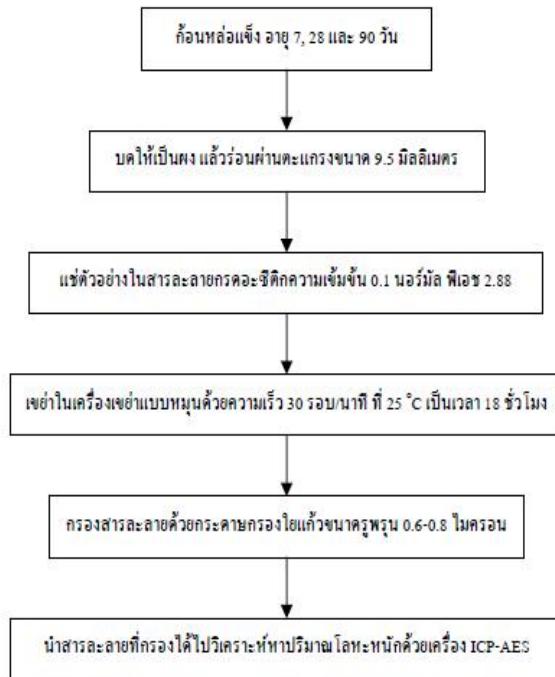
ขนาดเล็กเมื่อผสมในเพสต์จะทำให้อนุภาคเม็ด ปูนซีเมนต์สามารถกระจายตัวในเพสต์ได้ดี

ตารางที่ 6 แสดงปริมาณของโพรงชนิดต่างๆ, ขนาด โพรงเฉลี่ย, และ พื้นที่โพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ ที่ อายุ 7 วัน

	OPC100	OPC10SI	OPC30FA
Air Void (%) ($> 1.0 \mu\text{m}$)	7.15	7.91	8.12
Large Capillary (%) ($0.05-1.0 \mu\text{m}$)	9.12	13.24	13.25
Medium Capillary (%) ($0.01-0.05 \mu\text{m}$)	5.97	6.23	5.87
Total Porosity (%)	22.24	27.38	27.24
Average Pore (nm)	52.93	52.12	52.33
Total Pore Area (m^2/g)	9.89	14.47	14.06

4.4 การวิเคราะห์การชะละลายของก้อนหล่อแข็ง

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยวิธีการชะ ละลาย (โดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure: TCLP) ดังตารางที่ 7, 8 และ 9 พบว่า ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของก้อนหล่อแข็ง จะดีขึ้นตามอายุการบ่มของก้อนหล่อแข็ง แต่ ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายจะลดลงเมื่อ อัตราส่วนของกากตะกอนเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะก้อน หล่อแข็งที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสาน จะมีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับก้อนหล่อแข็งที่ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟุ่ม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟุ่ม พบว่ามีค่า ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 3 หังการทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLP ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ตารางที่ 7 แสดงประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะหนัก ของก้อนหล่อแข็งอายุ 7 วัน

ตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย (%)			
	Ni	Cu	Zn	Cr
OPC40S	50.66	49.21	55.6	65.65
OPC50S	45.57	46.7	48.23	61.55
OPC60S	41.24	43.05	48.88	62.38
OPC10SI40S	66.13	65.68	68.36	79.56
OPC10SI50S	65.44	66.74	66.98	78.54
OPC10SI60S	61.87	62.04	68.56	78.54
OPC30FA40S	65.74	67.4	68.06	79.5
OPC30FA50S	64.86	70.3	63.38	79.5
OPC30FA60S	59.48	56.16	65.86	79.5

ตารางที่ 8 แสดงประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะหนัก ของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วัน

ตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย (%)			
	Ni	Cu	Zn	Cr
OPC40S	63.2	61.6	68.3	82.2
OPC50S	55.7	58.5	60.1	78.4
OPC60S	51.4	53.7	61.1	78.1
OPC10SI40S	83.53	80.85	86.42	98.82
OPC10SI50S	81.93	83.31	84.61	98.82
OPC10SI60S	77.22	76.63	85.72	97.33
OPC30FA40S	82.13	83.8	84.2	98.82
OPC30FA50S	81.02	87.87	79.51	98.82
OPC30FA60S	74.35	70.02	82.1	98.82

