

การศึกษาการชะละลายก้อนหล่อแข็งจากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ปูนซีเมนต์
และวัสดุพอซโซลานเป็นวัสดุยึดประสาน

นายชูวิทย์ นาเพีย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

การศึกษาการชะละลายก้อนหล่อแข็งจากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ปูนซีเมนต์
และวัสดุพอซโซลานเป็นวัสดุยึดประสาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุุณบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ศ. ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ)

กรรมการ

(รศ. ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์)

กรรมการ

(ผศ. ดร.วันชัย สะตะ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ทิมปีจันงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์



ชววิทย์ นาเพีย : การศึกษาการชะละลายก๊อบล่อแข็งกาคตะกอนโลหะหนักที่ใช้ปูนซีเมนต์และวัสดุพอซโซลานเป็นวัสดุยึดประสาน (THE STUDY OF LEACHING ON THE SOLIDIFIED HEAVY METAL SLUDGE USING CEMENT AND POZZOLANIC MATERIALS AS BINDERS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีรวัดน์ ลินศิริ, 199 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของก๊อบล่อแข็งที่ใช้วัสดุพอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสาน ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมและเถ้าลอยร้อยละ 10 และ 30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 0 20 และ 40 โดยน้ำหนัก และผสมกาคตะกอนจากโรงงานชุบนิเกิลในอัตราส่วนร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.40 ทำการศึกษาคุณสมบัติของก๊อบล่อแข็ง โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด ความคงทนต่อสภาวะเปียกและแห้ง การรั่วไหลของโลหะหนักโดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) และ Dynamic Leaching Test (DLT) คุณสมบัติทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer Analysis (XRD) และ X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) ถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และทดสอบหาความพรุนโดยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

ผลการทดสอบพบว่าความสามารถรับกำลังอัดของก๊อบล่อแข็งที่มีกาคตะกอนโลหะหนักผสมทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีกาคตะกอนโลหะหนักผสมอยู่ทุกช่วงอายุการบ่ม ส่วนการทดสอบการชะละลายของก๊อบล่อแข็งพบว่าเมื่อผสมกาคตะกอนโลหะหนักในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายลดลง ก๊อบล่ออย่างที่มีอายุการบ่มนานขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายดีขึ้น ส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักในสารชะละลายของก๊อบล่ออย่างมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่ US.EPA กำหนด ในขณะที่ผลของภาพถ่ายขยายพื้นผิวของก๊อบล่อแข็งด้วยเครื่อง SEM และผลการทดสอบความพรุนของก๊อบล่อแข็งด้วยเครื่อง MIP พบว่าความหนาแน่น และปริมาตรโพรงทั้งหมดของก๊อบล่อแข็งมีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะหนักของก๊อบล่อแข็ง ส่วนความคงทนต่อสภาวะเปียกและแห้งของก๊อบล่อแข็ง พบว่าก๊อบล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุพอซโซลานเป็นวัสดุยึดประสานทุกอัตราส่วนที่อายุ 28 วัน มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ASTM D4843-88 โดยมีผลต่างระหว่างชุดควบคุมและชุดทดสอบไม่เกินร้อยละ 30 จากการวิจัยครั้งนี้พบว่าก๊อบล่อแข็งที่มีอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์

พอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 30 และผสมกากตะกอนร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุ
ยึดประสานจะได้ก้อนหล่อแข็งที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด



สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม_____

CHUWIT NAPIA : THE STUDY OF LEACHING ON THE SOLIDIFIED
HEAVY METAL SLUDGE USING CEMENT AND POZZOLANIC
MATERIALS AS BINDERS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
THEERAWAT SINSIRI, Ph.D., 199 PP.

LEACHING/HEAVY METAL/SOLIDIFIED WASTES

This research investigated the properties of solidified was using ordinary Portland cement (OPC) containing pozzolan as binder. Silica fume (SF) and fly ash (FA) were used to partially replace OPC at rate of 10 and 30% by weight respectively. Synthesized zeolite (SZ) and natural zeolite (NZ) were used to partially replace OPC at rate of 0, 20, and 40% by weight and the plating sludge was used at rate of 40, 50 and 60% by weight of binder. A water to binder (w/b) ratio of 0.40 was used for all the mixtures. The compressive strength and evaluation of the wet and dry resistance of solidified wastes were investigated. The leachability of heavy metals were determined by Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) and Dynamic Leaching Test (DLT). Additionally X-Ray Diffractometer Analysis (XRD) and X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) was used chemical property and Scanning Electron Microscope (SEM) were performed to investigate the fracture surface, while the pore size distribution was analyzed by Mercury Intrusion Porosimetry (MIP).

Test results indicated that the compressive strength of the solidified waste mixes significantly decreased compared with the control mixes for all age. The leaching tests of solidified waste, it was found that with an increased of plating sludge, leachability was relatively decreased. The results showed that when solidified waste age increased the effectiveness in reducing the leachability increased. The

concentrations of heavy metals in the leachates were within the limits specified by the US EPA. SEM and MIP results showed that density and total porosity of solidified wastes were related to compressive strength and effectiveness of reducing the leachability. The durability of the wet and dry of solidified waste for all mixed at 28 days were within the limits specified by the ASTM D4843-88. The research found that the replacement of OPC with NZ at rate of 30% and the plating sludge was used at rate of 40 % by weight of binder was better of solidified wastes.



School of Civil Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษา วิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะ แนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ กรรมการ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการศึกษาวิจัย ภายใต้โครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิต และพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา สำหรับ พัฒนาอาจารย์ในมหาวิทยาลัยกลุ่มใหม่

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ ที่สนับสนุน และให้โอกาสในการศึกษา ด้วยดีตลอดมา

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุน ให้โอกาสในการศึกษา และเป็นกำลังใจอันสำคัญยิ่งในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ชววิทย์ นาเพีย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ด
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปฏิสัมพันธ์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ของเสียอันตราย.....	5
2.1.1 คำนิยาม.....	5
2.1.2 แหล่งกำเนิดของเสียอันตราย.....	5
2.2 โลหะหนัก	7
2.2.1 แหล่งกำเนิดของสารโลหะหนัก.....	9
2.2.2 การสะสมของโลหะหนัก.....	10
2.2.3 สารพิษจากโลหะหนัก.....	11
2.2.4 โลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	การหล่อแข็งกากของเสียที่เป็นอันตราย.....	16
2.3.1	การหล่อแข็ง.....	16
2.3.2	เทคนิคการหล่อแข็งกากของเสียอันตราย.....	17
2.3.3	คุณสมบัติของสารที่ได้จากการหล่อแข็ง.....	20
2.4	วัสดุยึดประสาน.....	30
2.4.1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	30
2.4.2	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์.....	31
2.4.3	ปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	38
2.4.4	ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	40
2.5	วัสดุพอลิโซลัน.....	40
2.5.1	การนำวัสดุพอลิโซลันมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	41
2.5.2	ปฏิกิริยาพอลิโซลัน.....	42
2.5.3	ซีโอล์ด.....	42
2.5.4	เถ้าลอย.....	48
2.5.5	ซิลิกาฟูม.....	53
2.6	การชะละลาย.....	57
2.6.1	การวัดความสามารถในการชะละลาย.....	59
2.6.2	ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการชะละลาย.....	61
2.6.3	กลไกการชะละลาย.....	65
2.7	กรอบแนวคิดงานวิจัย.....	67
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	69
3.1	บทนำ.....	69
3.2	วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	69
3.2.1	วัสดุอุปกรณ์.....	69
3.2.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	70
3.2.3	การเตรียมกากตะกอนโลหะหนัก.....	71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	วิธีการทดสอบ	73
3.3.1	การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ	73
3.3.2	การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี ของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง	76
3.3.3	การศึกษาความคงทนของก้อนหล่อแข็งต่อสภาวะเปียกแห้ง	80
3.3.4	การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนัก ของก้อนหล่อแข็ง	82
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	85
4.1	บทนำ	85
4.2	คุณสมบัติของวัสดุยึดประสานและกากตะกอน	85
4.2.1	คุณสมบัติทางกายภาพ	85
4.2.2	องค์ประกอบทางเคมี	89
4.3	คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง	91
4.3.1	ความขึ้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์	91
4.3.2	ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์	92
4.3.3	ระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง	93
4.4	กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง	94
4.4.1	กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์	94
4.4.2	กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง	98
4.5	ปริมาตรและการกระจายตัวของโพรง	107
4.6	การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง	112
4.7	ความคงทนของก้อนหล่อแข็งต่อสภาวะเปียกแห้ง	114

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.8	การทดสอบการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง	116
4.8.1	การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP	116
4.8.2	การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี DLT.....	129
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ขนาดเฉลี่ยของโพรง และประสิทธิภาพการลดการชะละลาย	140
5	สรุปผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	144
5.1	สรุปผลการทดสอบในงานวิจัย	144
5.1.1	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสาน และกากตะกอนโลหะหนัก	144
5.1.2	ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง	145
5.1.3	การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด	145
5.1.4	ปริมาตรและการกระจายตัวของโพรง	145
5.1.5	การทดสอบความคงทนของก้อนหล่อแข็งต่อสภาวะเปียกแห้ง	146
5.1.6	การทดสอบการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง	146
5.1.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ขนาดเฉลี่ยของโพรง และประสิทธิภาพการลดการชะละลาย	147
5.2	ข้อเสนอแนะ	148
5.2.1	ข้อเสนอแนะในการใช้งาน.....	148
5.2.2	ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป.....	148
	รายการอ้างอิง	149
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน	156
	ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	158
	ประวัติผู้เขียน.....	199

สารบัญตาราง

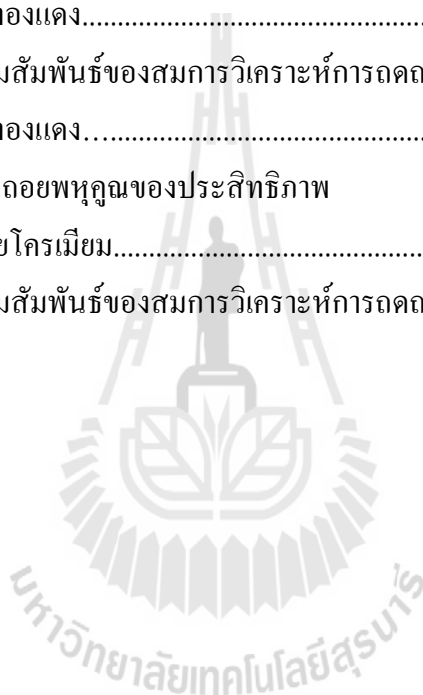
ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าการณั้ปริมาณกากของเสียอันตรายในประเทศไทย7
2.2	ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์15
2.3	ค่ามาตรฐานความสามารถในการรับแรงอัดของการหล่อแข็งของเสียเพื่อการฝังกลบ.....20
2.4	ปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ31
2.5	อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์36
2.6	คุณสมบัติของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ.....46
2.7	องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหินและซิลิกาฟูม54
2.8	คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1.....55
2.9	อัตราส่วนผสมและกำลังอัดของคอนกรีตที่มีและไม่มีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสม57
2.10	ค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารอันตรายที่ยอมให้มีได้ในสารชะละลาย59
2.11	ข้อดีและข้อเสียของการทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLP และ DLT60
3.1	อัตราส่วนผสมซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็งกากตะกอน โลหะหนัก.....71
4.1	ลักษณะทางกายภาพของวัสดุยึดประสานและกากตะกอน.....86
4.2	ความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ86
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานและกากตะกอน89
4.4	ความชื้นเหลวของซีเมนต์เพสต์91
4.5	ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์92
4.6	ระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง93
4.7	กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์.....96
4.8	กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง.....98
4.9	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของก้อนหล่อแข็งที่ผ่านการทดสอบสภาวะเปียกและแห้ง115
4.10	ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายนิกเกิล ในสารชะละลายของก้อนหล่อแข็ง118

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายทองแดง ในสารชะละลายของก้อนหล่อแข็ง	121
4.12 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายสังกะสี ในสารชะละลายของก้อนหล่อแข็ง.....	124
4.13 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโครเมียม ในสารชะละลายของก้อนหล่อแข็ง.....	127
4.14 ค่าพีเอชของสารละลายกรดอะซิติกที่สัมผัสกับ ก้อนหล่อแข็งที่ระยะเวลาต่าง ๆ	129
4.15 ค่าความเข้มข้นสะสมของนิเกิลในสารละลายกรดอะซิติก ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	130
4.16 ค่าความเข้มข้นสะสมของทองแดงในสารละลายกรดอะซิติก ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	131
4.17 ค่าความเข้มข้นสะสมของสังกะสีในสารละลายกรดอะซิติก ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	133
4.18 ค่าความเข้มข้นสะสมของโครเมียมในสารละลาย กรดอะซิติกที่ระยะเวลาต่าง ๆ	134
4.19 ค่าพีเอชของสารละลายฟลักซ์สังเคราะห์ที่สัมผัสกับ ก้อนหล่อแข็งที่ระยะเวลาต่าง ๆ	135
4.20 ค่าความเข้มข้นสะสมของนิเกิลในสารละลายฟลักซ์สังเคราะห์ ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	136
4.21 ค่าความเข้มข้นสะสมของทองแดงในสารละลายฟลักซ์สังเคราะห์ ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	137
4.22 ค่าความเข้มข้นสะสมของสังกะสีในสารละลายฟลักซ์สังเคราะห์ ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	138
4.23 ค่าความเข้มข้นสะสมของโครเมียมในสารละลายฟลักซ์สังเคราะห์ ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	139

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.24 กำลังรับแรงอัด ขนาดเฉลี่ยโพรง และประสิทธิภาพการลดการชะละลาย ของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วัน	140
4.25 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของประสิทธิภาพการลดการชะละลาย นิเกิล สังกะสี และทองแดง.....	141
4.26 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของสมการวิเคราะห์การถดถอย นิเกิล สังกะสี และทองแดง.....	141
4.27 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของประสิทธิภาพ การลดการชะละลายโครเมียม.....	143
4.28 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของสมการวิเคราะห์การถดถอยโครเมียม.....	143



สารบัญรูป

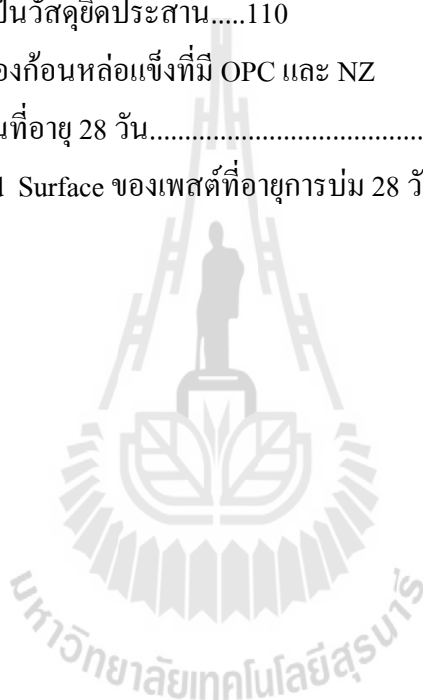
รูปที่	หน้า
2.1	ร้อยละของปริมาณของเสียอันตรายแยกตามแหล่งกำเนิด6
2.2	ตารางธาตุ8
2.3	การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์23
2.4	ผลกระทบของ w/c ต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์24
2.5	ภาพถ่ายขยายโดย SEM ของซีเมนต์เพสต์37
2.6	โครงสร้างของซีโอไลต์43
2.7	ภาพถ่ายขยายด้วย SEM ของซิลิกาฟุ่มควบแน่น55
2.8	กรอบแนวคิดการวิจัย68
3.1	หาพื้นที่ผิวจำเพาะ BET Surface Area Analyzer73
3.2	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค Particle Size Analyzer74
3.3	เครื่องทดสอบองค์ประกอบทางเคมี X-Ray Diffractometer Analysis (XRD)75
3.4	เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM)76
3.5	ชุดเครื่องมือเตรียมก้อนตัวอย่าง77
3.6	เครื่องทดสอบความชื้นเหลวปกติ Vicat Apparatus78
3.7	เครื่องทดสอบกำลังอัด Compression machine80
3.8	การทดสอบความคงทนของก้อนหล่อแข็งต่อสภาวะแวดล้อมเปียกแห้ง.....81
3.9	การทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLP ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 682
3.10	เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP)83
3.11	การทดสอบการชะละลายโดยวิธี DLT.....84
4.1	การกระจายตัวอนุภาคของวัสดุ.....87
4.2	ภาพถ่ายขยายของวัสดุยึดประสานและกากตะกอนโลหะหนัก.....88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 องค์ประกอบทางแร่ของซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติ.....	90
4.4 การพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์	97
4.5 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC เป็นวัสดุยึดประสาน.....	100
4.6 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ SF ร้อยละ 10 เป็นวัสดุยึดประสาน.....	100
4.7 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ FA ร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสาน.....	101
4.8 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ SZ ร้อยละ 20 เป็นวัสดุยึดประสาน.....	103
4.9 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ SZ ร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสาน.....	103
4.10 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ SZ ร้อยละ 40 เป็นวัสดุยึดประสาน.....	104
4.11 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ NZ ร้อยละ 20 เป็นวัสดุยึดประสาน.....	105
4.12 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ NZ ร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสาน.....	105
4.13 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ NZ ร้อยละ 40 เป็นวัสดุยึดประสาน.....	106
4.14 ปริมาตรโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 7 28 และ 90 วัน	107
4.15 การกระจายโพรงของซีเมนต์เพสต์แทนที่บางส่วน ด้วยวัสดุพอซโซลาน อายุ 28 วัน	108

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 การกระจายโพรงของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วัน ที่มี OPC SF และFA เป็นวัสดุยึดประสาน	109
4.17 การกระจายโพรงของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วัน ที่มี OPC และ SZ เป็นวัสดุยึดประสาน.....	110
4.18 การกระจายโพรงของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ NZ เป็นวัสดุยึดประสานที่อายุ 28 วัน.....	111
4.19 ภาพขยาย Fractured Surface ของเพลสต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน.....	113



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing and Materials
MIP	=	Mercury Instruction Porosity
XRF	=	X-Ray Fluorescence
XRD	=	X-Ray Diffraction
SEM	=	Scanning Electron Microscope
TCLP	=	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
DLT	=	Dynamic Leaching Test
ICP	=	Inductively Coupled Plasma Spectroscope
U.S.EPA	=	U.S. Environmental Protection Agency
w/b	=	อัตราส่วนน้ำ/วัสดุยึดประสาน
C-S-H	=	แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์
C-A-H	=	แคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรอกไซด์
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	=	อลูมินาไดรอกไซด์
OPC	=	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1
SF	=	ซิลิกาฟูม
FA	=	เถ้าลอย
SZ	=	ซีโอไลต์สังเคราะห์
NZ	=	ซีโอไลต์ธรรมชาติ
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
X_1	=	กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็ง หน่วย กก./ซม. ²
X_2	=	ขนาดเฉลี่ยโพรงของก้อนหล่อแข็ง หน่วย นาโนเมตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการที่ประเทศไทยได้มีนโยบายการพัฒนาอุตสาหกรรมตามลำดับและนับเป็นนโยบายสำคัญของประเทศในการพัฒนาเศรษฐกิจ โดยมุ่งเน้นการผลิตสินค้าประเภทสินค้าอุตสาหกรรมการเกษตร และสินค้าอุตสาหกรรมเพื่อการส่งออกมากยิ่งขึ้น ทำให้มีการก่อตั้งและขยายโรงงานอุตสาหกรรมมากมาย การเพิ่มขึ้นของโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าวทำให้ของเสียอันตรายที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นด้วย โดยของเสียอันตรายเกิดขึ้นทั้งจากวัตถุที่เป็นสารอันตรายที่ต้องนำเข้า เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตและสารพิษที่มีอยู่ในสินค้าที่ผลิตขึ้น ซึ่งนับวันจะมีของเสียอันตรายแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมที่เป็นธรรมชาติ และแพร่กระจายไปสู่บ้านเรือนชุมชน และไปสู่บุคคลมากยิ่งขึ้น

ปัจจุบันของเสียอันตรายกว่าร้อยละ 80 (จิตรพล พฤกษ์ภัทรกุล, 2547) เกิดจากกิจกรรมทางด้านอุตสาหกรรม ประเภทของของเสียอันตรายที่มีปริมาณมากที่สุดได้แก่ ตะกอนและของแข็ง โลหะหนัก น้ำมัน และขยะติดเชื้อ ชนิดของโลหะหนักที่พบมากได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม ไซยาไนต์ ตะกั่วปรอท และสังกะสี ซึ่งมาจากโรงงานถลุงโลหะ หุบลโลหะ ทำสี ทำแบตเตอรี่ เป็นต้น โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบอินทรีย์โลหะ (Organometallic Compound) ซึ่งเป็นพิษ และสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิด เป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อมีการสะสมในร่างกายของมนุษย์ อาจมีผลทำให้พิการหรือเสียชีวิตได้ โลหะหนักบางชนิด เช่น ปรอท แคดเมียมอาร์เซนิก ตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักประเภทที่มีพิษถาวร ซึ่งนอกจากจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลาแล้ว ยังสามารถสะสมในร่างกายมนุษย์และสัตว์น้ำได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกจากของเสีย น้ำเสีย หรือตะกอนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแพร่กระจายเข้าสู่วัฏจักรของน้ำหรือผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร

จากการสำรวจโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าปริมาณกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี กากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีปริมาณมากที่สุดคือกากตะกอนและของแข็งโลหะหนัก กากสารพิษเหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางน้ำ อากาศและดิน จะเห็นได้ว่ากากตะกอนและของแข็งโลหะหนักมีความเสี่ยงอันตรายมาก จึงเป็นปัญหาหนึ่งที่สมควรได้รับความใส่ใจและพยายามหาวิธีการกำจัดกากของเสียประเภทนี้ อย่างถูกต้องและเหมาะสม

นอกจากนี้ของเสียอันตรายที่ถูกปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น น้ำทิ้งจากโรงงาน ถึงแม้ว่าจะผ่านการบำบัดกระบวนการต่าง ๆ เพื่อลดความเข้มข้นของสารพิษแล้ว แต่ก็ยังคงมีกากตะกอนตกค้าง ซึ่งจะถูก [] กำจัดกากตะกอนในลักษณะนี้ไม่ปลอดภัยต่อผู้เก็บและขนถ่าย เนื่องจากเสถียรภาพของดินบางชนิดอยู่ในสภาพที่ไม่คงตัว ทำให้มีโอกาสแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดปัญหาต่อไป เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ จำเป็นต้องมีกระบวนการลดความเป็นพิษ หรือกักเก็บกากสารพิษอันตรายไม่ให้แพร่กระจายความเป็นพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยง่าย

การหล่อแข็ง (Solidification) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอันตรายประเภทสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยใช้ตัวยึดประสานชนิดต่าง ๆ ตรึงของเสียอันตราย ซึ่งสารอันตรายจะถูกเก็บไว้ในโครงสร้างของตัวยึดประสานด้วยพันธะเคมีและทำให้สารอันตรายอยู่ในสภาพคงตัว ลดโอกาสการแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมภายหลังจากการแข็งตัวแล้ว ตัวยึดประสานที่ใช้มาก ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย ซิลิกา กากตะกอนจากเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ซึ่งการหล่อแข็งทำให้สามารถจัดเก็บก้อนหล่อแข็งได้ง่ายและสะดวกต่อการนำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบอย่างปลอดภัย

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงนำมาสู่แนวความคิดในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ ซีโอไลต์สังเคราะห์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ เถ้าลอย และซิลิกาฟุ่ม มาใช้ในการเก็บกักหรือกรองสารปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์หลาย ๆ ด้าน คือ สามารถกำจัดโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ต้องใช้เทคโนโลยีที่มีราคาแพง นอกจากนี้ยังเป็นการส่งเสริมการรักษาสภาพแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย ซึ่งจะนำไปสู่การใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างเหมาะสมและเป็นทางเลือกใหม่ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ ศึกษาประสิทธิภาพในการกักเก็บสารปนเปื้อนโลหะหนักที่ใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสาน โดยแบ่งเป็นวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

- 1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดการชะละลายสาร โลหะหนักในก้อนหล่อแข็งที่ใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสาน
- 2) เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสานในอัตราส่วนที่กำหนด
- 3) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งที่ใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสานในอัตราส่วนที่กำหนด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาการชะละลายและความสามารถในการเก็บกักสารปนเปื้อนโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยวัสดุพอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุยึดประสานได้แก่ ซีลีกาฟุ่มร้อยละ 10 ถ้ำลอยร้อยละ 30 ซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยการผสมกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบโลหะในอัตราส่วนร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสานที่อายุของก้อนตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน

ทำการศึกษาคูสมบัติทางด้านกายภาพของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็งตัวอย่าง โดยการทดสอบความชื้นเหลือปกติ การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว การทดสอบกำลังอัด การทดสอบหาขนาดโพรง และการกระจายโพรงด้วยเครื่อง Mercury Instruction Porosity (MIP) การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดย X-Ray Fluorescence (XRF) และ X-Ray Diffraction (XRD)

การทดสอบการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งใช้วิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) และ Dynamic Leaching Test (DLT) ทดสอบหาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP) และการทดสอบความคงทนของก้อนหล่อแข็งต่อสภาวะแวดล้อมที่เปียกและแห้ง

สถานที่ทำการทดสอบและวิเคราะห์ตัวอย่าง คือ อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และห้องปฏิบัติการคอนกรีต มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ก้อนหล่อแข็งกาทะกอนโลหะหนักโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยวัสดุพอซโซลานเป็นวัสดุยึดประสานมีความสามารถในการเก็บกักสารโลหะหนัก ความสามารถในการรับแรงอัด และความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นตัวยึดประสานเพียงอย่างเดียว

2) ช่วยลดปัญหาด้านการจัดเก็บและลดการปนเปื้อนของสารโลหะหนักในดินและแหล่งน้ำทั้งใต้ดินและผิวดิน

3) เป็นแนวทางในการนำวัสดุพอซโซลานมาใช้ในการบำบัดกาทะกอนของเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดกาทะกอนของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

4) เป็นการสร้างฐานการวิจัย พัฒนาและใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่มีอยู่อย่างเป็นระบบ และเหมาะสมเพื่อนำไปสู่การคิดค้นและพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ ๆ ที่เหมาะสมกับการใช้งาน



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

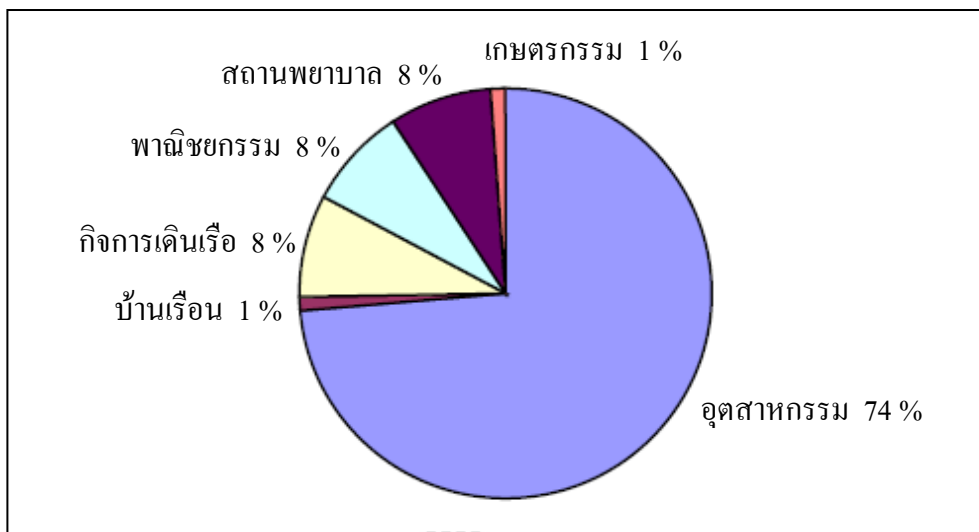
2.1 ของเสียอันตราย

2.1.1 คำนิยาม

สำหรับประเทศไทยมีการให้นิยามความหมายของเสียอันตรายจากหลายหน่วยงาน เช่น เมื่อปี พ.ศ.2535 สำนักคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (เดิม) ได้ให้คำนิยาม “ของเสียที่เป็นอันตราย” ว่าหมายถึงสารหรือวัตถุที่ไม่ใช่หรือใช้ไม่ได้ที่มีส่วนประกอบหรือเจือปนด้วยสารไวไฟ สารกัดกร่อน สารพิษ สารที่สามารถชะล้างได้ สารกัมมันตรังสีและ/หรือสิ่งที่ทำให้เกิดโรค ซึ่งเกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรม ชุมชน เกษตรกรรม ส่วนคำนิยามที่มีกฎหมายรองรับได้แก่ คำนิยามของกระทรวงอุตสาหกรรมซึ่งใช้ในการควบคุมเฉพาะปัญหามลพิษจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 25 (พ.ศ.2531) ให้คำจำกัดความ “ของเสียอันตราย” ว่าเป็นวัสดุที่ไม่ได้ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นสารไวไฟ กัดกร่อน เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย มีสารพิษปะปน หรือมีตัวทำละลายเสื่อมคุณภาพตามรายชื่อที่ระบุไว้บนเบื้อนหรือภาชนะก่อนที่เกิดจากการผลิตหรือเกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม

2.1.2 แหล่งกำเนิดของเสียอันตราย

แหล่งกำเนิดของเสียต่าง ๆ มี 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ ของเสียจากชุมชนอันประกอบด้วย บ้านเรือน สถาบันการศึกษา โรงพยาบาล และแหล่งพาณิชยกรรม ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และของเสียจากเกษตรกรรม (มัลลิกา ปัญญาอะโป, 2542) ซึ่งแหล่งกำเนิดของเสียทั้ง 3 แหล่งสามารถก่อให้เกิดทั้งของเสียที่ไม่อันตราย (Non-Hazardous Waste) และของเสียอันตราย (Hazardous Waste) แหล่งกำเนิดของเสียอันตรายที่สำคัญที่สุดคือ โรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากของเสียอันตรายที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมมีถึงร้อยละ 73-75 ของปริมาณของเสียอันตรายทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่เป็นแหล่งกำเนิดของเสีย ได้แก่ อุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมถลุงโลหะ อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมฟอกย้อม อุตสาหกรรมฟอกหนัง เป็นต้น ตัวอย่างของเสียอันตราย ได้แก่ บรรจุภัณฑ์สำหรับสารปราบศัตรูพืชและสารฆ่าแมลงต่าง ๆ ของเสียที่มีเส้นใย แอสเบสตอสปนเปื้อน ภาชนะกอนที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ร้อยละของปริมาณของเสียอันตรายแยกตามแหล่งกำเนิด (มัลลิกา ปัญญาอะโป, 2542)

ประเทศไทยกำลังอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงระบบเศรษฐกิจโดยมุ่งเน้นการผลิตสินค้าประเภทสินค้าอุตสาหกรรมการเกษตร และสินค้าอุตสาหกรรมเพื่อการส่งออกมากยิ่งขึ้น จาก การเปลี่ยนแปลงระบบเศรษฐกิจดังกล่าวทำให้ประเทศไทยมีการเจริญทางอุตสาหกรรมในอัตราสูง ทั้งในแง่จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมและปริมาณผลผลิต ผลของการพัฒนาอุตสาหกรรมทำให้ โรงงานอุตสาหกรรมที่ได้รับอนุญาตประกอบการมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การเพิ่มจำนวนของ โรงงานอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพจะก่อให้เกิดของเสียอันตรายทำให้มีแนวโน้มว่าของเสียอันตรายที่ เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในแต่ละปี ซึ่งสำนักงานนโยบายและแผน ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้คาดการณ์ การเพิ่มขึ้นของกากของเสียอันตรายในประเทศดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คาดการณ์ปริมาณกากของเสียอันตรายในประเทศไทย

หน่วย : ตัน						
ประเภทของเสีย	ปี พ.ศ.					
	2539	2540	2545	2550	2555	2560
รวม	304,131	317,991	386,816	455,787	525,306	595,316
ติดไฟได้	143,221.3	150,266.8	185,241.2	220,418.8	255,836.2	291,461.6
กัดกร่อน	259.3	273.7	345.4	418.0	491.0	564.3
ว่องไวต่อปฏิกิริยา	1,347.1	1,422.1	1,794.5	2,170.2	2,547.3	2,928.2
เป็นพิษ	147,332.2	153,405.9	183,581.4	213,666.6	244,042.1	274,671.7
กัมมันตรังสี	31.1	32.7	41.1	49.5	58.0	66.5
ติดเชื้อ	11,190.6	11,798.1	14,814.2	17,857.7	20,916.4	23,997.2
อื่น ๆ	749.7	791.3	997.9	1,206.3	1,415.6	1,626.8

ที่มา : สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมกระทรวง
ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

2.2 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่ความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งสิ้น 68 ธาตุ มีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอท เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) มีลักษณะเป็นมันวาวสะท้อนแสง เหนียว และสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า

โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่น ๆ ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกว่าโลหะอิสระได้หลายรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organ metallic Compound) ซึ่งเป็นพิษ หากปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ประกอบกับความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิดเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อมีการสะสมในร่างกายของมนุษย์ อาจมีผลทำให้พิการหรือเสียชีวิตได้ เช่น แบรลเลียม แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี เงิน อาร์เซนิก แอนติโมนี เซเลเนียม เทลลูเรียม และปรอท เป็นต้น ในจำนวนนี้ ปรอท แคดเมียม อาเซนิกและตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักที่มีพิษถาวร ไม่สามารถเปลี่ยนรูปตามกาลเวลาและยังสามารถสะสมอยู่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ ซึ่งในปัจจุบันโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดนี้ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการกำจัดออกจากของเสียก่อนทิ้งเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม

ตารางธาตุ

Period	Group																	
	1																	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 Se	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cp	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Unh	

atom number	Lanthanide														
b	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
symbol	Actinide														
A	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

รูปที่ 2.2 ตารางธาตุ

2.2.1 แหล่งกำเนิดของสารโลหะหนัก

แหล่งกำเนิดของสารโลหะหนักที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะที่สำคัญ คือ

1) แหล่งอุตสาหกรรม โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ ดังนั้นโอกาสที่โลหะหนักซึ่งปนเปื้อนกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทจะถูกถ่ายเทลงสู่แหล่งน้ำจึงเป็นไปได้สูง โดยอาจจะสะสมอยู่ในดินตะกอน และบางส่วนจะถูกพัดเคลื่อนย้ายลงสู่ทะเล โรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้แก่ โรงงานชุบโลหะ โรงงานฟอกย้อม และสิ่งทอ โรงงานฟอกหนังสัตว์ โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตสารเคมี โรงงานแบตเตอรี่ และถ่านไฟฉาย เป็นต้น

2) แหล่งเกษตรกรรม ประเทศไทยเป็นแหล่งเกษตรกรรม อาชีพ และรายได้ของประชากรจึงเกี่ยวข้องกับกาเพาะปลูกไม่ว่าจะเป็นการทำนา ทำไร่ หรือทำสวน จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลผลิตต่อพื้นที่ ประกอบกับลักษณะภูมิประเทศที่อยู่ในแถบร้อนชื้น แดด และเชื้อโรคต่าง ๆ ที่เป็นศัตรูพืชจึงเจริญได้ดี จึงต้องมีการนำยากำจัดศัตรูพืชมาใช้ ส่งผลทำให้เกิดมียากำจัดศัตรูพืชตกค้างอยู่ในพื้นที่เกษตรกรรมมากขึ้น ทั้งนี้ยากำจัดศัตรูพืชหลายชนิดมีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบอยู่ เช่น ยากำจัดเชื้อรา มีทองแดงเป็นองค์ประกอบอยู่ เป็นต้น ซึ่งยากำจัดศัตรูพืชส่วนใหญ่สลายตัวยาก และสารพิษตกค้างเหล่านี้จะถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำเมื่อเกิดการกัดเซาะหน้าดินโดยน้ำฝน

3) แหล่งชุมชน เป็นแหล่งก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำได้มาก โดยส่วนใหญ่เป็นโลหะหนักที่ปนมากับสิ่งปฏิกูล เช่น ขยะมูลฝอยต่าง ๆ ซึ่งมีชิ้นส่วนวัสดุที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบอยู่ เช่น กระดาษ สีทาบ้าน ถ่านไฟฉาย หม้อแบตเตอรี่รถยนต์ และเศษภาชนะที่เคลือบด้วยโลหะ เป็นต้น

2.2.2 การสะสมของโลหะหนัก

สารพิษโลหะหนักต่าง ๆ เมื่ออยู่ในแหล่งน้ำจะสะสมอยู่กับตัวกลาง เช่น ดิน ตะกอน พืช น้ำ สัตว์น้ำ หรือแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างอิสระได้ในปริมาณต่าง ๆ กัน ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่ปะปนหรือสะสมอยู่ในตัวกลางเหล่านี้สามารถที่จะเปลี่ยนรูปหรือเคลื่อนย้ายไปตามห่วงโซ่อาหารได้ ลักษณะการสะสมและการเคลื่อนย้ายในตัวกลางแต่ละชนิดในแหล่งน้ำสามารถแยกรายละเอียดได้ดังนี้ (โสภภาพรรณ จิรนิรุตติชัย, 2534)

1) การสะสมของโลหะหนักในน้ำ โลหะหนักที่สะสมในแหล่งน้ำมีทั้งในรูปที่ละลายน้ำ และอยู่ในรูปสารแขวนลอย ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำมีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา เนื่องจากความสามารถในการผสมผสานของสารแขวนลอยพวกที่ละลายน้ำแตกต่างกัน โดยพวกที่อยู่ในรูปแขวนลอยจะมีเวลาอยู่ในน้ำยาวนานกว่าพวกที่ละลายน้ำ

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

3) การสะสมของโลหะหนักในพืชน้ำ การสะสมของโลหะหนักในพืชน้ำจะสะสมด้วยการดูดซับจากน้ำโดยตรง ซึ่งพืชน้ำจะไม่สามารถควบคุมปริมาณโลหะหนักในตัวเองได้ ปริมาณการสะสมจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลาย หรือแขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นสำคัญ รวมถึงอายุของพืชเหล่านั้นด้วย ทั้งนี้พืชน้ำต่างชนิดกันก็จะมีการสะสมของปริมาณโลหะหนักแตกต่างกัน

4) การสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำ สัตว์น้ำส่วนใหญ่ได้รับสารพิษโลหะหนักเข้าไปด้วยการกินอาหารในลักษณะต่าง ๆ ตามชนิดของสัตว์น้ำนั้น การสะสมของโลหะหนักโดยการดูดซึมจากน้ำเข้าไปโดยตรงเป็นไปได้น้อยมาก การสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำจะเพิ่มขึ้นตามลำดับการบริโภค

2.2.3 สารพิษจากโลหะหนัก

แคดเมียม (Cadmium)

ในธรรมชาติแคดเมียมจะเป็นธาตุที่อยู่ร่วมกับสังกะสีและตะกั่ว ดังนั้นในการถลุงแร่จึงได้ธาตุทั้งสามออกมาพร้อมกัน สำหรับแคดเมียมนิยมนำมาทำอัลลอยและเคลือบโลหะต่าง ๆ ให้ขาวเป็นเงาหรือมีสีบรอน ใช้ทำน้ำมันเครื่องยนต์ ทำสี ใช้ทำให้เกิดแสงฟลูออเรสเซนต์ ใช้ทำแบตเตอรี่ ใช้ทำโพลีไวนิลพลาสติก ใช้ฉาบโลหะเครื่องไฟฟ้า เช่น ลวดสายไฟฟ้า ในทางยาใช้แคดเมียมทำเป็นยาฆ่าจุลินทรีย์และยาฆ่าแมลง แคดเมียมจะไม่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ แต่แคดเมียมจะอยู่ในรูปของเกลือต่าง ๆ ที่มีการละลายน้ำต่างกัน เกลือของแคดเมียม เช่น แคดเมียมไนเตรต แคดเมียมซัลเฟต จะละลายน้ำได้ดี แต่แคดเมียมออกไซด์ แคดเมียมไฮดรอกไซด์และแคดเมียมคาร์บอเนตจะไม่ละลายน้ำ แคดเมียมออกไซด์มีความดันไอสูงจึงระเหยได้ดีและเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย การดูดซึมของแคดเมียมพบว่าเมื่อแคดเมียมอยู่ในรูปของฝุ่น ปริมาณของแคดเมียมที่ตกในระบบทางเดินหายใจจะขึ้นกับขนาดและคุณสมบัติในการละลายน้ำของแคดเมียมเอง สำหรับแคดเมียมที่เข้าสู่ร่างกายทางระบบทางเดินอาหาร พบว่าถูกดูดซับได้น้อยมากคือประมาณ ร้อยละ 0.5-12 เท่านั้น แคดเมียมที่เข้าสู่ร่างกายจะไปสะสมในตับและไตเป็นส่วนใหญ่ การขับถ่ายแคดเมียมในคนนั้น แคดเมียมจะถูกขับออกทางปัสสาวะ

ความเป็นพิษเกิดจากแคดเมียมไปแทนที่สังกะสีในกระบวนการของเอนไซม์บางอย่างทำให้เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้ อาการพิษที่เกิดจากแคดเมียมมีทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง อาการพิษเฉียบพลันอันเกิดจากการสูดดมควันของแคดเมียมออกไซด์เข้าไปประมาณ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีอาการแพ้พิษเกิดขึ้นได้ทันที ได้แก่ จมูกและคออักเสบ เยื่อจมูก ปวด และหลอดลมถูกทำลาย แน่นหน้าอก หายใจขัด ไอมีเลือด ปวดบวมและตายได้ ส่วนอาการเรื้อรังอันเกิดจากการสูดดมผงฝุ่นแคดเมียมหรือรับประทานจะทำให้เกิดโรคที่เรียกว่า อีไต-อีไต โดยผู้ป่วยจะมีอาการปวดร้าวตามข้อตามกระดูก

ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่ว เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มนุษย์รู้จักนำมาใช้เริ่มตั้งแต่มนุษย์มีอารยธรรม และในปัจจุบันสารตะกั่วถูกนำไปประโยชน์อย่างกว้างขวางได้แก่ ใช้ทำแผ่นธาตุในแบตเตอรี่ ใช้หุ้มสายไฟฟ้าแรงสูงที่ฝังใต้ดินเพื่อกันความผุกร่อน ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสม ใช้ในอุตสาหกรรมสีและสารปราบศัตรู เป็นต้น

สารตะกั่วสามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยขบวนการธรรมชาติและเกิดจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ และการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือระบบทางเดินหายใจ ระบบทางเดินอาหาร โดยตะกั่วปนเปื้อนในน้ำดื่มและอาหาร และทางผิวหนังหรือจากการสัมผัส เมื่อสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะไปจับกับเม็ดเลือดแดง นอกจากนั้นไปอยู่ที่เนื้อเยื่ออ่อน เช่น ตับ ไต หัวใจ และปอด ร้อยละ 90 ของสารตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะถูกเก็บสะสมที่กระดูก สารตะกั่วที่ไม่ถูกดูดซึมไว้จะถูกขับถ่ายออกมากับอุจจาระ การเกิดพิษเนื่องจากสารตะกั่ว แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การเกิดพิษแบบเฉียบพลัน และแบบเรื้อรัง ซึ่งทั้ง 2 แบบ เกิดได้จากทั้งสารตะกั่วอนินทรีย์และสารตะกั่วอินทรีย์การเกิดพิษจากสารตะกั่วอนินทรีย์ พิษแบบเฉียบพลัน มักจะพบน้อย เกิดในรายที่รับประทานสารตะกั่วหรือหายใจเอาฝุ่นละอองของสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่มาก ส่วนใหญ่จะมีอาการทางประสาท เช่น หงุดหงิด นอนไม่หลับ คลุ้มคลั่ง เกิดความคิดสับสนและวิตกกังวล เนื่องจากสมองถูกทำลาย ในปากจะมีรสหวานคล้ายกับอมโลหะในปาก คอแห้ง กระหายน้ำ ปวดท้องอย่างรุนแรงบริเวณสะดือ มีอาการเบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียนท้องผูก ปัสสาวะไม่ออก เม็ดโลหิตถูกทำลาย ความดันโลหิตลดลง ตัวเย็น ปวดศีรษะ นอนไม่หลับ กล้ามเนื้ออ่อนเพลีย มือเท้าเป็นตะคริว มีอาการแข็งขี้มึนประสาทสัมผัสผิดปกติ ไตถูกทำลาย อาจตายได้ภายใน 1 หรือ 2 วัน ส่วนพิษแบบเรื้อรัง ชนิดนี้ผู้ป่วยได้รับสารตะกั่วทีละน้อยค่อย ๆ สะสมในร่างกาย มักมีอาการอ่อนเพลีย เหนื่อยหน่าย เบื่ออาหาร ท้องผูก ขี้มึนกระสับกระส่าย อาเจียนเป็นบางครั้ง ปวดศีรษะ เป็นตะคริวบริเวณท้องเป็นระยะ ๆ ซีด โลหิตจาง ไม่มีความรู้สึกทางเพศ ประจำเดือนขาด พบสารตะกั่วบริเวณเหงือก มีลักษณะเป็นเส้น (Lead Line) รายที่เป็นมาก ๆ จะมีอาการทางระบบประสาทเข้ามาร่วมด้วย อัมพาตที่กล้ามเนื้อมือและเท้า

ปรอท (Mercury)