ตารางที่ 9 แสดงประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะหนัก ของก้อนหล่อแข็งอายุ 90 วัน

ตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย (%)			
	Ni	Cu	Zn	Cr
OPC40S	70.16	68.42	75.24	91.25
OPC50S	61.84	64.9	66.79	90.11
OPC60S	57.73	59.81	67.32	89.62
OPC10SI40S	92.29	89.75	95.22	100
OPC10SI50S	90.94	92.47	93.17	100
OPC10SI60S	86.71	85.05	95.42	100
OPC30FA40S	91.64	93.18	93.46	100
OPC30FA50S	89.93	97.55	88.56	100
OPC30FA60S	82.58	77.22	91.31	100

5. สรุป

จากผลการศึกษาระยะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็ง กากตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ซิลิกาฟูมและเถ้าลอยเป็นวัสดุยึดประสาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟูมทำให้ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง ส่งผลให้เพศคมีโครงสร้างที่แน่นขึ้น อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

2. ก้อนหล่อแข็งที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจะมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม ค่ากำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้นทั้งในในระยะต้นและปลาย และเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อเทียบกับก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีกากตะกอนในส่วนผสม

3. ความสามารถในการละลายของก้อนหล่อแข็งมีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนและพบว่า การแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมจะมีกำลังอัดมากกว่า การแทนที่ ด้วยเถ้าลอย และมีประสิทธิภาพในการลดการละลายได้ดีกว่าด้วย

4. ความสัมพันธ์ของปริมาตรโพรง กำลังรับแรงอัด และประสิทธิภาพในการลดการละลาย คือ ปริมาตรโพรงมากจะรับกำลังอัดได้น้อยและเกิดการละลายสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ภายใต้งานโครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Cheng KY, Bishop P. 1992. Metal distribution in solidified/stabilized waste forms after leaching J Hazardous Waste & Hazardous Materials; 9: 163-171
- [2] ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2549. Cement Pozzolan and Concrete. กรุงเทพฯ : บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม.
- [3] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542. ซิลิกาฟูม. โยธาสาร, ฉบับเดือน ตุลาคม.
- [4] อุทัยรัตน์ แพรอด, 2548. ลักษณะทางกายภาพและชนิดของโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมเป็นวัสดุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] Hill, C.D., Sollars, C.J. and Perry, R., 1993. Ordinary Portland Cement Based Solidification of Toxic Wastes : The Role of OPC Reviewed. Cement and Concrete Research. 23 : 196-211.
- [6] Wiles, C.C. 1990. Solidification and stabilization technology, U.S.EPA, USA.



การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขานอ้อย
THE STUDY OF LEACHING OF HEAVY METALS CONTAMINANT IN CEMENT
PASTES CONTAINING BAGASSE ASHES

วรพรรณชัย สายวาริน¹⁾ ชูวิทย์ นาเพีย²⁾ และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ³⁾

Worawanchai Saiwarin,¹⁾ Chuwit Napia²⁾ and Theerawat Sinsiri³⁾

¹⁾นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

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

²⁾อาจารย์ คณะสังคมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ 33000

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

³⁾ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งกาบตะกอนโรงชุบโลหะโดยใช้เถ้าขานอ้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุยึดประสาน ในอัตราส่วนการแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และผสมกาบตะกอนโลหะร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การศึกษาครั้งนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานโดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าความชื้นเหลือปกติของเพสต์ ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ โดยการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF), ถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็ง โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด, การรั่วไหลของโลหะหนักโดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ผลการทดสอบพบว่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีกาบตะกอนโลหะหนักร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการผสมเถ้าขานอ้อย นอกจากนี้ยังพบว่าก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ

ละ 20 มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าการแทนที่ร้อยละ 10 และ 30 ขณะที่การทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักพบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารชะมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่ US.EPA กำหนด

คำสำคัญ : เถ้าขานอ้อย 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 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, Pozzolanic, Compressive strength, Leaching

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก อันเนื่องมาจากนโยบายทางเศรษฐกิจของประเทศ ส่งผลให้เกิดของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรมในปริมาณมาก โดยของเสียอันตรายกว่า 80% เกิดขึ้นจากกิจกรรมในภาคอุตสาหกรรม โดยประเภทของของเสียอันตรายที่มีมากที่สุดได้แก่ ตะกอนและของแข็งโลหะหนัก ชนิดของโลหะที่พบมากได้แก่ อาร์เซนิก, แคดเมียม, โครเมียม, โซเดียม, ตะกั่ว, ปะอศ และสังกะสี โดยส่วนมากพบจากโรงงานประเภท ถลุงโลหะ, ชุบโลหะ, ทำสี, ทำแบตเตอรี่ เป็นต้น โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรมากกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะเมื่อรวมตัวกับสารอินทรีย์กลายเป็นสารประกอบอินทรีย์โลหะ (Organometallic Compound) ซึ่งเป็นพิษ สามารถถ่ายทอสูสิ่งมีชีวิตผ่านทางห่วงโซ่อาหาร ความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิด เป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อสะสมภายในร่างกาย โดยอาจมีผลทำให้เกิดพิษหรือเสียชีวิต [1]

กระบวนการหล่อแข็ง (Solidification) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการบำบัดกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอันตรายประเภทอินทรีย์ที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยการใช้ตัวยัดประสานในการจำกัดความสามารถในการละลายและเคลื่อนตัวของโลหะหนักโดยพันธะทางเคมี ทำให้สารโลหะหนักอยู่ในสภาพคงตัว ลดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมหลังจากการแข็งตัวแล้ว วัสดุประสานที่ใช้มากได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้ากลบ เถ้าลอย ซิลิกา เป็นต้น หลังจากนั้นจึงนำไปบำบัดและจัดการใน

ขั้นตอนนี้ต่อไปอย่างถูกวิธี เพื่อลดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม [1,2]

ประเทศไทยมีการปลูกอ้อยเป็นจำนวนมากเพื่อป้อนสู่งานผลิตเป็นน้ำตาล [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 โดยผสมกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบโลหะในอัตราส่วนร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ENGINEERING JOURNAL, 2013, 43(1):

3. วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3.1.2 เถ้าขานอ้อย จากโรงงานผลิตน้ำตาล จังหวัดสุพรรณบุรี เนื่องจากมีการปลูกอ้อยเป็นจำนวนมาก และสะดวกต่อการขนย้ายของผู้วิจัย

3.1.3 กากตะกอนของเสียปูนเป็อนโลหะหนัก จากโรงงานชุบโลหะ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เนื่องจากมีโรงงานประเภทโรงงานชุบโลหะเป็นจำนวนมาก และสะดวกต่อการขนย้ายของผู้วิจัย

3.2 การเตรียมวัสดุ

ทำการบดเถ้าขานอ้อยด้วยเครื่องบดให้มีขนาดเล็ก ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ช่องเปิด 75 ไมโครเมตร) อบกากตะกอนของเสียให้แห้ง จากนั้นทำการบดให้มีขนาดเล็ก ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (ช่องเปิด 9 ไมครอน)

3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

OPC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

BA หมายถึง เถ้าขานอ้อย

S หมายถึง กากตะกอนของเสียโลหะหนัก

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

OPCXBA10S, OPCXBA30S, OPCXBA50S หมายถึง การผสมกากตะกอนของเสียในอัตราร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ โดย X คืออัตราส่วนของเถ้าขานอ้อย