ในสภาวะปกติปรอทบริสุทธิ์จะมีสถานะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายเงิน สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ สามารถแตกตัวเป็นไอออนบวกได้ 2 แบบ คือ Hg^+ (เมอร์คิวรัส) และ Hg^{2+} (เมอร์คิวริก) ปรอทที่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมมีต้นกำเนิดมาจากธรรมชาติและโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ปรอทที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจะมีการสลายตัวของสินแร่ที่มีปรอทเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจากการศึกษาจากการสลายตัวของปรอทโดย National Academy of Sciences ในปี ค.ศ.1978 พบว่าปริมาณของสารปรอทที่ระเหยออกมาตามผิวโลกมีจำนวนประมาณ 18,500–27,000 ตัน/ปี นอกจากนี้ยังปะปนออกมากับก๊าซภูเขาไฟ และระเหยจากมหาสมุทรอีกด้วย ปรอทที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงงานผลิตก๊าซคลอรีนและโซดาไฟ เยื่อกระดาษ พลาสติก เกสซิกันท์ สีต่าง ๆ ไวนิลคลอไรด์ หลอมโลหะ ยากำจัดเชื้อรา เทอร์โมมิเตอร์ แบตเตอรี่ชนิดแห้ง และในบรรดาอุตสาหกรรมดังกล่าวพบว่า โรงงานผลิตเยื่อกระดาษและก๊าซคลอรีนและโซดาไฟจะใช้ปรอทเป็นจำนวนมาก เมื่อโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าวปล่อยสารปรอทออกมากับน้ำทิ้งหรือน้ำเสีย ปรอทก็จะสะสมตัวในสิ่งแวดล้อมและเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ในที่สุดก็จะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์แล้วก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้

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

สังกะสี (Zinc)

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

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

2.2.4 โลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างโลหะกับปูนซีเมนต์สามารถแบ่งได้ 4 กลุ่ม คือ การดูดซับ (Sorption) การตกผลึก (Precipitation) การรวมเข้าในโครงผลึกของสารประกอบซีเมนต์ และการเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบของปูนซีเมนต์แล้วเกิดเป็นสารประกอบใหม่ (จิราภรณ์ นิจันท์พันธ์, 2543) พฤติกรรมของโลหะแต่ละตัวในระบบซีเมนต์ (Cementitious system) ทั้งก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับโลหะมีอิทธิพลอย่างมากไม่เพียงแต่เฉพาะคุณภาพหรือคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังมีผลต่อเนื่องไปยังขั้นอื่น ๆ อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น ความเสถียรของโลหะหนักที่รวมตัวกับปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ผสมจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ แต่เมื่อนำปูนซีเมนต์ไปผสมน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีผลในเรื่องความเสถียรของโลหะหนักโดยเฉพาะความสามารถในการชะละลายในขณะใช้งานและสิ้นอายุการใช้งาน ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสถานะภาพของโลหะหนักหลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสิ่งที่น่าศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถหาวิธีในการป้องกันหรือกำจัดโลหะหนักในการปฏิบัติงานจริง โลหะหนักที่อยู่

ในปูนซีเมนต์นอกจากจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์เองแล้วสารเจือปนเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพในระยะยาว

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์ (Dalton et al., 2004)

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

ฤทัยรัตน์ แพรอด (2548) ได้ศึกษาสภาพภาพของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบของเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ นอกจากนั้นยังอาจอยู่ในรูปของสารประกอบวานาเดียมออกไซด์ และซิลิกอนออกไซด์ เมื่ออายุบ่มสูงขึ้นพบว่าโลหะหนักมีการสร้างพันธะที่มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น มอร์ตาร์ที่มีปริมาณของทองแดงสูงกำลังรับแรงอัดจะต่ำลง ในขณะที่มอร์ตาร์ที่มีปริมาณของแบเรียมและวานาเดียมสูงกำลังรับแรงอัดก็มีค่าสูงขึ้นด้วย

พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล (2548) พบว่า สังกะสีและนิกเกิลได้ทำให้เฟสของปูนเม็ด ในรูปของ aluminite หรือ C_3A เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่โครเมียมได้ส่งผลให้เฟสของปูนเม็ด ในรูปของ alite หรือ C_3S และ belite หรือ C_2S ลดลง นอกจากนี้ยังพบสารประกอบของนิกเกิลที่เกิดขึ้นใหม่ในเฟสของปูนเม็ด คือ $MgNiO_2$ และสารประกอบของโครเมียมในเฟสของปูนเม็ด คือ $CaZn$ ด้วย

Bishop et al., (2003) พบว่า ความเป็นไปได้ของโลหะในการยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์มี 3 รูปแบบ คือ Calcium Complexation, Surface Adsorption และ Protective Coating/Osmotic Bursting แบบแรกในระบบสายเดี่ยวของ Ca_3SiO_5 และ Ca_2SiO_4 ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการตกตะกอนของ C-S-H ถ้าบางโลหะสามารถเกิด Complexation กับแคลเซียมในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะก่อให้เกิดการจับรูปเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้แคลเซียมในสารละลายลดลง การเกิด C-S-H ก็จะน้อยลงไปด้วย แบบที่ 2 คือ โลหะจะดูดติดอยู่ที่ผิวของซีเมนต์ ทำให้ขัดขวางการสัมผัสระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ดังนั้นจึงเป็นการยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชัน แบบสุดท้าย คือ โลหะจะไปเกาะติดที่ผิวของซีเมนต์แต่น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้เล็กน้อยซึ่งจัดว่าเป็นตัวหน่วง ทำให้ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นไปได้ช้า

2.3 การหล่อแข็งกากของเสียที่เป็นอันตราย

2.3.1 การหล่อแข็ง (Solidification)

การหล่อแข็งในแง่ของเทคโนโลยีการบำบัดของเสียอันตราย คือ กระบวนการที่นำกากของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดแล้วนำมาทำให้อยู่ในรูปของแข็ง โดยใช้ตัวยึดประสานชนิดต่าง ๆ เพื่อเป็นการตรึงสารพิษเหล่านั้น โดยวิธีทางฟิสิกส์และเคมี (Jong, 1990)

การหล่อแข็งในแง่ของการจัดการสารอันตราย คือ กระบวนการบำบัดกากของเสียอันตราย ซึ่งออกแบบมาเพื่อพัฒนาการกักเก็บของเสียอันตราย หรือเพื่อลดพื้นที่ผิวที่สารอันตรายจะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม (Wiles, 1990)

การหล่อแข็งในแง่ของ U.S.EPA คือ กระบวนการซึ่งอาศัยวิธีทางเคมีเพื่อที่จะลดการเคลื่อนที่ของสารอันตราย (Davis and David, 1991)

ดังนั้น การหล่อแข็งคือ กระบวนการที่นำกากของเสียอันตรายที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วมาทำให้อยู่ในรูปของแข็ง โดยใช้ตัวยึดประสานชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นการตรึงสารอันตรายเหล่านั้น โดยวิธีทางฟิสิกส์และเคมี เพื่อลดการเคลื่อนที่ของสารอันตรายไม่ให้เกิดการสัมผัสหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมต่อไป ของเสียอันตรายที่สามารถนำมาหล่อแข็งได้ต้องไม่ละลายน้ำ ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี และเมื่อถูกตรึงอยู่ในโครงสร้างของก้อนหล่อแข็งแล้วไม่สามารถซึมผ่านออกมาภายนอกได้

จุดประสงค์ของการหล่อแข็งคือ เพื่อลดความเป็นพิษของสาร ลดอัตราการเคลื่อนตัวของสารอันตราย ลดอัตราการละลาย การชะละลายสารอันตรายออกสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งเพื่อเพิ่มความแข็งแรง การรับแรงอัด และลดการซึมผ่านของน้ำของแข็งที่จะนำไปฝังกลบ นอกจากนี้การหล่อแข็งยังเป็นการลดพื้นที่ผิวที่ของเสียสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม เป็นการลดโอกาสที่ของเสียจะกระจายสู่สิ่งแวดล้อม (พจนีย์ ขุมมงคล และ สิริรินทร์เทพ เต้าประยูร, 2539)

2.3.2 เทคนิคการหล่อแข็งกากของเสียอันตราย (Pojasek, 1980)

1) Cement-Based Techniques

เป็นการหล่อแข็งกากตะกอนที่ใช้ซีเมนต์เป็นตัวยึดประสาน เป็นกระบวนการตรึงกากของเสียทางเคมี เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของการหล่อแข็ง จึงเพิ่มสารที่มีคุณสมบัติปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ ผสมร่วมกับซีเมนต์ เมื่อปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลานผสมกับน้ำจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ให้ความร้อนและมีค่าพีเอชสูง ทำให้โลหะหนักที่อยู่ในส่วนผสมอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์หรือเกลือคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำไอออนของโลหะอาจเข้าไปเกาะอยู่ในโครงผลึกของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งมีผลต่อการรั่วซึม โดยไปลดการซึมผ่านของสารละลายเข้าไปในเนื้อก้อนหล่อแข็ง อย่างไรก็ตามสารอินทรีย์บางชนิดที่อยู่ในกากตะกอนสามารถแทรกต่อกระบวนการหล่อแข็งได้ โดยจะไปยับยั้งการก่อตัวหรือเกิดการบวมทำให้ความแข็งแรงลดลง เช่น เกลือของโลหะหนักที่ละลายน้ำได้ของแมงกานีส สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว รวมทั้งสารปนเปื้อน เช่น สารอินทรีย์ โคลน ดินเหนียวบางชนิด เป็นสาเหตุให้เกิดการแข็งตัวได้ช้า สำหรับสารปนเปื้อนอื่นๆ และสารที่มีความละเอียดจะสามารถเคลือบอนุภาคที่ใหญ่กว่า ทำให้พันธะระหว่างของเสียกับปูนซีเมนต์อ่อนตัวลงหรือไม่เกิดขึ้นเลย การเติมสารพิเศษบางตัวจะช่วยแก้ปัญหาการยับยั้งการบวมและการเพิ่มความต้านทานการซึมผ่าน รวมทั้งเพิ่มความแข็งแรงให้กับก้อนหล่อแข็งอีก

ด้วยกากของเสียที่สามารถนำมาบำบัดด้วยวิธีการนี้ ได้แก่ เศษโลหะ ของเสียจากโรงงานชุบโลหะ และหลอมตะกั่ว ของเสียจาก โรงงานฟอกย้อม ถ้าจากเตาเผากากของเสีย ออกไซด์ที่เสื่อมสภาพ คตะไลต์ที่เสื่อมคุณภาพ กากตะกอนโรงงานผลิตอาหาร และกากตะกอนจากเครื่องกำจัดก๊าซ

2) Lime-Based Techniques

เป็นการใช้ปูนขาวผสมกากตะกอนของเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก กลไกการทำ ให้คงตัวเป็นการเปลี่ยนรูปโลหะอิสระเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ทั้งสามารถสะท้อนของ เสียที่เป็นกรดได้ นอกจากการเติมปูนขาวโดยตรงแล้ว วัสดุอื่นที่สามารถใช้แทนปูนขาวได้ทั้งยังมี คุณสมบัติและกลไกในการทำปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน ได้แก่ เถ้าลอย และถ้าจากการเผาซีเมนต์ การใช้ วัสดุนี้จึงเป็นการนำเอาของเสียจากเตาเผากลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง วิธีการนี้เป็นการใช้ ปูนขาวผสมกากตะกอนของเสียโดยอาจเพิ่มสารผสมที่มีส่วนประกอบของซิลิกา เช่นเถ้าลอยหรือ เถ้าแกลบ เมื่อเปรียบเทียบกับกรหล่อแข็งด้วย Cement-Based พบว่าก้อนแข็งที่ได้จาก Lime-Based ขอมให้น้ำซึมผ่านได้ดีกว่าและมีความสามารถในการรับแรงอัดได้น้อยกว่า

3) Thermoplastic Techniques

เป็นการหล่อแข็งที่ใช้ บิพูเมน พาราฟิน หรือ โพลีเอธิลีน ผสมกับกากตะกอนของ เสียที่แห้ง ณ อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะทำให้ส่วนผสมหลอมเหลวเข้ากับกากตะกอน เมื่อปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจึงได้ก้อนหล่อแข็งซึ่งมีคุณสมบัติต้านทานต่อความชื้นได้ดี ปกติมักใช้ กับกากกัมมันตรังสี ไม่สามารถใช้กับสารอินทรีย์หรือสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง

4) Organic polymer Techniques

เป็นการหล่อแข็ง โดยการนำสารอินทรีย์โมโนเมอร์เติมลงไปของเสียที่ต้องการ ทำให้คงตัว แล้วผสมให้เข้ากันจากนั้นจึงเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการรวมตัวของโมโนเมอร์ กลายเป็นโพลิเมอร์อยู่ในรูปของแข็งซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ ของเสียจะถูกจับไว้ในโครงสร้าง โพลิเมอร์ที่เกิดขึ้น ของเสียที่นำมาทำให้คงตัวโดยวิธีนี้อาจอยู่ในรูปของแข็งหรือกึ่งของแข็งก็ได้ วิธีการนี้เหมาะสำหรับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ และไม่เหมาะสมสำหรับของเสียที่ปนเปื้อนด้วย โลหะ เนื่องจากโลหะละลายได้ดีในกรดแก่ ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นโลหะบางส่วนจึงไม่ถูก จับไว้ในโครงสร้างของโพลิเมอร์แต่ละลายปนออกมากับตัวเร่งปฏิกิริยา

5) Encapsulation Techniques

เป็นการหล่อแข็ง โดยทำให้กากตะกอนแห้งจับกันเป็นก้อนแล้วเคลือบด้วย สารโพลิเมอร์ สารที่ห่อหุ้มนี้มีความแข็งแรงทนทานต่อน้ำ และสภาพแวดล้อมได้ดี

6) Self- Cementing Techniques

ใช้กับกากของเสียที่มีการปนเปื้อนของซัลเฟต ซัลไฟด์ และมีสารแคลไซต์ ร้อยละ 8-10 ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์คล้ายปูนพลาสเตอร์

7) Glassification

เป็นการนำของเสียมาผสมกับซิลิกาหรือทรายแก้วแล้วให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงถึง 1,600 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการหลอมตัวแล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจนเกิดเป็นโครงสร้างคล้ายแก้ว ซึ่งมีความคงตัวสูงมาก ของเสียอันตรายจะถูกจับอยู่ในผลึกแก้วและไม่สามารถถูกชะละลายสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้ วิธีการนี้ต้องใช้เครื่องมือที่มีเทคนิคสูงมากและมีราคาแพง จึงเหมาะสำหรับการหล่อแข็งของเสียที่มีความเป็นอันตรายสูง เช่น ของเสียกัมมันตรังสี ซึ่งมีระดับรังสีสูงมาก

สำหรับกากของเสียอันตรายที่มีสารโลหะหนักปนเปื้อน นิยมใช้การหล่อแข็งด้วยวิธี Cement-Based Techniques เพราะ

- ต้นทุนถูกกว่า
- ไม่ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง
- ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือพิเศษ
- ไม่ต้องการแรงงานที่ชำนาญการเฉพาะ
- ใช้เทคนิคการผสมสารเคมี (วัสดุยึดประสาน) ในกากของเสีย
- เหมาะสำหรับการหล่อแข็งของเสียอินทรีย์ เช่น โลหะหนัก
- ซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ จะมีค่าพีเอชประมาณ 10-12 เพราะมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากของเสียอยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งมีเสถียรภาพที่ค่าพีเอชสูง
- มีความต้านทานสภาพความเป็นกรดได้ดี เนื่องจากธรรมชาติของก้อนหล่อแข็งมีความเป็นด่างสูง
- ก้อนหล่อแข็งที่ได้สามารถนำไปกำจัดโดยการฝังกลบต่อไป

2.3.3 คุณสมบัติของสารที่ได้จากการหล่อแข็ง

กากของเสียที่ทำการหล่อแข็งแล้วควรมีลักษณะดังนี้ (Peratt et al., 1992)

1) กากของเสียที่อยู่ในก้อนหล่อแข็งต้องอยู่ในรูปไม่ละลายน้ำและไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา

2) การรั่วไหลของกากของเสียในก้อนหล่อแข็ง เมื่อนำกากตะกอนไปทำการหล่อแข็งสารที่ถูกตรึงอาจแยกตัวออกจากโครงสร้างของก้อนหล่อแข็งได้ในขณะที่นำไปฝังกลบแล้ว จะทำให้เกิดการปนเปื้อนในพื้นดินและแหล่งน้ำใต้ดินอาจมีโอกาสปะปนแพร่กระจายไปสู่แหล่งธรรมชาติได้ในภายหลัง

3) ความสามารถรับแรงอัด เมื่อนำก้อนหล่อแข็งไปทำการฝังกลบเพื่อความปลอดภัยและป้องกันมิให้ก้อนหล่อแข็งเกิดการแตกร้าว เพราะอาจเป็นสาเหตุทำให้ของเสียอันตรายที่ถูกตรึงไว้ภายในมีโอกาสสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น ทำให้เกิดการรั่วไหลของสารพิษออกมาปนเปื้อนสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นก้อนหล่อแข็งจึงต้องมีความสามารถรับแรงอัดได้มาตรฐานสำหรับการฝังกลบ ซึ่งโดยทั่วไปมาตรฐานกำลังรับแรงอัดต่ำสุดของก้อนหล่อแข็งที่สามารถนำไปฝังกลบจะต้องมากกว่า 50 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 3.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ASTM D 4843-88, 1997)

ตารางที่ 2.3 ค่ามาตรฐานความสามารถในการรับแรงอัดของการหล่อแข็งของเสียเพื่อการฝังกลบ (Metha et al., 1995)

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

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทำเสถียรและหล่อแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นตัวยึดประสานที่ผ่านมามีมากมาย เช่น

Jaggi (1988) ได้ทำการศึกษาถึงการกำจัดสารพิษจากโรงงานชุบโลหะแบบเตอรีและอุตสาหกรรมกำจัดศัตรูพืชโดยศึกษา แคลเมียม ตะกั่ว และอัลคริน ใช้กระบวนการทำให้เป็นก้อนและวัสดุประสานที่ใช้คือ ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แกลบ และผงซีเมนต์จากเตापูนซีเมนต์ ทำการทดสอบคุณสมบัติของแท่งซีเมนต์ที่แข็งตัว ได้แก่ การชะละลายและกำลังรับ

แรงอัดจากการศึกษาสรุปว่า ได้กำลังรับแรงอัดลดลงและการชะละลายของสารพิษเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณของเสียนในสัดส่วนเพิ่มขึ้นและเพิ่มอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาณของซีเมนต์ อัตราส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดของเสียดังกล่าว คือ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 โดยจะเหมาะกับของเสยที่เป็นสารอินทรีย์ (แคะเมียมและตะกั่ว) และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.35 เหมาะกับของเสยที่เป็นสารอินทรีย์ สำหรับวัสดุประสานที่เหมาะสมในการกำจัดแคะเมียม คือ ปูนซีเมนต์ ส่วนผงซีเมนต์ผงจากเตาเผาจะเหมาะกับของเสยที่เป็นสารอินทรีย์ (อัลคริน) ในขณะที่ปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบจะมีความเหมาะสมในการกำจัดสารพิษจากโรงชุบโลหะแบดเตอรี และในปีเดียวกันนี้ Bishop (1988) ได้ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากของเสยที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ โดยทำการทดสอบการชะละลายค่าความเป็นด่างจากก้อนของเสย 15 ครั้ง ซึ่งค่าความเป็นด่างที่ถูกชะล้างออกมาแต่ละครั้งจะเป็นตัวควบคุม pH ของการชะล้าง โดยการสะเทินกรดอะซิติกที่ใช้ในการทดลองให้เป็นกลาง และจากการศึกษาการชะละลายโลหะหนัก 3 ชนิด คือ แคะเมียม โครเมียม และตะกั่ว เพื่อศึกษาถึงกลไกของการยึดจับโลหะหนักในซีเมนต์แข็งตัว พบว่า แคะเมียมถูกชะละลายออกมามากกว่าโครเมียมและตะกั่ว ดังนั้นจึงสันนิษฐาน ได้ว่าแคะเมียมน่าจะอยู่ในรูป ของตะกอนไฮดรอกไซด์ และแทรกตัวอยู่ในรูพรุนของโครงสร้างภายในของซีเมนต์แข็งตัวหรือเกาะติดบนผนังของรูพรุนในซีเมนต์แข็งตัว ส่วนโครเมียมและตะกั่วพบว่ามีรูปแบบของการถูกชะละลายคล้ายคลึงกับซิลิกอน ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์และทราย ดังนั้นจึงเชื่อว่าโครเมียมและตะกั่วควรจะถูกยึดอยู่ในโครงสร้างของซิลิกอนหรืออาจมีส่วนรวมในปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ มากกว่าจะเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูพรุนหรือเกาะติดอยู่บนผนังของรูพรุน และจากการที่พบว่าการชะละลายของโครเมียมและตะกั่วจะเกิดขึ้นที่ pH ต่ำๆ ต่ำกว่า pH ในการชะละลายของแคะเมียม ทำให้อัตราการชะละลายของโลหะทั้งสองนี้มีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับที่คาดคะเนจากการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ จึงแสดงว่าโลหะทั้งสองนี้จะเกาะติดอย่างแข็งแรงภายในโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกาหรืออาจทำปฏิกิริยากับซิลิเกตเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกา และจะถูกชะละลายออกเมื่อโครงสร้างของซิลิกานี้ถูกทำลาย

ต่อมา Chang (1989) ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักด้วย กระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และซีเถ้าจากแกลบ เปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักระหว่างการใช้ซีเมนต์อย่างเดียวกับซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ 1:1 โดยใช้โลหะหนักจากการสังเคราะห์ ได้แก่ โครเมียม ทองแดง และปรอท จากผลการวิจัยพบว่ากลไกการยึดเกาะโลหะหนักในซีเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมชะละลาย พันธะการยึดเกาะระหว่างโลหะหนักกับซีเมนต์ที่แตกต่างกัน การชะละลายของโครเมียมในซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบจะสูงกว่าในซีเมนต์อย่างเดียว ในขณะที่การชะละลายของทองแดงและปรอทในซีเมนต์อย่างเดียวสูงกว่าซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ ทองแดงและ

ปรอทจะถูกยึดอยู่ในซีเมนต์ ในรูปพูนหรือดูดติดกับผนังของรูปพูน การชะละลายของทองแดงและปรอท จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่าง จากการวิเคราะห์น้ำสกัดพบว่าค่าความเป็นด่างจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าการชะละลายของทองแดงและปรอทจากการเปรียบเทียบสารที่ใช้กำจัดโลหะหนักทั้ง 2 วิธี พบว่าวิธีกำจัดโดยซีเมนต์อย่างเดียวจะเหมาะกับการกำจัดโครเมียม ส่วนการกำจัดโดยใช้ซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบเหมาะสำหรับกำจัดทองแดงและปรอท หลังจากนั้น Rijal (1990) ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดกากตะกอนน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยสารซีเมนต์ เพื่อกำจัดโลหะหนักในกากตะกอนน้ำเสีย ได้แก่ โครเมียม และสังกะสี สารซีเมนต์ที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ (อัตราส่วน 1:1) ทำการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักและกำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนผสมต่างๆ สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

การชะละลายโครเมียมในตัวอย่างที่หล่อจากปูนซีเมนต์จะต่ำกว่าที่หล่อจากปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบที่อัตราส่วนผสมระหว่างกากตะกอน:ซีเมนต์ น้อยกว่า 0.2 แต่เมื่ออัตราส่วนผสมมากกว่า 0.5 การชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบจะต่ำกว่าที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์ สังกะสีจะถูกยึดเกาะในปูนซีเมนต์ได้ดีกว่าในส่วนผสมปูนซีเมนต์กับซีเถ้าแกลบ อัตราส่วนผสมกากตะกอน:ซีเมนต์ ที่เหมาะสมกับสารซีเมนต์ทั้งสองชนิด คือ 0.5

กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม การชะละลายโลหะหนักเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกากตะกอนกำลังรับแรงอัดจากการทดสอบตัวอย่างที่หล่อจากปูนซีเมนต์ จะสูงกว่าที่หล่อจากปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ ในปีเดียวกันนั้น Jong (1990) ได้ทำการศึกษากระบวนการหล่อแข็งของเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนขาวผสมซีเถ้าแกลบ ซึ่งกากของเสียที่ทำการหล่อแข็งคือ โครเมียม ตะกั่ว ปรอท และสังกะสี พบว่าปริมาณการรั่วไหลของโลหะหนักเป็นสัดส่วนกับปริมาณกากตะกอนที่เพิ่มมากขึ้น และแปรผกผันกับระยะเวลาในการบ่ม กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยึดประสานมากกว่าก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนขาวผสมซีเถ้าแกลบยึดประสาน แต่ความสามารถในการตรึงกากตะกอนโลหะหนักน้อยกว่า จากการศึกษาทั้งสามกรณีที่กล่าวมาข้างต้น สรุปว่าปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ หรือปูนขาวผสมซีเถ้าแกลบนั้นมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดาสามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ในการยึดประสานเพื่อหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักได้ โดยมีการรั่วไหลของของเสียน้อยกว่าปูนซีเมนต์ และกำลังรับแรงอัดมีค่าสูงเพียงพอสำหรับการนำก้อนหล่อแข็งไปฝังกลบต่อไป

Peralta et al. (1992) ได้ทำการศึกษาโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาผสมกับเถ้าแกลบในอัตราส่วน 1:1 เพื่อหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักจากน้ำหล่อเย็นที่ประกอบด้วย As Ag Cd Cr Hg และ Pb ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กันพบว่า ถ้าใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวในการหล่อแข็ง

โลหะหนักจะรั่วไหลออกมามาก ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ แต่ถ้าใช้ปูนซีเมนต์ผสมร่วมกับเถ้าแกลบในปริมาณที่เท่ากันพบว่า จะสามารถกักเก็บโลหะหนักได้ดี และกลไกการกักเก็บโลหะหนักกับตัวยึดประสานนั้นเป็นกลไกทางกายภาพ โดยโลหะหนักจะถูกกักเก็บไว้ในโครงสร้างของซิลิกา (Silica matrix) ของซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว และความสามารถในการกักเก็บจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกอนในตัวยึดประสานมากขึ้น ในปีเดียวกัน Cheng and Bishop (1992) ได้ทำการศึกษาการกระจายของโลหะหนักในแท่งซีเมนต์ก่อนและหลังการทดสอบการชะละลายโดยใช้กรดอะซิติก โดยหล่อซีเมนต์เป็นรูปทรงกลมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และกากตะกอนโลหะหนักได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และอาร์เซนิก โลหะหนักจะถูกวิเคราะห์โดยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray (EDX) และ Wet digestion/AA Method ซึ่งจากการศึกษาพบว่า บริเวณผิวของตัวอย่างอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยกรดอะซิติก แคดเมียมส่วนใหญ่ในองค์ประกอบของซีเมนต์จะถูกชะละลายออกมาในขณะที่ซิลิกอน เหล็ก และอะลูมิเนียมยังคงเหลืออยู่ และสารดังกล่าวนี้จะมีคุณสมบัติในการดูดซับและดูดซับได้ดี ดังนั้นโลหะหนักที่ละลายออกไปจะถูกดูดซับที่บริเวณชั้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งช่วยป้องกันการชะละลายของโลหะหนักได้ และจากการวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างพบว่า การชะละลายของโลหะหนักจะเกิดเฉพาะที่บริเวณชั้นผิวเท่านั้น ปริมาณโลหะหนักในชั้นที่ไม่มีการชะละลาย ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับในช่วงก่อนการทดสอบการชะละลาย และจากผลการวิจัยในครั้งนี้ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซิลิกอน เหล็ก และอะลูมิเนียม มีคุณสมบัติในการดูดซับและดูดซับได้ดี ทำให้โลหะหนักถูกชะละลายออกมาได้น้อย และจากงานวิจัยเดิมที่ทราบว่าวัสดุพอลิซัลฟอนมีองค์ประกอบออกไซด์ของซิลิกอน เหล็ก และอะลูมิเนียมอยู่ในปริมาณสูง จึงส่งผลให้การนำวัสดุพอลิซัลฟอนมาใช้เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ทำให้สามารถลดการชะละลายของโลหะหนักได้ดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ต่อมา Hills et al., (1993) รายงานว่าการเพิ่มปริมาณของเสียในการหล่อแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้อัตราการเกิดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง โดยการเพิ่มกากของเสียจะทำให้สัดส่วนของปูนซีเมนต์ในการผสมลดลง ส่งผลให้เกิดการบวมและแตกร้าวภายในโครงสร้าง ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง และ Leangoon (1993) ได้ทำการศึกษาวัสดุประสานที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อนของของเสียที่นำมาจากโรงงานฟอกหนังซึ่งศึกษาโครเมียมและสารอินทรีย์และกากตะกอนจากโรงงานเซมิคอนดักเตอร์ศึกษาทองแดง ตะกั่ว และดีบุก วัสดุประสานที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เถ้าแกลบ เถ้าลอย และ ซิลิกาฟูม ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

ของเสียที่นำมาจากโรงงานฟอกหนังใช้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์:เถ้าแกลบ:เถ้าลอย เท่ากับ 0.7:0.1:0.1 โดยน้ำหนักสามารถทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราส่วน กากตะกอนต่อ วัสดุประสาน 0.64 โดยน้ำหนัก และของเสียจากโรงงานเซมิคอนดักเตอร์ ใช้อัตราปูนซีเมนต์ต่อเถ้า แกลบเถ้าลอยเท่ากับ 0.7:0.1:0.2 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสาน 1.37 โดย น้ำหนัก

Chi Lo et al., (2000) ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์เกี่ยวกับพฤติกรรมกร้าวไหล และสภาพทางเคมีของก้อนหล่อแข็งของเสียจากอุตสาหกรรม ในการศึกษาจะใช้การทดสอบ การร้าวไหลของโลหะหนักโดยวิธี TCLP และ DLT และการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดย วิธี SEM/EDS และ XRD จากผลของการทดสอบ สำหรับก้อนหล่อแข็งที่ใช้ OPC เป็น วัสดุยึดประสานมีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายออกมาน้อยกว่าก้อนหล่อแข็งที่ใช้ OPC ร่วมกับ PFA จากการวิเคราะห์ของเสียที่หล่อแข็งโดยวิธี SEM/EDS และ XRD พบว่าสังกะสีจะไป หน่วงปฏิกิริยาไฮดรชันของ OPC และ PFA ให้เกิดช้าลง และเมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยใช้ วิธี XRD จะพบสารประกอบโครงผลึกตัวใหม่ คือ ZnO อาจเกิดมาจากการเติมปูนซีเมนต์ลงไปผสม กับตะกอนสังกะสี ซึ่งทำให้สังกะสีเกิดการเปลี่ยนแปลงจากรูป Amorphous ไปเป็นรูป Crystals และจากการวิเคราะห์โดยวิธี XPS จะพบปริมาณสังกะสีอยู่ที่ผิวหน้าของของเสียที่ถูกนำไป หล่อแข็ง

Asavapisi et al., (2003) ได้ศึกษาพฤติกรรมกราะละลายของโลหะหนักจากก้อน หล่อแข็งของเสียประเภทสังกะสี-โซดาไนท์ โดยใช้วิธีการทดสอบคือ TCLP DLT และการควบคุม ค่า pH โดยค่า pH ที่ใช้คือ 4.0 8.0 และ 11.0 ของสารละลาย วัสดุยึดประสานที่ใช้ในการ หล่อแข็งคือ OPC และ OPC กับร้อยละ 10 ของ Pulverized Fuel Ash (PFA) และใช้ค่า w/s=0.5 จากการศึกษาพบว่าจากวิธี TCLP Cr ถูกชะละลายออกมามากที่สุดแต่ไม่เกินค่ามาตรฐานของ US.EPA ส่วนในภาวะที่ใช้การทดสอบแบบ DLT สารโลหะ Zn Fe และ Cr จะถูกชะละลายใน 0.1 N ของกรดอะซิติกมากกว่าในฝนกรดสังเคราะห์และใน Deionized Water และในการควบคุม pH การชะละลายของโลหะหนักใน pH=4 จะมีมากที่สุด ต่อมา Qian et al., (2003) พบว่าการก่อตัว และการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี Zn²⁺ จะขึ้นอยู่กับปริมาณของ Zn²⁺ ที่มีอยู่ใน ก้อนหล่อแข็ง โดยที่ร้อยละ 0.5 ของ Zn-AAS จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 10-2 และที่ร้อย ละ 2 ของ Zn²⁺ มีกำลังรับแรงอัดที่ 7-14 วันเท่ากับ 2-3 เมกะปาสกาล และที่ 28 วัน มีกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 9.5 เมกะปาสกาล ส่วนการทดสอบ TCLP leaching พบว่าเกิดการร้าวไหลของ Zn²⁺ มาก ในช่วงวันแรกและค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ ส่วนที่ร้อยละ 2 ของ Zn-AAS ที่ 28 วัน ยังมีค่าการร้าวไหล มากเกินค่ามาตรฐาน แต่ในความเป็นจริงแล้ว Zn²⁺ มากกว่าร้อยละ 99.99 ถูกตรึงอยู่

ใน AAS matrix เนื่องจากร้อยละ 2 ของ Zn^{2+} มีปริมาณสูงถึง 60,000 พีพีเอ็ม ที่มีอยู่ในก้อนหล่อแข็งด้วยกลไกการห่อหุ้มอนุภาคทางกายภาพ (Physical encapsulation) ทำให้สามารถตรึง Zn^{2+} ไว้ได้ในความเข้มข้นสูงส่วนกลไกทางเคมีนั้น ซึ่งถือเป็นกลไกที่สำคัญนั้นเกี่ยวข้องกับการก่อตัวของ Zinc silicate gel ซึ่งไม่ละลายน้ำ การเคลื่อนตัวของ Zn^{2+} เข้าไปใน C-S-H และการตกตะกอนของ Calcium zincate ซึ่งไม่ละลายน้ำทำให้เกิดการตรึง Zn^{2+} อยู่ใน AAS matrix และส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดและการรั่วไหลของ Zn^{2+}

สำหรับในประเทศไทยมีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการหล่อแข็งกาตะกอนเพื่อเก็บกักสารโลหะหนักดังนี้

กฤษณา ผากานนท์ (2537) ได้ทำการศึกษาการกำจัดกาตะกอนนิกเกิลจากขบวนการชุบโลหะด้วยวิธีการหล่อแข็ง โดยใช้วัสดุประสานเป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าแกลบ และเถ้าลอยลิกไนต์ และจากผลการศึกษาพบว่า วัสดุประสานทุกชนิดมีความสามารถรับกำลังอัดได้สูงกว่า 14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีการชะละลายของนิกเกิลต่ำกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานต่อทรายเป็น 1:2 และปริมาณกาตะกอนร้อยละ 10 และยังพบว่า เมื่อวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์อย่างเดียวจะมีการชะละลายมากกว่าเมื่อวัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาพพบว่า ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์จะมีโครงสร้างอัดตัวแน่นกว่าและมีพื้นผิวแน่นกว่าวัสดุประสานที่เป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียว และเป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบ

นฤมิตร คินีมาน (2538) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอไซด์ โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ จากผลการทดลองพบว่า ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 50 เป็นวัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะหนักได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ล้วน และจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน ตะกอนโลหะหนัก และตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนโดยใช้เครื่อง SEM ที่ขนาดกำลังขยาย 200 และ 2000 เท่า พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้เป็นวัสดุประสานในการทดลอง ผงปูนมีขนาดระหว่าง 0.025-0.005 มิลลิเมตร และมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ในขณะที่เถ้าลอยลิกไนต์มีรูปร่างค่อนข้างกลมและมีพื้นผิวเรียบ มีขนาดที่แตกต่างกันระหว่าง 0.005-0.075 มิลลิเมตร และรูปร่างของตะกอนโลหะหนักจะมีลักษณะคล้ายผลึกที่มีขนาดแตกต่างกันมีรูปร่างไม่แน่นอน ส่วนวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์อย่างเดียวที่แข็งตัวเมื่อผสมน้ำจะมีรูปร่างลักษณะเป็นผลึกแผ่นเรียบเกาะยึดตัวกันอย่างหนาแน่น ในขณะที่วัสดุประสานที่เป็นปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 50 ที่แข็งตัวเมื่อผสมน้ำจะเห็นลักษณะทรงกลมของเถ้าลอยถูกยึดจับด้วยผลึกของปูนซีเมนต์ และมีผลึกรูปร่างคล้ายเข็มเกิดขึ้นอยู่ทั่วไป จากการศึกษาพบว่า

ตะกอนโลหะหนักจะฝังตัวอยู่ในปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยจะเห็นอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีลักษณะค่อนข้างกลมปะปนอยู่ในโครงสร้างที่ซับซ้อนของปูนซีเมนต์

ชูชัย เทียวประสงค์ (2539) ได้ทำการศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมโดยใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 35 เพื่อหาปริมาณสูงสุดที่เมื่อทำการหล่อแข็งแล้วสามารถนำไปฝังกลบได้อย่างปลอดภัย จากผลการศึกษาพบว่า ก้อนหล่อแข็งที่ผ่านการบ่มขึ้นภายใน 28 วัน สามารถรับปริมาณโครเมียมได้สูงสุดเท่ากับ 40 กรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมของตัวยึดประสานซึ่งให้ค่าความสามารถรับกำลังอัดและปริมาณการรั่วซึมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย (2539) ได้ทำการศึกษาการทำตะกอนโลหะซัลไฟด์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นตัวประสานซึ่งมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคืออัตราส่วนผสมของโซเดียมซัลไฟด์เพื่อให้ได้ตะกอนที่เหมาะสม อัตราส่วนผสมของกากตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานและการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาบ่มโดยทำการทดสอบโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่โครเมียม โปรทและเหล็ก การวิจัยนี้ นำเอากากตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ซีโอดี มาหาสัดส่วนการผสมโซเดียมซัลไฟด์เพื่อให้ได้ตะกอนโลหะซัลไฟด์ที่เหมาะสม จากนั้นนำไปทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1) การเพิ่มสัดส่วนการเติมสารซัลไฟด์ลงไปในตะกอนโลหะหนักก่อนการทำให้เป็นก้อนทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงและการถูกชะละลายของโครเมียม โปรทและเหล็กมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน สัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีซึ่งทำให้ค่าความเข้มข้นของโปรทในน้ำสกัดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้สัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 3 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีจะทำให้ค่าความเข้มข้นของโปรทในน้ำสกัดต่ำมาก

2) อัตราส่วนของกากของเสียต่อวัสดุซีเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.25

3) ระยะเวลาบ่มมีผลต่อลักษณะทางกายภาพคือกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นและค่าความสามารถซึมน้ำได้ลดลง รวมทั้งความเข้มข้นของโครเมียมและโปรทในน้ำสกัดลดลงเช่นเดียวกัน

4) สัดส่วนการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์และอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานที่ใช้กับตะกอนซีโอดีสามารถนำไปใช้กับตะกอนที่ได้จากโรงงานเคลือบแก้วและตะกอนโลหะหนักจากโรงงานกำจัดกากอุตสาหกรรมเสมอค่าได้โดยตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแล้วผ่านเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนและมาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

5) ประสิทธิภาพในการทำให้เป็นก้อนของตะกอนโลหะหนักที่อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานเท่ากับ 0.25 ซึ่งสำหรับสัดส่วนการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีเท่ากับร้อยละ 60.01 และ 91.40 สำหรับโครเมียมและปรอทตามลำดับ ทั้งนี้ความเข้มข้นของโครเมียมและปรอทในน้ำสกัดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรมในทั้งสองสัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์

ประทีป เลียงเพ็ชร (2539) ศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนตะกั่ว โดยใช้ตัวยึดประสาน 3 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ซิลิกา จีเถ้าแกลบ และจีเถ้าลอย ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ซิลิกาต่อจีเถ้าแกลบ จีเถ้าลอย ร้อยละ 30 50 และ 70 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการตรึงกากตะกอนตะกั่ว คือ ปูนซีเมนต์ซิลิกาผสมจีเถ้าลอยร้อยละ 70 และอัตราส่วนน้ำต่อตัวยึดประสานเท่ากับ 0.4 ซึ่งจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งสูงเกินเกณฑ์มาตรฐาน

วราภรณ์ คุณวานากิจ และคณะ (2542) ได้ทำการทดลองนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะมาใช้เป็นวัสดุผสมกับปูนซีเมนต์ในการหล่อแข็งกากตะกอนเมอร์คิวริกซัลไฟด์ของน้ำทิ้งที่ได้จากการตกตะกอนน้ำทิ้งในการวิเคราะห์ซีไอดี พบว่า ฝุ่นทรายดำ ซึ่งเป็นกากของเสียที่เกิดขึ้นจากระบบกำจัดฝุ่นแบบถุงกรอง มีสมบัติทางเคมีคล้ายกับเถ้าลอย Class F สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมในการหล่อแข็งได้ โดยค่าความสามารถรับกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มนานขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณฝุ่นทรายดำ ในส่วนผสมมากขึ้นค่าความสามารถรับกำลังอัดจะลดลง และพบว่าที่สัดส่วนของฝุ่นทรายดำ ต่อปูนซีเมนต์เป็น 80:20 สามารถตรึงปรอทได้สูงถึง 50.29 ไมโครกรัมต่อกรัมก้อนหล่อแข็ง ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาฝุ่นทรายดำ ซึ่งจัดว่าเป็นกากของเสียเหลือใช้ก็ได้ถูกนำมาศึกษาวิจัยมากขึ้นเพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยใช้คุณสมบัติปอซโซลานมาเป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์

สุวิมล อัสวพิศิษฐ และดวงฤดี โชติกลาง (2544) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมมา 3 ชนิด ได้แก่ ตะกรันเตาหลอมเหล็ก เถ้าลอยลิกไนต์ และจีเถ้าแกลบ โดยทำการศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะแรกของซีเมนต์ที่เตรียมจากปูนขาวและกากของเสียเหล่านี้ ทั้งในสถานะที่มีและไม่มีสารกระตุ้น ซึ่งในการศึกษาจะใช้อัตราส่วน 20:80 และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเคมีทั้ง 2 ชนิด คือ โซเดียมซิลิเกต และ โซเดียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วนร้อยละ 0 4 5 และ 6 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า ทั้งโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะแรกของปอซโซลานซีเมนต์ได้ดี โดยซีเมนต์ที่เตรียมจากปูนขาวและเถ้าลอยลิกไนต์จะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าซีเมนต์ที่เตรียมจากตะกรันเตาหลอมเหล็กและที่เตรียมจากจีเถ้าแกลบ เนื่องจากซิลิกาออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าลอยลิกไนต์นั้นอยู่ในรูปที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาคือว่าตะกรันจากเตาหลอมเหล็กและจีเถ้าแกลบ

ชาตินัย โคนาวิท (2544) ศึกษาผลของซิลิกาฟุ้งควบแน่นและตะกรันเตาหลอมเหล็กต่อคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของก้อนหล่อแข็งของเสียดที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานและศึกษาความสามารถในการรองรับตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการชุบโลหะได้แก่ ความสามารถรับกำลังอัด ความคงทนของก้อนหล่อแข็งของเสียดต่อการกัดกร่อนโดยสารละลายกรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 0.2 นอร์มัล ความคงทนต่อสภาวะเปียกและแห้งและการร้าวไหลของโลหะหนัก

จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ผสมเพิ่มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของซิลิกาฟุ้งควบแน่นและตะกรันเตาหลอมเหล็กในส่วนผสมเพิ่มขึ้น และความสามารถรับกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มตัวอย่างนานขึ้นแต่ในอัตราที่ลดลง โดยซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟุ้งควบแน่นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก มีความสามารถรับกำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ ขณะที่ซีเมนต์เพสต์ผสมซิลิกาฟุ้งควบแน่นร้อยละ 5 และตะกรันเตาหลอมเหล็กร้อยละ 20 โดยน้ำหนักมีความสามารถรับกำลังอัดใกล้เคียงซีเมนต์เพสต์

ความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียดที่มีตะกอน โลหะหนักในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีตะกอนโลหะหนักอยู่ในส่วนผสม เนื่องจากโลหะหนักเข้ายับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ผลที่ตามมาคือ คุณภาพก้อนหล่อแข็งของเสียดที่ใช้ซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุยึดประสานใกล้เคียงกับก้อนหล่อแข็งของเสียดที่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสาน การทดสอบความคงทนต่อสภาวะเปียกและแห้ง และการร้าวไหลของโลหะหนักในระยะสั้น ด้วยวิธี TCLP ของก้อนหล่อแข็งของเสียดที่ระดับตะกอนโลหะหนักร้อยละ 20 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ U.S. EPA

สุรชาติพิ์ อินทวงศ์ (2545) ศึกษาวิธีการทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งจากตะกอนของโรงชุบโลหะที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุยึดประสาน ใช้กากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLD สารละลายที่สกัดได้มีค่าความเข้มข้นของโครเมียมต่ำกว่ามาตรฐานที่ U.S. EPA กำหนด สังกะสีและเหล็กไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานแต่อยู่ในระดับต่ำกว่า 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร และ 1.5 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ส่วนการทดสอบด้วยวิธี DLT ภายได้สภาวะการชะละลายที่ไม่รุนแรง (ค่า pH =5-6) ความเข้มข้นสะสมของโครเมียมและเหล็กในน้ำชะละลายมีค่า 0.4 มิลลิกรัม/ลิตร และ 3-4 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ส่วนสังกะสีตรวจไม่พบ กรณีสภาวะการชะละลายที่รุนแรง (ค่า pH =3) โลหะหนักทั้ง 3 ชนิดจะถูก

จะออกมามากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดในสารละลายที่สกัดได้จากตัวอย่างที่บด จะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่บด

ศิริภัทร์ นาคศรีชุ่ม (2545) ได้ทำการศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนโรงชุบโลหะ ประเภทสังกะสี-ไซยาไนด์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุยึดประสาน ใช้กากตะกอนของเสียร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน และเถ้าลอยลิกไนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าก่อนหล่อแข็งอัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์และกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 20 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด และความสามารถในการกักเก็บโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งโดยวิธี TCLP เมื่อใช้ส่วนผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 20 และกากของเสียร้อยละ 10 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมามีปริมาณต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทดสอบและด้านเศรษฐกิจแล้ว จึงสรุปว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการหล่อแข็งกากตะกอนโรงชุบโลหะ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นตัวยึดประสานคืออัตราส่วนที่มีการแทนที่เถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 30 และมีกากตะกอนของเสียร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ต่อมา พิณชุกรณ์ ชอบเที่ยงธรรม (2546) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฝุ่นทราย คามาใช้เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบโครเมียม พบว่าค่าการชะละลายโครเมียมสูงขึ้นเมื่อปริมาณกากตะกอนในก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุยึดประสานปูนซีเมนต์ เถ้าลอยลิกไนต์ และฝุ่นทรายคือร้อยละ 20 24 และ 56 ตามลำดับ กากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ทำให้ก้อนหล่อแข็งมีค่ารับกำลังอัดและควบคุมการชะละลายโครเมียมจากกากตะกอนโลหะผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ขณะที่ จิตตินิ เจริญจิตต์ ศึกษาการหล่อแข็งโดยการใช้น้ำปูนขาว และซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานที่อัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 45:55 55:45 และ 65:35 ในสภาวะที่มีสารกระตุ้น ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และปูนซีเมนต์ (OPC) ร้อยละ 0 2 4 6 และ 8 และทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด อัตราส่วน 45:55 ในสภาวะที่มีสารกระตุ้นโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 8 มีการพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีในช่วง 28 วันของการบ่ม เมื่อเติมกากตะกอนโรงชุบโลหะประเภทสังกะสี-ไซยาไนด์ ลงไปร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน ก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในสภาวะที่มีโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 8 ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดคือ 111.6 และ 60.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ และจากเกณฑ์มาตรฐานการฝังกบเมื่อครบ 28 วัน พบว่าในสภาวะที่ใช้สารกระตุ้นโซเดียมซิลิเกตร้อยละ 8 ก้อนหล่อแข็ง

สามารถรองรับกากตะกอนโลหะหนักได้ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และในสถานะที่ใช้สารกระตุ้นโซเดียมคาร์บอเนตสามารถรองรับกากตะกอนโลหะหนักได้ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักค่าความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำชะตามวิธี TCLP เกินค่ามาตรฐานที่ปริมาณกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่ใช้โซเดียมซิลิเกตร้อยละ 8 และร้อยละ 30

ยุทธพงษ์ พิจาร โขติ (2549) ศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนจากโรงงานชุบโลหะโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยการนำเถ้าลอยลิกไนต์ปริมาณ ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และกากตะกอนจากโรงงานชุบโลหะ ปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก แล้วทำการหล่อแข็งก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร สูง 5.0 เซนติเมตร สำหรับทดสอบหาความสามารถในการรับกำลังอัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร สูง 2.5 เซนติเมตร สำหรับทดสอบความสามารถในการเก็บกักโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง ที่อายุการบ่ม 3 7 และ 14 วัน จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการหล่อแข็งกากตะกอนจากโรงงานชุบโลหะโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ อัตราส่วนที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักและมีกากตะกอนของเสียร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถรับกำลังอัดและเก็บกักโลหะหนักผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ U.S. EPA

2.4 วัสดุยึดประสาน

2.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

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

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภทตามลักษณะการใช้งาน ดังนี้ ประเภทที่ 1 เรียกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement หรือ Standard Portland Cement) ปูนชนิดนี้เป็นชนิดมาตรฐานสำหรับงานก่อสร้างปกติทั่วไป เช่น งานคอนกรีตเสริมเหล็กในงานอาคาร สะพาน ถนน สนามบิน และอื่น ๆ

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) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษที่มีอัตราความร้อนต่ำขณะเดียวกันก็ให้กำลังเพิ่มขึ้นช้า ๆ เหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างเขื่อนและงานที่ใช้คอนกรีตหลามาก ๆ

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

2.4.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO SiO_2 Al_2O_3 Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันเป็นร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์ และออกไซด์รอง ได้แก่ MgO Na_2O Ti_2O P_2O_5 และยิปซัม เมื่อออกไซด์หลักรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด จะเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิดคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 2.4

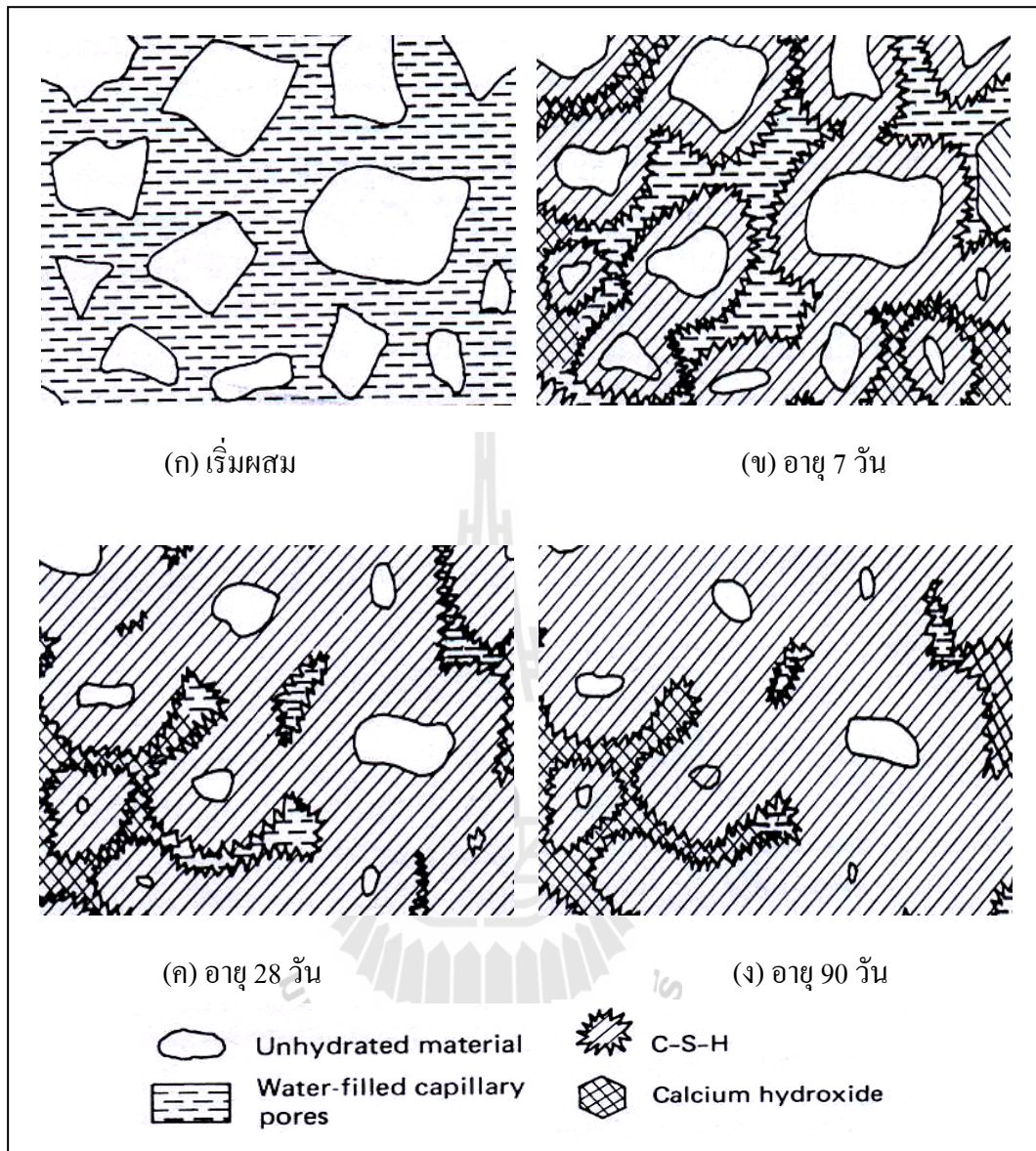
ตารางที่ 2.4 ปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ

สารประกอบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์				
	ประเภท1	ประเภท2	ประเภท3	ประเภท4	ประเภท5
ไตรแคลเซียมซิลิเกต(C_3S)	45	44	53	28	38
ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)	27	31	19	49	43
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)	11	3	11	4	4
เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)	8	13	9	12	9
อื่น ๆ	3.6	3.2	4.7	3.4	3.2

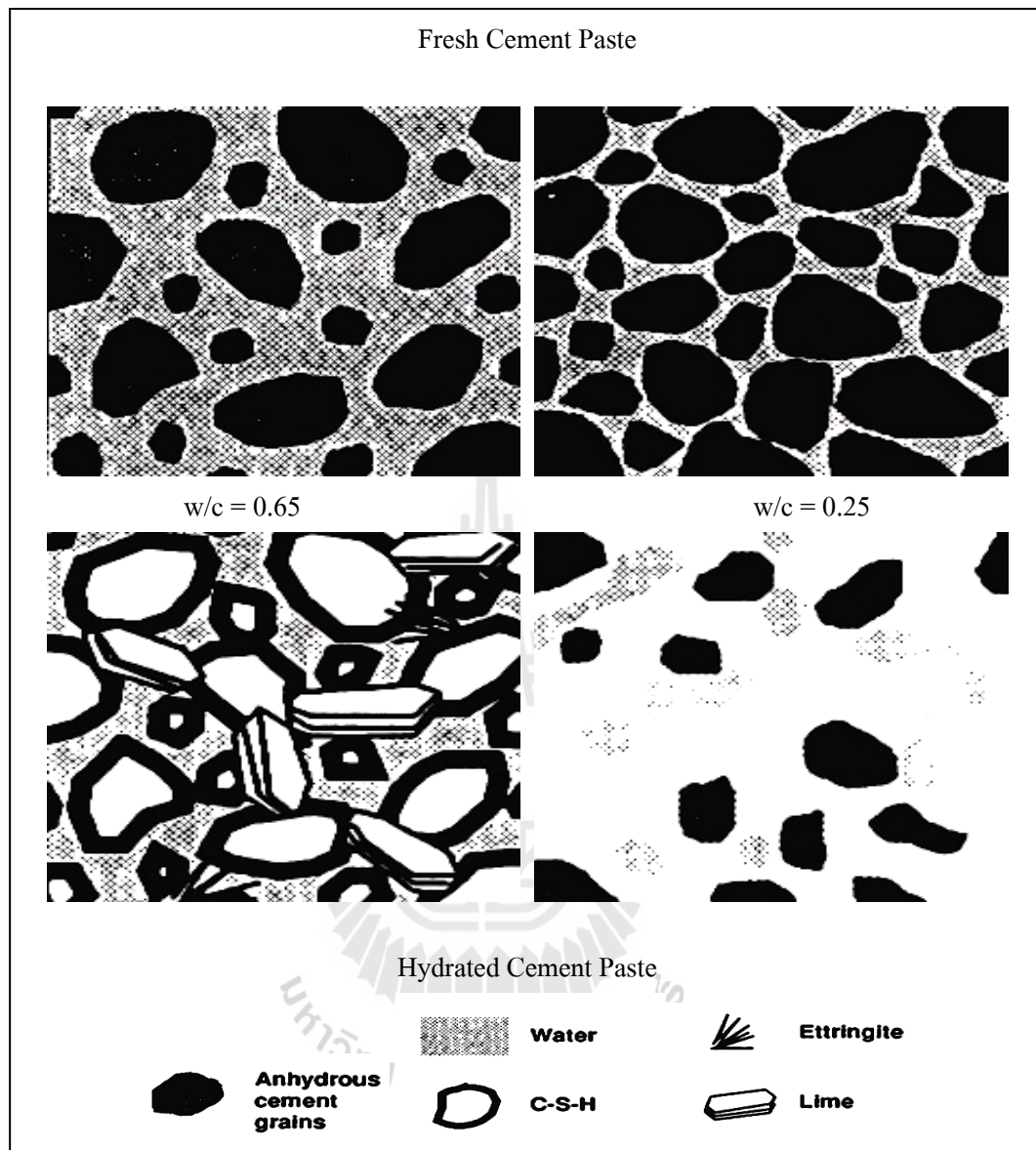
เมื่อเม็ดปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้สารประกอบเกิดขึ้นใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตหรือเอททริงไคต์ (Etringite) และสารประกอบอื่นอีกไม่มาก นอกจากนี้ซีเมนต์เพสต์ยังประกอบด้วยเม็ดปูนซีเมนต์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาโพรงคาпилลารี (Capillary Pore) และโพรงอากาศ (Air Void) ด้วย

การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ เริ่มต้นจากเม็ดปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งจะขยายตัวเข้าไปในโพรงหรือช่องว่าง ผลผลิตไฮเดรชันเรียกรวม ๆ ว่า ซีเมนต์เจล (Cement Gel)





รูปที่ 2.3 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ (Mindess and Young, 1981)



รูปที่ 2.4 ผลกระทบของ w/c ต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์
(Aitcin and Baalbaki, 1994)

รูปที่ 2.5 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ต่อโครงสร้างระดับอนุภาคของซีเมนต์เพสต์ โดยพิจารณาที่ปริมาตรเท่ากัน พบว่าที่ w/c=0.65 อนุภาคของปูนซีเมนต์จะอยู่ห่างกัน เมื่อ w/c ลดลงเท่ากับ 0.25 อนุภาคปูนซีเมนต์จะอยู่ใกล้กัน เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาจะอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ทำให้โครงสร้างระดับอนุภาคของซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้นที่ระยะเวลาเท่ากันพิจารณา w/c=0.65 การพัฒนา

ผลิตผลจากปฏิกิริยาให้เชื่อมโยงถึงกันต้องใช้เวลานาน มีปริมาณน้ำเกินความจำเป็นในการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ ส่วนประกอบของน้ำที่เหลือจะเป็นตัวกลางในการนำสารอันตรายเข้ามาทำอันตรายต่อคอนกรีต และถ้ามีส่วนเกินเหลือก็ทำให้เกิดโพรงในคอนกรีต ทำให้ของเหลวหรือก๊าซที่สามารถทำอันตรายกับคอนกรีตซึมเข้ามาในโพรงของคอนกรีต และทำปฏิกิริยากับสารประกอบในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตเสื่อมสภาพและความทนทานลดลง

โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นของแข็ง ส่วนของช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ (Voids) และน้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว

1) ของแข็ง ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) เป็นสารที่ทำให้กำลังกับคอนกรีต มีปริมาณมากที่สุด ในซีเมนต์เพสต์ 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 ซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสถานะแข็งประกอบไปด้วยสารต่าง ๆ ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ การสูญเสียน้ำในซีเมนต์เพสต์จะส่งผลทำให้ซีเมนต์เพสต์มีการหดตัว (Shrinkage) น้ำในซีเมนต์เพสต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้วสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทตามความยากง่ายในการกำจัดออกไป 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 เรียกว่าน้ำอิสระ (Free Water) เมื่อนำน้ำอิสระออกจากเพสต์แล้วจะไม่ทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลง ส่วนน้ำชนิดที่ 2 เป็นน้ำที่เกิดจากแรงดึงคาปิลลารี (Capillary Tension) ในช่องว่างขนาด 5-50 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อน้ำชนิดนี้ระเหยออกไปจะส่งผลทำให้ซีเมนต์เกิดการหดตัว

- น้ำที่ถูกดูดซับ (Adsorbed Water) คือ น้ำที่อยู่ใกล้กับผิวสัมผัสของของแข็งซึ่งถูกยึดไว้ด้วยแรงดึงดูด (Attractive Force) ของของแข็งที่อยู่ในเพสต์ โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับอยู่รอบๆ ผิวสัมผัสของของแข็งในเพสต์ เรียกแรงยึดเหนี่ยวนี้ว่าแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) น้ำในส่วนนี้จะเรียงตัวกันไม่เกิน 5 โมเลกุล (ความหนารวมไม่เกิน 1.3 นาโนเมตร) น้ำส่วนนี้ถูกขับออกโดยทำให้เพสต์แห้งเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าประมาณร้อยละ 30 การสูญเสีย น้ำในส่วนนี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัว

- น้ำระหว่างชั้น (Interlayer Water) เป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของ C-S-H เนื่องจากโครงสร้างของ C-S-H มีลักษณะเป็นชั้น ๆ โดยแรงดึงดูดแต่ละชั้นเป็นแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน น้ำส่วนนี้อยู่ใน Gel Pore ของซีเมนต์เพสต์ (มีขนาดเล็กกว่า 2.6 นาโนเมตร) น้ำส่วนนี้ถูกยึดไว้อย่างแข็งแรงโดยผิวของของแข็งในช่องว่าง การกำจัดน้ำในส่วนนี้ต้องใช้ความร้อนสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 11 โครงสร้างของ C-S-H จะหดตัวเมื่อสูญเสียน้ำดังกล่าวไป

- น้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี (Chemically Combined Water) เป็นน้ำที่เป็นส่วนประกอบของผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Product) น้ำในส่วนนี้น้ำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี การกำจัดน้ำในส่วนนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส เพื่อให้ซีเมนต์เพสต์และน้ำสลายตัวไปเป็นสารอื่นหรือที่เรียกว่าการสลายตัวของสาร (Decomposition) เช่น การสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ CaO กับน้ำ (H₂O)

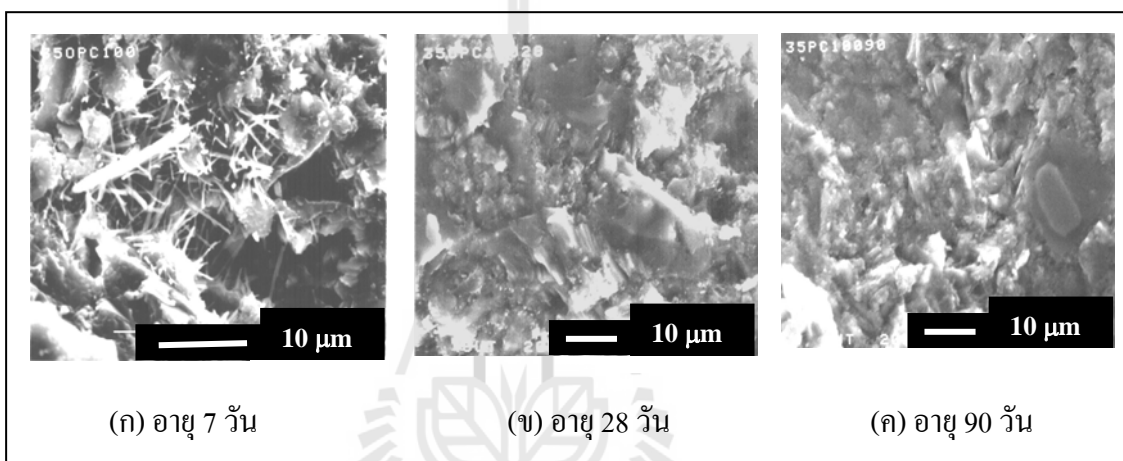
เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100-400 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำประเภทต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์จะระเหยไป แต่เมื่อเผาซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นระหว่าง 400-1,000 องศาเซลเซียส สารประกอบต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์จะสลายตัวไปเป็นสารประกอบอื่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำลงหรือเป็นธาตุดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์

(ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และคณะ, 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 2.5 แสดงภาพถ่ายขยายโดย SEM ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ พบว่าที่อายุ 7 วัน ดังรูปที่ 2.5 (ก) โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์มีช่องว่างหรือโพรงมาก พบเอทริงไคต์มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายเข้าไปในช่องว่างที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 2.5 (ข) ผลิตผลไฮเดรชันประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรด์ และส่วนประกอบย่อยอื่นอีกไม่มาก ขยายเข้าไปในโพรงหรือช่องว่างมากขึ้นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้น โดยเฉพาะที่อายุ 90 วัน ดังรูปที่ 2.5 (ค) ซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่แน่นยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายขยายโดย SEM ของซีเมนต์เพสต์ (ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ 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) โพรงคาปิลลารี (Capillary Pores) เป็นส่วนของช่องว่างของน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมไม่แน่นอน (Irregular Shape) ปริมาตรและขนาดของโพรงคาปิลลารีขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และการเกิดปฏิกิริยา ในอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำ ($w/c < 0.35$) โพรงคาปิลลารีมีขนาดอยู่ในช่วง 10-50 นาโนเมตร ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูง ($w/c > 0.50$) โพรงคาปิลลารีมีขนาดใหญ่ถึง 3-5 ไมโครเมตร โพรงคาปิลลารีที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตรมีผลต่อกำลังและการซึมผ่านของคอนกรีต ส่วนโพรงคาปิลลารีที่มีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร ส่งผลต่อการหดตัวและการคืบของคอนกรีต

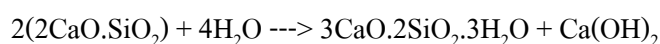
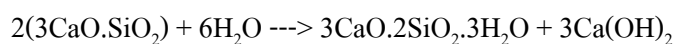
3) โพรงเจล (Gel Pores) เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของซีเมนต์เจล เป็นโพรงที่มีขนาดเล็กมาก คือ มีขนาดต่ำกว่า 10 นาโนเมตร โดย Powers คำนวณว่าโพรงเจลระหว่างโครงสร้างของ C-S-H มีขนาดเฉลี่ย 18°A ($1^\circ \text{A} = 10^{-10}$ เมตร) Feldman and Seredar พบว่าช่องว่างระหว่างโครงสร้างของ C-S-H มีขนาดตั้งแต่ 5 ถึง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

2.4.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ผลที่ได้ก็จะแตกต่างกันในช่วงแรกของปฏิกิริยาตามชนิดของสารประกอบของปูนซีเมนต์ ดังนี้ (พิณชูกรณ์ ชอบเที่ยงธรรม, 2546)

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S)

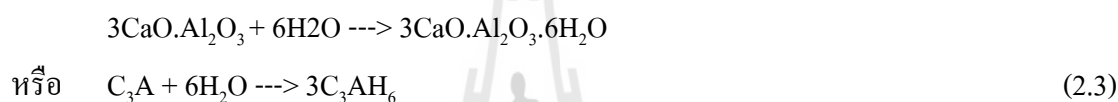
แคลเซียมซิลิเกตจะทำ ปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสาน ดังสมการ



C-S-H ที่ได้จะมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันไป โดยจะขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ C-S-H ที่ได้จะทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นวุ้น (Gel) มีสมบัติเป็นตัวประสานเหนียวคล้ายกาว ก่อแข็งตัว และเกาะยึดแน่นกับวัสดุผสม สำหรับ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาจะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนและการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ และ Ca(OH)_2 อาจทำปฏิกิริยาต่อกับวัสดุที่มีธาตุซิลิกาและอะลูมิเนียมผสมอยู่ เช่น วัสดุปอซโซลาน

2) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ



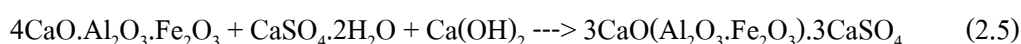
เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วจนเกินไป จึงใส่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะไปทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการ



เราจะเรียก แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ว่า Ettringite โดยชั้นของ Ettringite จะหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตเป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้ไปหยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite ก็จะทำให้เกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาณของของแข็ง ซึ่งแรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A ขึ้นมาอีก แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยา ก็จะเกิด Ettringite ใหม่เข้ามาแทนที่โดยจะไปหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A อีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่งไอออนซัลเฟตมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite ก็จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

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



2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (ประทีป เลียงเพ็ชร, 2539)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ปัจจัยดังกล่าว คือ

1) อายุของเพสต์ ยกเว้นช่วงที่ไม่มีปฏิกิริยา (Dormant Period) อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดมากที่สุดในช่วงแรก และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป จนถึงช่วงสิ้นสุดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4

2) องค์ประกอบของซีเมนต์ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน

3) ความละเอียดของซีเมนต์ พบว่าซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำได้มากเป็นผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในช่วงแรกของปฏิกิริยา

4) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยพบว่าในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะยังไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่จะพบว่าในช่วงหลัง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง จะทำให้ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

5) อุณหภูมิ พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์

2.5 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) หมายถึงวัสดุที่มีธาตุซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่เลย แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานอยู่ในรูปของผงละเอียดและมีความชื้นเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ และเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานคล้ายปูนซีเมนต์ (ASTM C618-00, 2001) คือ มีความแข็งแรงยึดเกาะได้ดี เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) วัสดุปอซโซลานที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ เถ้าถ่านหิน ที่พบได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าภูเขาไฟ ซิลิกาฟูม และซีโอไลต์ เป็นต้น

สิ่งสำคัญประการหนึ่งของวัสดุปอซโซลานคือ ต้องมีความละเอียดสูงจึงจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ดีและรวดเร็ว

ประเภทของวัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม (Metha et al., 1986) คือ

1) วัสดุปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) คือวัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ และหินพูน (Pumicite) เป็นต้น

2) วัสดุปอซโซลานที่ได้สังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) คือวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ดินเหนียว หินเชล หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ และถ้ำลอย เป็นต้น

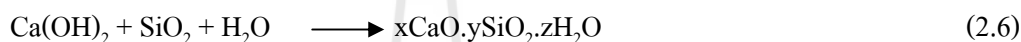
2.5.1 การนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชาตินัย โคสนาวิทย์, 2544)

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ คือ ผลผลิตส่วนหนึ่งที่ได้จากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งถูกปล่อยให้เป็นอิสระในระหว่างการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ตามทฤษฎีพื้นฐานปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบซิลิกาในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระเพื่อที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์ สำหรับปฏิกิริยานี้ซิลิกาต้องอยู่ในรูป อัมมูเนียน (Amorphous) ถ้าอยู่ในรูปผลึกจะมีผลต่อปฏิกิริยาช้ามาก ดังนั้นอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดจึงขึ้นอยู่กับความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลาน โดยทั่วไปอัตราส่วนของวัสดุปอซโซลานที่ใช้จะอยู่ระหว่างร้อยละ 15-50 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ทั้งหมด

การประยุกต์ใช้วัสดุปอซโซลานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัด โดยอนุภาคของวัสดุปอซโซลานซึ่งมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์ เมื่อแพร่กระจายเข้าไปในเพสต์แล้วจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลаниค ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แทรกตามอนุภาคของเม็ดปูนซีเมนต์ ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้เพสต์มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มากขึ้นและเพิ่มความหนาแน่นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต นอกเหนือจากปฏิกิริยาปอซโซลаниคแล้วยังเกิดการแทรกซึมของสารปอซโซลานที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุนด้วย

2.5.2 ปฏิกริยาปอซโซลาน

ปฏิกริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกริยาไฮเดรชัน โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดจากปฏิกริยาไฮเดรชัน เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ ซิลิกาฟูม และซีโอไลต์ เป็นต้น ผลที่ได้จากปฏิกริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งเป็นสารที่ให้กำลังแก่คอนกรีตเช่นเดียวกับที่ได้จากปฏิกริยาไฮเดรชันดังกล่าวข้างต้น ในส่วนของปฏิกริยาปอซโซลานมีสมการเคมีดังสมการ (จักรพันธ์ วงษ์พา, 2546)



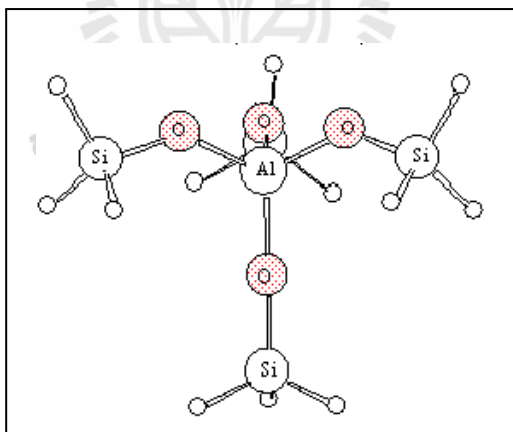
ค่า x y z q r และ s ในสมการเป็นค่าที่แปรไปตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกริยาปอซโซลาน สารประกอบ C-S-H และ C-A-H นอกจากจะช่วยให้กำลังให้กับคอนกรีตแล้ว ยังช่วยให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตลดลงตามไปด้วย

2.5.3 ซีโอไลต์

ซีโอไลต์ (zeolite) คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอมและออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4)\ สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็งเป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) นอกจากซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม

เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้

ซีโอไลต์อาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของแร่ธาตุ มีการทำเป็นเหมืองซีโอไลต์ในพื้นที่หลายแห่งของโลก หรืออาจสังเคราะห์ขึ้นได้โดยกระบวนการทางเคมี เพื่อประโยชน์ทางการค้า ซึ่งจะทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีสมบัติเฉพาะเจาะจง รวมทั้งอาจมีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ในห้องปฏิบัติการเพื่อประโยชน์ในการศึกษาลักษณะทางเคมีของซีโอไลต์ ซีโอไลต์มีมากกว่า 600 ชนิด แต่สามารถแบ่งกลุ่มตามชนิดของโครงสร้างได้ประมาณ 40 ชนิด ซึ่งความแตกต่างในโครงสร้างนี้มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของซีโอไลต์ เช่น โครงสร้างผลึก ความหนาแน่น ขนาดของโพรง ความแข็งแรงของพันธะ เป็นต้น การจำแนกชนิดของซีโอไลต์นั้นอาศัยขนาดและรูปร่างของโพรงซีโอไลต์เป็นหลัก ซึ่งจะทำให้หน้าซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกันไป ลักษณะเด่นของซีโอไลต์ คือ โครงสร้างที่เป็นรูพรุนอย่างเป็นระเบียบของซีโอไลต์ ซึ่งอาจใช้เป็นตัวกรองสารที่ต้องการ โดยโมเลกุลที่เล็กกว่าขนาดโพรงซีโอไลต์ก็จะสามารถผ่านไปได้ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถผ่านออกมา และโมเลกุลที่ต้องการซึ่งมีขนาดพอดีกับโพรงซีโอไลต์ก็จะถูกกักไว้ภายในโพรง



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของซีโอไลต์ (อุษา อันทอง, 2549)

1) โครงสร้างของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นแร่ที่ประกอบด้วย ผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตที่มีน้ำผลึกของ โลหะอัลคาไลน์ หรือโลหะอัลคาไลน์เอิร์ทซึ่งโดยมากจะเป็น โลหะโซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม สตรอนเชียม และแบเรียม โดยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็น โครงสร้าง 3 มิติ ของอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) ซึ่งประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกต โดยมีการเชื่อมต่อของอะตอมออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุดคือ เป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) โครงสร้างซีโอไลต์แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ

- โครงสร้างปฐมภูมิ SiO_4 และ AlO_4 แต่ละหน่วย จะจัดเรียงตัวในลักษณะรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedron) เชื่อมต่อกัน โดยอะตอมของซิลิกอนและอะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางส่วนอะตอมของออกซิเจนอยู่ที่จุดยอดมุมสามเหลี่ยมทรงสี่หน้า

- โครงสร้างทุติยภูมิ จะเกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิแต่ละหน่วยมาเชื่อมต่อกัน โดยอาศัยจุดยอดมุมทั้งสี่เป็นจุดเชื่อมต่อ เพื่อให้ได้เป็น โครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น โครงสร้างที่เกิดจากโครงสร้างขั้นปฐมภูมิมาเชื่อมต่อกันเป็นวงขนาดเล็กในรูปแบบต่างๆ กัน เช่น สี่เหลี่ยม ห้าเหลี่ยม และแปดเหลี่ยม โดยเป็นวงเดี่ยว หรือวงซ้อนก็ได้ เรียกว่า โครงสร้างทุติยภูมิ

- โครงสร้างรูปทรงหลายหน้า เมื่อนำโครงสร้างทุติยภูมิ มาเชื่อมต่อกันจะเกิดเป็น โพรงที่มีขนาดใหญ่ ซีโอไลต์ต่างชนิดกันจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันไป ทำให้คุณสมบัติของซีโอไลต์นั้นๆ มีคุณสมบัติแตกต่างกันไปด้วย

2) คุณสมบัติของซีโอไลต์

เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์ที่เป็นแบบเปิดประกอบด้วยช่องว่าง และการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลจำนวนมาก ซึ่งมีแคทไอออน และโมเลกุลของน้ำเกาะอยู่ภายใน โดยสามารถแลกเปลี่ยนกับแคทไอออนอื่นได้ คือมีคุณสมบัติเป็น Ion exchange นำไปใช้ขบวนการ Water softening และ Water treatment นอกจากนี้โลหะอื่น ๆ เช่น ตะกั่ว ปรอท แคลเซียม ซิลเวอร์ ไอออนก็สามารถแลกเปลี่ยนได้เช่นเดียวกัน ยังมีคุณสมบัติเป็น Reversible dehydration ซึ่งเป็น Molecular sieve ที่ทำให้มีคุณสมบัติต่างจากการดูดซับอื่น และยังแสดงคุณสมบัติเป็นสารดูดซับที่ดี สามารถแยกแก๊สและไอของผสม เช่น แอมโมเนีย ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ด้วย เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน

3) ชนิดของซีโอไลต์

ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือซีโอไลต์ที่พบตามธรรมชาติ (Natural or mineral zeolite) และที่สังเคราะห์ขึ้น (Synthetic zeolite) ซีโอไลต์แต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ที่พบตามธรรมชาติมีมากกว่า 35 ชนิด ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์ขึ้นมีถึงประมาณ 100 ชนิด ซีโอไลต์มี 2 ชนิด ดังนี้

- ซีโอไลต์ที่เกิดตามธรรมชาติ (Natural or Mineral zeolite) ประกอบด้วย Hydrated Alumino Silicates ของ Alkaline และ Alkaline-Earth Metals ซึ่งซีโอไลต์ธรรมชาติจะมีน้ำหนักเบา เป็นแร่ที่มีความนุ่ม มีสีน้ำตาล น้ำตาลเหลืองหรือสีเขียวจาง มีลักษณะคล้ายขอล็ก ซีโอไลต์ธรรมชาติที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 3 ชนิด คือ Clinoptilolite Chabazite และ Mordenite บางอุตสาหกรรมอาจจะใช้ Phillipsite ชนิดของซีโอไลต์ที่สำคัญคือ (วัฒนชัย อยู่ในวงศ์, 2546)

Group 1: Single 4 – ring ได้แก่ Analcime- $\text{Na}_{16} [(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{32}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$,
Phillipsite-(K, Na) $_{10} [(\text{AlO}_2)_{10}(\text{SiO}_2)_{22}] \cdot 20\text{H}_2\text{O}$ และ Laimonte- $\text{Ca}_4 [(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{46}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$

Group 2: Single 6 – ring ได้แก่ Erionite-(Ca,Mg,K₂,Na₂) $_4 [(\text{AlO}_2)_9(\text{SiO}_2)_{27}] \cdot 27\text{H}_2\text{O}$

Group 3: Double 4 – ring ได้แก่ A(Linde) - $\text{Na}_{12} [(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}] \cdot 27\text{H}_2\text{O}$

Group 4: Double 6 – ring ได้แก่ Chabazite - $\text{Ca}_2 [(\text{AlO}_2)_4(\text{SiO}_2)_8] \cdot 13\text{H}_2\text{O}$

Group 5: Complex 4 – 1 ได้แก่ Natrolite - $\text{Na}_{16} [(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{24}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$

Group 6: Complex 5 – 1 ได้แก่ Mordenite - $\text{Na}_8 [(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{40}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$

Group 7: Complex 4 – 4 – 1 ได้แก่ Clinoptilolite - $\text{Na}_{16} [(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{30}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$

ในสภาพธรรมชาติพบแร่ซีโอไลต์ประมาณ 50 ชนิด แต่ที่พบบ่อยและมีปริมาณค่อนข้างสูงในดินมีเพียง 9 ชนิดเท่านั้น ได้แก่ Clinoptilolite Analcime Chabazite Heulandite Mordenite Phillipsite Natrolite Stilpite และ Gesmondine แร่ทั้ง 9 ชนิด ในกลุ่มนี้ Clinoptilolite และ Mordenite เท่านั้นที่พบมากในดินทั่วไป (ปริดา พากเพียร และคณะ, 2535)

- ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthetic zeolite) เกิดจากการทำปฏิกิริยาเบสิกออกไซด์ต่าง ๆ เช่น Al_2O_3 SiO_2 Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์ที่มีน้ำผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดได้ตั้งแต่เป็นเจล (Gelatin) จนถึงรูปที่เป็นรูพรุน (Porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (Sandlike) ได้แก่ Zeolite A Zeolite Y Zeolite F และ Zeolite M เป็นต้น

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ (วัณนชัย อยู่ในวงค์, 2546)

ซีโอไลต์	ส่วนประกอบทางเคมี	อัตราส่วน Si : Al	ช่องว่างโมเลกุล (นาโนเมตร)
Analcime	$\text{Na} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.7 - 2.9	0.26
Chabazite	$2\text{Ca} \cdot 4\text{AlO}_2 \cdot 8\text{SiO}_2 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	1.4 - 3.0	0.31 x 0.44
Clinoptilolite	$\text{Na}/\text{K} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	4.0 - 5.1	0.31 x 0.79
Erionite	$\text{Ca}/\text{Mg}/2\text{Na}/2\text{K} \cdot 2\text{AlO}_2 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2.2	0.76
Laumkotite	$\text{Ca} \cdot 2\text{AlO}_2 \cdot 4\text{SiO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.8 - 2.6	0.46 x 0.63
Mordentite	$\text{Na} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	4.4 - 5.3	0.67 x 0.70
Phiplippisite	$\text{K}/\text{Na} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.3 - 3.0	0.28 x 0.48
Stellerite	$\text{Ca} \cdot 2\text{AlO}_2 \cdot 7\text{SiO}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.8 - 4.4	0.45 x 0.59

4) ประโยชน์ของซีโอไลต์

ซีโอไลต์สังเคราะห์มีประโยชน์และถูกนำมาใช้มากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ เนื่องจากมีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอ มีโครงสร้างที่แน่นอนและค่อนข้างบริสุทธิ์ มีสารปนเปื้อนน้อย ปัจจุบันซีโอไลต์มีประโยชน์และมีบทบาทในอุตสาหกรรมหลายด้านดังนี้

- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น Hydrogenation Lkylation Aromatization และ Isomerization เป็นต้น

- ใช้เป็น Sorption agent เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถดูดซับสารต่าง ๆ ได้ตามขนาดและโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด เช่น ใช้ในขบวนการ defying ของ natural gas แยก CO_2 และสารประกอบซัลเฟอร์จากแก๊สธรรมชาติแยกสารที่ทำให้เกิดสารมลภาวะ เช่น SO_2 NO_2 และ O_2 จากอากาศ เป็นต้น

- Water softeners ซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกในโครงร่างผลึกกับแคลเซียมไอออนหรือแมกนีเซียมไอออนได้จึงช่วยลดความกระด้างของน้ำ

- ใช้เป็น Ion exchange resins จากคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเรซิน เพื่อแลกเปลี่ยนกับไอออนบวก Univalent หรือ Divalent Selectivity ของซีโอไลต์ของไอออนบวกที่เป็น Univalent จากมากไปหาน้อย ดังนี้

- ใช้เป็น Detergent builder ซีโอไลต์เป็นที่นิยมในต่างประเทศที่เจริญแล้ว ใช้เป็นส่วนผสมของผงซักฟอกเนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับทำผงซักฟอก คือมีค่า Capacity และ Kinetics ซึ่งทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนบวกเป็นไปได้มากและเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วย ซึ่งฟอสเฟตทำให้พีชน้ำหรือพวกสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้มีปัญหาในการกำจัดและเมื่อมีการตายแล้วทับถมกันเข้าจึงทำให้น้ำเน่าเสียและสัตว์น้ำที่จำเป็นลดจำนวนลงได้เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย

ซีโอไลต์ ได้ชื่อว่าเป็น Molecular sieve เนื่องจากโมเลกุลมีช่องว่างที่สม่ำเสมอจำนวนมากซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติคล้าย sieve บนโมเลกุลที่มีช่องว่างที่สม่ำเสมอ เนื่องจากซีโอไลต์มีมากมายหลายชนิดและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซีโอไลต์แต่ละชนิดจึงมีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานในด้านใดจึงควรศึกษาคุณสมบัติให้เหมาะสมก่อนเพื่อให้สามารถใช้งานได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด

ปัจจุบันในต่างประเทศมีการศึกษาวิจัยและนำซีโอไลต์มาใช้งานคอนกรีตอย่างมาก โดยเฉพาะประเทศจีนที่มีภูมิศาสตร์เป็นภูเขา มีแหล่งซีโอไลต์จากธรรมชาติมากมายและมีการนำซีโอไลต์มาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย เช่น

Nai-Qian Feng and Li Gui-Zui (1991) ได้ศึกษาถึงการนำซีโอไลต์มาใช้กับวัสดุที่มีเงื่อนไขของความชื้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ผลการทดลองพบว่าถ้าอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง ความชื้นของภาชนะที่เก็บตัวอย่างมอร์ต้าปกติจะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ขณะที่ความชื้นของภาชนะที่เก็บตัวอย่างมอร์ต้าที่มีความชื้นเข้ามาเกี่ยวข้องจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับอาคารที่ต้องการรักษาความชื้นที่เหมาะสมในการใช้งาน ต่อมา Curkovic et al. (1996) ได้ทำการทดลองกำจัดตะกั่วและแคดเมียมออกจากน้ำเสียโดยใช้ ซีโอไลต์ตามธรรมชาติและซีโอไลต์จากการสังเคราะห์ พบว่าซีโอไลต์ที่ได้ผ่านขบวนการพิเศษจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว และแคดเมียมดีขึ้นและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิพบว่าสามารถกำจัด โลหะหนักได้มากขึ้น Nai-Qian Feng and Jian-Hua Yan (1998) ได้ศึกษาผลของซีโอไลต์ในการยับยั้งการขยายตัวของอัลคาไลน์ พบว่าถ้าวัสดุที่ผสมในคอนกรีตมีปริมาณของอัลคาไลน์มากกว่าร้อยละ 3 ของคอนกรีตจะมีแนวโน้มที่จะเกิด alkali-aggregate rxn. (ARR) ซึ่งในสภาพแวดล้อมที่เปียก ARR อาจจะทำให้เนื้อคอนกรีตขยายตัวจนเกิดการแตกหัก หรือการวิบัติของคอนกรีตขึ้นได้ การใส่ผงซีโอไลต์แทนซีเมนต์บางส่วนสามารถยับยั้งการขยายตัวที่เกิดจาก ARR ได้ ตัวอย่างเช่น การใส่ซีโอไลต์แทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 สามารถลดการขยายตัวที่เกิดจาก ARR ได้ร้อยละ 0.04 ที่อายุของตัวอย่าง 180 วัน จากนั้น Poon et al. (1999) ได้ศึกษาถึงความสามารถของซีโอไลต์ในการเป็นวัสดุผสมจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าซีโอไลต์ที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุปอซโซลานที่มี

ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ระหว่างซิลิกาฟูมกับเถ้าถ่านหิน โดยทั่วไปซีโอไลต์ที่ผสมในซีเมนต์ด้วย w/c ratio ต่ำกว่าจะทำให้มอร์ตาร์แข็งแรงมากกว่า แต่การผสมซีโอไลต์ในซีเมนต์ที่ w/c ratio สูงกว่าจะทำให้อัตราการเกิดการปฏิกิริยามากกว่า ดังนั้นถ้าผสมซีโอไลต์ร้อยละ 15 จะช่วยลดช่องว่างในเพสต์ได้ แต่การผสมซีโอไลต์ร้อยละ 25 จะทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้นที่อายุของตัวอย่างตั้งแต่ 3–180 วัน ในปี 2005 Nai-Qian Feng และ Gai-Fen Peng ได้ศึกษาถึงการใส่ซีโอไลต์ผสมซีเมนต์ที่มีสาร อัลคาไลน์ต่ำ จากกระบวนการผลิตและส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลักในการผลิตซีเมนต์ในจีนพบว่า มีองค์ประกอบของอัลคาไลน์ในซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 0.6 ซึ่งมีผลทำให้กำลังที่ได้ไม่เป็นไปตามต้องการเมื่อ w/c ratio เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการใส่ซีโอไลต์และคาร์บอนเนตแทนที่ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 20–25 ผลจากการทดลองพบว่ากำลังที่ได้เป็นไปตามที่ต้องการและสูงขึ้น

2.5.4 เถ้าลอย

เถ้าลอย หรือเถ้าถ่านหิน เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามลมร้อนเพื่อออกไปสู่ปล่องควัน จากนั้นตัวดักจับ (Electrostatic Precipitator) จะรวบรวมเถ้าถ่านหินเพื่อเก็บไว้ในไซโลต่อไป ส่วนประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นเถ้าลอยจึงมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเมื่อผสมน้ำ เถ้าลอยนิยมนำมาใช้งานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่นด้วยเหตุผลสองประการคือ ประการแรก พบว่าเถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้ดี และเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สอง เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็ก และส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหิน หรือทราย ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นและลักษณะทรงกลมของเถ้าลอยจะช่วยให้คอนกรีตมีการสั่นไหลได้ดีขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2549)

การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือ เพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้เถ้าลอยจะมีข้อเสียคือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายของน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพื่อเพิ่มฟองอากาศมากขึ้น เพื่อให้ได้

คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าลอยผสมอยู่ (Lane and Best, 1982)

ในทางปฏิบัติจะใช้เถ้าลอยผสมกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารปอซโซลานและจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้กำลังรับแรงที่อายุมากขึ้นดีขึ้น และเนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์และการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้คุณสมบัติด้านความคงทนต่อการทำลายของเกลือซัลเฟตและคลอไรด์ดีขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยมีรูปร่างทรงกลม เมื่อผสมทดแทนปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มความสามารถทำงานได้ของส่วนผสมหรือทำให้ส่วนผสมต้องการน้ำลดลง ซึ่งทำให้ส่วนผสมมีความทึบน้ำสูงขึ้น และความคงทนดีขึ้นด้วยจึงนิยมใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีตที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อนของสภาพแวดล้อม

1) องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยคือ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา ดังนั้น ASTM C 618 จึงแยกเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C โดยเถ้าลอย Class F มีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอย Class C มีปริมาณออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก (ฤทัยรัตน์ แพรอด, 2548) สำหรับโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นวัตถุดิบในการให้ความร้อน เถ้าลอยที่ได้เป็นทั้ง Class F และ Class C เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติและมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีจึงต่างกัน (วารสาร คุณวานากิจ, 2536)

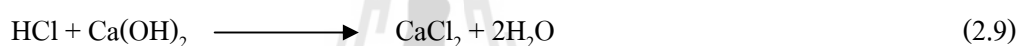
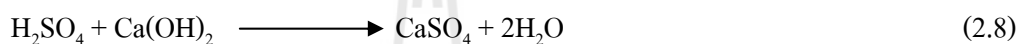
2) ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย

ความสามารถของเถ้าลอยในการรวมตัวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลาน จะขึ้นอยู่กับความละเอียดและคุณสมบัติของเถ้าลอย เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบที่มีสถานะที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) อยู่ประมาณร้อยละ 70-80 โดยเถ้าลอยที่ละเอียดจะมีความไม่เป็นผลึกสูงกว่าเถ้าลอยที่หยาบ เถ้าลอยที่มีความละเอียดสูงจึงสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดต่ำ นอกจากนี้เถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำสามารถพัฒนากำลังได้เร็วเช่นกัน (Chindapasirt and Ruangsiriyakul, 2001) ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้

ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7–14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ

3) ประโยชน์ของเถ้าลอยในงานคอนกรีต

- ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจากกรด เนื่องจากในปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดสารเชื่อมประสานและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งหากคอนกรีตสัมผัสกับกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟูริก ก็จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟูริก ดังนี้ (สมชัย กกกำแหง, 2542)



ซึ่งสารประกอบ CaSO_4 จะตกตะกอนกลายเป็นยิปซัม (Gypsum) อยู่บนผิวคอนกรีต ทำให้ถูกชะล้างได้ง่าย ส่วนสารประกอบ CaCl_2 จะกลายเป็นผลึกเกลือคลอไรด์สะสมอยู่ในโพรงของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทำให้เกล็ดดังกล่าวสามารถละลายได้ จากสาเหตุดังกล่าวเมื่อนำเถ้าลอยมาใช้ในคอนกรีตทำให้ Ca(OH)_2 ที่มีอยู่ลดน้อยลง และสาเหตุอีกประการหนึ่งคือเถ้าลอยมีอนุภาคส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมเมื่อใช้ผสมคอนกรีตทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น จึงสามารถลดการกัดกร่อนได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ผสมเถ้าลอย

- ลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในงานที่ใช้คอนกรีตเป็นปริมาณมาก ๆ ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะสูง ดังนั้นเมื่อใช้เถ้าลอยผสมในคอนกรีต ความร้อนสะสมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์จะลดลงเพราะปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้้น้อยลง และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยก็จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ทำให้ลดโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวจากผลของความร้อน

- เพิ่มกำลังของคอนกรีตในช่วงระยะปลาย การพัฒนากำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นได้ต้องมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นเมื่อปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นก็จะทำปฏิกิริยาเคมีกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีอยู่ในเถ้าลอยอย่างช้า ๆ ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นจากเดิมจึงทำให้ความแข็งแรงในระยะยาวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้น

- เพิ่มความสามารถในการเทได้ เนื่องจากเถ้าลอยส่วนใหญ่มีรูปร่างทรงกลมขนาดระหว่าง 5-40 ไมครอน ดังนั้นเมื่อนำเถ้าลอยมาผสมคอนกรีตจึงทำให้ซีเมนต์เพสต์สามารถไหลได้ง่ายขึ้น กลไกสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้เถ้าลอยเพิ่มความสามารถในการเทได้ คือ อนุภาคเถ้าลอยในส่วนที่มีขนาดเล็กกว่าจะจับอยู่ที่ผิวของเม็ดปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ส่งผลให้อนุภาคของปูนซีเมนต์อยู่ห่างกันจึงสามารถไหลได้ง่ายขึ้น

- ลดการหดแห้งจากการสูญเสียน้ำ การหดแห้งของคอนกรีต (Dry Shrinkage) เป็นผลมาจากซีเมนต์เพสต์เกิดการสูญเสียน้ำขึ้น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนของน้ำต่อสารเชื่อมประสานมากย่อมเกิดการหดแห้งได้มาก (วราภรณ์ คุณวานากิจ, 2536) เถ้าลอยเมื่อนำมาใช้ผสมแทนปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตลดลงที่ความสามารถในการเทได้เท่าเดิม ทำให้คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีความหดแห้งลดลง แต่การที่เถ้าลอยมีปริมาณมากกว่าปูนซีเมนต์ที่น้ำหนักเท่ากันทำให้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีผลทำให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการหดแห้งเพิ่มขึ้นได้

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเพสต์และมอร์ตาร์หรือศึกษาการเก็บกักสาร โลหะหนักที่ผ่านมามีมากมาย เช่น

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาเพสต์ของปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ พบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาดในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นในซีเมนต์เพสต์ ทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดสูงขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดต่ำลง ส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหินที่แยกขนาดให้มีขนาดเล็ก จะทำให้ขนาดโพรงคาปิลลารีและปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์ต่ำลงเมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า และมีผลทำให้กำลังอัดสูงขึ้น เนื่องจากผลของการกระจายตัวที่ดีในเพสต์ ช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Nucleation Effect) อุดช่องว่างในเพสต์ได้ดี และทำปฏิกิริยาปอซโซลานานได้ดีกว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่หยาบ ต่อมาในปี 2550 ได้ศึกษาถึงผลกระทบของซีโอไลต์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม พบว่าการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และปริมาตรโพรงทั้งหมดในซีเมนต์เพสต์สูงขึ้น แต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง ส่งผลให้เพสต์มีโครงสร้างที่แน่นขึ้น อาจเป็นผลของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานบางส่วน

Brink and Halstead (1956) ได้ทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์อัตราส่วนร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนักพบว่า การผสมเถ้าลอยมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุเริ่มแรกต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมเถ้าลอย ซึ่งที่อายุเริ่มแรกนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังที่ลดลงเนื่องจากส่วนผสมมี

ปริมาณของปูนซีเมนต์ลดน้อยลง และจะลดลงมากขึ้นเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออายุมากขึ้นการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมเถ้าลอย

Pandy (1987) ศึกษาการใช้เถ้าลอยในการกำจัดแคลเซียม โดยในการทดลองได้ใช้เถ้าลอยปริมาณ 1 กรัมต่อสารละลายแคลเซียมสังเคราะห์ 50 มิลลิกรัม และหาปริมาณแคลเซียมที่เหลืออยู่โดยใช้ Dithizone method ผลการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีเมื่อพีเอชเท่ากับ 8.5 โดยใช้เวลาที่จะให้เข้าสู่สมดุลประมาณ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมเริ่มต้นลดลงจาก 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 84.80 เป็นร้อยละ 89.82 ค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสูงมาก คือ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าพีเอชจาก 4 เป็น 8.5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าเพิ่มจาก 11.85 % เป็น 89.82 % และยังพบอีกว่าประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 10

ในประเทศไทย ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร (2528) ทำการศึกษาคุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหิน พบว่ากำลังรับแรงอัดในระยะเริ่มแรกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้นแต่เมื่อเวลานานขึ้นกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหินจะดีขึ้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลาน และพบว่าการผสมเถ้าถ่านหินที่พอเหมาะจะอยู่ในช่วงร้อยละ 0-40 ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นสามารถชดเชยปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ถูกแทนที่

บุรฉัตร ฉัตรวิระ และพิชัย นิमितยงสกุล (2537) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ แล้วสามารถสรุปได้ว่า เถ้าลอยแม่เมาะสามารถลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ และเนื่องจากเถ้าลอยแม่เมาะมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ต่ำ แต่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง จึงทำให้ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมีค่าสูง และในปีเดียวกัน ก็ได้ทำการศึกษาเรื่องความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ โดยทำการศึกษาสมบัติของเถ้าลอยที่ใช้แทนซีเมนต์ในการทำมอร์ตาร์แล้วพบว่าในระยะแรกกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะจะต่ำกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา แต่เมื่อเวลาผ่านไปกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะจะเพิ่มสูงขึ้นกว่ามอร์ตาร์ธรรมดา และสามารถให้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ได้ร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก โดยไม่มีผลข้างเคียงต่อมอร์ตาร์ รวมทั้งลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ ส่วนอัตราความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะก็จะลดลง เมื่อปริมาณเถ้าลอยผสมในมอร์ตาร์มีปริมาณมากขึ้น และพบว่ารูปทรงของอนุภาคเถ้าลอยมี

ผลต่อสมบัติของเถ้าลอย และเป็นสาเหตุในการลดปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อรักษาความสามารถในการเทได้

สมหมาย สว่างกิจ และคณะ (2535) ศึกษาการด้านทานการกัดกร่อน จากกรดซัลฟูริกของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินจากประเทศสหรัฐอเมริกา และเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ นับว่าเป็นการศึกษาผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมแต่เป็นสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินทั้งสองแหล่งผลิตสามารถลดการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกได้ โดยที่การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 50 สามารถด้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าการแทนที่ ร้อยละ 25

สุวิมล อัสวพิศิษฐ และ ดวงแก้ว โชติกลาง (2546) ได้ทำการศึกษาการใช้สารละลายที่เป็นด่างเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาของเถ้าลอยที่ใช้เป็นวัสดุยึดประสานในการบำบัดกากตะกอนโรงชุบโลหะ ซึ่งในการศึกษาได้ใช้ปูนขาวและเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 40 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารกระตุ้น 2 ชนิด คือ โซเดียมซิลิเกต และ โซเดียมคาร์บอเนต พบว่ามีการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้สูงสุดและมากกว่าไม่มีการเติมสารกระตุ้น และเมื่อมีการเติมกากตะกอนโรงชุบโลหะในปริมาณที่มากขึ้น ที่การเติมสารกระตุ้น โซเดียมซิลิเกตร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก การรับแรงของก้อนหล่อแข็งจะน้อยกว่าการเติมสารกระตุ้น โซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก และจากการทดสอบการละลายของโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งด้วยวิธี TCLP นั้นไม่พบโลหะหนักประเภทโครเมียม สังกะสี และเหล็ก ถูกชะออกจากก้อนหล่อแข็ง

2.5.5 ซิลิกาฟุ้ง

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) หรือ ไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือ ซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed Silica Fume) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต Silicon Metal และ Ferrosilicon Alloy เป็นขบวนการ Reduction จาก Quartz ที่บริสุทธิ์ไปเป็น Silicon โดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ SiO₂ ซึ่งต่อมากจะออกซิไดซ์ (Oxidize) และกลั่นตัว (Condense) ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ได้เป็นอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) และถูกดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ โดยทั่วไปซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20-25 ม²/ก (โดยวิธี Nitrogen Absorption) 0.1 ไมโครเมตรเป็นขนาดที่เล็กมากๆ ขนาดของซิลิกาฟุ้ง (0.1 กล่าวคือมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 100 เท่า เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่เล็กมาก ๆ จึงมีพื้นที่ผิวสูงมากและอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ทำให้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมาก ปัญหาของซิลิกาฟุ้งที่พบบ่อยเมื่อใช้ในคอนกรีต คือต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความชื้น

เหลวเท่าเดิม สาเหตุเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆของซิลิกาฟุ้งจึงมีการใช้น้ำที่ค่อนข้างสูงในการเคลือบผิวหน้า

1) องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ SiO_2 ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ คือพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซิลิกาฟุ้งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักจะมี SiO_2 ที่สูงมากคือมักจะมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O และออกไซด์อื่น ๆ ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ SiO_2 ซึ่งสูงกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป หากนำค่าออกไซด์ของซิลิกาฟุ้งมาเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน จะพบว่ามียุทธศาสตร์ที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหินและซิลิกาฟุ้ง
(ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542)

ออกไซด์	ปูนซีเมนต์ประเภท 1	เถ้าถ่านหิน	ซิลิกาฟุ้ง
SiO_2	20	48	92
Al_2O_3	5	26	0.7
Fe_2O_3	3	10	1.2
CaO	60	5	0.2
MgO	1.1	2	0.2
SO_3	2.4	0.7	-
ออกไซด์อื่น ๆ	1.5	1.3	2.6
LOI	2	3	-

2) คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ้งที่เห็นชัดเจนคือเป็นฝุ่นผงสีค่อนข้างดำหรือเทาหรือเทาอมขาวที่ละเอียดมาก แต่ถ้าเป็นคอนกรีตซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของซิลิกาฟุ้งหลาย ๆ เม็ดเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ้งมีค่าประมาณ 2.2 ความละเอียดทดสอบโดยวิธีของ เบลนมีค่าประมาณ 150,000 ซม.²/ก. ขณะที่ของปูนซีเมนต์มีค่าเพียง 3400 ซม.²/ก. ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเมื่อขยายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope

(SEM) พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร ขณะที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าประมาณ 15 เนื่องจากมีขนาดที่เล็กมากจึงมีปัญหาในการขนย้าย ดังนั้นจึงนิยมนำซิลิกาฟูมมาอัดรวมกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า คอนกรีตซิลิกาฟูม ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.9 สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม เถ้าถ่านหิน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 แสดงในตารางที่ 2.8



รูปที่ 2.7 ภาพถ่ายขยายด้วย SEM ของซิลิกาฟูมควบแน่น (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542)

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟูม, เถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542)

คุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์ประเภท 1	เถ้าถ่านหิน	ซิลิกาฟูม
ความละเอียดของเบตน ($\text{ชม.}^2/\text{ก.}$)	3,400	3,800	150,000
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.4	2.2
สี	เทา	เทาอ่อนจนถึงเทาเข้มหรือสีน้ำตาล	เทาดำ เทาอมขาว

3) ประโยชน์ของซิลิกาฟุ่มในงานคอนกรีต

ในประเทศไทย อเมริกา และ ยุโรป จะใช้ซิลิกาฟุ่มในการผสมคอนกรีตโดยการผสม “แยก” กล่าวคือใส่ซิลิกาฟุ่มในการผสมคอนกรีต แต่ที่ประเทศแคนาดานอกจากการผสมแยกแล้ว ยังมีการใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนหนึ่งของปูนซีเมนต์ โดยมีซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ราวร้อยละ 8 เนื่องจากซิลิกาฟุ่ม มีความละเอียดสูงมากจึงมีปัญหาในเรื่องการขนส่งหรือใช้งานมากพอสมควรเพราะหากไม่ระวังให้ดีอาจปลิวไปตามลมได้ง่าย ดังนั้นจึงมีการใช้ซิลิกาฟุ่มในรูปแบบที่ผสมกับน้ำให้อยู่ในรูปของเหลวข้น (Slurry Form)

ผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อความสามารถในการเทและการเข้มน้ำ เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีความละเอียดสูงมาก ดังนั้นเมื่อใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำที่มากขึ้น ซึ่งแนวทางแก้ไขในปัญหานี้คือการใช้สารลดน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษเข้าช่วยเพื่อไม่ให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตสูงจนเกินไป เพราะจะทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลงตามกฎของ Abram's ส่วนการเข้มน้ำในคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ่มพบว่ามีความน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้ซิลิกาฟุ่ม ผลกระทบต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นในคอนกรีต พบว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตไม่ได้ลดอุณหภูมิของคอนกรีตให้ต่ำลง ดังนั้นการใช้ซิลิกาฟุ่มเพื่อวัตถุประสงค์ในการลดอุณหภูมิเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงควรหลีกเลี่ยง ผลกระทบต่อกำลังอัด ซิลิกาฟุ่มนิยมใช้เป็นวัสดุหนึ่งในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงมาก (120 เมกะปาสกาล ที่อายุ 90 วัน) โดยการใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ ซึ่งคอนกรีตที่ได้นอกจากจะมีกำลังอัดที่สูงมากแล้วยังมีการซึมผ่านที่ต่ำมากด้วย เพราะ ซิลิกาฟุ่มจะไปอุดพวกโครงสร้างของ Pore ของไฮเดรตซีเมนต์เพสต์ไว้ การใช้ซิลิกาฟุ่มในปริมาณที่เหมาะสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต จะมีประสิทธิภาพเหมือนใช้ปูนซีเมนต์ถึง 3 หรือ 4 เท่า เช่น ใช้ซิลิกาฟุ่ม 1 กก. แทนที่ปูนซีเมนต์ 3 หรือ 4 กก. ในคอนกรีตแต่ยังคงให้คอนกรีตที่มีกำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วันที่เท่ากัน (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542)

ตารางที่ 2.9 อัตราส่วนผสมและกำลังอัดของคอนกรีตที่มีและไม่มีซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสม
(ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2542)

ส่วน ผสมที่	อัตราส่วนผสม (kg/m ³)					สารลด น้ำพิเศษ (ml/kg)	ค่ายุบตัว (mm)	กำลังอัดที่ 28 วัน (MPa)	กำลังดึงผ่า ซีกที่ 28 วัน (MPa)
	ปูนซีเมนต์	ซิลิกาฟูม	ทราย	หิน	น้ำ				
1	401	0	729	1211	141	16.1	75	55.6	5.2
2	361	40	725	725	141	18.2	75	70.7	6.3
3	341	60	719	719	140	21.4	60	75.2	6.2
4	320	80	716	716	139	26.2	60	74.2	4.6

จากการศึกษาของ บวรธรรม ไชยเอีย (2535) พบว่า ไมโครซิลิกาจะทำให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เพราะไมโครซิลิกามีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก เมื่อมีความละเอียดมากก็จำเป็นต้องใช้น้ำในการเคลือบผิวมาก การเพิ่มปริมาณสารไมโครซิลิกามีผลต่อการก่อตัวไม่มากนัก โดยที่ปริมาณสารไมโครซิลิการ้อยละ 10 จะทำให้แนวโน้มของการก่อตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ที่ปริมาณสารไมโครซิลิการ้อยละ 20 และ 30 กลับทำให้ระยะเวลาก่อตัวลดลง กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมไมโครซิลิการ้อยละ 0-30 เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารไมโครซิลิกา

Berke (1988) ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมไมโครซิลิกา พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารไมโครซิลิกาจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารไมโครซิลิกา เนื่องจากสารไมโครซิลิกาที่มีขนาดเล็กมากนั้นจะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้น มีผลโดยตรงทำให้กำลังรับแรงกดของคอนกรีตสูงขึ้น

2.6 การชะละลาย

เมื่อน้ำใต้ดินหรือน้ำผิวดิน สัมผัสหรือผ่านของเสียน้ำจะซึมผ่านเข้าไปทำให้ของเสียบางส่วนละลายออกมา ซึ่งสามารถวัดอัตราการละลายได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การชะละลาย (Leaching) โดยเรียกน้ำว่า สารชะ เรียกน้ำปนเปื้อนที่ผ่านออกมาว่า Leachate และเรียกความสามารถของของเสียน้ำในการถูกชะละลายว่า ความสามารถในการชะละลาย (Leachability)

การชะละลายก็คือ อัตราที่องค์ประกอบที่อันตราย หรือองค์ประกอบที่ไม่ต้องการเคลื่อนที่ จากของเสีย และผ่านไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยผ่านทาง leachate โดยปกติแล้วอัตรานี้จะวัดและแสดง ในรูปของความเข้มข้นขององค์ประกอบดังกล่าวใน leachate กล่าวคือ การชะละลายของสารพิษ อาจบอกในรูปของความสามารถในการชะละลาย (L) ซึ่งมักประเมินได้จากการเปรียบเทียบความเข้มข้นขององค์ประกอบดังกล่าวใน leachate กับในของเสียเริ่มต้น ซึ่งจะสามารถบอกถึงสัดส่วน ขององค์ประกอบที่ละลายออกมาระหว่างการทดสอบ ซึ่งก็เป็นการวัดความสามารถในการชะ ละลายนั่นเอง (Corner, 1990)

นั่นคือ ความสามารถในการชะละลาย เท่ากับ ความเข้มข้นของสารพิษที่ออกมาจาก ตัวอย่างหลังการสกัด (C_i) หารด้วยความเข้มข้นของสารพิษเริ่มต้น (C_0)

$$L = C_i / C_0 \quad (2.10)$$

โดยที่ L คือ ความสามารถในการชะละลาย (มิลลิกรัม/กรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นของสารพิษก่อนทำการสกัด

C_i คือ ความเข้มข้นของสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด หรือ

ความสามารถในการชะละลาย เท่ากับ ปริมาณสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด (W_i) หาร ด้วยปริมาณสารพิษก่อนทำการสกัด (W_0)

$$L = W_i / W_0 \quad (2.11)$$

โดยที่ W_0 คือ ปริมาณสารพิษก่อนทำการสกัด (กรัม)

W_i คือ ปริมาณสารพิษที่ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด (มิลลิกรัม)

ตารางที่ 2.10 ค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารอันตรายที่ยอมรับได้ในสารชะละลาย

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

2.6.1 การวัดความสามารถในการชะละลาย

เนื่องจากการทดสอบความคงทนของผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องใช้เวลานาน จึงต้องใช้วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้ผลเร็ว ในสหรัฐอเมริกา วิธีการทดสอบของเสียอันตรายสำหรับการฝังกลบที่ได้รับการยอมรับทางด้านสิ่งแวดล้อมคือ วิธี EP Tox และวิธี TCLP

วิธีการทดสอบส่วนใหญ่เป็นกระบวนการแบบ batch ซึ่งของเสียจะสัมผัสกับสารชะเป็นช่วงเวลาหนึ่ง โดยเขย่าส่วนผสมอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้สมดุลทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการบดตัวอย่างก่อนทำการสกัด หลังจากการสกัดและแยกของเหลวออกจากของแข็งแล้วนำไปวิเคราะห์หองค์ประกอบต่าง ๆ ใน leachate วิธีการทดสอบส่วนใหญ่ใช้อัตราส่วนสารชะต่อของเสียเป็น 20:1 เพื่อให้ได้ความเข้มข้นสูงสุดขององค์ประกอบใน leachate ประมาณร้อยละ 5 ขององค์ประกอบในของเสียเริ่มต้น สารชะที่ใช้ในการทดสอบส่วนใหญ่จะเป็นกรดอะซิติก หรือ บัฟเฟอร์ หรือบางวิธีจะเป็นน้ำปราศจากไอออน ค่าพีเอชสุดท้ายของ leachate จะขึ้นอยู่กับความเป็น

เบสของของเสีย เนื่องจากค่าพีเอชสุดท้ายเป็นปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมการชะละลายของโลหะ วิธี TCLP จึงออกแบบให้เรียนแบบสภาวะของการชะละลายในหลุมฝังกลบจริง โดยใช้สารชะเป็น กรดอะซิติกเนื่องจากในหลุมฝังกลบจะเกิดการคดอินทรีย์ขึ้นระหว่างการสลายตัวของสารอินทรีย์ ดังนั้นจุดประสงค์ของการใช้กรดอะซิติกเป็นสารชะก็คือ เพื่อเลียนแบบกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นนั่นเอง ส่วนวิธีการทดสอบ DLT เป็นการทดสอบระยะยาวที่นิยมใช้สารชะ 3 ชนิดโดยการประยุกต์จาก American Nuclear Society test 16.1 (ANSI/ANS/16.1) ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน สารละลาย กรดอะซิติก และสารละลายฟีนอล ข้อดีและข้อเสียของการทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLD และ DLT ตามตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ข้อดีและข้อเสียของการทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLP และ DLT

วิธีการทดสอบ	TCLP	DLT
ข้อดี	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้เวลาในการทดสอบน้อย 2. การเตรียมสารชะละลายได้ง่ายและมีความแม่นยำสูง 3. ใช้ปริมาณสารชะละลายจำนวนน้อย ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย 4. การใช้กรดอะซิติกเป็นสารชะละลายเป็นการเลียนแบบสภาวะจริงของสารที่เกิดจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. การเปลี่ยนสารชะละลายโดยไม่มีการเขย่าทำให้ใกล้เคียงกับสภาวะจริงในหลุมฝังกลบ เนื่องจากสารชะละลายมีการเคลื่อนที่รอบก้อนหลอ่แข็งน้อย 2. ช่วยในการประเมินผลการชะละลายในระยะยาวสำหรับหลุมฝังกลบ
ข้อเสีย	<ol style="list-style-type: none"> 1. การเขย่าสารชะละลายอย่างแรงทำให้ต่างจากสภาวะจริงในหลุมฝังกลบ เนื่องจากสารชะละลายมีการเคลื่อนที่รอบก้อนหลอ่แข็งมาก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้เวลาในการทดสอบนาน 2. ใช้สารชะละลายปริมาณมากและมีการเปลี่ยนสารชะละลายบ่อย ๆ ทำให้ค่าใช้จ่ายสูง

2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการชะละลาย

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการชะละลายแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

1) ปัจจัยเกี่ยวกับวิธีทดสอบ

- พื้นที่ผิวของของเสีย สภาวะในการทดสอบการชะละลายของก้อนหล่อแข็งของเสียควรจะคล้ายคลึงกับสภาวะในหลุมฝังกลบมากที่สุด แต่ในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถเป็นไปได้ ดังนั้นวิธีทดสอบส่วนใหญ่จึงใช้การเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวอย่างโดยการบดเพื่อให้การทดสอบมีความถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามผู้ทดสอบจะต้องตระหนักว่าวิธีการบดตัวอย่างนั้นเราไม่สามารถควบคุมได้เพียงพอ เนื่องจากการบดสามารถกำหนดขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดได้ แต่ไม่สามารถกำหนดขนาดที่เล็กที่สุดและการกระจายของขนาดได้ ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้จึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเหล่านี้ด้วย

- เทคนิคและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเขย่า วิธีทดสอบส่วนมากจะใช้การเขย่าเพื่อให้ถึงสมดุลระหว่างของเสียและสารชะเร็วขึ้น วิธี EP Tox ไม่ได้กำหนดไว้ทั้งเทคนิคและอุปกรณ์ที่ใช้ เพียงแต่การเขย่าจะต้องไม่ทำให้เกิดการแยกชั้น และจะต้องแน่ใจว่าผิวหน้าของตัวอย่างทั้งหมดสัมผัสกับสารละลายที่ใช้สกัดอยู่ตลอดเวลา ส่วนวิธี TCLP กำหนดให้ใช้อุปกรณ์ในการเขย่าแบบหมุนรอบ อย่างไรก็ตามเทคนิคการเขย่าอาจจะทำให้เกิดกับสภาวะจริงในหลุมฝังกลบบ้าง เนื่องจากโดยปกติแล้วในหลุมฝังกลบสารชะคงที่หรือไหลเข้ามาอยู่รอบอนุภาคของของเสีย

- ธรรมชาติของการชะละลาย ตามหลักการแล้วการชะละลายควรจะเหมือนกับสภาวะจริงในหลุมฝังกลบ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเป็นไปได้ เนื่องจากค่าพีเอชและองค์ประกอบของสารชะละลายเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และมักจะไม่สามารถทราบความต้องการของค่าเหล่านั้น ดังนั้นแนวทางของวิธีทดสอบในปัจจุบันจะใช้สารชะที่รุนแรง มีค่าพีเอชต่ำปานกลาง เช่น สารชะละลายของวิธี EP Tox และวิธี TCLP

สารชะละลายที่ใช้จะต้องสามารถหาได้ทุกวันในห้องปฏิบัติการ เช่น รีเอเจนต์ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ และเป็นสารที่เตรียมได้ง่าย ตัวอย่างสารชะละลาย ได้แก่ กรดคาร์บอนิก (น้ำที่อิมตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์) กรดอะซิติก หรืออะซิเตตบัฟเฟอร์

- อัตราส่วนของสารชะละลายต่อของเสีย ไม่มีอัตราส่วนใดที่สามารถเป็นตัวแทนสำหรับสภาวะจริงในหลุมฝังกลบที่ทุกเวลาใดๆ ได้ ของเสียโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการบำบัดด้วยวิธีหล่อแข็งจะมีองค์ประกอบที่เมื่อละลายน้ำจะทำให้เกิดไอออน และแรงดึงดูดระหว่างไอออน ซึ่งมีผลทำให้ความสามารถในการชะละลายขององค์ประกอบดังกล่าวลดลงเมื่ออัตราส่วนของสารชะละลายต่อของเสียต่ำ ดังนั้นอัตราส่วนที่สูงกว่าจึงเหมาะสมมากกว่า

- จำนวนครั้งในการชะละลาย วิธีทดสอบบางวิธี เช่น Multiple Extraction Procedure (MEP) ของเสียจะถูกสกัดด้วยสารชะละลายเพียงครั้งเดียว แต่บางวิธีถูกออกแบบมาเพื่อให้ใกล้เคียงธรรมชาติที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบส่วนมาก นั่นคือมีการเปลี่ยนสารชะละลายใหม่อย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยทั่วไปสันนิษฐานว่าสารที่ถูกชะละลายออกมาครั้งแรกจะมีความเข้มข้นขององค์ประกอบสูงสุด เพราะสารชะละลายสัมผัสกับความเข้มข้นสูงสุดบนผิวหน้าของของเสีย แต่อย่างไรก็ตามในกรณีของโลหะไม่จำเป็นต้องเป็นเช่นนี้เสมอ ปัจจุบันวิธีการทดสอบส่วนใหญ่จะใช้การชะละลายครั้งเดียว

- ระยะเวลาในการสัมผัส มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของเวลาพบว่าค่าที่ยอมรับได้ในเกือบทุกสถานการณ์เป็น 24 ชั่วโมง วิธีทดสอบส่วนใหญ่จึงใช้ค่านี้เป็นมาตรฐาน แต่ปัจจุบัน EPA ดัดแปลงระยะเวลาสำหรับวิธี TCLP โดยการลดเวลาในการทดสอบเป็น 18 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าไม่มีผลกระทบต่อผลการทดสอบมากนัก

- 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 คือกระบวนการปรับพีเอช วิธีนี้จะรักษาพีเอชไว้ที่ 5.0 ± 0.2 แต่เนื่องจากอัตราการเติมกรดอะซิติก 0.5 นอร์มัล เพื่อปรับพีเอชนั้นไม่ได้มีการกำหนดไว้จึงทำให้เกิดการแปรปรวนได้อย่างมาก ความสามารถในการละลายของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะไฮดรอกไซด์ค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอช และจะแตกต่างกันไปตามชนิดของโลหะ วิธี TCLP จึงมีการปรับปรุงให้ไม่มีการปรับพีเอช โดยการใช้สารชะเป็นกรดอะซิติกหรือบัฟเฟอร์ขึ้นอยู่กับความเป็นเบสของของเสีย

การควบคุมพีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการประเมินความสามารถในการชะละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโลหะ ควรจะบันทึกค่าพีเอชสุดท้ายของสารชะเมื่อสิ้นสุดการทดสอบไว้เสมอ เพราะว่าเป็นค่าที่มักจะใช้ตัดสินว่าของเสียเป็นไปตามมาตรฐานบังคับสำหรับโลหะหรือไม่

- การแยกสารที่สกัดได้ โลหะหลายชนิดสามารถคงอยู่ในของเสียและในสารผสมของของเสียกับสารชะในสถานะคอลลอยด์ จึงมีการใช้กระบวนการกรองเพื่อแยกคอลลอยด์เหล่านี้ ออก แต่ไม่ได้ต้องทำเสมอ ถ้าสารที่สกัดได้ขุ่นจึงต้องกรอง เพราะว่าการกรองก็ใช้เวลาช่วงหนึ่ง ดังนั้นถ้าใช้เวลานานของเสียก็ยังสัมผัสกับสารชะนานขึ้น

- การวิเคราะห์ การวิเคราะห์ leachate ที่ได้ขึ้นอยู่กับเทคนิคของผู้วิเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้ด้วย

2) ปัจจัยเกี่ยวกับของเสีย

- การควบคุมพีเอช การควบคุมพีเอชมีความสำคัญมาก ถ้าสภาวะในการหล่อแข็งไม่มีการควบคุมพีเอชที่เพียงพออาจจะมีผลต่อความสามารถในการชะละลายของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์บางชนิด โดยปกติแล้วการหล่อแข็งต้องการสภาวะที่พีเอชสูง เพราะโลหะไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการละลายต่ำที่สุดในช่วงพีเอช 7.5-11 แต่อย่างไรก็ตามโลหะบางชนิด เช่น โครเมียม มีคุณสมบัติเป็นแอมโฟเทอริกซึ่งมีความสามารถในการละลายสูงกว่าทั้งที่พีเอชต่ำและพีเอชสูง นอกจากนี้โลหะทุกชนิดไม่ได้มีค่าความสามารถในการละลายต่ำที่สุดในช่วงเดียวกัน ดังนั้นสภาวะในการหล่อแข็งจึงยอมให้เป็นพีเอชใด ๆ ได้

- การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ การมีตัวออกซิแดนท์และตัวรีดิวซ์ที่แรงอยู่จะสามารถเปลี่ยนวาเลนซ์ของโลหะซึ่งมีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะนั้น ตัวอย่างเช่น โครเมียม

- ปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ ปฏิกิริยาการตกตะกอนของโลหะในรูปไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต ซัลไฟด์ซัลไฟด์ และอื่น ๆ รวมถึงในรูปสารเชิงซ้อน นอกจากนี้อีกปฏิกิริยาหนึ่งที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) ที่มักจะเกิดขึ้นในดิน ซึ่งจะช่วยการชะละลายโดยการเกิดสารเชิงซ้อนแอนไอออนิกที่ละลายน้ำจากแคทไอออนของโลหะ แต่อย่างไรก็ตามลิแกนด์อินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น พอลิเมอร์ และกรดฮิวมิก อาจจะช่วยการตรึงโดยการดูดซับบนอนุภาคของแข็ง

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายหรือการเก็บกักสารโลหะหนัก เช่น

Shin et al. (1988) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะโดยการทำเป็นก้อนด้วยซีเมนต์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์ น้ำต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณของเสีย และปริมาณสาร Precipitator สรุปผลวิจัยได้ดังนี้

1) การชะละลายของโลหะหนักได้แก่โครเมียมและสังกะสีจะลดลง เมื่อลดอัตราส่วนผสมทราย : ซีเมนต์ น้ำ : ซีเมนต์ และเพิ่มปริมาณสาร Precipitator

2) กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มตัว 14 วันจะเพิ่มขึ้น เมื่อลดอัตราส่วนผสมซีเมนต์ และปริมาณของเสียที่กำจัด

3) จากการวิเคราะห์โดย Anova Analysis พบว่า อัตราส่วนผสมซีเมนต์ จะมีผลต่อการชะละลายของโครเมียม และอัตราส่วนน้ำ:ซีเมนต์ จะมีผลต่อการชะละลายของสังกะสีและกำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์

4) จากผลการวิจัย เมื่อนำไปวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ เช่น ค่าใช้จ่าย การชะละลายของโครเมียม และสังกะสี จะต้องต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ EPA คือ 5 และ 500 พีพีเอ็ม และกำลังรับแรงอัด ต้องมีค่าสูงกว่า 10 กก./ซม.² จะได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับการกำจัดกากตะกอนแห้ง 30 กรัม จะต้องใช้อัตราส่วนผสมทราย:ซีเมนต์ และ น้ำ:ซีเมนต์ และปริมาณสาร Precipitator เท่ากับ 1 1.5 และ 1 075 กรัมตามลำดับ

5) การใช้สาร Precipitator และทราย จะไม่มีความสำคัญในทางเศรษฐศาสตร์ในทางปฏิบัติ

และในปีเดียวกัน Shin and Sujiwattana (1988) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียอันตรายโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์โดยใช้ของเสีย 4 ชนิดคือ แคลเซียม ตะกั่ว อัลตรีน และคลอเดน และนำก้อนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วไปทดสอบการชะละลายในน้ำสกัดและกำลังรับแรงอัด สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1) ปริมาณของแคลเซียม ตะกั่ว อัลตรีน และคลอเดน ที่รั่วไหลออกมาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของของเสียที่ผสมลงไปในส่วนผสมของซีเมนต์กับทราย

2) กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมาแล้วจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโลหะหนักที่ผสมลงไปในส่วนผสมของซีเมนต์กับทราย

3) อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมจะลดความสามารถในการถูกชะละลายของแคลเซียม ตะกั่ว อัลตรีนและคลอเดนเท่ากับ 0.5

- 4) ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ทำให้ได้กำลังอัดมากกว่าอัตราส่วนที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 1.0 และ 0.25
- 5) ถ้าสารที่ใช้ในการชะละลายมีค่าพีเอชในตอนเริ่มต้นต่ำก็ยิ่งทำให้ความสามารถในการถูกชะละลายของของเสียนั้นเพิ่มขึ้น
- 6) อัตราส่วนของพื้นผิวต่อปริมาตรมีผลต่อการถูกชะละลายของแคลเซียม ตะกั่ว อัลคริน และคลอเดน ถ้ายังมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวปริมาตรมากขึ้นก็ยิ่งทำให้ความสามารถในการถูกชะละลายของของเสียนั้นเพิ่มขึ้น
- 7) ระยะเวลาในการบ่มของของเสียนั้นไม่ค่อยมีผลต่อความสามารถในการถูกชะละลายของของเสีย แต่ถ้าเพิ่มระยะเวลาบ่มจะทำให้กำลังรับแรงอัดของของเสียเพิ่มขึ้นได้
- 8) เทคนิคการทำของเสียให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และซิลิกาพบว่าเหมาะสมสำหรับของเสียโลหะหนักมากกว่าของเสียพวกสารอินทรีย์ที่ใช้ฆ่าแมลง

2.6.3 กลไกการชะละลาย

ก้อนหล่อแข็งของเสียเป็นของแข็งที่มีรูพรุนซึ่งอิมมิดด้วยน้ำ ประกอบด้วยเฟสของแข็งหนึ่งเฟสหรือมากกว่า ช่องว่างของอากาศ และเฟสของเหลวที่เรียกว่าสารละลายในรูพรุน (Pore solution) ทั้งหมดอยู่ในสมดุลเคมี เมื่อของแข็งสัมผัสสภาวะการชะละลายสมดุลจะถูกรบกวนทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของสารนั้น ๆ ระหว่างของแข็งและสารละลายที่ใช้ในการชะละลาย ซึ่งจะเกิดฟลักซ์โดยมวลระหว่างผิวหน้าของของแข็งและสารชะ ทำให้เกิดการแพร่ (bulk diffusion) ในของแข็งทั้งก้อน โดยที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาระหว่างของแข็งและสารชะละลาย

กลไกย่อยหลายแบบเป็นกลไกที่เกิดในของแข็ง ที่ผิวของของแข็ง และในสารชะละลาย (สุรชาติพิทย์ อินทรวงษ์, 2545)

ก) การละลาย (Solubilization)

สำหรับการชะละลายขององค์ประกอบต่าง ๆ ชั้นแรกองค์ประกอบนั้นต้องละลายในสารละลายที่อยู่ในรูพรุนของของแข็ง หรือสารละลายในสารชะที่ซึมผ่านเข้าไปในของแข็ง สารบางตัวละลายช้ากว่าตัวอื่น ๆ เพราะอัตราการละลายถูกควบคุมโดยความสามารถในการละลาย และโดยความเข้มข้นในสารละลายที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของของแข็ง

สำหรับกรณีของการหล่อแข็ง ของแข็งมักจะสัมผัสกับน้ำใต้ดิน อัตราการละลาย จะถูกควบคุมโดยการแพร่ของโมเลกุลของสารที่ละลายน้ำ ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดตอนแรกอัตรา การละลายจะถูกจำกัดโดยจำนวนไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีอยู่ หลังจากนั้นจะถูกจำกัดโดย การแพร่ขององค์ประกอบของของเสีย เพราะว่าการแพร่ของไฮโดรเจนไอออนจะเร็วกว่าอนุภาคอื่น

ข) การเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง (Transport Through the Solid)

ภายในก้อนหล่อแข็งของเสียการเคลื่อนที่อาจจะเกิดโดยการนำ (Convection) หรือ การแพร่ ก้อนหล่อแข็งของเสียส่วนมากมีความสามารถในการซึมผ่านต่ำ ดังนั้นการเคลื่อนที่แบบ การนำอาจจะไม่สำคัญทั้งในการทดสอบการชะละลาย และในสภาวะจริง การแพร่จึงเป็น กระบวนการเดียวที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง

ค) การแพร่ผ่านชั้นที่ถูกชะละลาย (Diffusion Through the Leached Layer)

เนื่องจากองค์ประกอบที่ละลายน้ำจำนวนมากถูกชะจากของแข็งที่ไม่ละลายน้ำทำ ให้เกิดชั้นที่ถูกชะละลาย (Leached Layer) ขึ้นในของแข็งภายใต้สภาวะที่พีเอชต่ำ ทั้งไฮโดรเจน ไอออนและองค์ประกอบที่สามารถถูกชะได้จะแพร่ผ่านชั้นนี้ ในทางตรงกันข้ามจากที่ทราบว่อัตราการ ชะละลายในชั้นที่ถูกชะถูกจำกัดโดยการแพร่ขององค์ประกอบ เพราะไฮโดรเจนไอออนแพร่เร็ว กว่าตัวอื่น ๆ ชั้นที่ถูกชะนี้จึงไม่ได้เป็นตัวจำกัดอัตราการชะละลายทั้งหมดในกระบวนการชะละลาย เพราะเมื่อองค์ประกอบถูกชะออกมาชั้นที่ถูกชะก็อาจจะกลายเป็นมีรูพรุนมากขึ้นเมื่อเทียบกับ ของแข็งที่ไม่ได้ถูกชะ ดังนั้นการแพร่ของโมเลกุลในสารละลายที่อยู่ในรูพรุนจะกลายเป็นปัจจัยที่ เป็นตัวจำกัดอัตราการชะละลายด้วย

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

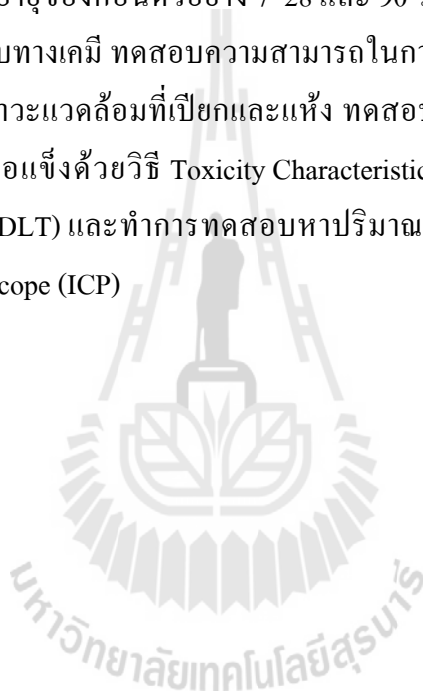
ชั้นที่ของแข็งเชื่อมต่อกับของเหลวอาจจะทำให้เกิดสภาวะที่จำกัดสำหรับการ ชะละลายเหมือนกันในปรากฏการณ์ไฟฟ้าเคมี ความเร็วที่ระบบเข้าสู่สมดุลมักจะถูกจำกัดโดยความหนาและธรรมชาติของชั้นที่กั้นอยู่