3.4 อัตราส่วนผสม

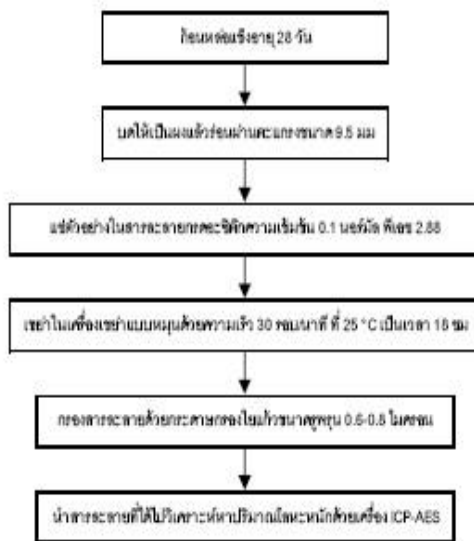
ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ดังแสดงในตารางที่ 1 ทำการหล่อตัวอย่างทดสอบโดยใช้แบบทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม ตามมาตรฐาน ASTM C 109 [9] หลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมงจึงทำการถอดแบบออกและบ่มตัวอย่างโดยการนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง 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

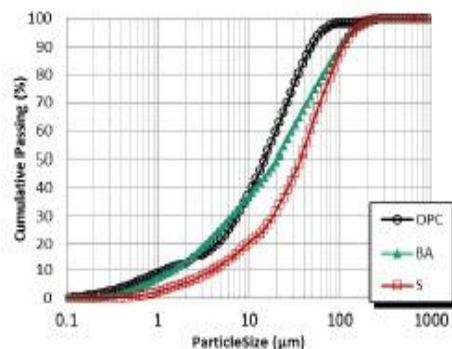
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, แก้วชานอ้อย และกากตะกอนของเสีย พบว่าแก้วชานอ้อย และกากตะกอนของเสีย มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และกากตะกอนของเสียมีค่าต่ำที่สุด คือ 1.79 ขนาด

อนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แก้วชานอ้อย และกากตะกอนของเสียเท่ากับ 14.3, 19.8 และ 36.9 ไมครอน ตามลำดับ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และแก้วชานอ้อยมีขนาดใกล้เคียงกัน ส่วนกากตะกอนของเสียนั้นมีขนาดใหญ่กว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นเท่ากับ 3,870 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซึ่งมีค่ามากที่สุด ส่วนแก้วชานอ้อย และกากตะกอนของเสียมีค่าเท่ากับ 3,010 และ 2,100 ตารางเซนติเมตร/กรัม ตามลำดับ ดังแสดงตามตารางที่ 2 และการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, แก้วชานอ้อย และกากตะกอนของเสีย ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 2 ความถ่วงจำเพาะ, ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและพื้นที่ผิว

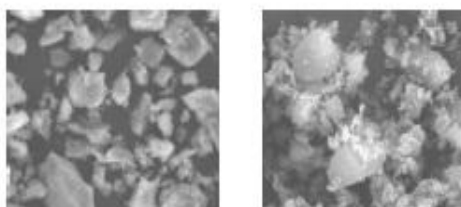
Chemical composition (%)	OPC	BA	S
Specific gravity	3.15	2.16	1.79
Mean Particle size d_{50} (μm)	14.3	19.8	36.9
Surface area (cm^2/g)	3,870	3,010	2,100



รูปที่ 2 การกระจายตัวของอนุภาค

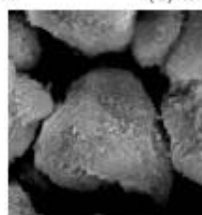
ENGINEERING JOURNAL, 2013, 43(1):

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



(ก) ซีเมนต์

(ข) แก้วชานอ้อย



(ค) กากตะกอนโลหะ

รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุโดย SEM

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, แก้วชานอ้อย และกากตะกอนของเสีย โดยแก้วชานอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสารประกอบออกไซด์หลักที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3) และ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันแล้วมากกว่าร้อยละ 70, ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) น้อยกว่าร้อยละ 4 และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการ

เผา ต่ำกว่า 10 ดังนั้นแก้วชานอ้อยที่นำมาใช้จัดเป็นวัสดุปอซโซลานใน Class F ตามข้อกำหนด ASTM C 618 [13] สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แล้วเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาปอซโซลาน [14]

กากตะกอนของเสียปนเปื้อนโลหะหนักสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นกากตะกอนของเสียจากโรงงานชุบโลหะ ประกอบไปด้วยออกไซด์โลหะหนัก คือ นิกเกิล ทองแดง สังกะสี และโครเมียม โดย นิกเกิล (Ni) มีความเป็นพิษ ซึ่งอาจทำให้เกิดมะเร็งทางเดินหายใจ เพราะไปทำลายการสังเคราะห์ดีเอ็นเอ ทำให้เซลล์ตาย และมีผลอักเสบ ทองแดง (Cu) เมื่อได้รับในปริมาณมากเป็นระยะเวลานานจะทำให้ร่างกายอ่อนแออยู่ตลอดเวลาและกล้ามเนื้อแข็งเกร็ง สังกะสี (Zn) เมื่อได้รับในปริมาณมากเป็นระยะเวลานานจะทำให้ระบบภูมิคุ้มกันลดลง 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	-

ENGINEERING JOURNAL, 2013, 43(1):

NiO	-	-	38.85			50	36.8
CuO	-	-	14.08	90	10	-	33.6
ZnO	-	-	9.29			10	35.1
CrO	-	-	0.43			30	39.4
Other	-	3.14	-			50	46.5
LOI	0.98	8.64	0.5	80	20	-	35.9

4.3 ความชื้นเหลวปกติ

ตารางที่ 4 แสดงค่าความชื้นเหลวปกติจากการทดสอบ โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความชื้นเหลวปกติของ OPC100, OPC10BA, OPC20BA และ OPC30BA มีค่าเท่ากับ 26.7, 33.6, 35.9 และ 39.6 ตามลำดับ จะพบว่าค่าความชื้นเหลวปกติมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนผสม เนื่องจากเถ้าชานอ้อยทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความชื้นเหลวปกติของอัตราส่วนที่มีกากตะกอนของเสียโลหะหนักผสมอยู่ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในอัตราส่วนผสม ค่าความชื้นเหลวปกติจะมีค่ามากขึ้น โดยกากตะกอนทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 4 ค่าความชื้นเหลวปกติ

Binder			S (%)	ความชื้น เหลวปกติ (ร้อยละ)
OPC (%)	BA (%)			
100	-	-		26.7
		10		27.5
		30		31.2

			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

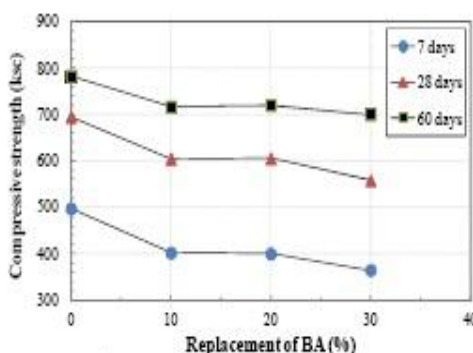
รูปที่ 4 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อย ค่ากำลังอัดที่ได้นั้นมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากในช่วงแรกการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าชานอ้อยยังไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมาก[10,11] และเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ก้อนหล่อแข็งจะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยกำลังรับแรงอัดที่อายุ 60 วัน ของ OPC10BA, OPC20BA และ OPC30BA มีค่าเท่ากับ 717, 720 และ 700 ksc ตามลำดับ และกำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ OPC100 เท่ากับ 783 ksc การแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 20 จะมีกำลังอัดดีกว่าการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 คือ มี

ENGINEERING JOURNAL, 2013, 43(1):