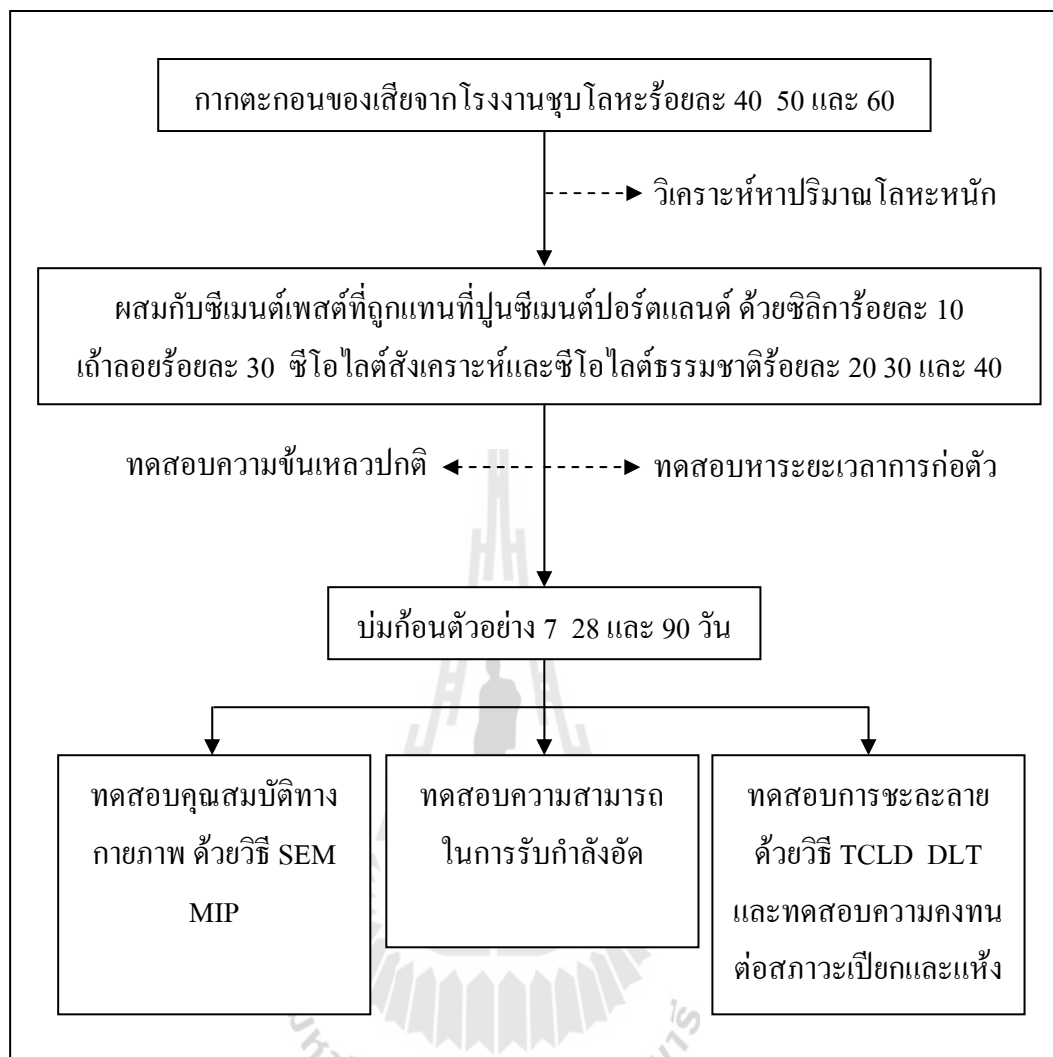
จ) การเคลื่อนที่ทั้งหมดในการชะละลาย (Bulk Transport in Liquid Leachant)

เมื่อระบบเข้าใกล้สมดุล อัตราการชะละลายจะลดลงตามความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างเฟสของแข็งและเฟสสารละลายจนเข้าใกล้ศูนย์ ปรากฏการณ์นี้อาจจะเกิดขึ้นในหลุมฝังกลบที่อิ่มตัว แต่ไม่มีการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดิน ซึ่งจะมีผลต่อความเข้มข้นสูงสุดที่จะเป็นไปได้ ขององค์ประกอบใน leachate แต่อัตราการชะละลายทั้งหมดอาจจะต่ำกว่าระบบที่มีการเคลื่อนที่ ในอีกทางหนึ่งน้ำใต้ดินที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจะทำให้องค์ประกอบที่ละลายน้ำใต้ดินของแข็งที่มี รูพรุนมีอัตราการชะละลายเร็วมาก

2.7 กรอบแนวคิดงานวิจัย

จากผลการวิจัยที่ผ่านมาทำให้ได้แนวทางในการศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอซโซลานด้วยการหล่อแข็งให้เป็นก้อน โดยใช้วิธี Cement-Based Techniques เนื่องจากมีความเหมาะสมดังได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งได้กำหนดตัวแปรต่าง ๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมาให้เหมาะสมในการวิจัยในครั้งนี้ โดยการนำกากตะกอนของเสียจากโรงงานชุบโลหะในอัตราส่วนร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก ผสมกับซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยซิลิกา ร้อยละ 10 เถ้าลอย ร้อยละ 40 ซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติ ร้อยละ 20 30 และ 40 ที่อายุของก้อนตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน จากนั้นทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี ทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัด ทดสอบความคงทนของก้อนหล่อแข็งต่อสภาวะแวดล้อมที่เปียกและแห้ง ทดสอบและความสามารถในการเก็บกักโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) และ Dynamic Leaching Test (DLT) และทำการทดสอบหาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP)





รูปที่ 2.8 กรอบแนวคิดการวิจัย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

จากปัญหาการปนเปื้อนของสารโลหะหนักสู่สภาพแวดล้อมและการจัดการกับกากตะกอนของเสีย จึงนำมาสู่แนวความคิดในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุพอลิโพรพิลีน ซิลิกาฟูม เถ้าลอย ซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ มาใช้ในการเก็บกักหรือกรองสารปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยการศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุพอลิโพรพิลีนด้วยการหล่อแข็งให้เป็นก้อน ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง รวมถึงวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพและวิเคราะห์โครงสร้างระดับโมเลกุลของตัวอย่าง โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซิลิกาฟูม เถ้าลอย ซีโอไลต์สังเคราะห์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และกากตะกอนโลหะหนัก

ส่วนที่ 2 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยซิลิกาฟูม เถ้าลอย ซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นวัสดุยึดประสาน และผสมกากตะกอนของเสียจากโรงงานหุบโลหะ ในอัตราส่วนต่าง ๆ กันของตัวอย่างอายุ 7 28 และ 90 วัน

ส่วนที่ 3 ศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) และ Dynamic Leaching Test (DLT) และการทดสอบความคงทนของก้อนหล่อแข็งต่อสภาวะแวดล้อมที่เปียกและแห้ง

3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตราช้าง
- 2) ซิลิกาฟูม

- 3) ถั่วลอ่ย เป็นถั่วถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- 4) ซีโอไลต์สังเคราะห์ จากบริษัทไทยซิลิเกตเคมีคัล จำกัด จังหวัดชลบุรี
- 5) ซีโอไลต์ธรรมชาติ จากบริษัทในจังหวัดปทุมธานี
- 6) กากตะกอนของเสีย จากโรงงานชุบโลหะ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
- 7) น้ำประปา
- 8) กรดอะซีติก
- 9) กรดซัลฟูริก
- 10) กรดไนตริก

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมี วิธี X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)
- 2) เครื่องทดสอบองค์ประกอบทางเคมี วิธี X-Ray Diffraction Analysis (XRD)
- 3) เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM)
- 4) เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค Particle Size Analyzer
- 5) เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ BET Surface Area Analyzer
- 6) เครื่องทดสอบ Mercury Instruction Porosity (MIP)
- 7) ชุดทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)
- 8) ชุดทดสอบ Dynamic Leaching Test (DLT)
- 9) เครื่องทดสอบ Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP)
- 10) เครื่องทดสอบความชื้นเหลวปกติ Vicat Apparatus
- 11) เครื่องทดสอบกำลังอัด Compression machine
- 12) ตู้อบปรับอุณหภูมิได้
- 13) ตู้ดูดความชื้น
- 14) ชุดตะแกรงร่อน
- 15) เครื่องผสมซีเมนต์ขนาด 5 ลิตร
- 16) แบบหล่อก้อนตัวอย่าง ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร
- 17) เครื่องวัดค่า pH pH meter

3.2.3 การเตรียมวัสดุสำหรับการทดลอง

วัสดุยึดประสาน

นำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซิลิกาฟูม เถ้าลอย ซีโอล์ตสังเคราะห์ และ ซีโอล์ตธรรมชาติไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 100 แล้วเก็บไว้ในถังที่ปิดสนิทสำหรับใช้ตลอดการทดลอง

กากตะกอนโลหะหนัก

นำกากตะกอนโลหะหนักจากโรงงานชุบผิวโลหะมาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วบดให้มีขนาดเล็กโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เก็บไว้ในถังที่ปิดสนิทสำหรับใช้ตลอดการทดลอง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก

ร้อยละของวัสดุยึดประสาน					ร้อยละ กากตะกอน โลหะหนัก (S)	อัตราส่วน น้ำ/วัสดุยึด ประสาน (w/b)	สัญลักษณ์
ปูนซีเมนต์ (OPC)	ซิลิกาฟูม (SF)	เถ้าลอย (FA)	ซีโอล์ต สังเคราะห์ (SN)	ซีโอล์ต ธรรมชาติ (NZ)			
100	-	-	-	-	-	0.4	OPC100
					40	0.4	OPC40S
					50	0.4	OPC50S
					60	0.4	OPC60S
90	10	-	-	-	-	0.4	OPC10SF
					40	0.4	OPC10SF40S
					50	0.4	OPC10SF50S
					60	0.4	OPC10SF60S
70	-	30	-	-	-	0.4	OPC30FA
					40	0.4	OPC30FA40S
					50	0.4	OPC30FA50S
					60	0.4	OPC30FA60S

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมซีเมนต์เฟสท์และก้อนหล่อแข็งกาจตะกอนโลหะหนัก (ต่อ)

ร้อยละของวัสดุยึดประสาน					ร้อยละ กาจตะกอน โลหะหนัก (S)	อัตราส่วน น้ำ/วัสดุยึด ประสาน (w/b)	สัญลักษณ์
ปูนซีเมนต์ (OPC)	ซิลิกาฟูม (SF)	เถ้าลอย (FA)	ซีโอไลต์ สังเคราะห์ (SN)	ซีโอไลต์ ธรรมชาติ (NZ)			
80	-	-	20	-	-	0.4	OPC20SZ
					40	0.4	OPC20SZ40S
					50	0.4	OPC20SZ50S
					60	0.4	OPC20SZ60S
70	-	-	30	-	-	0.4	OPC30SZ
					40	0.4	OPC30SZ40S
					50	0.4	OPC30SZ50S
					60	0.4	OPC30SZ60S
60	-	-	40	-	-	0.4	OPC40SZ
					40	0.4	OPC40SZ40S
					50	0.4	OPC40SZ50S
					60	0.4	OPC40SZ60S
80	-	-	-	20	-	0.4	OPC20NZ
					40	0.4	OPC20NZ40S
					50	0.4	OPC20NZ50S
					60	0.4	OPC20NZ60S
70	-	-	-	30	-	0.4	OPC30NZ
					40	0.4	OPC30NZ40S
					50	0.4	OPC30NZ50S
					60	0.4	OPC30NZ60S
60	-	-	-	40	-	0.4	OPC40NZ
					40	0.4	OPC40NZ40S
					50	0.4	OPC40NZ50S
					60	0.4	OPC40NZ60S

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

การทดสอบความถ่วงจำเพาะ

โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier Flask) ตาม ASTM C 188 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำ ที่มีปริมาตรเท่าวัสดุนั้น โดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอชโซลานหาได้จากการแทนที่ในน้ำมันก๊าด

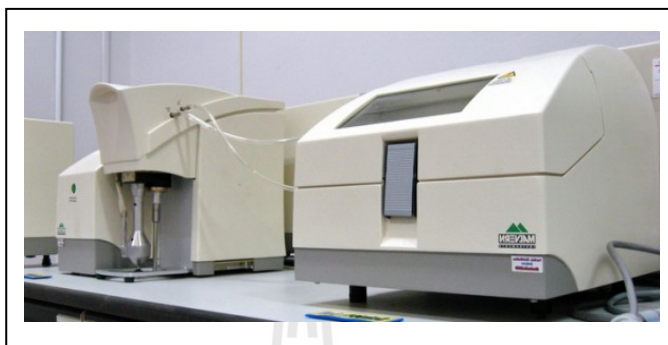
การทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะ

นำตัวอย่างที่จะทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะน้ำหนักประมาณ 0.04 กรัม จากนั้นกำจัดไอน้ำที่เกาะอยู่บนพื้นผิวเดิมออกโดยเรียกว่า Outgassing หรือ degassing โดยผ่านก๊าซไนโตรเจน และให้อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างที่จะวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET Surface Area Analyzer



รูปที่ 3.1 หาพื้นที่ผิวจำเพาะ BET Surface Area Analyzer

การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาค
วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอซโซ
ลาน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer)



รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค Particle Size Analyzer

การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี

ทบก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ประมาณ 5–10 มิลลิเมตร นำชิ้นตัวอย่างไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -195°C ประมาณ 5 นาที นำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่อง Freeze-Dryer ที่อุณหภูมิ -40°C ความดัน 0.5 ปาสคาล เป็นเวลา 2 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบ XRD เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย X-Ray Diffraction (XRD) และ X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

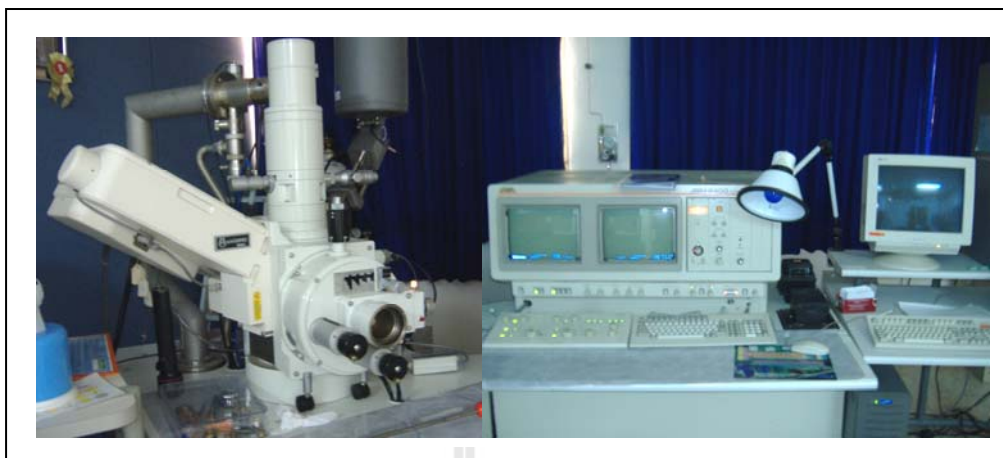


รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบองค์ประกอบทางเคมี X-Ray Diffractometer Analysis (XRD)

การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

การเตรียมตัวอย่างที่เป็นผงแข็ง โดยการนำผงตัวอย่างมาโรยบนแท่นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร ที่ติดแผ่นกาว 2 หน้า เตรียมไว้แล้ว โดยให้ผงตัวอย่างติดแผ่นกาวเป็นแผ่นบาง ๆ จากนั้นนำไปเป่าด้วยลมออกซิเจนเพื่อให้ผงตัวอย่างหลุดออกให้เหลือเพียงชั้นเดียว นำแท่นตัวอย่างไปอบด้วยแสงไฟเพื่อไล่ความชื้น แล้วนำแท่นตัวอย่างไปเคลือบด้วยอิมมัลชันทองคำ หลังจากนั้นจึงนำไปถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM

การเตรียมตัวอย่างที่เป็นก้อนของแข็ง โดยการนำส่วนตรงกลางของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำชิ้นงานให้มีขนาดประมาณ 0.25×0.25 มิลลิเมตร² โดยให้ด้านที่ไม่ต้องการศึกษาติดบนสตัป (stub) ด้วยเทปกาวคาร์บอน แล้วเป่าทำความสะอาดฝุ่นที่ปนเปื้อนด้วยลูกโป่งยาง เมื่อสะอาดดีแล้วทำการฉาบผิวตัวอย่างด้วยทองคำโดยเครื่อง Sputter coater หรือ Ion sputter จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ 3.4 เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง

การเตรียมตัวอย่างก้อนซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง

โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยวัสดุปอซโซลาน และผสมกากตะกอนของเสียในอัตราส่วน ซิลิกาฟุ่ม ร้อยละ 10 เถ้าลอย ร้อยละ 30 ซีโอไลต์สังเคราะห์ และ ซีโอไลต์ธรรมชาติ ร้อยละ 20 30 และ 40 ทำหน้าที่เป็นวัสดุยึดประสานและผสมกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบโลหะในอัตราส่วนร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสานควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานเท่ากับ 0.4 โดยการผสมด้วยเครื่อง (Mechanical Mixer) ขั้นตอนดังนี้

- 1) นำไบตี (Paddle) และอ่าง (Bowl) ที่แห้ง ติดตั้งลงบนตำแหน่งของเครื่องผสม
- 2) ใส่น้ำผสมลงในอ่าง แล้วเติมวัสดุยึดประสานและกากตะกอนโลหะหนักลงไป
ในน้ำ ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วินาที ให้น้ำถูกดูดซึม
- 3) เริ่มผสมในความเร็วต่ำ (140 ± 5 rpm) เป็นเวลา 30 วินาที หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 วินาที ระหว่างนี้ให้ทำการกวาดเอาเพสต์ที่ติดอยู่ข้าง ๆ อ่างลงไปให้อ่างให้หมด
- 4) เริ่มผสมด้วยความเร็วปานกลาง (285 ± 10 rpm) เป็นเวลา 150 วินาที
- 5) นำส่วนผสมที่ได้หล่อลงในแบบหล่อขนาด $50 \times 50 \times 50$ มิลลิเมตรที่เตรียมไว้



รูปที่ 3.5 ชุดเครื่องมือเตรียมก้อนตัวอย่าง

การทดสอบความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์

โดยใช้เครื่องมือไวแค (Vicat Apparatus) เป็นวิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่พอเหมาะสำหรับเพสต์ โดยพิจารณาจากการจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เป็นระยะ 10 ± 1 มิลลิเมตร ในเวลา 30 วินาที ตาม ASTM C 187 ซึ่งวิธีการผสมเพสต์เป็นไปตาม ASTM C 305 โดยการนำส่วนผสมที่ออกแบบไว้ผสมด้วยเครื่อง (Mechanical Mixer) ขึ้นตอนดังนี้

- 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 ด้วยเกรียงที่มีขอบคมหนึ่งครั้งระมัดระวังอย่ากดลงบนเพสต์

8) ตั้งแบบให้ยู่ได้เครื่องไวแคทและนำเอาพลักเกอร์ด้านที่ใหญ่มาวางแตะที่ผิวของเพสต์และขีดศกฐ

9) ตั้งค่าตัวชี้ที่เครื่องที่ได้ (Movable indicator) ไปที่ค่าขีดศูนย์ที่ด้านบนของสเกล ซึ่งเป็นค่าตั้งต้น (Initial reading)

10) ปลดอพลักเกอร์ลงมาภายในเวลา 30 วินาที หลังจากที่พักผสมเสร็จ เครื่องจะต้องไม่มีการสั่นในระหว่างที่ทำการทดสอบ บันทึกค่าพลักเกอร์ที่จมลงไป ในซีเมนต์เพสต์หลังจากที่ปลดอพลักเกอร์จมลงไปเป็นระยะเวลา 30 วินาที เพสต์จะมีความขึ้นเหลวปกติเมื่อพลักเกอร์จมลงไปเป็นระยะ 10 ± 1 มิลลิเมตร จากผิวด้านบน ภายในระยะเวลา 30 วินาทีหลังปลดอพลักเกอร์ ทำการลองทดสอบหลายๆ ครั้ง โดยเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่ใช้ผสม จนกระทั่งได้ค่าความขึ้นเหลวปกติ



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความขึ้นเหลวปกติ Vicat Apparatus

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว

ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายตาม ASTM C 191 โดยใช้ปริมาณน้ำที่พอเหมาะจากการทดสอบความขึ้นเหลวปกติ ซึ่งการก่อตัวระยะต้นคือระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร เป็นระยะ 25 มิลลิเมตร ในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจนทำให้เข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงด้วยน้ำหนักของตัวเองได้

การทดสอบหาขนาดโพรง และการกระจายโพรง ด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimeter (MIP)

ทุบก้อนลูกบาศก์ให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ประมาณ 5-8 มิลลิเมตร เลือกชิ้นตัวอย่าง ซึ่งอยู่ตรงกลางก้อนลูกบาศก์ประมาณ 8 กรัม นำชิ้นตัวอย่างไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวซึ่งมีอุณหภูมิที่ -195°C ประมาณ 5 นาที นำตัวอย่างไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่อง Freeze-Dryer ที่อุณหภูมิ -40°C ความดัน 0.5 ปาสคาล เป็นเวลา 2 วัน นำชิ้นตัวอย่างประมาณ 1-1.5 กรัม ใส่ในแท่งใส่ตัวอย่าง (Penetrometer) แล้วติดตั้งในช่องความดันต่ำ เดินเครื่องเพื่อให้ระบบเป็นสุญญากาศ หลังจากนั้นเพิ่มความดันจนถึง 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และนำแท่งใส่ตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักและติดตั้งที่ช่องความดันสูง เพื่ออัดความดันจนกระทั่งถึงความดันสูงสุดที่ 33,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ทุบก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดความกว้าง 10×10 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร นำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่อง Freeze-Dryer ที่อุณหภูมิ -40°C ความดัน 0.5 ปาสคาล เป็นเวลา 2 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบด้วยทองและนำไปทดสอบถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM

การทดสอบกำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง

นำก้อนซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็งที่ได้จากการหล่อตัวอย่างในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มิลลิเมตร อายุการบ่ม 7 28 และ 90 วัน ที่เตรียมไว้ไปทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดตามมาตรฐาน 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 เพื่อป้องกันความ
 ผิดพลาดจากการทดลอง



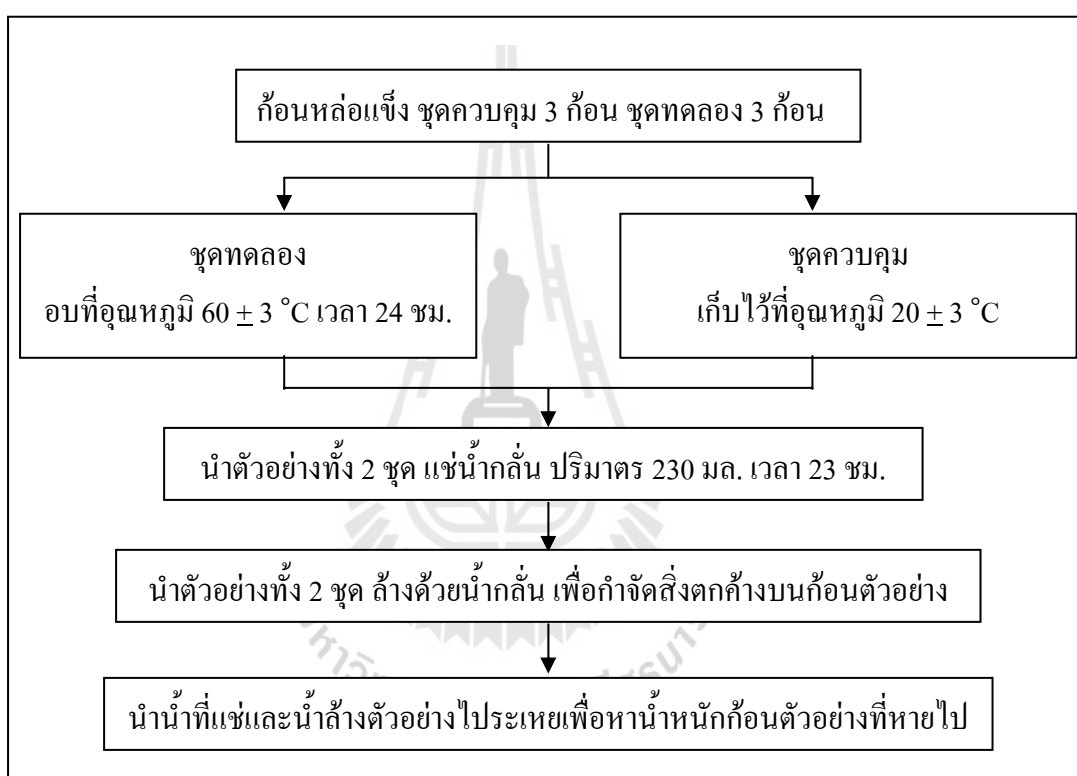
รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบกำลังอัด Compression machine

3.3.3 การศึกษาความคงทนของก้อนหล่อแข็งต่อสภาวะเปียกแห้ง

ความคงทนของก้อนหล่อแข็งต่อสภาวะแวดล้อมที่เปียกและแห้งทดสอบตาม
 มาตรฐาน ASTM D4843-88

- 1) เตรียมก้อนตัวอย่างที่มีส่วนผสมเดียวกัน 7 ก้อน แบ่งก้อนตัวอย่างเพื่อทำเป็น
 ชุดควบคุมและชุดทดลองอย่างละ 3 ก้อน สำหรับตัวอย่างที่เหลืออีก 1 ก้อน นำไปวิเคราะห์หา
 ความชื้น
- 2) นำชุดทดลองไปอบที่อุณหภูมิ $60 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ส่วนชุดควบคุมเก็บไว้ที่อุณหภูมิ
 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ในตู้บ่มก๊าซไนโตรเจน เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นที่ผิวของก้อนตัวอย่างเป็น
 เวลา 24 ชั่วโมง
- 3) นำตัวอย่างชุดทดลองมาวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่าง
 เย็นลง จากนั้นจึงนำตัวอย่างทั้งชุดทดลองและชุดควบคุมแช่น้ำกลั่นปริมาตร 230 มิลลิลิตร ใน
 บีกเกอร์ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 23 ชั่วโมง

- 4) นำก้อนตัวอย่างทั้งชุดทดลองและชุดควบคุมออกจากรีดน้ำกลั่นและทำการล้างก้อนตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดสิ่งตกค้างบนก้อนตัวอย่าง จากนั้นนำน้ำที่แช่ตัวอย่างและน้ำล้างตัวอย่างไประเหยน้ำออก เพื่อหาน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่หายไป พร้อมทั้งสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่าง ได้แก่ รอยแตกร้าวที่บริเวณผิวหน้าก้อนตัวอย่าง
- 5) ทำซ้ำข้อ 2-4 เช่นนี้เรื่อยไปจนครบ 12 รอบ หรือจนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างของชุดทดลองเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าร้อยละ 30 ของน้ำหนักตัวอย่างชุดควบคุม

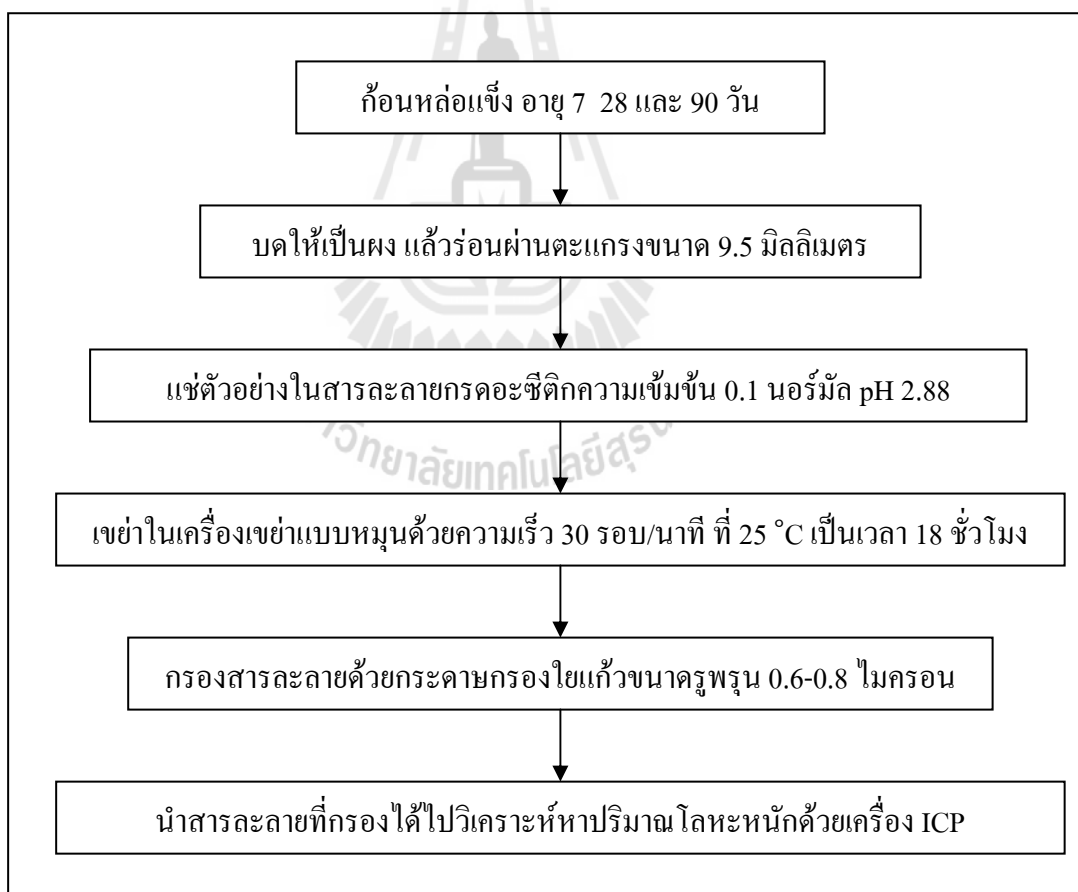


รูปที่ 3.8 การทดสอบความคงทนของก้อนหล่อแข็งต่อสภาวะแวดล้อมเปียกแห้ง

3.3.4 การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง

1) การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

นำก้อนหล่อแข็งตัวอย่างที่บ่มเป็นระยะเวลา 7 28 และ 90 วัน มาบดให้เป็นผงละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 9.5 มิลลิเมตรหรือน้อยกว่า จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ที่มีค่า pH เท่ากับ 2.88 โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักของของแข็งต่อปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 1:20 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุนที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25°C กรองสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรองใยแก้วขนาดรูพรุน 0.6-0.8 ไมครอน หลังจากนั้นนำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP



รูปที่ 3.9 การทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLP ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6



รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP)

2) การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Dynamic Leach Test (DLT)

การทดสอบการชะละลายจะใช้สารชะ 2 ชนิด คือ สารละลายกรดอะซีติกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล และสารละลายฟีนครดสังเคราะห์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยนำก้อนหล่อแข็งตัวอย่างที่บ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน มาแช่ในสารชะในขวดพลาสติกขนาด 1 ลิตร โดยก้อนตัวอย่างบรรจุอยู่ในตาข่ายพลาสติก และแขวนอยู่ตรงกึ่งกลางของสารละลายเพื่อให้ก้อนตัวอย่างสัมผัสกับสารละลายทุกทิศทาง ใช้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสของของแข็งต่อปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 1:20

เปลี่ยนสารละลาย และนำสารละลายไปวัดค่า pH และวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ดังนี้

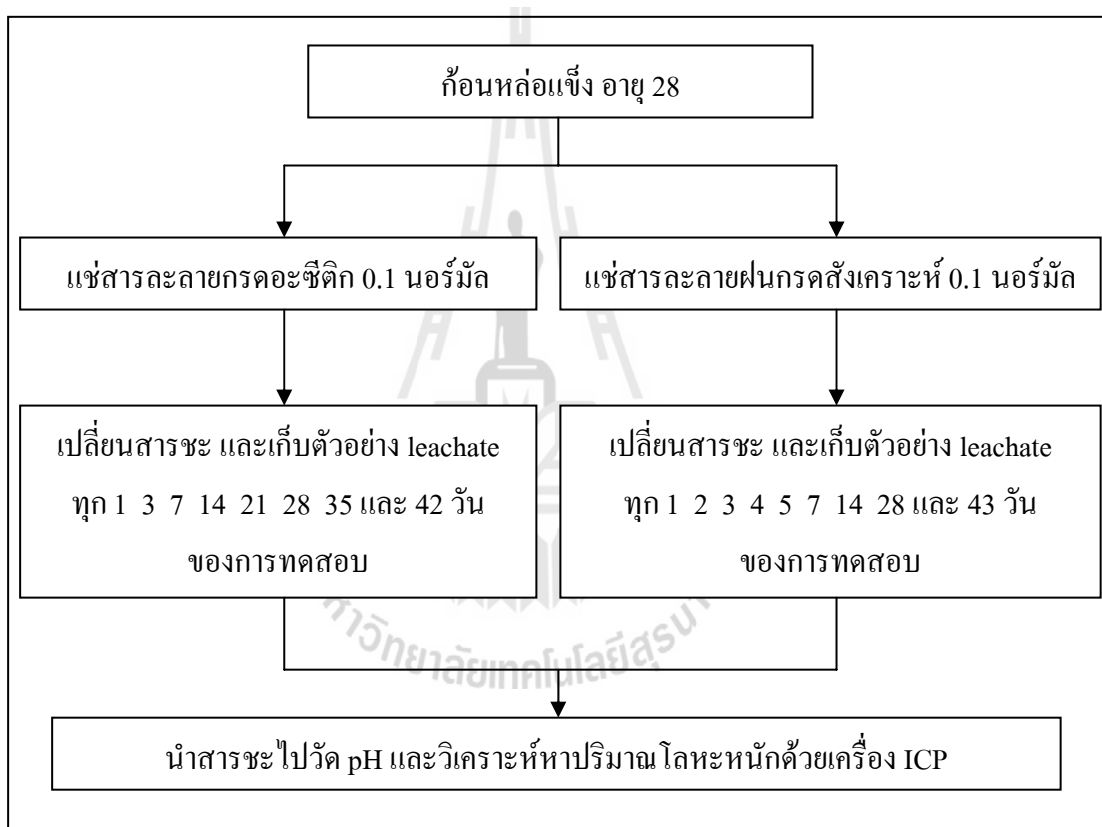
สารชะเป็นสารละลายกรดอะซีติกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

เปลี่ยนสารละลาย และนำสารละลายไปวัดค่า pH และวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ทุก 1 3 7 14 21 28 35 และ 42 วันของการทดสอบ (พิเชษฐ์ อธิภาคย์, 2542)

สารชะเป็นสารละลายฟลักซ์สังเคราะห์

เปลี่ยนสารละลาย และนำสารละลายไปวัดค่า pH และวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ทุก 1 2 3 4 5 7 14 28 และ 43 วันของการทดสอบ (Jeffrey and Means, 1955)

การเตรียมสารละลายฟลักซ์สังเคราะห์ โดยนำน้ำที่ปราศจากไอออนมาผสมกับ สารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล และสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก จนกว่า pH ของสารละลายจะมีค่าคงที่เท่ากับ 5



รูปที่ 3.11 การทดสอบการชะละลายโดยวิธี DLT

บทที่ 4

ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

การชะละลายก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักในงานวิจัยนี้เป็นการนำกากตะกอนของเสียจากโรงงานชุบโลหะมาทำการหล่อแข็งโดยใช้วัสดุพอลิซัลฟอนผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสาน ในอัตราส่วนการแทนปูนซีเมนต์ ด้วยซิลิกาฟูมและเถ้าลอยร้อยละ 10 และ 30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 0 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ผสมกากตะกอนจากโรงงานชุบนิเกิลในอัตราส่วนร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน บ่มตัวอย่างในระยะเวลาที่แตกต่างกัน คือ 7 28 และ 90 วันตามลำดับ จากนั้นจึงทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด การชะละลายของโลหะหนัก และทดสอบหาความพรุนของก้อนหล่อแข็ง ดังนี้

4.2 คุณสมบัติของวัสดุยึดประสานและกากตะกอน

4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัสดุยึดประสานและกากตะกอนจากโรงงานชุบโลหะ ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีสีเทา มีปริมาณของแข็งร้อยละ 99.50 และปริมาณความชื้นร้อยละ 0.50 ซิลิกาฟูม มีสีเทาดำ มีปริมาณของแข็งร้อยละ 99.78 และปริมาณความชื้นร้อยละ 0.22 เถ้าลอย มีสีน้ำตาล มีปริมาณของแข็งร้อยละ 98.15 และปริมาณความชื้นร้อยละ 1.85 ซีโอไลต์สังเคราะห์ มีสีขาว มีปริมาณของแข็งร้อยละ 96.22 และปริมาณความชื้นร้อยละ 3.78 ซีโอไลต์ธรรมชาติ มีสีขาวอมเขียว มีปริมาณของแข็งร้อยละ 95.64 และปริมาณความชื้นร้อยละ 4.36 และกากตะกอนโลหะหนัก มีสีเขียวอมเทา มีปริมาณของแข็งร้อยละ 65.04 และปริมาณความชื้นร้อยละ 35.06

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุยึดประสานและกากตะกอน

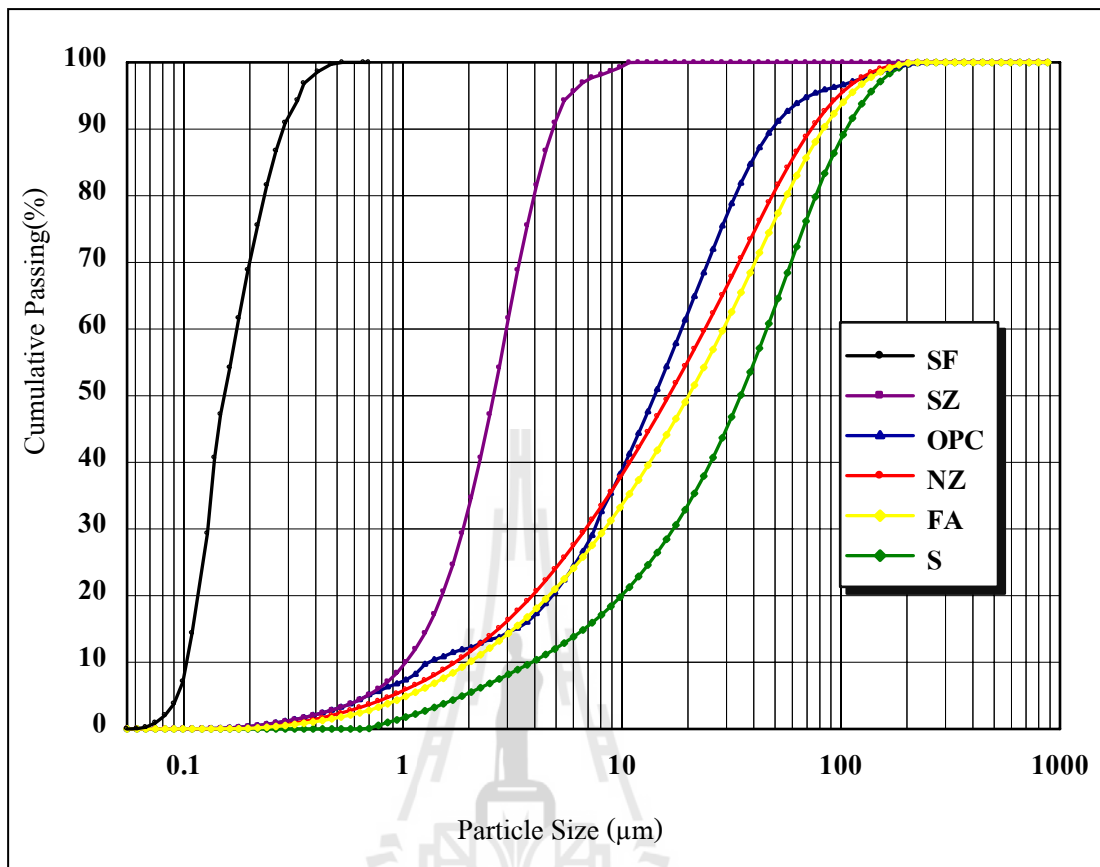
วัสดุ	สี	ปริมาณของแข็ง(ร้อยละ)	ปริมาณความชื้น(ร้อยละ)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	สีเทา	99.50	0.50
ซีลิกาฟูม	สีเทาดำ	99.78	0.22
เถ้าลอย	สีน้ำตาล	98.15	1.85
ซีโอไลต์สังเคราะห์	สีขาว	96.22	3.78
ซีโอไลต์ธรรมชาติ	สีขาวอมเขียว	95.64	4.36
กากตะกอนโลหะหนัก	สีเขียวอมเทา	65.04	35.06

ผลจากการวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ ตามตารางที่ 4.2 พบว่า ซีลิกาฟูมมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.24 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.15 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 144,800 ตารางเซนติเมตร/กรัม เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.21 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20.13 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 4,800 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซีโอไลต์สังเคราะห์มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.87 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.51 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 32,500 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซีโอไลต์ธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.09 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 16.17 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 5,400 ตารางเซนติเมตร/กรัม และกากตะกอนโลหะหนัก มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.14 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3.81 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,900 ตารางเซนติเมตร/กรัม การกระจายอนุภาควัสดุ ดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ

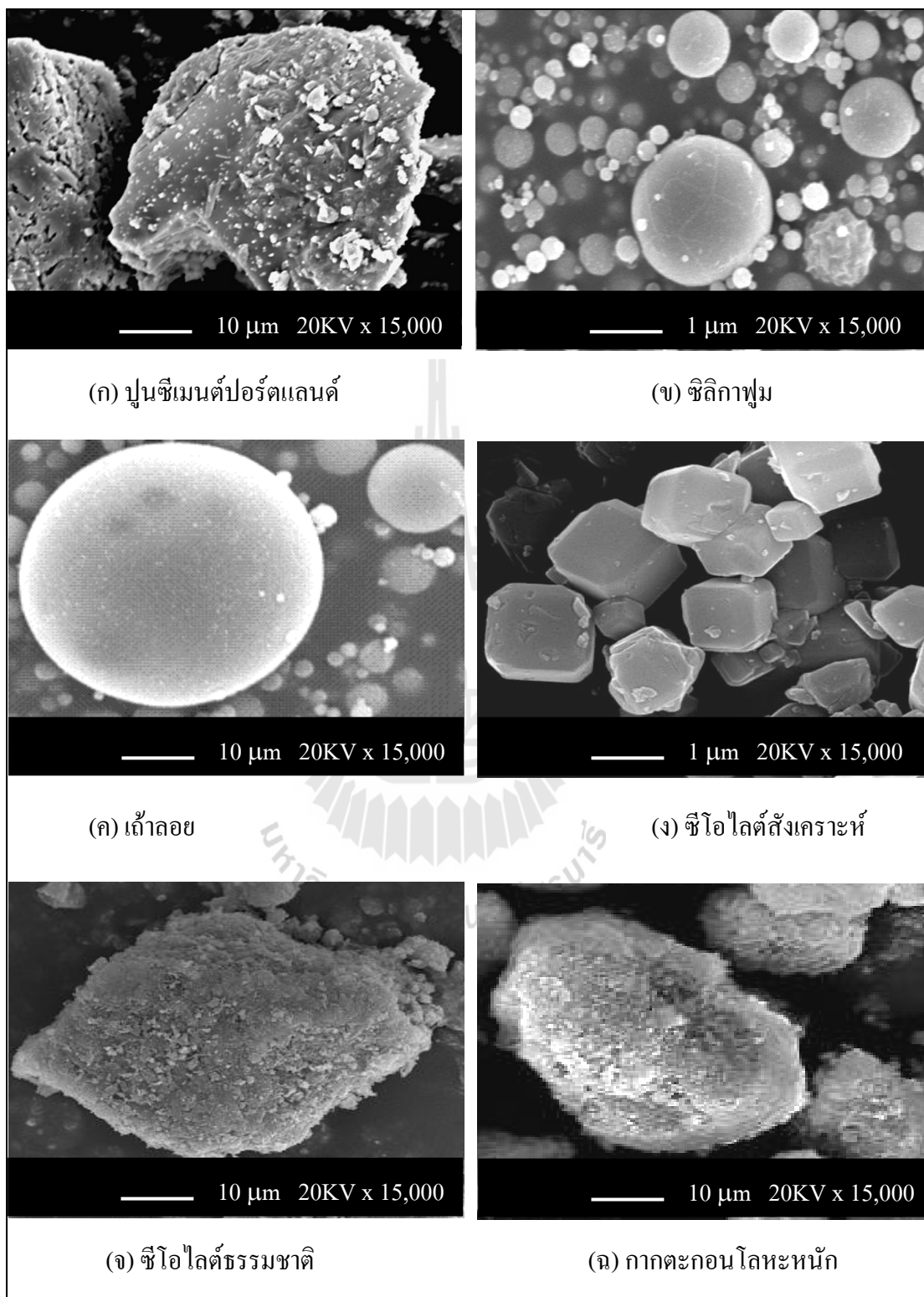
วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย d_{50} (ไมครอน)	พื้นที่ผิวจำเพาะ ($\text{cm}^2/\text{กรัม}$)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3.15	14.12	3,600
ซีลิกาฟูม	2.24	0.15	144,800
เถ้าลอย	2.21	20.13	3,100
ซีโอไลต์สังเคราะห์	1.87	2.51	32,500
ซีโอไลต์ธรรมชาติ	2.09	16.17	5,400
กากตะกอนโลหะหนัก	2.14	34.81	1,900

* Blaine analysis, ** BET analysis



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวอนุภาคของวัสดุ

จากการนำวัสดุยึดประสานและกากตะกอนของเสียไปทำการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และกากตะกอนโลหะหนัก มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และมีเนื้อแน่น ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 (ง) พบว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์ มีพื้นผิวเรียบ รูปร่างมีลักษณะเป็นหกเหลี่ยม ส่วนซิลิกาฟูม (SF) และถ้ำลอย (FA) พบว่ามีรูปร่างกลมมน ผิวเรียบ ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (ข) และ (ค) ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายของวัสดุยึดประสานและกากตะกอนโลหะหนัก