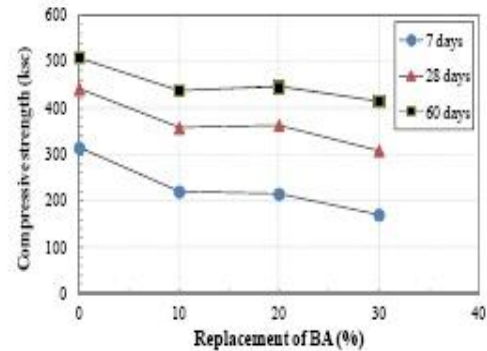
ค่าเท่ากับ 400 ksc 605 ksc และ 720 ksc ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน โดยคิดเป็น 80.4%, 87.2% และ 92.0% เมื่อเทียบกับซีเมนต์เฟสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุเดียวกัน

รูปที่ 5, 6 และ 7 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งทดสอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย แก้วชานอ้อยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุประสาน และผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าก้อนหล่อแข็งมีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนของเสียในอัตราส่วนผสมมากขึ้น เช่น OPC10S, OPC30S และ OPC50S ที่อายุ 60 วัน มีค่า 508.59, 100.25 และ 10.56 ksc เนื่องจากปริมาณกากตะกอนของเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของวัสดุยึดประสานในส่วนผสมลดลง ซึ่งจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้น้อย [12]จึงทำให้กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียบางอัตราส่วนมีกำลังอัดต่ำ

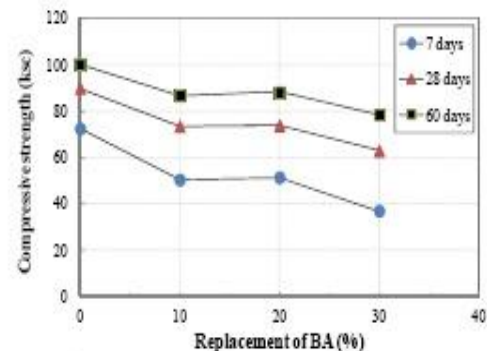
มาตรฐานกำลังรับแรงอัดต่ำสุดของก้อนหล่อแข็งที่สามารถนำไปฝังกลบ จะต้องมากกว่า 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 3.15 ksc [15]



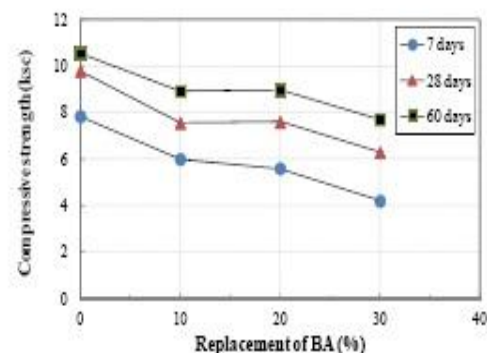
รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เฟส



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เฟส (10S)



รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เฟส (30S)



รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เฟส (50S)

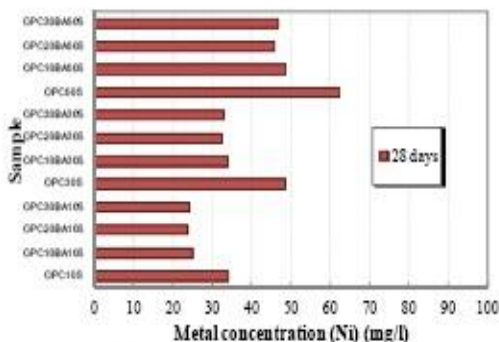
4.5 การวิเคราะห์การระคายของก้อนหล่อแข็ง

จากการทดลอง พบว่าปริมาณโลหะหนักที่พบในสารระคายมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของกากตะกอนเพิ่มมากขึ้น และที่อัตราส่วนกากตะกอน

ENGINEERING JOURNAL, 2013, 43(1):

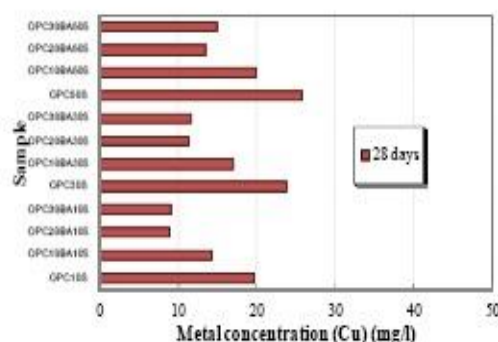
เท่ากัน ปริมาณการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อ
แข็งทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึด
ประสานเพียงอย่างเดียวมีปริมาณการชะละลายโลหะ
หนักสูงกว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขาน้อยเป็น
วัสดุยึดประสานร่วม เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไฮ
ดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮดร
ชันของปูนซีเมนต์สามารถยึดตรึงโลหะหนักได้โดย
ขบวนการทางกายภาพและเคมี และเมื่อมีการเติมเถ้า
ขาน้อยในส่วนผสมทำให้มีปริมาณสารประกอบซิลิ
กาเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์
อิสระที่ได้จากกระบวนการไฮดรชันระหว่างการก่อตัว
ของปูนซีเมนต์ ทำให้ได้สารประกอบซึ่งมีคุณสมบัติใน
การยึดประสาน จึงสามารถตรึงโลหะไว้ได้ดีขึ้น

จากรูปที่ 8 แสดงปริมาณการชะละลายของโลหะ
หนักนิกเกิล (Ni) ของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อายุ 28 วัน
พบว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อัตราส่วนกากตะกอน
เท่ากัน ปริมาณการชะละลายนิกเกิลของก้อนหล่อแข็ง
ทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึด
ประสานเพียงอย่างเดียวมีปริมาณการชะละลายนิกเกิล
สูงกว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขาน้อยเป็นวัสดุ
ยึดประสานร่วม โดยก้อนหล่อ OPC50S มีค่าการชะ
ละลายสูงที่สุดคือ 62.46 มิลลิกรัม/ลิตร ดังรูป



รูปที่ 8 การชะละลายของนิกเกิล (Ni)

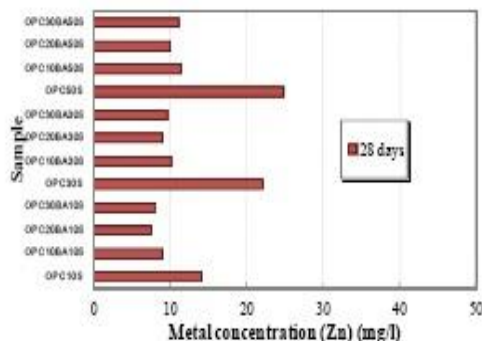
จากรูปที่ 9 แสดงปริมาณการชะละลายของโลหะ
หนักทองแดง (Cu) ของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อายุ
28 วัน พบว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อัตราส่วนกาก
ตะกอนเท่ากัน ปริมาณการชะละลายทองแดงของ
ก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็น
วัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียวมีปริมาณการชะละ
ลายทองแดงสูงกว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขาน
น้อยเป็นวัสดุยึดประสานร่วม โดยก้อนหล่อ OPC50S
มีค่าการชะละลายสูงที่สุดคือ 25.83 มิลลิกรัม/ลิตร ดัง
รูป



รูปที่ 9 การชะละลายของทองแดง (Cu)