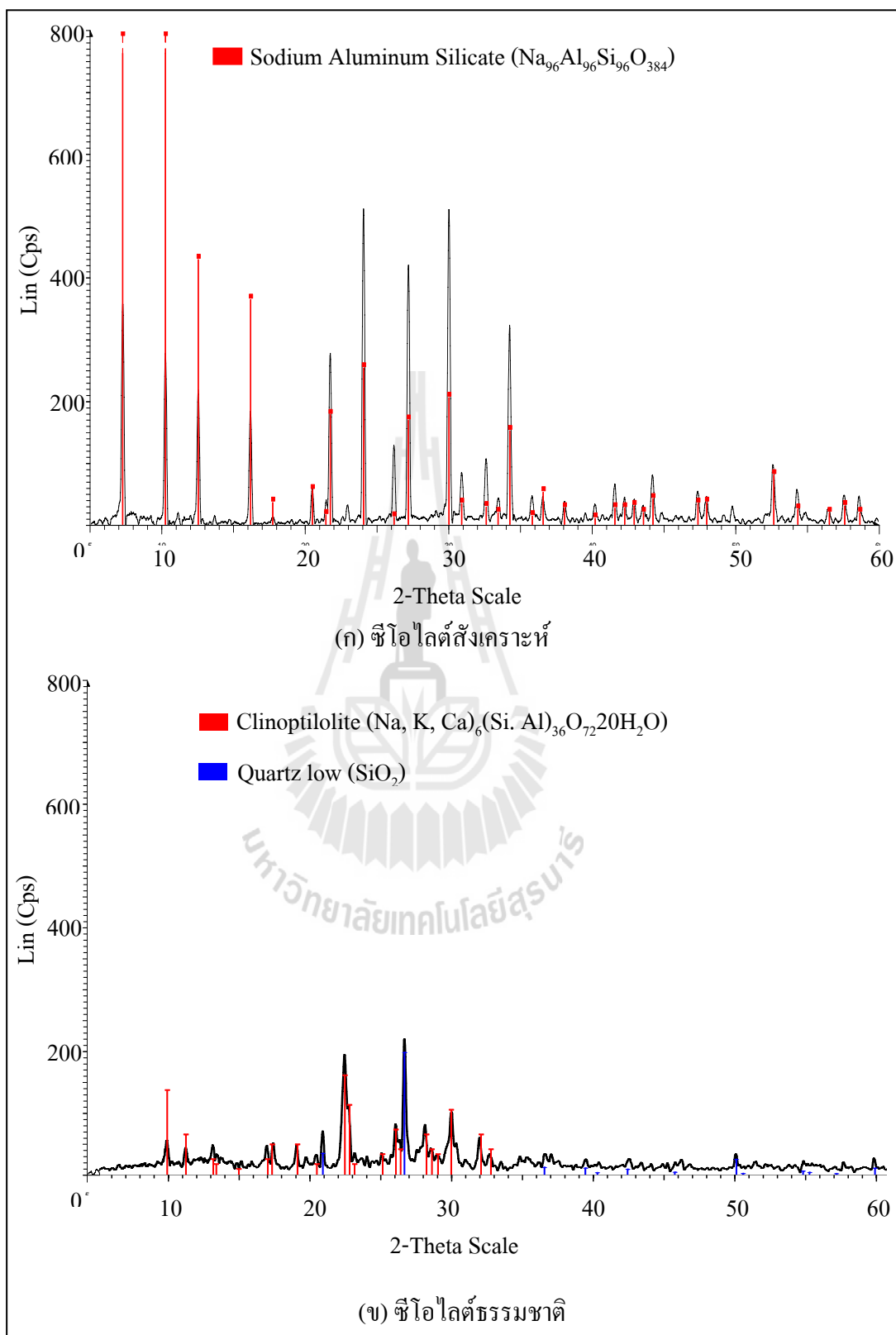
4.2.2 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานพบว่า องค์ประกอบทางเคมีหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกาไดออกไซด์ (SiO₂) มีค่าเท่ากับร้อยละ 66.96 และ 19.85 ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบทางเคมีหลักของซิลิกาฟุ่มเถ้าลอย ซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ คือ ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO₂) มีค่าเท่ากับร้อยละ 94.88 43.87 65.30 และ 75.32 ตามลำดับ และในกากตะกอนโลหะหนัก พบว่า มีปริมาณออกไซด์ของโลหะหนัก นิกเกิล (NiO) ทองแดง (CuO) สังกะสี (ZnO) และโครเมียม (CrO) เท่ากับร้อยละ 40.88 13.08 10.33 และ 0.64 ตามลำดับ และมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 25.32

จากการวิเคราะห์หาแร่ที่เป็นองค์ประกอบเพื่อระบุชนิดของซีโอไลต์ พบว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์ คือ โซเดียมอลูมิเนียมซิลิเกต (Sodium Aluminum Silicate, Na₉₆Al₉₆Si₉₆O₃₈₄) และ ซีโอไลต์ธรรมชาติ คือ ไคลน็อพติโลไลต์ (Clinoptilolite, (Na, K, Ca)₆(Si, Al)₃₆O₇₂·20H₂O) ที่มีแร่ควอตซ์ (Quartz) ผสมอยู่เล็กน้อย ดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานและกากตะกอน

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในวัสดุยึดประสานและกากตะกอน (ร้อยละ)					
	OPC	SF	FA	SZ	NZ	S
SiO ₂	19.85	94.88	43.87	65.30	75.32	5.53
Al ₂ O ₃	4.49	0.73	26.33	26.18	10.28	3.78
Fe ₂ O ₃	3.56	1.34	10.81	0.03	2.66	-
CaO	66.96	0.99	12.69	0.12	3.95	25.32
MgO	1.36	-	1.23	0.08	1.2	-
K ₂ O	0.34	1.42	1.10	2.64	4.29	-
Na ₂ O	-	-	2.74	1.87	0.89	-
NiO	-	-	-	-	-	40.88
CuO	-	-	-	-	-	13.08
ZnO	-	-	-	-	-	10.33
CrO	-	-	-	-	-	0.64
LOI	0.98	-	-	5.65	2.3	0.44



รูปที่ 4.3 องค์ประกอบทางแร่ของซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติ

4.3 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง

4.3.1 ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์

จากการทดลองพบว่าซีเมนต์เพสต์ OPC100 มีค่าความชื้นเหลวปกติร้อยละ 25.5 เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยวัสดุปอซโซลาน ซิลิกาฟูม ซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอนุภาคของวัสดุปอซโซลานดังกล่าวมีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวสูง และภาคในอนุภาคมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้ดูดซึมน้ำได้ดี ตัวอย่างเช่น การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 30 ทำให้เพสต์ OPC30SZ และ OPC30NZ มีความชื้นเหลวปกติเท่ากับร้อยละ 33.2 และ 31.7 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากขึ้น จะต้องเพิ่มปริมาณน้ำให้มากขึ้นด้วย เช่น เพสต์ OPC20SZ OPC30SZ และ OPC40SZ ปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 32.4 33.2 และ 34.4 ตามลำดับ ส่วนปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์แทนที่ด้วยเถ้าลอยมีค่าลดลง เนื่องจากเถ้าลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและมีผิวเรียบทำให้ส่วนผสมทำงานได้ง่ายขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความชื้นเหลวของซีเมนต์เพสต์

ตัวอย่าง	ความชื้นเหลวปกติ (ร้อยละ)
OPC100	25.5
OPC10SF	31.8
OPC30FA	24.8
OPC20SZ	32.4
OPC30SZ	33.2
OPC40SZ	34.4
OPC20NZ	31.2
OPC30NZ	31.7
OPC40NZ	32.0

4.3.2 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

จากการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย พบว่า เพสต์ OPC100 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย เท่ากับ 132 นาที และ 181 นาที ตามลำดับ ส่วนเพสต์ OPC30SF OPC20NZ OPC30NZ และ OPC40NZ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากซิลิกาฟูมและซีโอไลต์ธรรมชาติ มีออกไซด์ของซิลิกาสูง ซึ่งเป็นธาตุที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำให้เกิดการแข็งตัวนั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้น และคุณลักษณะของซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่มีความพรุนสูง ทำให้มีพื้นที่สัมผัสกับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกของปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้เร็วขึ้น ดังนั้นแนวโน้มของระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายจึงลดลง ในขณะที่การแทนที่ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ มากขึ้นจะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น้อยลง เป็นผลทำให้ปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตลดลง จึงเป็นสาเหตุให้เวลาการก่อตัวของเพสต์ที่ผสมซีโอไลต์สังเคราะห์นานกว่าซีเมนต์เพสต์ธรรมดา ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ วิภา นันทมนตรี (2554) ที่พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงอันเนื่องมาจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานมากขึ้น ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

ตัวอย่าง	เวลา (นาที)	
	ระยะก่อตัวเริ่มต้น	ระยะก่อตัวสุดท้าย
OPC100	132	181
OPC10SF	124	185
OPC30FA	131	182
OPC20SZ	141	185
OPC30SZ	142	186
OPC40SZ	143	187
OPC20NZ	132	180
OPC30NZ	131	180
OPC40NZ	130	180

4.3.3 ระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง

จากตารางที่ 4.6 พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะการใส่กากตะกอนมากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น้อยลง ไตรแคลเซียมซัลเฟตและไดแคลเซียมซัลเฟตซึ่งเป็นองค์ประกอบในปูนซีเมนต์ที่สามารถทำปฏิกิริยาเมื่อรวมกับน้ำแล้วก่อให้เกิดแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรตทำให้เกิดการแข็งตัวนั้นมีปริมาณลดลง และโลหะหนักในกากตะกอนยังยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยโดยสารโลหะหนักจะแทรกสอดระหว่างเม็ดปูนและเคลือบผิวเม็ดปูนทำให้ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์เกิดไม่สมบูรณ์ (Hills et al.,1993)

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง

ตัวอย่าง	เวลา (นาที)	
	ระยะก่อตัวเริ่มต้น	ระยะก่อตัวสุดท้าย
OPC40S	148	192
OPC50S	151	195
OPC60S	154	197
OPC10SF40S	130	189
OPC10SF50S	135	191
OPC10SF60S	141	192
OPC30FA40S	145	185
OPC30FA50S	153	188
OPC30FA60S	155	189
OPC20SZ40S	149	186
OPC20SZ50S	152	186
OPC20SZ60S	156	185
OPC30SZ40S	145	185
OPC30SZ50S	153	188
OPC30SZ60S	155	189
OPC40SZ40S	149	188
OPC40SZ50S	151	189

OPC40SZ60S	152	190
------------	-----	-----

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง (ต่อ)

ตัวอย่าง	เวลา (นาที)	
	ระยะก่อตัวเริ่มต้น	ระยะก่อตัวสุดท้าย
OPC20NZ40S	135	184
OPC20NZ50S	135	185
OPC20NZ60S	136	186
OPC30NZ40S	135	183
OPC30NZ50S	137	183
OPC30NZ60S	138	186
OPC40NZ40S	135	184
OPC40NZ50S	136	185
OPC40NZ60S	136	187

4.4 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง

4.4.1 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วย ซิลิกาฟูม เถ้าลอย ซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ พบว่า กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุม (OPC100) ที่อายุการบ่ม 728 และ 90 วัน เท่ากับ 548.3 743.4 และ 809.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนก้อนตัวอย่าง OPC10SF สามารถให้กำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมทุกอายุการบ่มคือ 561.3 841.4 และ 887.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ไม่เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นทำให้เกิดการสะสมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในระบบเพิ่มมากขึ้น ถึงระดับที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างซิลิกาฟูมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีคุณสมบัติยึดประสานและแทรกตามช่องเปิดของซีเมนต์ประกอบด้วยซิลิกาฟูมมีอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกอยู่ตามช่องว่างได้ดีทำให้โครงสร้างภายในแข็งแรง ส่งผลให้ความสามารถรับกำลังอัดของเพสต์ OPC10SF สูงกว่าเพสต์ OPC100 สอดคล้องกับผลการทดลอง

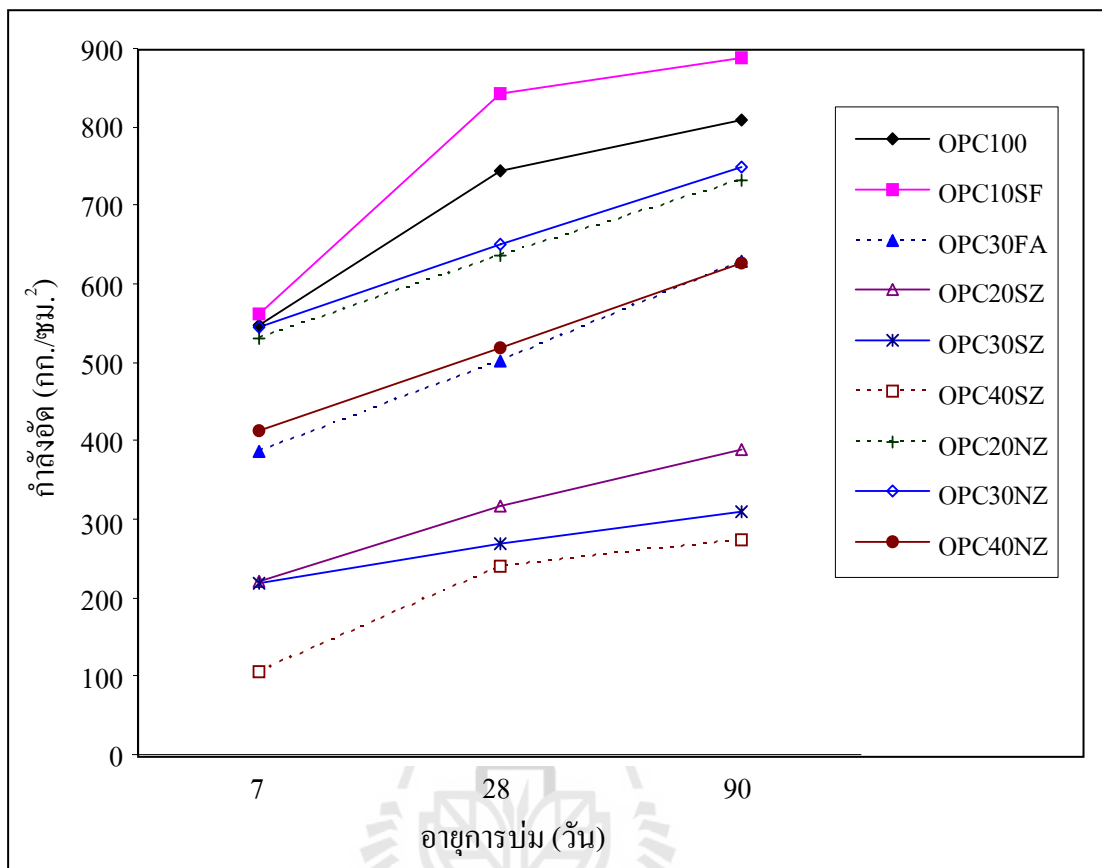
ของ Asavapisit et al. (2001) ที่พบว่าระยะเวลาการบ่ม 3 ถึง 90 วัน ความสามารถรับกำลังอัดของตัวอย่างที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาควมแน่นร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยี่ดประสานเท่ากับ 0.45 ให้ความสามารถรับกำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ ก้อนตัวอย่าง OPC30FA ให้กำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 28 และ 90 วัน เท่ากับ 386.8 502.2 และ 629.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ ให้กำลังอัดค่อนข้างต่ำทุกอัตราส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม เช่น เพสต์ OPC20SZ ให้กำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 28 และ 90 วัน เท่ากับ 220.3 317.1 และ 388.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 40.2 42.7 และ 48.0 ตามลำดับ

ส่วนผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ พบว่า อัตราส่วนที่ให้กำลังอัดมากที่สุดคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 และกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ OPC30NZ ให้กำลังอัดใกล้เคียงซีเมนต์เพสต์ควบคุมทุกอายุการบ่มมากที่สุด คือที่อายุการบ่ม 7 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 544.9 650.3 และ 747.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 99.4 87.5 และ 92.4 ตามลำดับ ในขณะที่เพสต์ OPC40NZ ให้กำลังอัดต่ำสุดทุกอายุการบ่ม เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติสูงถึงร้อยละ 40 ทำให้กำลังอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นน้อย เนื่องจากเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ ทำให้สัดส่วนของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ลดลง ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ลดลง จึงมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไม่เพียงพอสำหรับทำปฏิกิริยาปอชโซลานิก ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาของสารปอชโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จึงเกิดขึ้นได้น้อย ดังนั้นความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งจึงลดลง อีกทั้งการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้อัตราการระเหยของน้ำรวมทั้งความสามารถในการรับแรงอัดลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติสูงขึ้นส่งผลให้กำลังอัดช่วงอายุต้นมีค่าต่ำแต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาปอชโซลานิกเพิ่มขึ้น (Hills et al., 1993)

ตารางที่ 4.7 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด, กก./ซม. ² (ร้อยละเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม)		
	7 วัน	28 วัน	90 วัน
OPC100	548.3 (100.0)	743.4 (100.0)	809.2 (100.0)
OPC10SF	561.3 (102.4)	841.4 (113.2)	887.7 (109.7)
OPC30FA	386.8 (70.5)	502.2 (67.6)	629.0 (77.7)
OPC20SZ	220.3 (40.2)	317.1 (42.7)	388.8 (48.0)
OPC30SZ	218.3 (39.8)	267.6 (36.0)	310.4 (38.4)
OPC40SZ	104.5 (19.1)	239.2 (32.2)	274.3 (33.9)
OPC20NZ	530.3 (96.7)	636.1 (85.6)	731.4 (90.4)
OPC30NZ	544.9 (99.4)	650.3 (87.5)	747.8 (92.4)
OPC40NZ	413.1 (75.3)	517.4 (69.6)	625.2 (77.3)





รูปที่ 4.4 การพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

4.4.2 กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง

การทดสอบกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักในอัตราร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุการบ่ม 7 28 และ 90 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มตัวในแต่ละอัตราส่วนผสม และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสมที่อายุการบ่มเท่ากัน เนื่องจากปริมาณกากตะกอนโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของวัสดุยึดประสานในส่วนผสมลดลง ซึ่งจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้น้อย และกากตะกอนโลหะหนักจะแทรกสอดระหว่างเม็ดปูนและเคลือบผิวเม็ดปูนทำให้ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์เกิดไม่สมบูรณ์ สอดคล้องกับ Hills et al. (1993) ที่รายงานว่า การเพิ่มปริมาณของเสียในการหล่อแข็งจะทำให้อัตราการเกิดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง โดยการเพิ่มกากของเสียจะทำให้สัดส่วนของปูนซีเมนต์ในการผสมลดลง ส่งผลให้เกิดการบวมและแตกร้าวภายในโครงสร้าง ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ดังนั้นกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักบางอัตราส่วนจึงมีกำลังอัดต่ำกว่าค่ามาตรฐานความสามารถในการรับแรงอัดของการหล่อแข็งของเสียเพื่อการฝังกลบ ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานของ US.EPA จะต้องมากกว่า 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

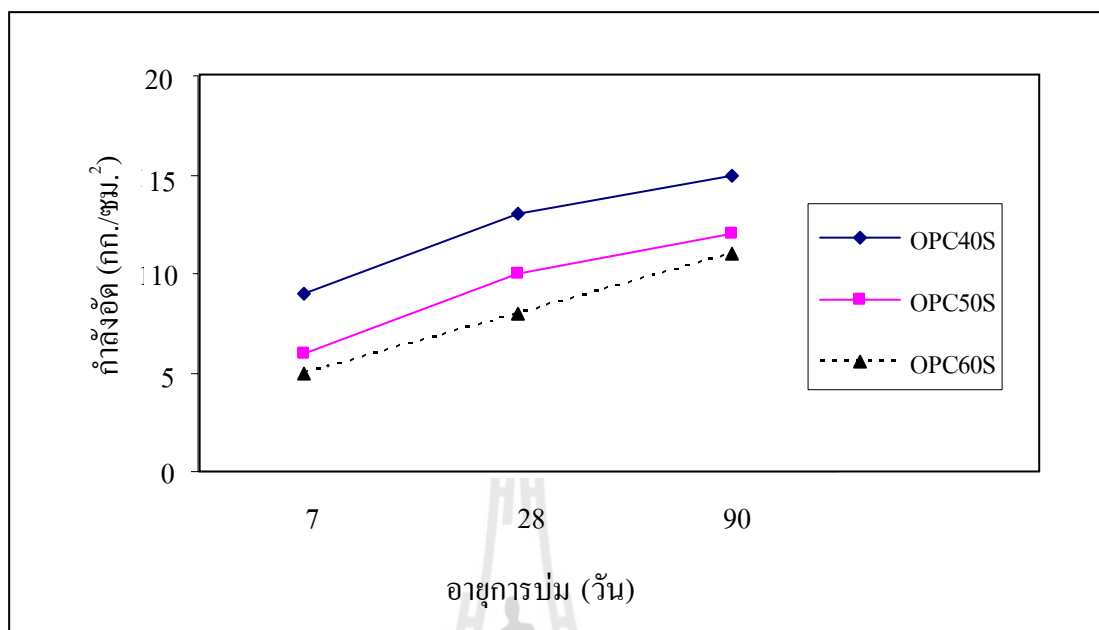
ตารางที่ 4.8 กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)			ค่ามาตรฐาน (กก./ซม. ²)
	7 วัน	28 วัน	90 วัน	
OPC40S	9.3	12.9	15.4	10
OPC50S	6.1	10.2	11.9	10
OPC60S	5.2	8.3	11.2	10
OPC10SF40S	46.8	126.8	146.4	10
OPC10SF50S	18.2	28.4	35.0	10
OPC10SF60S	10.2	13.3	14.9	10
OPC30FA40S	9.2	11.4	19.2	10
OPC30FA50S	7.8	10.0	13.3	10
OPC30FA60S	5.1	5.9	11.2	10

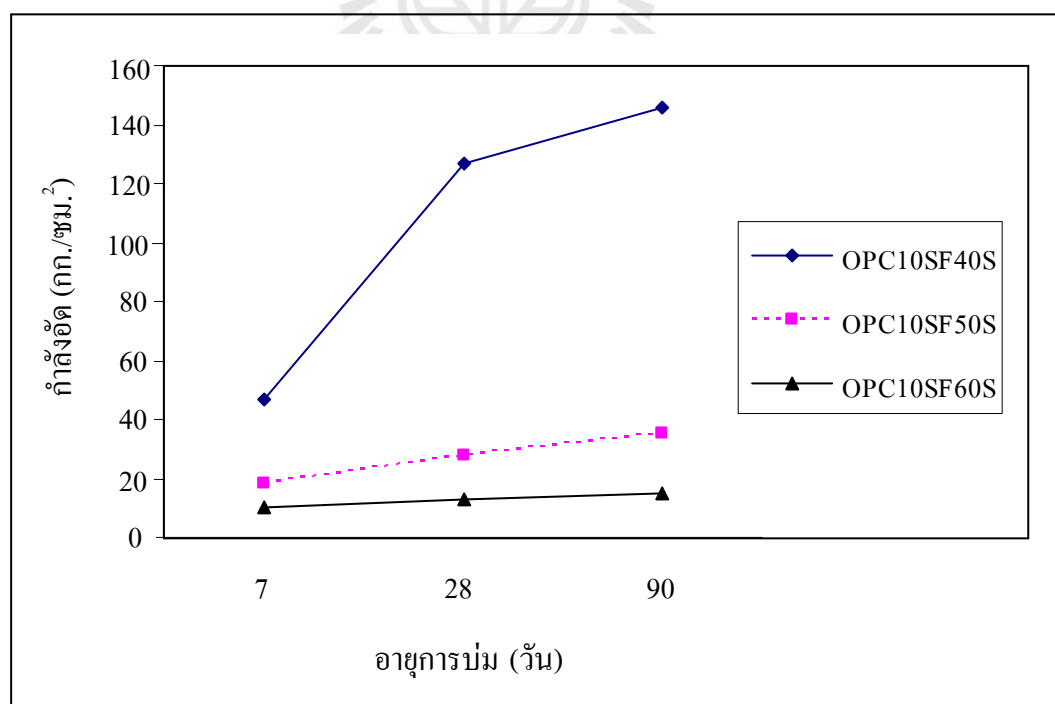
ตารางที่ 4.8 กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง (ต่อ)

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)			ค่ามาตรฐาน (กก./ซม. ²)
	7 วัน	28 วัน	90 วัน	
OPC20SZ40S	21.0	137.9	164.0	10
OPC20SZ50S	13.3	50.2	109.1	10
OPC20SZ60S	8.2	14.1	20.4	10
OPC30SZ40S	5.2	74.1	164.0	10
OPC30SZ50S	3.3	44.9	131.1	10
OPC30SZ60S	2.3	11.8	31.2	10
OPC40SZ40S	3.4	61.1	177.4	10
OPC40SZ50S	3.0	43.2	138.7	10
OPC40SZ60S	1.3	12.0	32.6	10
OPC20NZ40S	442.0	584.2	665.1	10
OPC20NZ50S	364.4	500.3	594.6	10
OPC20NZ60S	311.3	421.5	512.9	10
OPC30NZ40S	300.2	504.1	567.8	10
OPC30NZ50S	229.3	425.3	489.4	10
OPC30NZ60S	103.4	319.4	370.2	10
OPC40NZ40S	199.0	369.2	443.1	10
OPC40NZ50S	155.2	320.7	401.3	10
OPC40NZ60S	123.3	265.1	345.4	10

สำหรับก้อนหล่อแข็งที่มีภาคตะกอนร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก และมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสาน พบว่า กำลังอัดก้อนหล่อแข็งที่อายุบ่ม 7 วัน ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน คือก้อนหล่อแข็ง OPC40S OPC50S และ OPC60S มีค่าเท่ากับ 9.3 6.1 และ 5.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

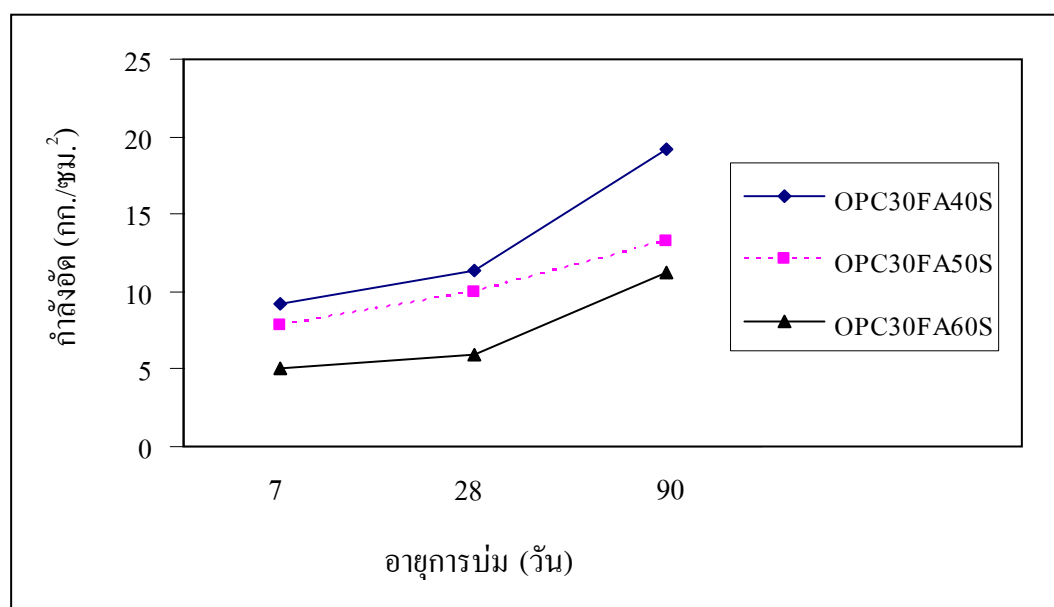


รูปที่ 4.5 การพัฒนากําลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC เป็นวัสดุยึดประสาน



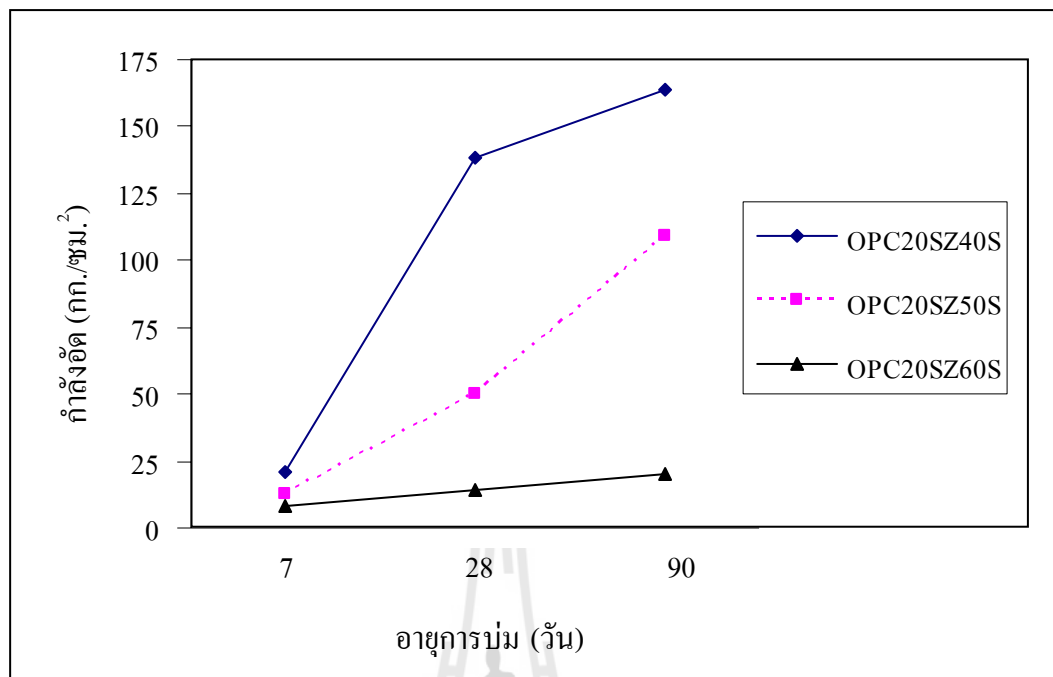
รูปที่ 4.6 การพัฒนากําลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ SF ร้อยละ 10 เป็นวัสดุยึดประสาน

สำหรับก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุอัดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุอัดประสาน พบว่าเมื่ออายุการบ่ม 7 วันจะให้ค่าความสามารถในการรับแรงอัดเท่ากับ 47 18 และ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นอัตราการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว คือที่อายุ 28 และ 90 วัน ความสามารถในการรับแรงอัดเท่ากับ 127 และ 146 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ก้อนหล่อแข็งที่มีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 50 และ 60 อัตราการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ คือที่อายุ 28 และ 90 วัน ความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 50 เท่ากับ 28 และ 35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และก้อนหล่อแข็งที่มีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 60 เท่ากับ 13 และ 15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานฝังกบอย่างปลอดภัยของ US.EPA พบว่า มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ทุกระยะเวลาในการบ่ม

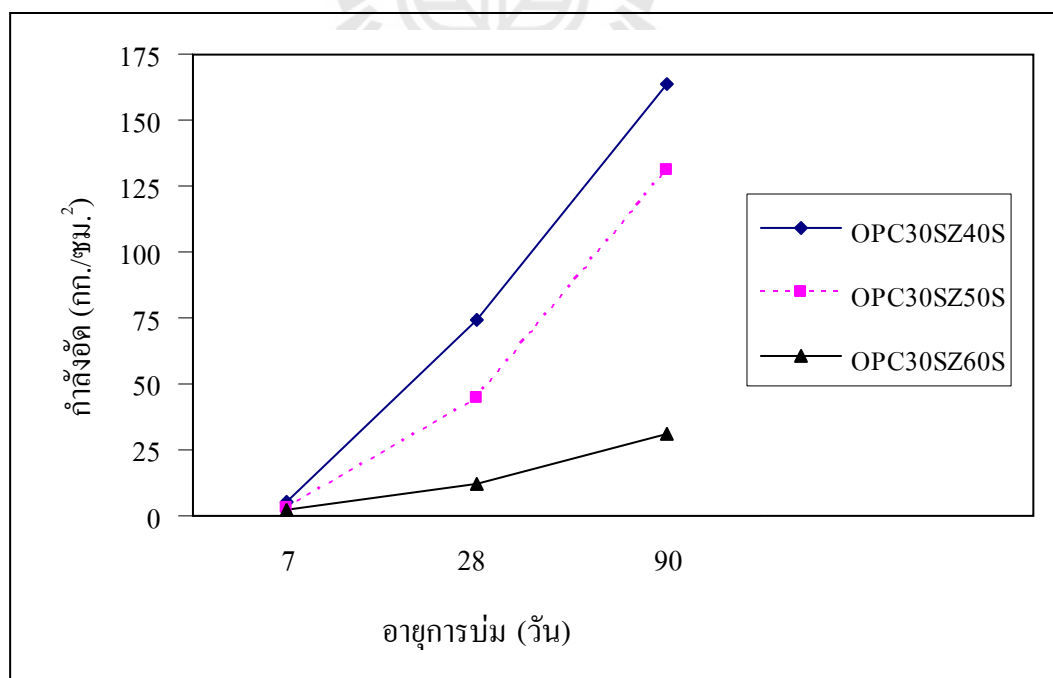


รูปที่ 4.7 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ FA ร้อยละ 30 เป็นวัสดุอัดประสาน

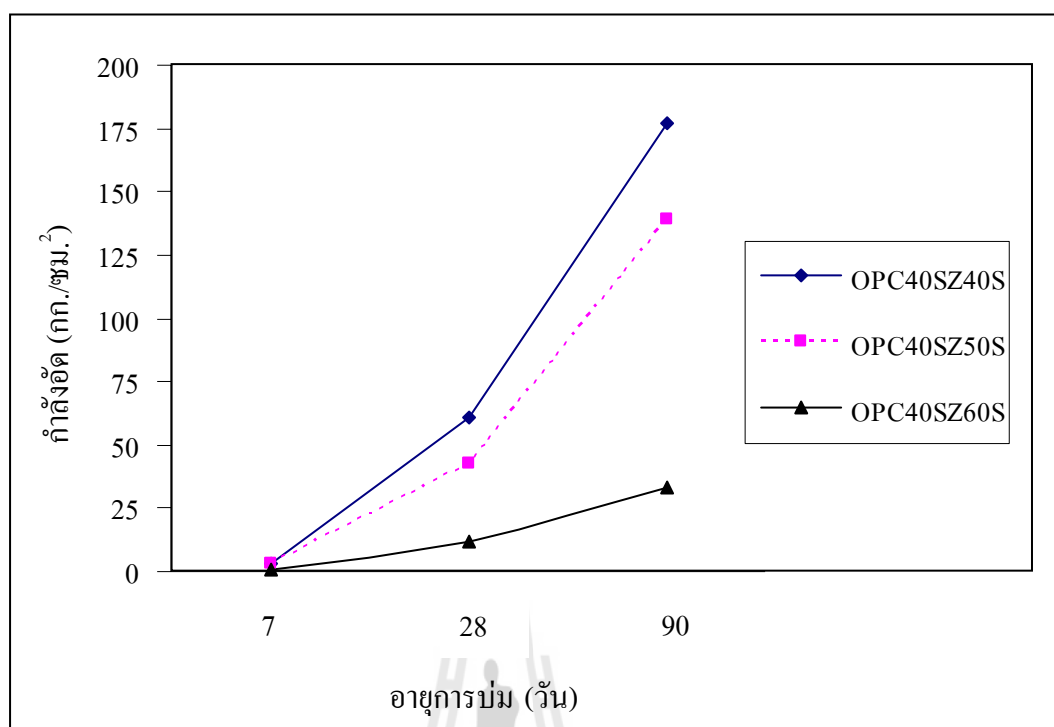
สำหรับก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุอัดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุอัดประสาน พบว่าเมื่ออายุการบ่ม 7 วันจะให้ค่าความสามารถในการรับแรงอัดเท่ากับ 9.2 7.8 และ 5.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานฝังกบอย่างปลอดภัยของ US.EPA ที่กำหนดไว้ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 28 และ 90 วัน อัตราการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ คือ เท่ากับ 11.4 10.0 5.9 และ 19.2 13.3 11.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 ส่วนก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุอัดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักปริมาณร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุอัดประสาน พบว่าเมื่ออายุการบ่ม 7 วัน ก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 30 และ 40 จะให้ค่าความสามารถในการรับแรงอัดต่ำกว่าค่ามาตรฐานฝังกบอย่างปลอดภัยของ US.EPA กำหนดไว้ คือเท่ากับ 5.2 3.3 2.3 และ 3.4 3.0 1.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 20 30 และ 40 ที่มีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 และ 50 มีอัตราการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ยกเว้นก้อนหล่อแข็งที่มีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 60 อัตราการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ดังรูปที่ 4.8-10



รูปที่ 4.8 การพัฒนากําลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ SZ ร้อยละ 20 เป็นวัสดุยึดประสาน

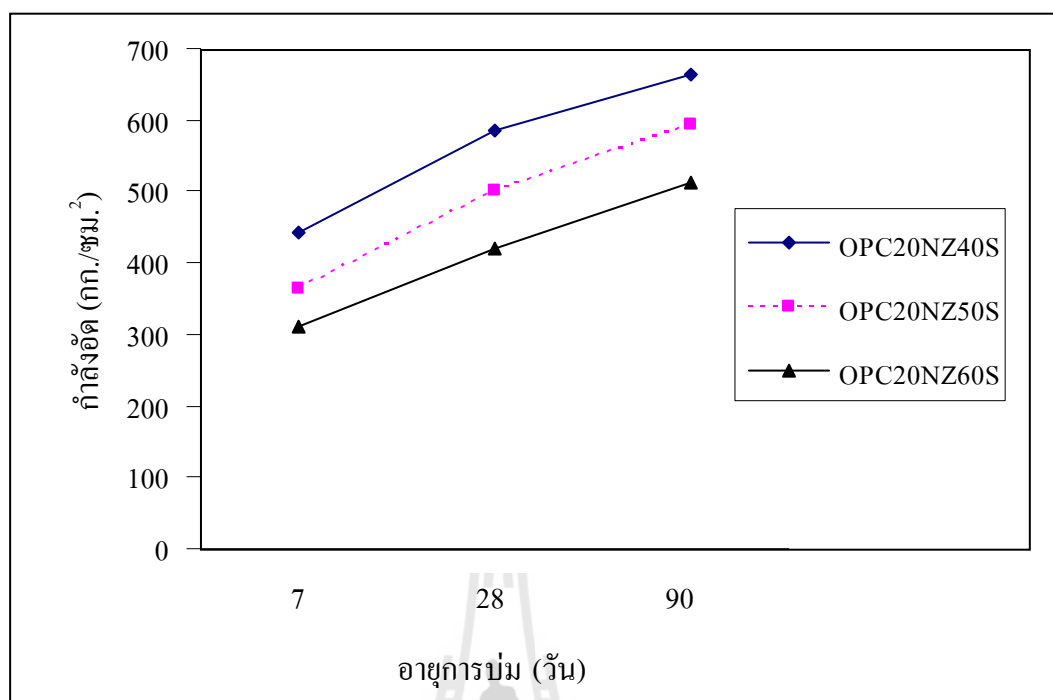


รูปที่ 4.9 การพัฒนากําลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ SZ ร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสาน

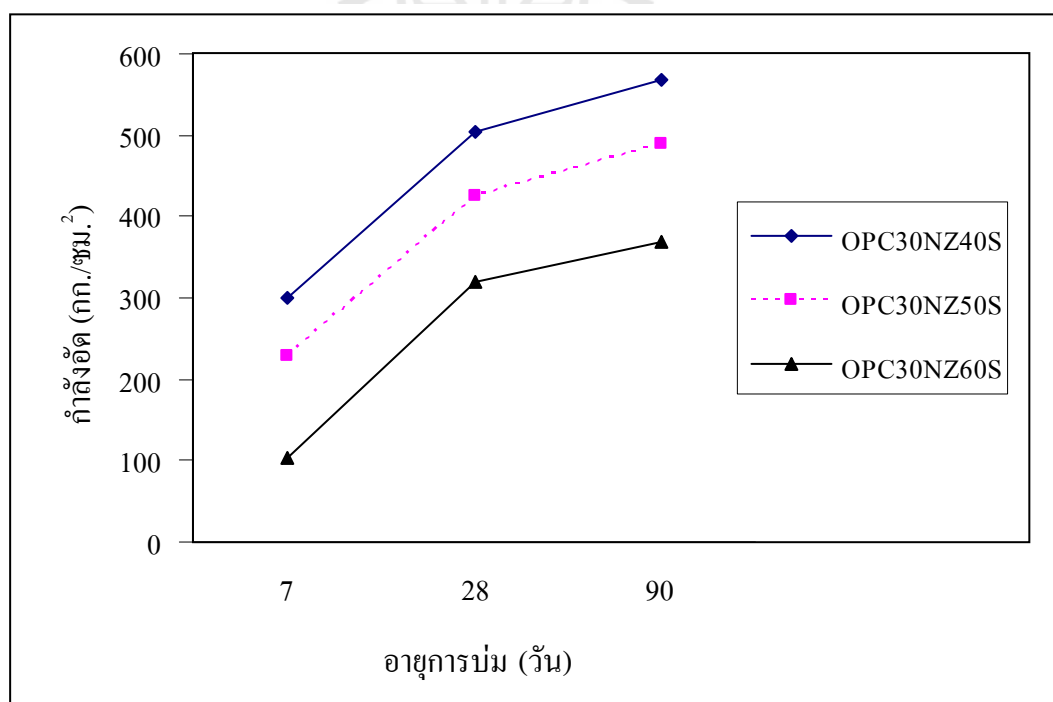


รูปที่ 4.10 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ SZ ร้อยละ40 เป็นวัสดุยึดประสาน

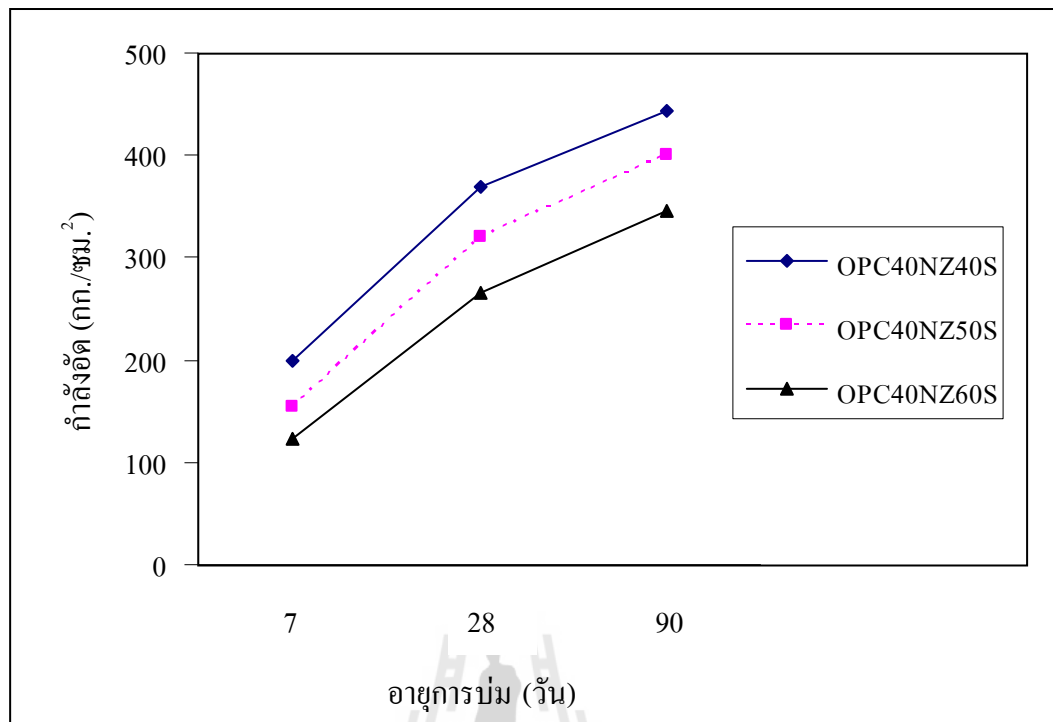




รูปที่ 4.11 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ NZ ร้อย 20 เป็นวัสดุยึดประสาน



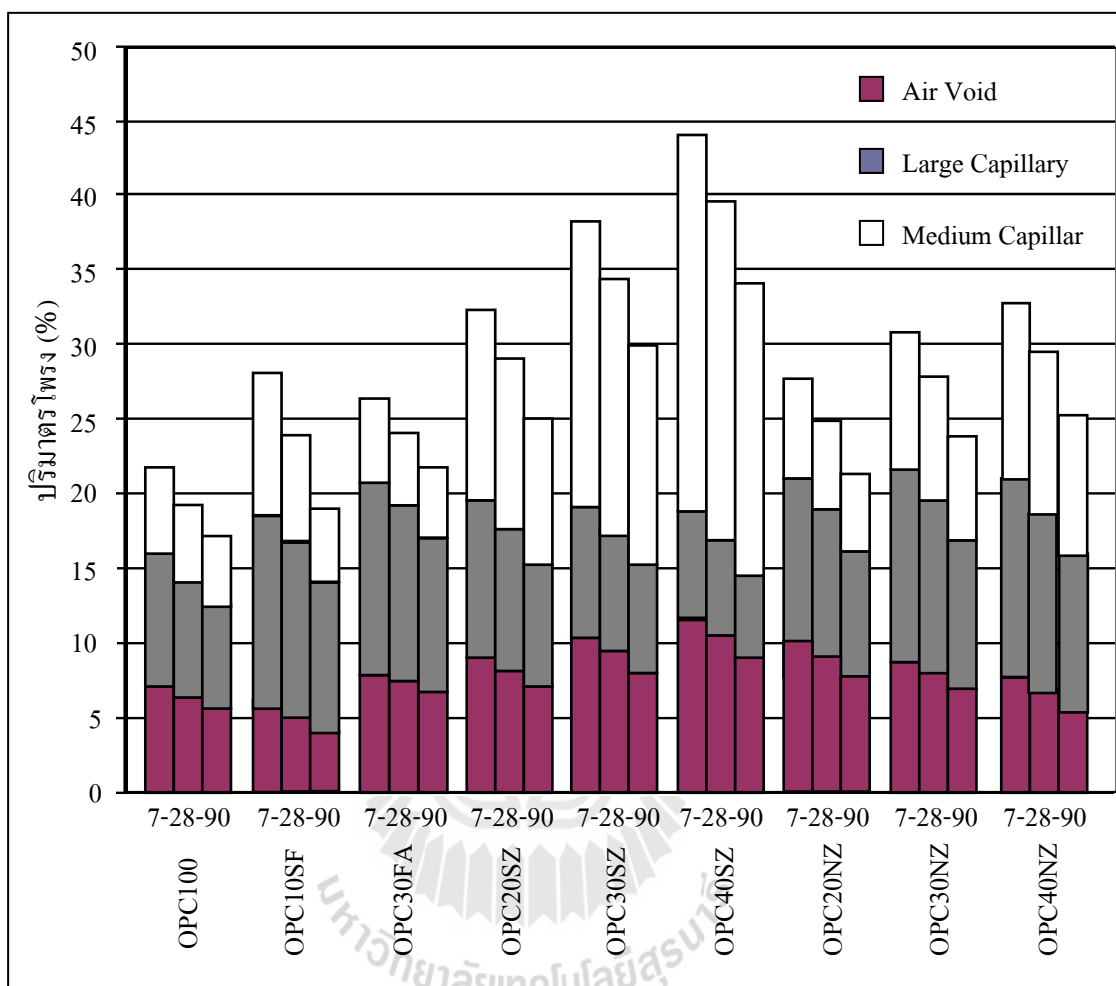
รูปที่ 4.12 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ NZ ร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสาน



รูปที่ 4.13 การพัฒนากําลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ NZ ร้อยละ 40 เป็นวัสดุยึดประสาน

สำหรับก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุยึดประสานและมีกาตะก้อนโลหะหนักปริมาณ ร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน พบว่า ก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติทุกอัตราส่วนมีกําลังอัดค่อนข้างสูงและมีค่ามากกว่า ค่ามาตรฐานฝังกบอย่างปลอดภัยของ US.EPA ที่กำหนดไว้ทุกระยะเวลาในการบ่ม การพัฒนา กําลังอัดในช่วง 7 ถึง 28 วัน มีอัตราการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และ ในช่วง 28 ถึง 90 วัน อัตราการรับแรงของก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ดังรูปที่ 4.11-13

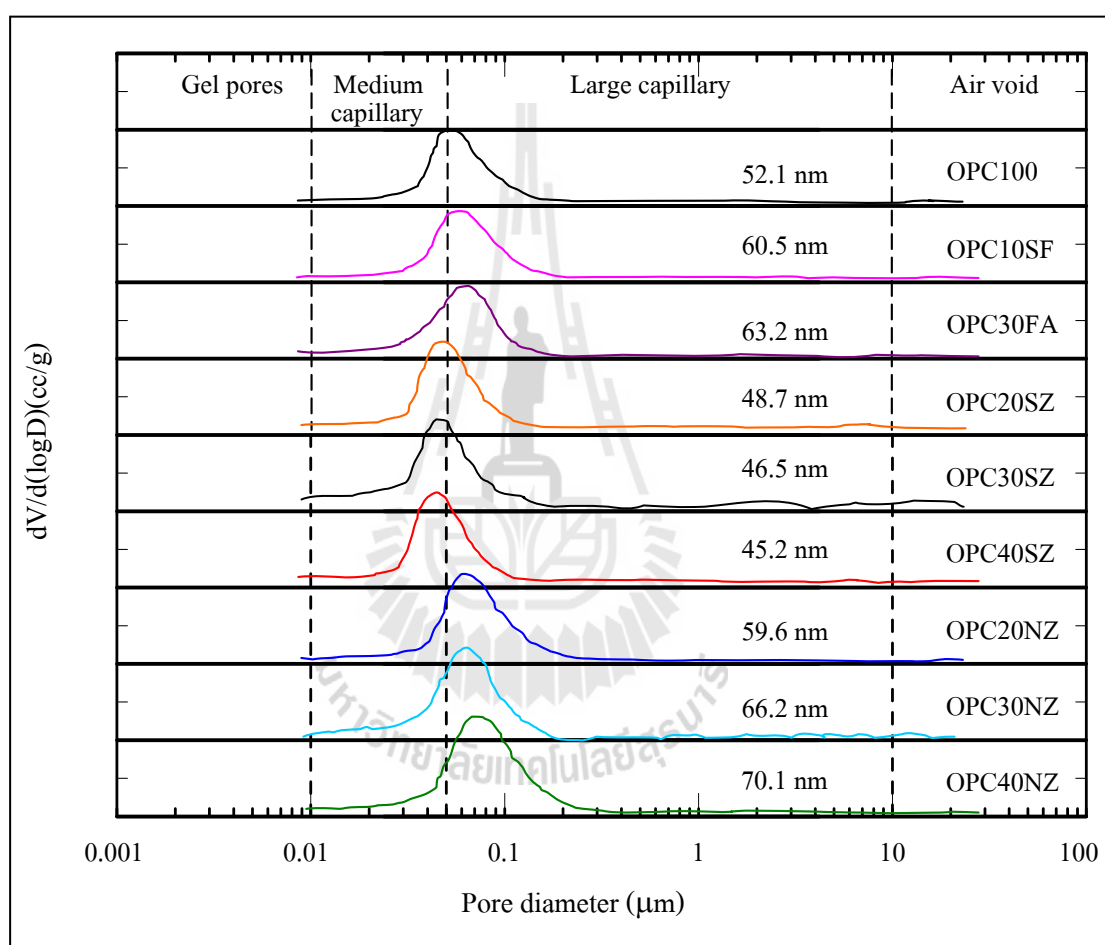
4.5 ปริมาณและการกระจายตัวของโพรง



รูปที่ 4.14 ปริมาณโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 7 28 และ 90 วัน

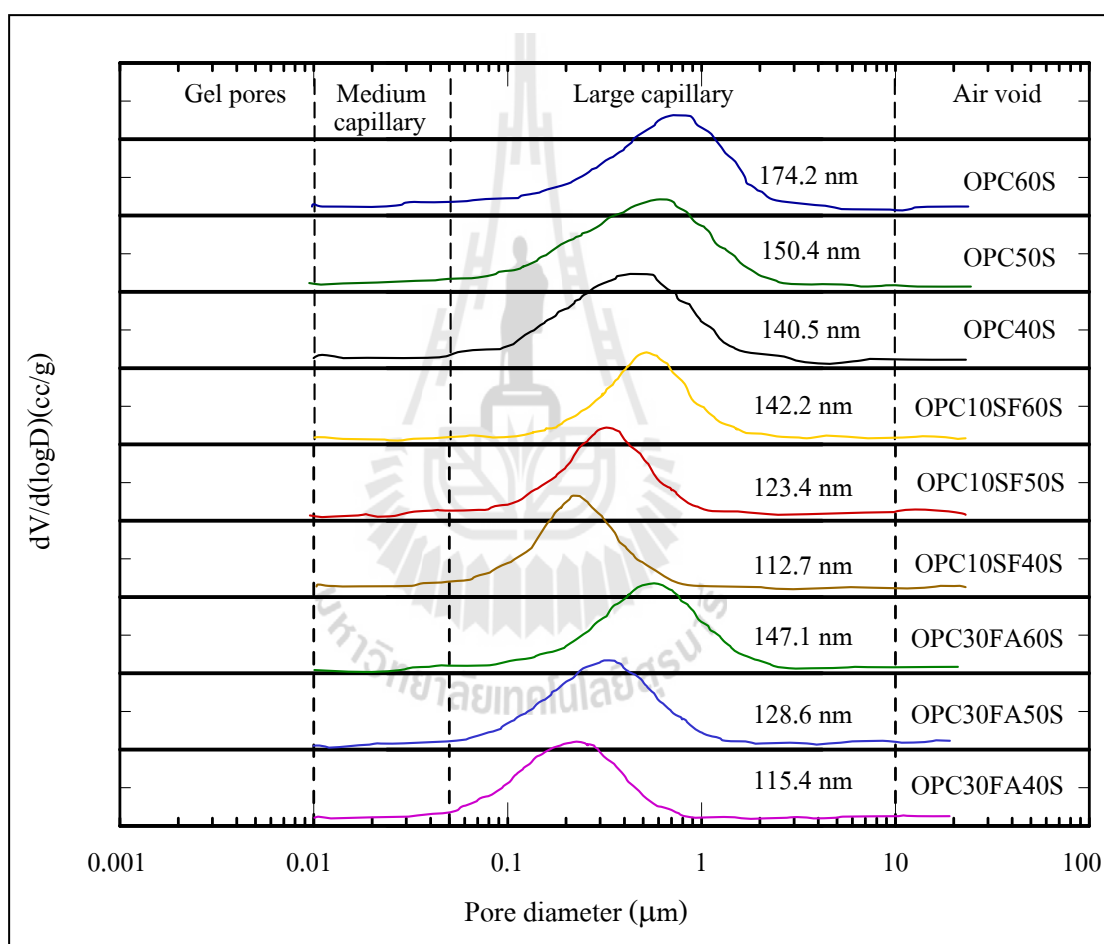
จากรูปที่ 4.14 พบว่าปริมาณโพรงทั้งหมด (Total Porosity) มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซิลิกาฟูม เถ้าลอย ซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของซิลิกาฟูม เถ้าลอย ซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติมีรูพรุนหรือโพรงขนาดเล็กเชื่อมต่อกัน เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณโพรง และพื้นที่โพรงสูงขึ้น แต่ขนาดเฉลี่ยของโพรง (Average Pore) พบว่ามีขนาดเล็กลงเป็นเพราะว่าขนาดอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์มีขนาดเล็กมาก (ขนาดเฉลี่ยประมาณ 2.51 ไมครอน) เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีขนาดเฉลี่ย

ประมาณ 14.12 ไมครอน ขนาดที่เล็กของซีโอไลต์สังเคราะห์จะไปแทรกตัวระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้ช่องว่างลดลง (ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และคณะ, 2550) ส่วนขนาดเฉลี่ยของโพรงที่เกิดจากการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยและซีโอไลต์ธรรมชาติใกล้เคียงกับเพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากขนาดอนุภาคของเถ้าลอยและซีโอไลต์ธรรมชาติกับปูนซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน



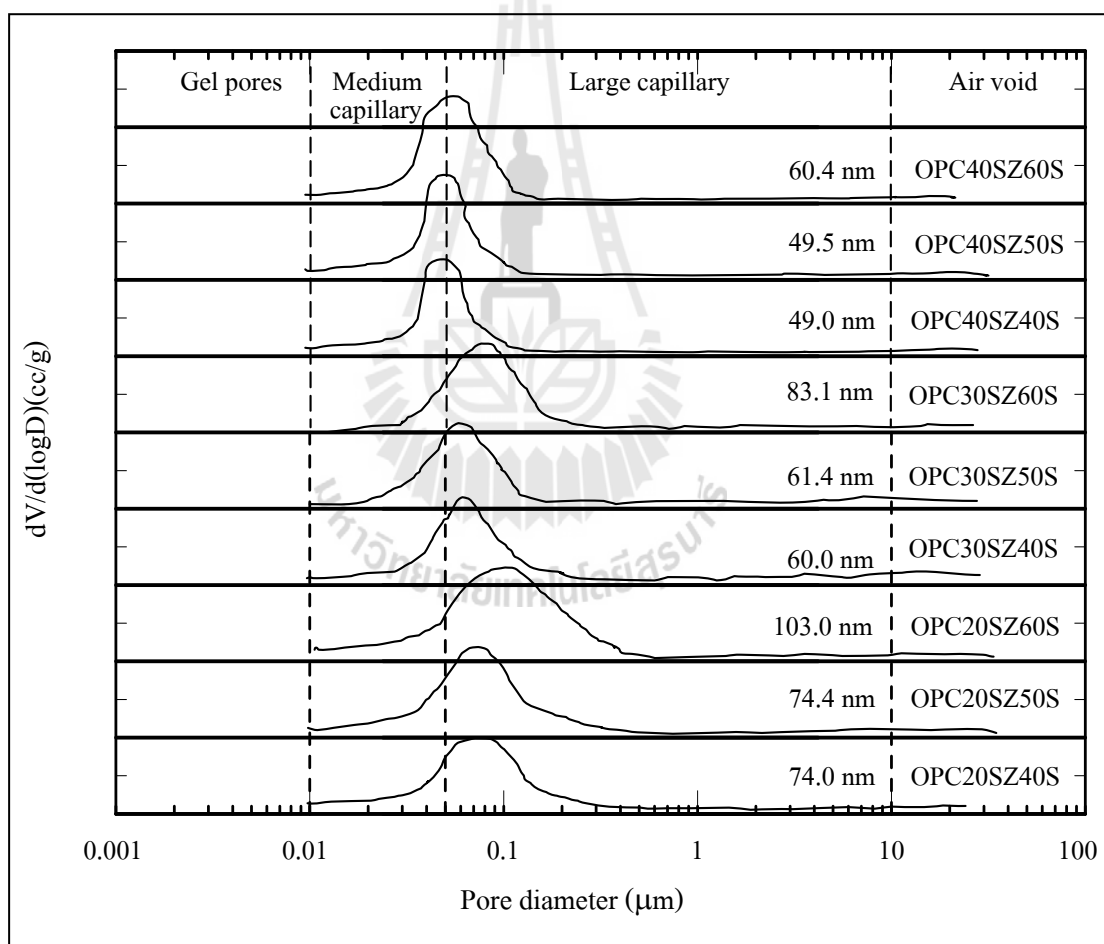
รูปที่ 4.15 การกระจายโพรงของซีเมนต์เพสต์แทนที่บางส่วนด้วยวัสดุพอซโซลาน อายุ 28 วัน

จากรูปที่ 4.15 พบว่า เพสต์ที่ไม่มี การแทนที่ปูนซีเมนต์มีขนาดเฉลี่ยของโพรงเท่ากับ 52.1 นาโนเมตร เพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซิลิกาฟูมและเถ้าลอยมีขนาดเฉลี่ยของโพรงเท่ากับ 60.5 และ 63.2 นาโนเมตร ตามลำดับ เพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 20 30 และ 40 มีขนาดเฉลี่ยของโพรงอยู่ในช่วง Medium capillary คือ 48.7 46.5 และ 45.2 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 20 30 และ 40 มีขนาดเฉลี่ยของโพรง 59.6 66.2 และ 70.1 นาโนเมตร ตามลำดับ



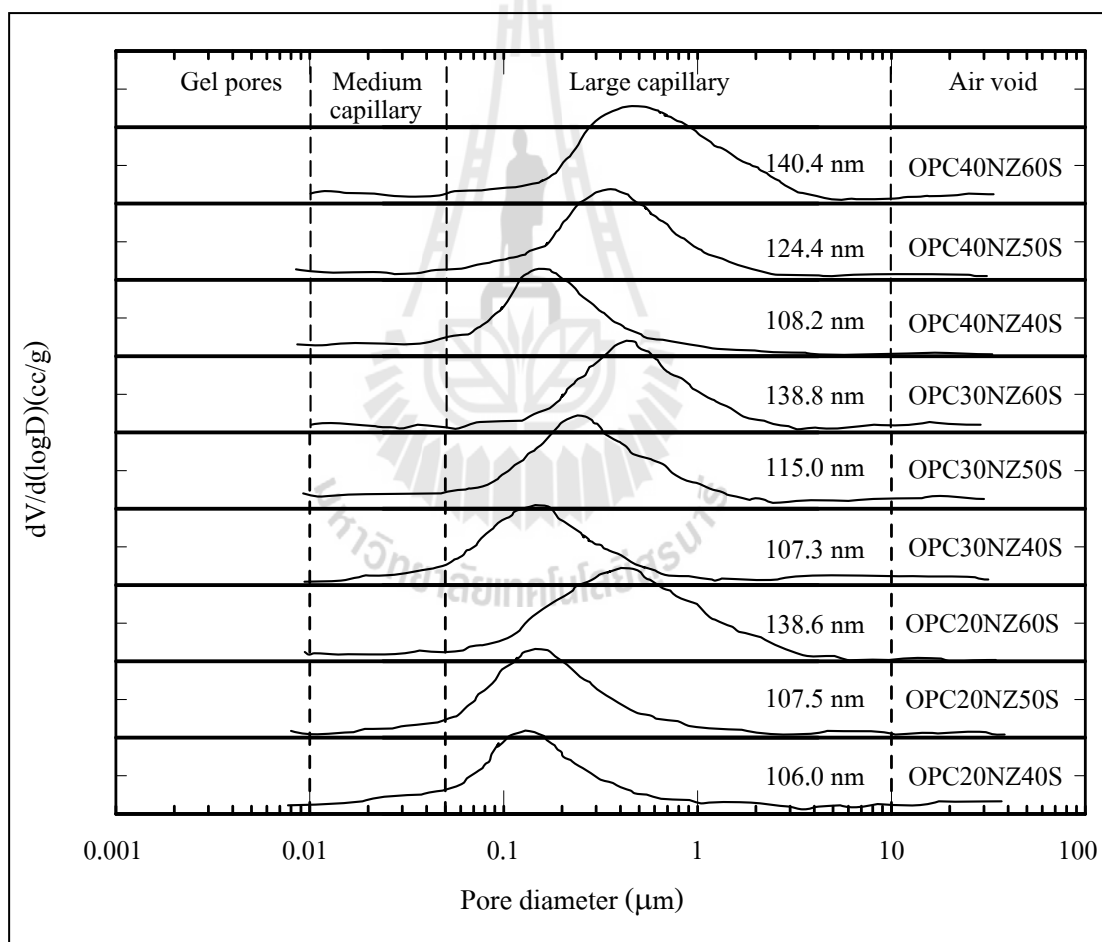
รูปที่ 4.16 การกระจายโพรงของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วัน ที่มี OPC SF และ FA เป็นวัสดุยึดประสาน

จากรูปที่ 4.16 พบว่า ก้อนหล่อแข็งที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานอย่างเดียว และก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซิลิกาฟุ่ม และเถ้าลอยร้อยละ 10 และ 30 ตามลำดับ มีขนาดเฉลี่ยของโพรงใหญ่ขึ้น ตามอัตราส่วนของกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารโลหะหนักทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดไม่สมบูรณ์ เพราะมีการยับยั้งปฏิกิริยาบางส่วนโดยสารโลหะหนักจะแทรกสอดระหว่างเม็ดปูนและเคลือบผิวเม็ดปูน และเนื่องจากปริมาณกากตะกอนโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของวัสดุยึดประสานในส่วนผสมลดลง ซึ่งจะทำให้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้ขนาดเฉลี่ยของโพรงใหญ่



รูปที่ 4.17 การกระจายโพรงของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วัน ที่มี OPC และ SZ เป็นวัสดุยึดประสาน

จากรูปที่ 4.17 พบว่า ก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุยึดประสาน มีขนาดเฉลี่ยของโพรงใหญ่ขึ้น ตามอัตราส่วนของกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับรูปที่ 4.18 เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นวัสดุยึดประสาน ทั้งนี้เนื่องจากสารโลหะหนักทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดไม่สมบูรณ์ มีการยับยั้งปฏิกิริยาบางส่วน และปริมาณกากตะกอนของเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของวัสดุยึดประสานในส่วนผสมลดลง ซึ่งจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้ขนาดเฉลี่ยของโพรงใหญ่

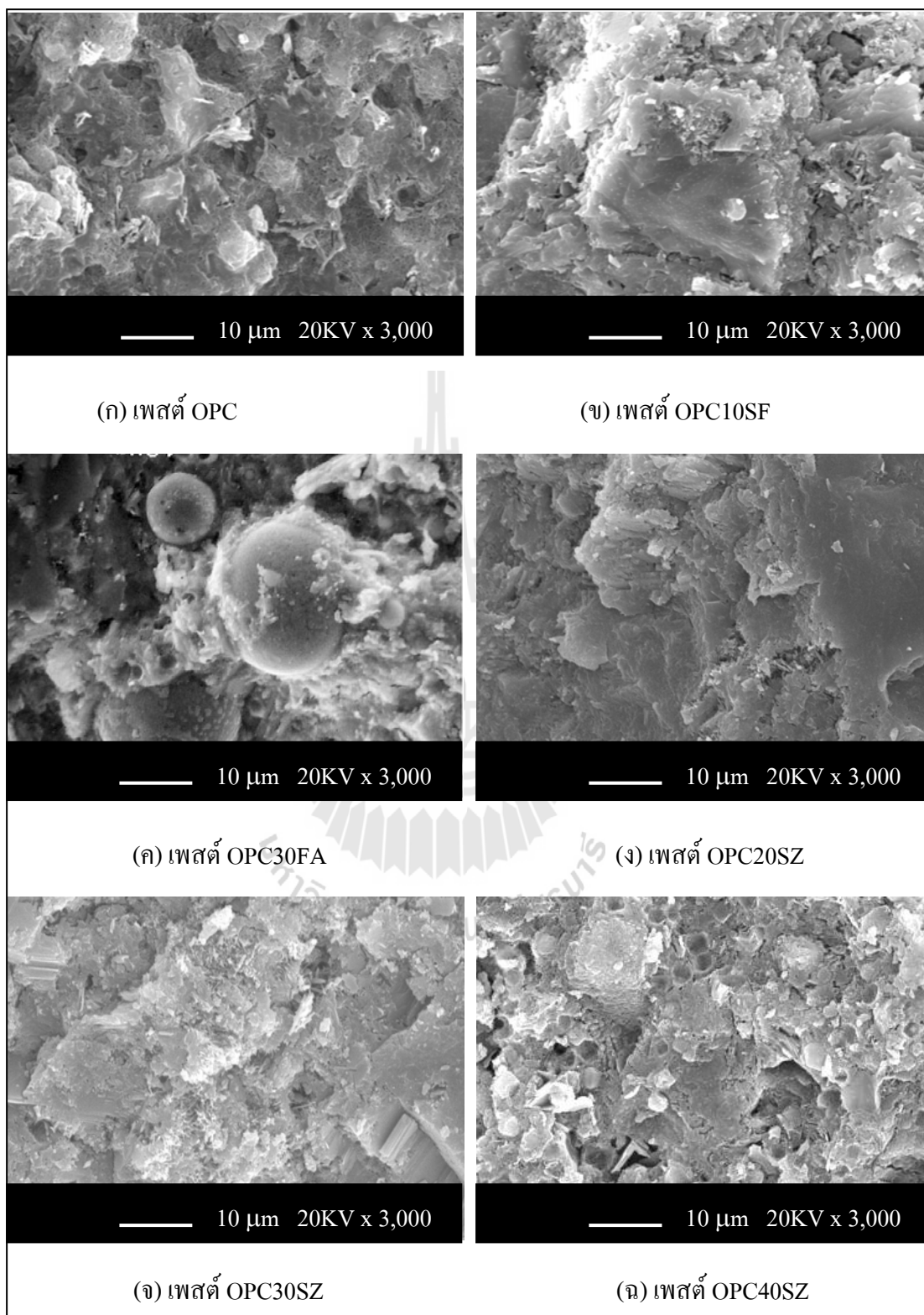


รูปที่ 4.18 การกระจายโพรงของก้อนหล่อแข็งที่มี OPC และ NZ เป็นวัสดุยึดประสานที่อายุ 28 วัน

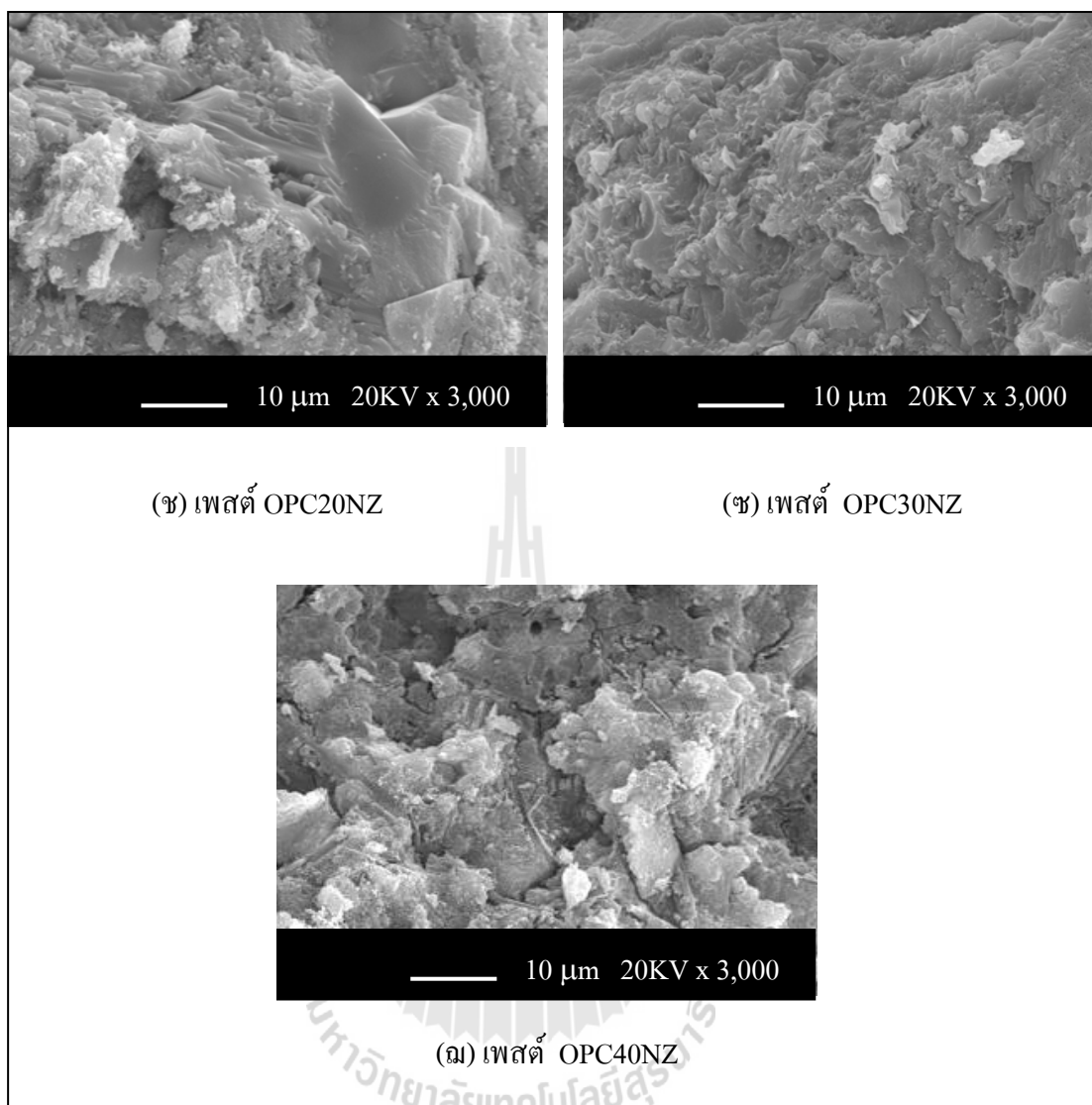
4.6 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซีเมนต์เพสต์และก้อนหล่อแข็ง

จากรูปที่ 4.19 พบว่าเพสต์ OPC100 มีความพรุนและช่องว่างกระจายอยู่ทั่ว เมื่อพิจารณาเพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ พบว่าเพสต์มีความแน่นขึ้น สอดคล้องกับผลวิเคราะห์การกระจายตัวของโพรง กล่าวคือเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ ทำให้ขนาดโพรงลดลง ทำให้เพสต์แน่นขึ้น อาจเป็นผลของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานบางส่วน นอกจากนี้อนุภาคของซีโอไลต์บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาทำหน้าที่อุดช่องว่างในเพสต์ ในขณะที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากขึ้น ความพรุนและช่องว่างเล็ก ๆ ภายในเพสต์ก็มากขึ้นด้วย โดยเฉพาะในเพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ในปริมาณมาก ส่งผลให้โครงสร้างเพสต์มีโพรงเล็ก ๆ กระจายอยู่ทั่ว





รูปที่ 4.19 ภาพขยาย Fractured Surface ของเพลสต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 4.19 (ต่อ) ภาพขยาย Fractured Surface ของเฟสค์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

4.7 ความคงทนของก้อนหล่อแข็งต่อสถานะเปียกแห้ง

การศึกษาคูณสมบัติของก้อนหล่อแข็งซีเมนต์เฟสค์และซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานต่อสถานะเปียกและแห้ง เพื่อให้มั่นใจว่าก้อนหล่อแข็งจะมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะที่รุนแรงในแหล่งฝังกลบโดยนำก้อนหล่อแข็งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4843-88 เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตลอดการทดลอง โดยน้ำหนักก้อนตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ควรเกินร้อยละ 30 ของน้ำหนักตัวอย่างชุดควบคุม

ตารางที่ 4.9 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของก้อนหล่อแข็งที่ผ่านการทดสอบสภาวะเปียกและแห้ง

ตัวอย่าง	ผลรวมน้ำหนักก้อนทดสอบที่เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)	ผลรวมน้ำหนักก้อนควบคุมที่เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงก้อนทดสอบ - ก้อนควบคุม (ร้อยละ)
OPC40S	12.14	3.41	8.73
OPC50S	19.37	7.16	12.21
OPC60S	32.68	8.33	24.35
OPC10SF40S	7.10	3.90	3.20
OPC10SF50S	15.45	7.32	8.13
OPC10SF60S	22.80	10.90	11.90
OPC30FA40S	14.32	4.01	10.31
OPC30FA50S	20.70	8.43	12.27
OPC30FA60S	29.98	10.12	19.86
OPC20SZ40S	5.85	2.65	3.20
OPC20SZ50S	19.44	8.54	10.90
OPC20SZ60S	23.22	11.50	11.72
OPC30SZ40S	6.20	2.39	3.81
OPC30SZ50S	20.93	9.70	11.23
OPC30SZ60S	26.57	11.67	14.90
OPC40SZ40S	7.11	3.67	3.44
OPC40SZ50S	20.73	10.26	10.47
OPC40SZ60S	29.67	12.32	17.35
OPC20NZ40S	4.50	2.40	2.10
OPC20NZ50S	9.26	3.64	5.62
OPC20NZ60S	16.50	9.50	7.00
OPC30NZ40S	5.82	3.19	2.63
OPC30NZ50S	13.54	5.04	8.50
OPC30NZ60S	19.92	10.00	9.92
OPC40NZ40S	7.30	4.7	2.60
OPC40NZ50S	16.35	8.98	7.37
OPC40NZ60S	22.70	11.49	11.21

จากตารางที่ 4.9 พบว่าผลต่างของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงระหว่างชุดควบคุมและชุดทดสอบของก้อนหล่อแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของกากตะกอนเพิ่มขึ้น โดยก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด คือ ก้อนหล่อแข็ง OPC40S OPC50S และ OPC60S มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 8.73 12.21 และ 24.35 ตามลำดับ ในขณะที่ก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซีโอไลด์ธรรมชาติเป็นวัสดุยึดประสานมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงน้อยสุด ซึ่งจากการทดสอบความคงทนต่อสภาวะเปียกและแห้งของก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุพอซโซลานมีการเปลี่ยนแปลงในระดับที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ASTM D4843 โดยมีผลต่างระหว่างชุดควบคุมและชุดทดสอบไม่เกินร้อยละ 30

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นกับก้อนหล่อแข็งหลังการทดสอบความคงทนต่อสภาวะเปียกและแห้งของก้อนหล่อแข็งที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุพอซโซลานเป็นวัสดุยึดประสานจะมีความคล้ายคลึงกัน โดยการอบชุดทดสอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ความชื้นของก้อนหล่อแข็งลดลงทำให้บริเวณด้านนอกแห้งและเมื่อนำก้อนหล่อแข็งลงแช่น้ำและทำเช่นนี้จนครบ 12 รอบ พบว่าก้อนหล่อแข็งมีลักษณะหลุดร่อนบริเวณผิวหน้าก้อนหล่อแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากการแทรกสอดการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์โดยโลหะหนักจากตะกอน ส่งผลให้ก้อนหล่อแข็งมีความพรุนสูง การพัฒนาโครงสร้างของก้อนหล่อแข็งไม่สมบูรณ์

4.8 การทดสอบการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง

4.8.1 การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP

นำก้อนหล่อแข็งที่ผ่านการทดสอบความสามารถรับกำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วันทดสอบความสามารถในการชะละลายโลหะหนัก โดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

จากตารางที่ 4.10 พบว่าประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักนี้เกิดสูงขึ้นตามอายุของก้อนหล่อแข็ง แต่ประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักจะต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในก้อนหล่อแข็ง

จากการทดลองพบว่าสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก มีค่าความเข้มข้นของนิเกิล 50.65 60.96 และ 66.87 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 63.21 55.72 และ 51.43 ตามลำดับ ในขณะที่สารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักอัตราส่วนเดียวกัน มีค่าความเข้มข้นของนิเกิล 22.66 24.87 และ 33.36 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับคิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 83.54 81.94 และ 77.22 ตามลำดับ ส่วนที่สารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักอัตราส่วนเดียวกัน มีค่าความเข้มข้นของนิเกิล 24.61 26.12 และ 35.31 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับคิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 82.13 81.03 และ 74.35 ตามลำดับ

ส่วนสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 20 30 และ 40 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความเข้มข้นของนิเกิลที่มากที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง OPC40SZ60S เท่ากับ 35.32 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 74.35 และค่าความเข้มข้นของนิเกิลที่น้อยที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง OPC30SZ40S เท่ากับ 22.35 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 83.77 ในขณะที่สารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติด้วยอัตราส่วนเดียวกัน พบว่าค่าความเข้มข้นของนิเกิลที่มากที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง OPC40NZ60S เท่ากับ 13.40 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 90.26 และค่าความเข้มข้นของนิเกิลที่น้อยที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง OPC30NZ40S เท่ากับ 7.36 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 94.65

ตารางที่ 4.10 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายนิกเกิล ในสารชะละลาย
ของก้อนหล่อแข็ง

ตัวอย่าง	pH	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย, ร้อยละ)		
		อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 90 วัน
Plating sludge (S)	6.14	137.67 (00.00)	137.67 (00.00)	137.67 (00.00)
OPC40S	6.44	67.93 (50.66)	50.65 (63.21)	41.08 (70.16)
OPC50S	7.11	74.93 (45.57)	60.96 (55.72)	52.53 (61.84)
OPC60S	7.67	80.89 (41.24)	66.87 (51.43)	58.19 (57.73)
OPC10SF40S	7.60	46.63 (66.13)	22.66 (83.54)	10.61 (92.29)
OPC10SF50S	7.87	47.58 (65.44)	24.87 (81.94)	12.47 (90.94)
OPC10SF60S	7.81	52.50 (61.87)	31.36 (77.22)	18.30 (86.71)
OPC30FA40S	9.77	47.17 (65.74)	24.61 (82.13)	11.51 (91.64)
OPC30FA50S	8.80	48.37 (64.86)	26.12 (81.03)	13.86 (89.93)
OPC30FA60S	8.50	55.78 (59.48)	35.31 (74.35)	23.98 (82.58)
OPC20SZ40S	7.60	46.64 (66.13)	22.66 (83.54)	10.61 (92.29)
OPC20SZ50S	7.87	47.59 (65.43)	24.88 (81.93)	12.47 (90.94)
OPC20SZ60S	7.81	52.49 (61.87)	31.37 (77.22)	18.33 (86.68)
OPC30SZ40S	8.21	46.93 (65.91)	22.35 (83.77)	10.38 (92.46)
OPC30SZ50S	8.15	47.86 (65.24)	23.89 (82.64)	12.75 (90.74)
OPC30SZ60S	8.10	52.85 (61.61)	33.28 (75.83)	22.97 (83.32)
OPC40SZ40S	9.77	47.17 (65.74)	24.61 (82.13)	11.52 (91.64)
OPC40SZ50S	8.8	48.39 (64.85)	26.13 (81.02)	13.87 (89.93)
OPC40SZ60S	8.5	55.78 (59.48)	35.32 (74.35)	23.99 (82.58)
OPC20NZ40S	11.35	35.13 (74.48)	10.05 (92.70)	4.49 (96.74)
OPC20NZ50S	11.22	35.57 (74.16)	10.22 (92.58)	4.72 (96.57)
OPC20NZ60S	11.14	37.01 (73.12)	11.84 (91.40)	6.39 (95.36)
OPC30NZ40S	11.21	32.86 (76.13)	7.36 (94.65)	1.58 (98.85)
OPC30NZ50S	11.09	32.99 (76.03)	7.98 (94.20)	2.23 (98.38)
OPC30NZ60S	11.02	33.34 (75.78)	8.24 (94.01)	2.51 (98.18)

ตารางที่ 4.10 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายนิกเกิล ในสารชะละลาย
ของก้อนหล่อแข็ง (ต่อ)

ตัวอย่าง	pH	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย, ร้อยละ)		
		อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 90 วัน
OPC40NZ40S	11.18	37.55 (72.72)	12.62 (90.84)	7.20 (94.77)
OPC40NZ50S	10.79	37.81 (72.54)	13.26 (90.37)	7.82 (94.32)
OPC40NZ60S	9.71	38.02 (72.38)	13.40 (90.26)	8.09 (94.13)

จากตารางที่ 4.11 พบว่าประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักของแดง
สูงขึ้นตามอายุของก้อนหล่อแข็ง แต่ประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักจะต่ำลงเมื่อ
เพิ่มปริมาณกากตะกอนในก้อนหล่อแข็ง

จากการทดลองพบว่าสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ใช้
ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก มี
ค่าความเข้มข้นของทองแดง 28.71 31.07 และ 34.63 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ คิดเป็น
ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 61.63 58.47 และ 53.71 ตามลำดับ

ส่วนสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกา
ฟุ่มร้อยละ 10 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดย
น้ำหนัก มีค่าความเข้มข้นของทองแดง 12.49 14.33 และ 17.49 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับคิดเป็น
ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 83.30 80.85 และ 76.63 ตามลำดับ ในขณะที่
สารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสาน
และมีกากตะกอนโลหะหนักอัตราส่วนเดียวกัน มีค่าความเข้มข้นของทองแดง 9.07 12.13
และ 22.43 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับคิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อย
ละ 87.87, 83.79 และ 70.02 ตามลำดับ

ส่วนสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลต์
สังเคราะห์ร้อยละ 20 30 และ 40 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนัก
ร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความเข้มข้นของทองแดงที่มากที่สุดได้จากก้อนหล่อ
แข็ง OPC40SZ60S เท่ากับ 22.44 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับ
ร้อยละ 70.02 และค่าความเข้มข้นของทองแดงที่น้อยที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง
OPC30SZ40S เท่ากับ 7.78 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับ
ร้อยละ 89.60 และสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ
ร้อยละ 20 30 และ 40 เป็นวัสดุยึดประสานที่มีกากตะกอนโลหะหนักอัตราส่วนเดียวกัน พบว่าค่า
ความเข้มข้นของทองแดงที่มากที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง OPC40NZ60S เท่ากับ 7.37 มิลลิกรัม/
ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 90.15 และค่าความเข้มข้นของ
ทองแดงที่น้อยที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง OPC30NZ40S เท่ากับ 3.80 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น
ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 94.92



ตารางที่ 4.11 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายทองแดง ในสารชะละลายของ
ก้อนหล่อแข็ง

ตัวอย่าง	pH	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย, %)		
		อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 90 วัน
Plating sludge (S)	6.14	74.82 (00.00)	74.82 (00.00)	74.82 (00.00)
OPC40S	6.44	38.04 (49.16)	28.71 (61.63)	23.63 (68.42)
OPC50S	7.11	39.88 (46.70)	31.07 (58.47)	26.26 (64.90)
OPC60S	7.67	42.61 (43.05)	34.63 (53.71)	30.08 (59.80)
OPC10SF40S	7.6	24.68 (67.01)	12.49 (83.30)	5.63 (92.48)
OPC10SF50S	7.87	25.88 (65.41)	14.33 (80.85)	7.67 (89.75)
OPC10SF60S	7.81	28.41 (62.03)	17.49(76.63)	11.18 (85.06)
OPC30FA40S	9.77	22.39 (70.08)	9.07 (87.87)	1.83 (97.55)
OPC30FA50S	8.8	24.23 (67.62)	12.13 (83.79)	5.11 (93.17)
OPC30FA60S	8.5	32.81 (56.16)	22.43 (70.02)	17.05 (77.22)
OPC20SZ40S	7.6	24.68 (67.01)	12.49 (83.31)	5.64 (92.46)
OPC20SZ50S	7.87	25.88 (65.41)	14.33 (80.84)	7.67 (89.74)
OPC20SZ60S	7.81	28.41 (62.03)	17.49 (76.62)	11.18 (85.05)
OPC30SZ40S	8.21	25.17 (66.36)	7.78 (89.60)	5.71 (92.37)
OPC30SZ50S	8.15	25.86 (65.44)	10.87 (85.47)	6.73 (90.98)
OPC30SZ60S	8.1	28.54 (61.86)	21.39 (71.41)	16.52 (77.92)

ตารางที่ 4.11 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายทองแดง ในสารชะละลาย
ของก้อนหล่อแข็ง (ต่อ)

ตัวอย่าง	pH	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย, ร้อยละ)		
		อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 90 วัน
OPC40SZ40S	9.77	22.39 (70.07)	9.08 (87.86)	6.33 (91.55)
OPC40SZ50S	8.8	24.23 (67.62)	12.12 (83.80)	7.38 (90.14)
OPC40SZ60S	8.5	32.81 (56.15)	22.44 (70.02)	17.04 (77.22)
OPC20NZ40S	11.35	19.53 (73.90)	6.23 (91.67)	4.82 (93.56)
OPC20NZ50S	11.22	19.76 (73.59)	6.42 (91.42)	4.95 (93.38)
OPC20NZ60S	11.14	20.09 (73.15)	6.49 (91.33)	5.04 (93.27)
OPC30NZ40S	11.21	17.05 (77.22)	3.80 (94.92)	2.21 (97.04)
OPC30NZ50S	11.09	18.06 (75.87)	4.41 (94.10)	2.84 (96.21)
OPC30NZ60S	11.02	18.91 (74.73)	4.55 (93.92)	2.95 (96.06)
OPC40NZ40S	11.18	20.30 (72.88)	6.66 (91.10)	5.21 (93.04)
OPC40NZ50S	10.79	20.52 (72.57)	7.25 (90.31)	5.87 (92.15)
OPC40NZ60S	9.71	20.64 (72.42)	7.37 (90.15)	5.91 (92.10)

จากตารางที่ 4.12 พบว่าประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักสังกะสีสูงขึ้นตามอายุของก้อนหล่อแข็ง แต่ประสิทธิภาพการลดการชะละลายสารโลหะหนักจะต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในก้อนหล่อแข็ง

จากการทดลองพบว่าสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก มีค่าความเข้มข้นของสังกะสี 19.96 24.50 และ 25.14 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 68.37 61.18 และ 60.17 ตามลำดับ

ส่วนสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก มีค่าความเข้มข้นของสังกะสี 8.55 9.00 และ 9.70 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับคิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 86.45 85.75 และ 84.64 ตามลำดับ ในขณะที่สารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักอัตราส่วนเดียวกัน มีค่าความเข้มข้นของทองแดง 9.95 11.29 และ 12.91 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับคิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 84.24 82.12 และร้อยละ 79.54 ตามลำดับ

ส่วนสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 20 30 และ 40 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความเข้มข้นของสังกะสีที่มากที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง OPC40SZ60S เท่ากับ 12.913 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 79.54 และค่าความเข้มข้นของสังกะสีที่น้อยที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง OPC20SZ40S เท่ากับ 8.562 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 86.44 และสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติและมีกากตะกอนโลหะหนักอัตราส่วนเดียวกัน พบว่าค่าความเข้มข้นของสังกะสีที่มากที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง OPC40NZ60S เท่ากับ 6.266 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 90.07 และค่าความเข้มข้นของสังกะสีที่น้อยที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง OPC30NZ40S เท่ากับ 1.14 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 98.19

ตารางที่ 4.12 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายสังกะสี ในสารชะละลายของ
ก้อนหล่อแข็ง

ตัวอย่าง	pH	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย, ร้อยละ)		
		อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 90 วัน
Plating sludge (S)	6.14	63.12 (00.00)	63.12 (00.00)	63.12 (00.00)
OPC40S	6.44	27.97 (55.68)	19.96 (68.37)	15.61 (75.28)
OPC50S	7.11	32.21 (48.97)	24.50 (61.18)	20.59 (67.38)
OPC60S	7.67	32.60 (48.35)	25.14 (60.17)	20.92 (66.85)
OPC10SF40S	7.6	19.81 (68.62)	8.55 (86.45)	2.88 (95.43)
OPC10SF50S	7.87	19.93 (68.42)	9.00 (85.75)	3.01 (95.23)
OPC10SF60S	7.81	20.81 (67.04)	9.70 (84.64)	4.31 (93.18)



ตารางที่ 4.12 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายสังกะสี ในสารชะละลาย
ของก้อนหล่อแข็ง (ต่อ)