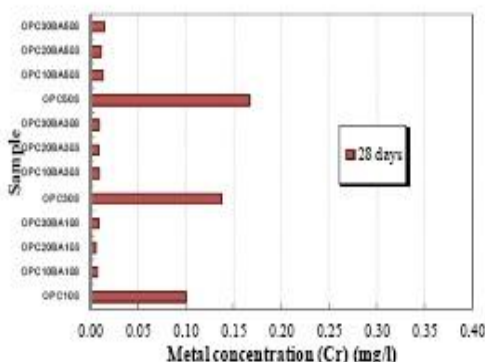
รูปที่ 10 แสดงปริมาณการชะละลายของโลหะ
หนักสังกะสี (Zn) ของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อายุ 28
วัน พบว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อัตราส่วนกาก
ตะกอนเท่ากัน ปริมาณการชะละลายสังกะสีของก้อน
หล่อแข็งทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุ
ยึดประสานเพียงอย่างเดียวมีปริมาณการชะละลาย
สังกะสีสูงกว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขาน้อย
เป็นวัสดุยึดประสานร่วม โดยก้อนหล่อ OPC50S มีค่า
การชะละลายสูงที่สุดคือ 24.83 มิลลิกรัม/ลิตร ดังรูป

ENGINEERING JOURNAL, 2013, 43(1):



รูปที่ 10 การชะละลายของสังกะสี (Zn)

รูปที่ 11 แสดงปริมาณการชะละลายของโลหะหนักโครเมียม (Cr) ของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่อัตราส่วนกากตะกอนเท่ากัน ปริมาณการชะละลายโครเมียมของก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียวมีปริมาณการชะละลายโครเมียมสูงกว่าก้อนหล่อแข็งทดสอบที่ใช้เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุยึดประสานร่วม โดยก้อนหล่อ OPC50S มีค่าการชะละลายสูงที่สุดคือ 0.10, 0.14 และ 0.17 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ดังรูป



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 และการใช้วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุยึดประสานร่วมทำให้มีการชะละลายโลหะหนักลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียว

5. สรุป

จากผลการศึกษากำลังรับแรงอัดและการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุยึดประสาน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ก้อนหล่อแข็งที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยจะมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และการแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 20 มีกำลังรับแรงอัดได้ต่ำกว่าการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 30 โดยน้ำหนัก

2. เมื่อมีปริมาณกากตะกอนโลหะหนักเพิ่มขึ้น ปริมาณกากตะกอนจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง โดยค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งส่วนใหญ่มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกำลังรับแรงอัด

ENGINEERING JOURNAL, 2013, 43(1):

ต่ำสุดของก้อนหล่อแข็งที่สามารถนำไปฝังกลบ คือ จะต้องมียุคมากกว่า 3.15 ksc

3. ปริมาณการชะละลายของก้อนหล่อแข็งมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนโลหะ และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อย ส่งผลให้ก้อนหล่อแข็ง มีปริมาณการชะละลายต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานเพียงอย่างเดียว

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้ และสาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย และผู้ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยครั้งนี้ทุกท่าน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Napia C., Sinsiri T, Jaturapitakkul C, Chindapasirt 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] Kulchanaorasit S., Influences of Bagases 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. and 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. and 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. and 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. and Valencia-Morales E., Sugar cane wastes as pozzolanic materials: Application of mathematical model, *ACI Materials: Application of mathematical Journal* 2008; 105: 258-264.

ENGINEERING JOURNAL, 2013; 43(1):

- [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 D.W., Heavy metal speciation and leaching behaviours 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.

ประวัติผู้เขียน

นางสาววรรณรัช สหายาริน เกิดเมื่อวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ. 2526 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย ปัจจุบันมีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนอนุบาลสุโขทัย จังหวัดสุโขทัย ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 3 ที่โรงเรียนอุดมครุณี จังหวัดสุโขทัย ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 4 - 6 ที่โรงเรียนสุโขทัยวิทยาคม จังหวัดสุโขทัย และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) เมื่อ พ.ศ.2550 จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หลังจากสำเร็จการศึกษา ในปี พ.ศ.2550 ได้เข้าทำงานที่บริษัท กุทธา จำกัด เป็นเวลา 6 เดือนต่อมาได้เข้าทำงานที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัยเป็นเวลา 1 ปี จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2552

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโทมีบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ จำนวน 2 บทความ ดังต่อไปนี้

1) ในงานการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6

2) วิศวกรรมสาร ม.ข. (accepted)

ดังปรากฏในภาคผนวก ข.