ตัวอย่าง	pH	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย, ร้อยละ)		
		อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 90 วัน
OPC30FA40S	9.77	20.12 (68.12)	9.95 (84.24)	4.12 (93.47)
OPC30FA50S	8.8	21.51 (65.92)	11.29 (82.12)	5.47 (91.33)
OPC30FA60S	8.5	23.07 (63.45)	12.91 (79.54)	7.21 (88.58)
OPC20SZ40S	7.6	19.51 (69.09)	8.56 (86.44)	2.89 (95.42)
OPC20SZ50S	7.87	19.93 (68.42)	9.13 (85.54)	3.02 (95.22)
OPC20SZ60S	7.81	20.80 (67.04)	9.71 (84.62)	4.31 (93.18)
OPC30SZ40S	8.21	19.95 (68.40)	8.92 (85.87)	3.59 (94.31)
OPC30SZ50S	8.15	20.07 (68.21)	10.24 (83.77)	4.96 (92.14)
OPC30SZ60S	8.1	20.99 (66.75)	11.91 (81.13)	6.70 (89.38)
OPC40SZ40S	9.77	20.12 (68.12)	9.95 (84.24)	4.12 (93.47)
OPC40SZ50S	8.8	21.51 (65.92)	11.29 (82.12)	5.48 (91.32)
OPC40SZ60S	8.5	23.07 (63.45)	12.91 (79.54)	7.22 (88.57)
OPC20NZ40S	11.35	15.19 (75.93)	3.57 (94.34)	2.32 (96.32)
OPC20NZ50S	11.22	15.46 (75.50)	3.72 (94.11)	2.43 (96.15)
OPC20NZ60S	11.14	15.98 (74.68)	4.53 (92.83)	3.28 (94.80)
OPC30NZ40S	11.21	12.93 (79.51)	1.14 (98.19)	0.77 (98.77)
OPC30NZ50S	11.09	13.41 (78.76)	1.30 (97.95)	1.04 (98.35)
OPC30NZ60S	11.02	15.19 (75.94)	3.88 (93.85)	2.58 (95.92)
OPC40NZ40S	11.18	15.17 (75.97)	3.64 (94.24)	2.38 (96.24)
OPC40NZ50S	10.79	15.63 (75.25)	3.78 (94.01)	2.53 (95.99)
OPC40NZ60S	9.71	17.35 (72.52)	6.27 (90.07)	5.06 (91.98)

จากตารางที่ 4.13 พบว่าประสิทธิภาพการลดการชะละลายสาร โลหะหนัก โครเมียมสูงขึ้นตามอายุของก้อนหล่อแข็ง แต่ประสิทธิภาพการลดการชะละลายสาร โลหะหนักจะต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในก้อนหล่อแข็ง

จากการทดลองพบว่าสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ใช้ ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก มีค่าความเข้มข้นของโครเมียม 0.15 0.18 และ 0.19 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพ การลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 81.79 78.10 และ 77.74 ตามลำดับ

ส่วนสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม ร้อยละ 10 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก มีค่าความเข้มข้นของโครเมียม 0.01 0.01 และ 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับคิดเป็นประสิทธิภาพ การลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 98.69 98.33 และ 97.50 ตามลำดับ และสารละลายที่สกัดได้ จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอน โลหะหนักอัตราส่วนเดียวกัน มีค่าความเข้มข้นของโครเมียม 0.016 0.021 และ 0.023 มิลลิกรัม/ ลิตร ตามลำดับคิดเป็น ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 98.10 97.50 และ 97.26 ตามลำดับ

ส่วนสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลต์ สังกะหร้อยละ 20 30 และ 40 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความเข้มข้นของโครเมียมที่มากที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง OPC40SZ60S เท่ากับ 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อย ละ 97.98 และค่าความเข้มข้นของสังกะสีที่น้อยที่สุดได้จากก้อนหล่อแข็ง OPC20SZ40S เท่ากับ 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 98.81 และ สารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติและมีกากตะกอน โลหะหนักอัตราส่วนเดียวกัน พบว่าไม่มีโครเมียมในสารละลายที่สกัดได้ในทุกอัตราส่วนของก้อน ตัวอย่างแสดงว่าประสิทธิภาพการลดการชะละลาย เท่ากับร้อยละ 100.00

ตารางที่ 4.13 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโครเมียม ในสารชะละลายของ
ก้อนหล่อแข็ง

ตัวอย่าง	pH	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย, ร้อยละ)		
		อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 90 วัน
Plating sludge (S)	6.14	0.840 (00.00)	0.840 (00.00)	0.840 (00.00)
OPC40S	6.44	0.29 (65.00)	0.15 (81.79)	0.07 (91.07)
OPC50S	7.11	0.32 (61.67)	0.18 (78.10)	0.08 (90.36)
OPC60S	7.67	0.33 (61.19)	0.19 (77.74)	0.09 (88.93)
OPC10SF40S	7.6	0.17 (79.29)	0.01 (98.69)	0.00 (100.00)
OPC10SF50S	7.87	0.18 (78.33)	0.01 (98.33)	0.00 (100.00)
OPC10SF60S	7.81	0.19 (77.74)	0.02 (97.50)	0.00 (100.00)
OPC30FA40S	9.77	0.17 (79.29)	0.02 (98.10)	0.00 (100.00)
OPC30FA50S	8.8	0.18 (79.05)	0.02 (97.50)	0.00 (100.00)
OPC30FA60S	8.5	0.18 (78.93)	0.02 (97.26)	0.00 (100.00)
OPC20SZ40S	7.6	0.18 (79.17)	0.01 (98.81)	0.00 (100.00)
OPC20SZ50S	7.87	0.18 (78.33)	0.02 (98.21)	0.00 (100.00)
OPC20SZ60S	7.81	0.19 (77.74)	0.02 (97.62)	0.00 (100.00)
OPC30SZ40S	8.21	0.18 (79.17)	0.01 (98.69)	0.00 (100.00)
OPC30SZ50S	8.15	0.19 (77.98)	0.01 (98.57)	0.00 (100.00)
OPC30SZ60S	8.1	0.19 (77.62)	0.01 (98.33)	0.00 (100.00)
OPC40SZ40S	9.77	0.17 (79.76)	0.01 (98.57)	0.00 (100.00)
OPC40SZ50S	8.8	0.17 (79.64)	0.02 (98.21)	0.00 (100.00)
OPC40SZ60S	8.5	0.17 (79.40)	0.02 (97.98)	0.00 (100.00)
OPC20NZ40S	11.35	0.16 (80.95)	0.00 (100.00)	0.00 (100.00)
OPC20NZ50S	11.22	0.16 (80.60)	0.00 (100.00)	0.00 (100.00)
OPC20NZ60S	11.14	0.17 (79.40)	0.00 (100.00)	0.00 (100.00)

ตารางที่ 4.13 ปริมาณสารและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโครเมียม ในสารชะละลาย
ของก้อนหล่อแข็ง (ต่อ)

ตัวอย่าง	pH	ปริมาณสารโลหะหนักในสารชะละลาย, มิลลิกรัม/ลิตร (ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย, ร้อยละ)		
		อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน	อายุ 90 วัน
OPC30NZ40S	11.21	0.13 (84.29)	0.00 (100.00)	0.00 (100.00)
OPC30NZ50S	11.09	0.13 (84.05)	0.00 (100.00)	0.00 (100.00)
OPC30NZ60S	11.02	0.14 (83.57)	0.00 (100.00)	0.00 (100.00)
OPC40NZ40S	11.18	0.16 (80.71)	0.00 (100.00)	0.00 (100.00)
OPC40NZ50S	10.79	0.16 (80.48)	0.00 (100.00)	0.00 (100.00)
OPC40NZ60S	9.71	0.17 (80.24)	0.00 (100.00)	0.00 (100.00)

จากตารางที่ 4.10-13 โดยภาพรวม พบว่าค่าความเข้มข้นของนิเกิลที่พบในก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานมีค่ามากกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุยึดประสาน เนื่องจากค่า pH ของสารละลายที่สกัดได้จากก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุยึดประสานมีค่าสูงขึ้นจนอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการตรึงโลหะไฮดรอกไซด์และทำให้โลหะไฮดรอกไซด์มีความเสถียรมากขึ้นและมีความสามารถในการละลายลดลง ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของโลหะไฮดรอกไซด์ในสารละลายที่สกัดได้มีค่าต่ำ (Rattanasak et al., 2001) และสาเหตุเนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ซึ่งสามารถยึดตรึงโลหะหนักได้ โดยขบวนการทางกายภาพและเคมี หรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์ และเนื่องจากเมื่อมีการเติมซิลิกาฟุ่ม เถ้าลอย ซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมทำให้มีปริมาณสารประกอบซิลิกาเพิ่มขึ้น ซึ่งสารประกอบซิลิกานี้จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระที่ได้จากกระบวนการไฮเดรชันระหว่างการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ทำให้ได้สารประกอบซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสาน จึงสามารถตรึงโลหะไว้ได้ดีขึ้น ในกรณีของโลหะหนักสังกะสีสอดคล้องกับผลการทดลองของ Lombardi et al. (1998) ที่พบว่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายที่สกัดได้มีค่าต่ำเพราะสังกะสีถูกกักไว้ทางเคมีในเฟสของซีเมนต์ ส่วนในกรณีของโครเมียมสอดคล้องกับการทดลองของ Paul L. Bishop (1988) ที่สรุปไว้ว่าโครเมียมถูกชะละลายออกมาน้อยกว่าที่ควรจะเป็นตามความสามารถในการละลายของโครเมียมไฮดรอกไซด์ แสดงว่าโครเมียมถูกกักอยู่ในโครงสร้างของซิลิกา มากกว่าจะอยู่ในรูปฟรอน ซึ่งจะถูก

ชะละลายออกมาเมื่อโครงสร้างซิลิกาถูกทำลาย และ Serclerat et al. (1999) พบว่าโครเมียมที่ถูกชะละลายออกมามีค่า pH ต่ำกว่า 10 และถูกกักไว้ในของแข็งช่วง pH 11-13 ซึ่งเป็นช่วงที่สัมพันธ์กับช่วง pH ที่เฟสของเอทรีนไจต์เสถียร จึงสรุปได้ว่าโครเมียมถูกกักไว้ทางเคมีโดยการแทนที่ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปโครเมทในโครงสร้างของเอทรีนไจต์ ดังนั้นโครเมียมจะถูกชะละลายออกมาเมื่อมีการสลายตัวของโครงสร้างของเอทรีนไจต์เท่านั้น

4.8.2 การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี DLT

ก) การชะละลายในสารละลายกรดอะซิติก

ตารางที่ 4.14 ค่า pH ของสารละลายกรดอะซิติกที่สัมพันธ์กับก่อนหล่อแข็งที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ตัวอย่าง	pH เริ่มต้น	ระยะเวลาที่สารละลายสัมพันธ์กับก่อนหล่อแข็ง (วัน)							
		1	3	7	14	21	28	35	42
OPC40S	3.0	4.73	4.78	4.85	4.97	4.61	4.65	4.59	4.41
OPC50S	3.0	4.68	4.73	4.79	4.92	4.40	4.50	4.51	4.37
OPC60S	3.0	4.63	4.68	4.73	4.86	4.33	4.43	4.48	4.10
OPC10SF40S	3.0	4.56	4.68	4.70	4.85	4.50	4.46	4.38	4.32
OPC10SF50S	3.0	4.51	4.63	4.65	4.80	4.40	4.42	4.50	4.28
OPC10SF60S	3.0	4.47	4.60	4.64	4.76	4.36	4.38	4.46	4.24
OPC30FA40S	3.0	4.39	4.51	4.60	4.75	4.28	4.29	4.37	4.16
OPC30FA50S	3.0	4.37	4.48	4.58	4.73	4.25	4.27	4.35	4.14
OPC30FA60S	3.0	4.32	4.44	4.53	4.73	4.21	4.23	4.31	4.10
OPC30SZ40S	3.0	4.30	4.42	4.51	4.70	4.19	4.21	4.29	4.19
OPC30SZ50S	3.0	4.28	4.40	4.49	4.68	4.17	4.19	4.26	4.17
OPC30SZ60S	3.0	4.25	4.46	4.60	4.73	4.21	4.26	4.32	4.15
OPC30NZ40S	3.0	4.41	4.63	4.77	4.91	4.37	4.42	4.49	4.31
OPC30NZ50S	3.0	4.38	4.60	4.74	4.88	4.34	4.39	4.46	4.28
OPC30NZ60S	3.0	4.34	4.56	4.69	4.83	4.30	4.35	4.42	4.24

จากตารางที่ 4.14 พบว่าสารละลายกรดอะซิติกที่ชะเป็นสารชะละลายมีค่า pH เริ่มต้น 3.0 หลังจากสัมผัสก้อนหล่อแข็งเป็นเวลา 1 วัน ค่า pH ของสารละลายสูงขึ้นเป็นประมาณ 4.25–4.73 เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในก้อนหล่อแข็งยังมีความเข้มข้นมาก จึงละลายและแพร่ออกมาสะเทินกรดอะซิติกอย่างรวดเร็ว ทำให้ค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้นสูงในช่วงแรกของการทดสอบและเพิ่มอย่างต่อเนื่องในช่วง 14 วันแรก เป็นประมาณ 4.70-4.97 หลังจากนั้นค่า pH ของสารละลายจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ตลอดการทดสอบคืออยู่ในช่วง 4.15–4.41 หลังจาก 42 วันของการทดสอบ แต่เมื่อก้อนหล่อแข็งสัมผัสกับสารละลายกรดอะซิติกนานขึ้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายและแพร่ออกมาสะเทินกรดอะซิติกลดลงทำให้ค่า pH ของสารละลายเปลี่ยนแปลงในอัตราที่ลดลง

ตารางที่ 4.15 ค่าความเข้มข้นสะสมของนิเกิลในสารละลายกรดอะซิติกที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นสะสมของโลหะหนักในสารชะละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)							
	1	3	7	14	21	28	35	42
OPC40S	3.02	9.66	15.46	21.03	28.18	35.23	44.03	49.54
OPC50S	3.20	10.25	17.63	23.62	33.07	40.68	53.29	59.74
OPC60S	3.08	11.41	19.51	25.36	34.24	43.49	57.40	64.86
OPC10SF40S	0.97	3.70	6.25	8.87	11.89	15.22	19.78	22.14
OPC10SF50S	1.06	3.99	6.87	9.48	13.36	16.83	21.72	24.32
OPC10SF60S	1.36	5.13	8.72	12.30	16.97	21.21	27.37	30.73
OPC30FA40S	1.05	4.00	6.95	9.60	13.05	16.57	21.54	24.11
OPC30FA50S	1.24	4.69	8.11	11.03	14.78	18.32	23.09	25.86
OPC30FA60S	1.66	6.30	10.77	14.43	18.76	23.83	30.50	34.25
OPC30SZ40S	0.99	3.76	6.35	8.51	12.09	15.11	19.50	21.89
OPC30SZ50S	1.02	3.95	6.84	9.58	13.22	16.65	20.82	23.29
OPC30SZ60S	1.32	5.10	9.89	13.36	18.03	22.90	29.08	32.57
OPC30NZ40S	0.34	1.25	2.20	2.94	3.94	5.01	6.41	7.20
OPC30NZ50S	0.35	1.32	2.31	3.26	4.37	5.42	6.99	7.82
OPC30NZ60S	0.43	1.45	2.51	3.46	4.50	5.71	7.14	7.99

จากตารางที่ 4.15 พบว่าความเข้มข้นสะสมของนิกเกิลที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายกรดอะซิติกหลังจากสัมผัสกับก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสัมผัสสารละลาย ตัวอย่างเช่น ก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 3.02 3.20 และ 3.08 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และความเข้มข้นสะสมของนิกเกิลเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง โดยในวันที่ 42 ความเข้มข้นสะสมของนิกเกิลที่ถูกชะออกมาในสารละลายเท่ากับ 49.54 59.74 และ 64.86 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.16 ค่าความเข้มข้นสะสมของทองแดงในสารละลายกรดอะซิติกที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นสะสมของโลหะหนักในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)							
	1	3	7	14	21	28	35	42
OPC40S	1.71	5.48	8.76	11.92	15.97	19.96	24.95	28.07
OPC50S	1.63	5.22	8.99	12.04	16.86	20.73	27.16	30.45
OPC60S	1.60	5.91	10.10	13.14	17.73	22.52	29.73	33.59
OPC10SF40S	0.54	2.04	3.44	4.89	6.55	8.39	10.91	12.20
OPC10SF50S	0.61	2.30	3.96	5.46	7.70	9.70	12.51	14.01
OPC10SF60S	0.76	2.86	4.86	6.86	9.46	11.82	15.25	17.13
OPC30FA40S	0.39	1.47	2.56	3.54	4.81	6.11	7.94	8.89
OPC30FA50S	0.58	2.17	3.76	5.12	6.86	8.50	10.71	12.00
OPC30FA60S	1.05	4.00	6.84	9.17	11.92	15.14	19.37	21.76
OPC30SZ40S	0.34	1.31	2.21	2.97	4.21	5.26	6.79	7.62
OPC30SZ50S	0.47	1.81	3.13	4.38	6.04	7.62	9.52	10.65
OPC30SZ60S	0.86	3.32	6.43	8.68	11.72	14.89	18.91	21.18
OPC30NZ40S	0.17	0.64	1.13	1.52	2.03	2.58	3.30	3.71
OPC30NZ50S	0.20	0.73	1.28	1.80	2.41	2.99	3.86	4.32
OPC30NZ60S	0.24	0.80	1.38	1.91	2.48	3.15	3.93	4.40

จากตารางที่ 4.16 พบว่าความเข้มข้นสะสมของทองแดงที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายกรดอะซิติกหลังจากสัมผัสกับก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสัมผัสสารละลาย ตัวอย่างเช่น ก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอโลด์ธรรมชาติร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอน โลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 0.17 0.20 และ 0.24 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และความเข้มข้นสะสมของทองแดงเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง โดยในวันที่ 42 ความเข้มข้นสะสมของทองแดงที่ถูกชะออกมาในสารละลายเท่ากับ 3.71 4.32 และ 4.40 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.17 พบว่าความเข้มข้นสะสมของสังกะสีที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายกรดอะซิติกหลังจากสัมผัสกับก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสัมผัสสารละลาย ตัวอย่างเช่น ก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอโลด์สังเคราะห์ร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอน โลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 0.40 0.44 และ 0.47 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และความเข้มข้นสะสมของสังกะสีเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง โดยในวันที่ 42 ความเข้มข้นสะสมของสังกะสีที่ถูกชะออกมาในสารละลายเท่ากับ 8.74 9.93 และ 11.64 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ



ตารางที่ 4.17 ค่าความเข้มข้นสะสมของสังกะสีในสารละลายกรดอะซิติกที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นสะสมของโลหะหนักในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)							
	1	3	7	14	21	28	35	42
OPC40S	1.19	3.81	6.09	8.29	11.11	13.88	17.35	19.52
OPC50S	1.29	4.12	7.09	9.49	13.29	16.35	21.42	24.01
OPC60S	1.17	4.33	7.41	9.63	13.01	16.52	21.80	24.64
OPC10SF40S	0.37	1.41	2.39	3.39	4.55	5.82	7.56	8.46
OPC10SF50S	0.38	1.43	2.46	3.40	4.79	6.04	7.79	8.72
OPC10SF60S	0.42	1.60	2.72	3.84	5.30	6.62	8.54	9.59
OPC30FA40S	0.42	1.61	2.81	3.87	5.27	6.69	8.70	9.73
OPC30FA50S	0.53	2.00	3.47	4.71	6.32	7.83	9.87	11.05
OPC30FA60S	0.61	2.32	3.97	5.32	6.92	8.78	11.24	12.63
OPC30SZ40S	0.40	1.50	2.54	3.40	4.83	6.03	7.78	8.74
OPC30SZ50S	0.44	1.69	2.92	4.08	5.64	7.10	8.88	9.93
OPC30SZ60S	0.47	1.82	3.53	4.77	6.44	8.18	10.39	11.64
OPC30NZ40S	0.06	0.22	0.38	0.52	0.69	0.88	1.12	1.26
OPC30NZ50S	0.17	0.64	1.12	1.59	2.12	2.63	3.40	3.80
OPC30NZ60S	0.06	0.20	0.35	0.48	0.63	0.80	1.00	1.12

จากตารางที่ 4.18 พบว่าตรวจไม่พบความเข้มข้นสะสมของโครเมียมที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายกรดอะซิติกหลังจากสัมผัสกับก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลท์ธรรมชาติเป็นวัสดุยึดประสาน และตรวจพบน้อยมาก คือ 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ในก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟู เถ้าลอย และซีโอไลท์สังเคราะห์เป็นวัสดุยึดประสาน ในขณะที่ความเข้มข้นสะสมของโครเมียมที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายกรดอะซิติกของก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึด และมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ทุกอัตราส่วน และความเข้มข้นสะสมของโครเมียมเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง โดยในวันที่ 42 ความเข้มข้นสะสมของโครเมียมที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายเท่ากับ 0.15 0.18 และ 0.18 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 ค่าความเข้มข้นสะสมของโครเมียมในสารละลายกรดอะซิติกที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นสะสมของโลหะหนักในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)							
	1	3	7	14	21	28	35	42
OPC40S	0.01	0.03	0.05	0.06	0.08	0.10	0.13	0.15
OPC50S	0.01	0.03	0.05	0.07	0.10	0.12	0.16	0.18
OPC60S	0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	0.12	0.16	0.18
OPC10SF40S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
OPC10SF50S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
OPC10SF60S	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
OPC30FA40S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
OPC30FA50S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
OPC30FA60S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
OPC30SZ40S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
OPC30SZ50S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
OPC30SZ60S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
OPC30NZ40S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
OPC30NZ50S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
OPC30NZ60S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ข) การชะละลายในสารละลายฟลักซ์สังเคราะห์

จากตารางที่ 4.19 พบว่าสารละลายฟลักซ์สังเคราะห์ที่มีค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 5.0 หลังจากสัมผัสก้อนหล่อแข็งเป็นเวลา 1 วันค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นประมาณ 10.20–11.20 และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง 3 วันแรกของการทดสอบเป็นประมาณ 10.50–11.60 หลังจากนั้นค่า pH ของสารละลายจะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ ตลอดการทดลองคืออยู่ในช่วง 6.20–7.00 หลังจาก 43 วันของการทดสอบ

ตารางที่ 4.19 ค่า pH ของสารละลายฟลักครดสังเคราะห์ที่สัมผัสกับก้อนหล่อแข็งที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ตัวอย่าง	pH เริ่มต้น	ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับก้อนหล่อแข็ง (วัน)								
		1	2	3	4	5	7	14	28	43
OPC40S	5.0	11.20	11.45	11.60	11.02	8.82	8.92	8.03	7.71	6.94
OPC50S	5.0	11.09	11.33	11.46	10.89	8.71	8.82	7.93	7.62	6.86
OPC60S	5.0	10.96	11.20	11.30	10.74	9.67	9.78	8.80	7.92	6.97
OPC10SF40S	5.0	10.90	11.00	11.20	10.64	9.58	9.69	8.72	7.85	7.06
OPC10SF50S	5.0	10.79	10.89	11.09	10.53	9.69	9.81	8.83	7.68	6.91
OPC10SF60S	5.0	10.70	10.80	11.00	10.45	9.20	9.31	8.38	7.29	6.56
OPC30FA40S	5.0	10.49	10.59	10.80	10.26	9.02	9.12	8.21	7.14	6.43
OPC30FA50S	5.0	10.43	10.54	10.75	10.21	8.97	9.08	8.17	7.11	6.40
OPC30FA60S	5.0	10.33	10.44	10.64	10.11	8.79	8.90	8.01	7.04	6.33
OPC30SZ40S	5.0	10.28	10.38	10.59	10.06	8.55	8.65	7.79	7.00	6.30
OPC30SZ50S	5.0	10.23	10.33	10.53	10.01	8.71	8.81	7.93	6.93	6.24
OPC30SZ60S	5.0	10.20	10.71	11.03	10.48	8.38	8.48	7.64	7.33	6.60
OPC30NZ40S	5.0	10.50	11.03	11.36	10.45	9.30	9.41	8.47	8.13	6.50
OPC30NZ50S	5.0	10.40	10.92	11.25	10.46	8.89	9.00	8.10	7.77	6.69
OPC30NZ60S	5.0	10.23	10.74	11.06	10.18	8.14	8.24	7.42	7.12	6.41

จากตารางที่ 4.20 พบว่าความเข้มข้นสะสมของนิกเกิลที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายฟลักครดสังเคราะห์หลังจากสัมผัสกับก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสัมผัสสารละลาย ตัวอย่างเช่น ก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 3.00 3.14 และ 3.02 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และความเข้มข้นสะสมของนิกเกิลเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง โดยในวันที่ 43 ความเข้มข้นสะสมของนิกเกิลที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายเท่ากับ 50.85 60.57 และ 65.75 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.20 ค่าความเข้มข้นสะสมของนิเกิลในสารละลายผงกรดสังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นสะสมของโลหะหนักในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)								
	1	2	3	4	5	7	14	28	43
OPC40S	3.00	9.59	15.34	20.86	27.95	34.94	43.67	49.13	50.85
OPC50S	3.14	10.04	17.27	23.14	32.40	39.85	52.20	58.52	60.57
OPC60S	3.02	11.17	19.11	24.84	33.54	42.59	56.22	63.53	65.75
OPC10SF40S	0.97	3.67	6.20	8.81	11.80	15.11	19.64	21.98	22.64
OPC10SF50S	1.04	3.90	6.71	9.25	13.05	16.44	21.21	23.75	24.46
OPC10SF60S	1.34	5.08	8.63	12.17	16.80	21.00	27.09	30.42	31.33
OPC30FA40S	1.03	3.91	6.81	9.40	12.78	16.23	21.10	23.62	24.42
OPC30FA50S	1.21	4.59	7.94	10.81	14.48	17.95	22.62	25.34	26.20
OPC30FA60S	1.62	6.17	10.55	14.13	18.38	23.34	29.87	33.54	34.69
OPC30SZ40S	0.97	3.68	6.22	8.34	11.84	14.80	19.10	21.45	22.20
OPC30SZ50S	1.00	3.85	6.67	9.33	12.88	16.23	20.28	22.70	23.49
OPC30SZ60S	1.29	5.00	9.70	13.10	17.68	22.45	28.52	31.94	33.06
OPC30NZ40S	0.33	1.20	2.11	2.83	3.79	4.81	6.16	6.92	7.13
OPC30NZ50S	0.34	1.28	2.24	3.16	4.24	5.25	6.77	7.58	7.81
OPC30NZ60S	0.42	1.41	2.44	3.37	4.38	5.56	6.95	7.79	8.02

สารละลายผงกรดสังเคราะห์หลังจากสัมผัสกับก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสัมผัสสารละลาย ตัวอย่างเช่น ก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 0.17 0.19 และ 0.24 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และความเข้มข้นสะสมของทองแดงเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง โดยในวันที่ 43 ความเข้มข้นสะสมของทองแดงที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายเท่ากับ 3.79 4.36 และ 4.56 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.21 ค่าความเข้มข้นสะสมของทองแดงในสารละลายฝนกรดสังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นสะสมของโลหะหนักในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)								
	1	2	3	4	5	7	14	28	43
OPC40S	0.18	0.56	0.90	1.22	1.64	2.05	2.56	2.88	2.98
OPC50S	1.32	4.95	8.51	11.74	16.56	20.86	26.91	30.14	31.19
OPC60S	1.45	5.49	9.34	13.16	18.17	22.71	29.30	32.90	34.05
OPC10SF40S	0.52	1.99	3.46	4.77	6.49	8.24	10.72	11.99	12.41
OPC10SF50S	0.65	2.47	4.27	5.81	7.78	9.65	12.15	13.61	14.02
OPC10SF60S	0.81	3.09	5.28	7.07	9.19	11.67	14.94	16.78	17.28
OPC30FA40S	0.39	1.46	2.47	3.32	4.71	5.89	7.59	8.53	8.78
OPC30FA50S	0.51	1.95	3.38	4.73	6.53	8.23	10.29	11.51	11.86
OPC30FA60S	1.03	3.90	6.67	8.93	11.61	14.75	18.87	21.20	21.83
OPC30SZ40S	0.33	1.27	2.15	2.87	4.08	5.10	6.58	7.39	7.61
OPC30SZ50S	0.46	1.79	3.10	4.34	5.98	7.54	9.42	10.54	10.90
OPC30SZ60S	0.83	3.20	6.20	8.38	11.31	14.36	18.24	20.43	21.14
OPC30NZ40S	0.17	0.64	1.12	1.50	2.01	2.56	3.27	3.68	3.79
OPC30NZ50S	0.19	0.72	1.25	1.77	2.37	2.93	3.78	4.23	4.36
OPC30NZ60S	0.24	0.80	1.38	1.91	2.48	3.15	3.93	4.40	4.54

จากตารางที่ 4.22 พบว่าความเข้มข้นสะสมของสังกะสีที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายฝนกรดสังเคราะห์หลังจากสัมผัสกับก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสัมผัสสารละลาย ตัวอย่างเช่น ก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 30 เป็นวัสดุยึดประสานและมีภาคตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 0.39 0.44 และ 0.47 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และความเข้มข้นสะสมของสังกะสีเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง โดยในวันที่ 43 ความเข้มข้นสะสมของสังกะสีที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายเท่ากับ 8.82 10.21 และ 11.93 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.22 ค่าความเข้มข้นสะสมของสังกะสีในสารละลายฝนกรดสังเคราะห์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นสะสมของโลหะหนักในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)								
	1	2	3	4	5	7	14	28	43
OPC40S	1.17	3.74	5.98	8.13	10.90	13.63	17.03	19.16	19.74
OPC50S	1.25	3.99	6.87	9.20	12.89	15.85	20.76	23.28	23.97
OPC60S	1.14	4.22	7.22	9.39	12.67	16.10	21.25	24.01	24.82
OPC10SF40S	0.40	1.52	2.60	3.48	4.53	5.75	7.36	8.27	8.55
OPC10SF50S	0.39	1.48	2.50	3.35	4.75	5.94	7.66	8.60	8.90
OPC10SF60S	0.41	1.60	2.76	3.87	5.34	6.73	8.41	9.41	9.74
OPC30FA40S	0.47	1.77	3.03	4.07	5.29	6.71	8.59	9.65	9.99
OPC30FA50S	0.49	1.88	3.17	4.25	6.03	7.54	9.72	10.92	11.30
OPC30FA60S	0.54	2.08	3.60	5.04	6.96	8.77	10.96	12.26	12.63
OPC30SZ40S	0.39	1.47	2.49	3.33	4.73	5.91	7.63	8.56	8.82
OPC30SZ50S	0.44	1.68	2.91	4.08	5.62	7.09	8.86	9.91	10.21
OPC30SZ60S	0.47	1.81	3.50	4.73	6.38	8.11	10.29	11.53	11.93
OPC30NZ40S	0.06	0.22	0.38	0.51	0.68	0.86	1.10	1.24	1.28
OPC30NZ50S	0.17	0.64	1.11	1.57	2.10	2.61	3.36	3.76	3.88
OPC30NZ60S	0.06	0.20	0.35	0.48	0.62	0.79	0.99	1.10	1.14

จากตารางที่ 4.23 พบว่าตรวจไม่พบความเข้มข้นสะสมของโครเมียมที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายฝนกรดสังเคราะห์หลังจากสัมผัสกับก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลท์ธรรมชาติเป็นวัสดุยึดประสาน และตรวจพบน้อยมาก คือ 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ในก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟู เถ้าลอย และซีโอไลท์สังเคราะห์เป็นวัสดุยึดประสาน ในขณะที่ความเข้มข้นสะสมของโครเมียมที่ถูกชะละลายออกมาในสารละลายฝนกรดสังเคราะห์ของก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึด และมีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ทุกอัตราส่วน และความเข้มข้นสะสมของโครเมียมเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง โดยในวันที่ 43 ความเข้มข้นสะสมของโครเมียมที่ถูกชะออกมาในสารละลายเท่ากับ 0.15 0.18 และ 0.18 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ขนาดเฉลี่ยของโพรง และประสิทธิภาพการลดการชะละลาย

ตารางที่ 4.24 กำลังรับแรงอัด ขนาดเฉลี่ยโพรง และประสิทธิภาพการลดการชะละลายของก้อน
หล่อแข็งอายุ 28 วัน

กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ^๒)	ขนาดเฉลี่ยโพรง (นาโนเมตร)	ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย (%)			
		Ni	Zn	Cu	Cr
5.9	147.7	74.4	78.1	70.0	93.8
10.0	128.6	76.1	79.5	77.9	95.8
11.4	115.4	78.1	82.2	79.8	96.8
11.8	52.6	77.8	83.7	80.4	99.4
12.0	60.4	76.4	82.1	79.0	99.3
13.3	142.2	76.2	80.7	74.6	96.0
14.1	103.0	77.2	82.7	76.6	97.3
28.4	123.4	79.2	82.6	76.3	97.8
43.2	49.5	81.0	83.5	87.9	99.3
44.9	58.4	82.6	84.1	87.6	99.4
50.2	74.4	81.9	84.6	83.3	98.2
61.1	49.0	82.1	84.2	83.8	99.4
74.1	63.3	83.7	85.8	85.5	99.4
126.8	112.7	83.5	86.4	80.8	98.8
137.9	74.0	83.5	86.4	80.9	98.8
265.1	140.4	86.4	89.1	87.1	100.0
319.4	119.2	92.2	91.8	89.9	100.0
369.2	108.2	90.8	94.0	91.3	100.0
421.5	138.6	91.4	92.8	91.3	100.0
425.3	118.7	94.0	96.2	93.9	100.0
500.3	107.5	92.7	94.3	94.4	100.0
504.1	107.3	95.6	97.9	94.1	100.0
584.2	116.0	94.6	96.1	96.7	100.0

จากตารางที่ 4.24 พบว่ากำลังรับแรงอัด ขนาดเฉลี่ยของโพรงและประสิทธิภาพการลดการชะละลายของก้อนหล่อแข็งกาคตะกอน โลหะหนักที่อายุ 28 วัน มีความสัมพันธ์กัน เมื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย นิเกิล สังกะสี และทองแดง และประสิทธิภาพการลดการชะละลายโครเมียม ดังนี้

1) ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย นิเกิล สังกะสี และทองแดง

ตารางที่ 4.25 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของประสิทธิภาพการลดการชะละลายนิเกิล สังกะสี และทองแดง

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	0.767(a)	0.588	0.578	6.93131	0.588	55.747	2	78	0.000

a Predictors: (Constant), X₁, X₂

ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple R) เท่ากับ 0.767

ประสิทธิภาพในการทำนาย (R square) เท่ากับ 0.588

ประสิทธิภาพในการทำนายที่ปรับแล้ว (Adjust R square) เท่ากับ 0.578

ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการทำนาย (Standard error) เท่ากับ 6.93131

ตารางที่ 4.26 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของสมการวิเคราะห์การถดถอยนิเกิล สังกะสี และทองแดง

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	86.702	2.537		34.180	0.000
	X ₁	0.042	0.004	0.743	10.129	0.000
	X ₂	-0.099	0.022	-0.322	-4.390	0.000

จากตารางที่ 4.25 และ 4.26 พบว่า ตัวแปรที่ได้รับการคัดเลือกให้เข้าสมการ คือ ค่ากำลังรับแรงอัด (X_1) และค่าขนาดเฉลี่ยโพรง (X_2) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple R) เท่ากับ 0.767 ประสิทธิภาพในการทำนาย (R square) เท่ากับ 0.588 นั่นคือ ค่ากำลังรับแรงอัด (X_1) และค่าขนาดเฉลี่ยโพรง (X_2) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดการชะละลาย (L) โดยภาพรวมคิดเป็นร้อยละ 57.80 ซึ่งประสิทธิภาพในการทำนายที่ปรับแล้ว (Adjust R square) เท่ากับ 0.578 และความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการทำนาย (Standard error) เท่ากับ 6.93131 ในลักษณะนี้แสดงว่าค่ากำลังรับแรงอัด (X_1) และค่าขนาดเฉลี่ยโพรง (X_2) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดการชะละลาย (L) โดยภาพรวมที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 สามารถเขียนเป็นสมการวิเคราะห์การถดถอย ได้ดังนี้

$$L = 86.702 + 0.042X_1 - 0.099X_2 \quad (4.1)$$

เมื่อ	L	คือ	ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย (ร้อยละ)
	X_1	คือ	กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วัน (กก./ซม. ²)
	X_2	คือ	ขนาดเฉลี่ยโพรงของก้อนหล่อแข็ง (นาโนเมตร)

2) ประสิทธิภาพการลดการชะละลายโครเมียม

จากตารางที่ 4.27 และ 4.28 พบว่า ตัวแปรที่ได้รับการคัดเลือกให้เข้าสมการ คือ ค่ากำลังรับแรงอัด (X_1) และค่าขนาดเฉลี่ยโพรง (X_2) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple R) เท่ากับ 0.643 ประสิทธิภาพในการทำนาย (R square) เท่ากับ 0.413 นั่นคือ ค่ากำลังรับแรงอัด (X_1) และค่าขนาดเฉลี่ยโพรง (X_2) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดการชะละลาย (L) โดยภาพรวมคิดเป็นร้อยละ 36.40 ซึ่งประสิทธิภาพในการทำนายที่ปรับแล้ว (Adjust R square) เท่ากับ 0.346 และความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการทำนาย (Standard error) เท่ากับ 5.08533 ในลักษณะนี้แสดงว่าค่ากำลังรับแรงอัด (X_1) และค่าขนาดเฉลี่ยโพรง (X_2) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดการชะละลาย (L) โดยภาพรวมที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 สามารถเขียนเป็นสมการวิเคราะห์การถดถอย ได้ดังนี้

$$L = 105.093 + 0.015X_1 - 0.097X_2 \quad (4.2)$$

เมื่อ L คือ ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย (ร้อยละ)
 X_1 คือ กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วัน (กก./ซม.²)
 X_2 คือ ขนาดเฉลี่ยโพรงของก้อนหล่อแข็ง (นาโนเมตร)

ตารางที่ 4.27 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของประสิทธิภาพการลดการชะละลายโครเมียม

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	0.643(a)	0.413	0.364	5.08533	0.413	8.452	2	24	0.002

a Predictors: (Constant), X_1 , X_2

ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple R) เท่ากับ 0.643

ประสิทธิภาพในการทำนาย (R square) เท่ากับ 0.413

ประสิทธิภาพในการทำนายที่ปรับแล้ว (Adjust R square) เท่ากับ 0.364

ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการทำนาย (Standard error) เท่ากับ 5.08533

ตารางที่ 4.28 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของสมการวิเคราะห์การถดถอยโครเมียม

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	105.093	3.223		32.603	0.000
	X_1	0.015	0.005	0.440	2.787	0.010
	X_2	-0.097	0.029	-0.535	-3.388	0.002

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งที่ใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสาน เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสานในอัตราส่วนที่กำหนด และเปรียบเทียบคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งที่ใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสานในอัตราส่วนที่กำหนด ซึ่งจากการศึกษาพบข้อสรุปที่สำคัญดังนี้

5.1 สรุปผลการทดสอบในงานวิจัย

จากผลการศึกษาการชะละลายก้อนหล่อแข็งจากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุพอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุยึดประสาน ในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10 เถ้าลอยร้อยละ 30 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 0 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ผสมจากตะกอนโลหะหนักจากโรงงานหุบนิกเกิดในอัตราส่วนร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานและจากตะกอนโลหะหนัก

จากการทดลองพบว่า องค์ประกอบทางเคมีหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ แคลเซียมออกไซด์ และซิลิกาไดออกไซด์ ส่วนองค์ประกอบทางเคมีหลักของซิลิกาฟูม เถ้าลอย ซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ คือ ซิลิกาไดออกไซด์ ส่วนโลหะหนักที่พบในจากตะกอนจากโรงงานหุบนิกเกิด คือ ออกไซด์ของโลหะหนัก นิกเกิล ทองแดง สังกะสี และโครเมียม และจากการวิเคราะห์แร่ที่เป็นองค์ประกอบเพื่อระบุชนิดของซีโอไลต์ พบว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์ คือ โซเดียมอลูมิเนียมซิลิเกต และซีโอไลต์ธรรมชาติ คือ ไคลน็อพติโลไลต์

5.1.2 ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง

จากการทดลอง พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการหล่อก้อนหล่อแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุมเนื่องมาจากอนุภาคของวัสดุยึดประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนมีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวสูง และภาคในอนุภาคมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้ดูดซึมน้ำได้ดี ในขณะที่การเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพราะการใส่กากตะกอนมากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น้อยลงและโลหะหนักในกากตะกอนยังยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วย

5.1.3 การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด

การทดสอบกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียในอัตราร้อยละ 40 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุการบ่ม 7 28 และ 90 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มตัวในแต่ละอัตราส่วนผสม และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสมที่อายุการบ่มเท่ากัน เนื่องจากปริมาณกากตะกอนของเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของวัสดุยึดประสานในส่วนผสมลดลง ซึ่งจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้น้อย จึงทำให้กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักบางอัตราส่วนมีกำลังอัดต่ำกว่าค่ามาตรฐานความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียเพื่อการฝังกลบ ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานของ US.EPA จะต้องมากกว่า 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และพบว่าก้อนหล่อแข็งที่ใช้วัสดุยึดประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติให้กำลังรับแรงอัดดีกว่าซิลิกาฟูม เถ้าลอย และซีโอไลต์สังเคราะห์

5.1.4 ปริมาตรและการกระจายตัวของโพรง

จากการทดลองพบว่าเพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุพอซโซลานมีปริมาณโพรงทั้งหมด (Total Porosity) เพิ่มขึ้น แต่ขนาดเฉลี่ยของโพรง (Average Pore) มีขนาดเล็ก เนื่องจากคุณสมบัติวัสดุพอซโซลานมีรูพรุนหรือโพรงขนาดเล็กเชื่อมต่อกัน ส่วนก้อนหล่อแข็ง มีขนาดเฉลี่ยของโพรงใหญ่ขึ้น ตามอัตราส่วนของกากตะกอนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารโลหะหนักขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ และปริมาณกากตะกอนของเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของวัสดุยึดประสานในส่วนผสมลดลง ซึ่งจะทำให้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้ขนาดเฉลี่ยของโพรงใหญ่

5.1.5 การทดสอบความคงทนของก้อนหล่อแข็งต่อสภาวะเปียกแห้ง

จากการทดสอบ พบว่าก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ในขณะที่ก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นวัสดุยึดประสานมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงน้อยสุด อย่างไรก็ตามความคงทนต่อสภาวะเปียกและแห้งของก้อนหล่อแข็งแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุพอลิไซลาลานที่อายุ 28 วันมีการเปลี่ยนแปลงในระดับที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ASTM D4843-88 โดยมีผลต่างระหว่างชุดควบคุมและชุดทดสอบไม่เกินร้อยละ 30

5.1.6 การทดสอบการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง

การทดสอบด้วยวิธี TCLP พบว่าสารชะละลายที่สกัดได้มีความเข้มข้นของโครเมียม ต่ำกว่า 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร ตามมาตรฐานที่ US.EPA กำหนดไว้ ส่วนนิกเกิล ทองแดง และสังกะสีถึงแม้จะไม่มีกำหนดค่ามาตรฐานไว้แต่ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายอยู่ในระดับสูง เนื่องจากค่า pH ของสารละลายที่สกัดได้มีค่าสูงขึ้นจนอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการตรึงโลหะไฮดรอกไซด์ และทำให้ไฮดรอกไซด์มีความเสถียรมากขึ้นและมีความสามารถในการละลายลดลง หรือกล่าวได้ว่า ความสามารถในการกักเก็บสาร โลหะหนักของก้อนหล่อแข็งสูง จึงทำให้ความเข้มข้นของโลหะไฮดรอกไซด์ในสารละลายที่สกัดได้มีค่าต่ำ

การทดสอบด้วยวิธี DLT สำหรับการ ใช้สารละลายกรดอะซิติกและสารละลายฟนกรดสังเคราะห์เป็นสารชะละลาย พบว่า การใช้สารละลายกรดอะซิติกเป็นสารชะละลาย ความเข้มข้นของสารโลหะหนักที่ถูกชะออกมามากกว่าการใช้สารละลายฟนกรดสังเคราะห์เป็นสารชะละลาย แสดงว่าภายใต้สภาวะการชะละลายที่รุนแรง (pH เริ่มต้นของสารชะประมาณ 3) ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายจะต่ำกว่าสภาวะการชะละลายที่ไม่รุนแรง (pH เริ่มต้นของสารชะประมาณ 5-6) หรือภายใต้สภาวะปกติ

การหล่อแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นวัสดุยึดประสานมีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะหนักของก้อนตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ได้มากกว่า 90% ทุกอัตราส่วนของกากตะกอนโลหะหนัก และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะหนักของก้อนตัวอย่างได้ดีที่สุด

5.1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ขนาดเฉลี่ยของโพรง และประสิทธิภาพการลดการชะละลาย

ผลจากการวิเคราะห์สรุปได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัด และค่าขนาดเฉลี่ยโพรงส่งผลต่อประสิทธิภาพการลดการชะละลาย โดยภาพรวมที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 สามารถเขียนเป็นสมการวิเคราะห์การถดถอยได้ดังนี้

ประสิทธิภาพการลดการชะละลายนิเกิล สังกะสี และทองแดง

$$L = 86.702 + 0.042X_1 - 0.099X_2 \quad (4.1)$$

ประสิทธิภาพการลดการชะละลายโครเมียม

$$L = 105.093 + 0.015X_1 - 0.097X_2 \quad (4.2)$$

เมื่อ	L	คือ	ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย (ร้อยละ)
	X_1	คือ	กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็ง อายุ 28 วัน (กก./ซม. ²)
	X_2	คือ	ขนาดเฉลี่ยโพรงของก้อนหล่อแข็ง (นาโนเมตร)

เพื่อพิจารณาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วันที่ได้จากการทดสอบจะเห็นว่า การหล่อแข็งกาคตะกอนโลหะหนักจากโรงงานชุบโลหะหนักเกิดโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุพอลิโพรพิลีนที่มีอัตราส่วนที่เหมาะสม ดังนี้

- 1) การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และผสมกาคตะกอนโลหะหนักไม่เกินร้อยละ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน
- 2) การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 และผสมกาคตะกอนโลหะหนักไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน
- 3) การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 40 และผสมกาคตะกอนโลหะหนักไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน
- 4) การแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 40 และผสมกาคตะกอนโลหะหนักไม่เกินร้อยละ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะในการใช้งาน

1) ในการนำไปใช้งานในการบำบัดกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมควรมีการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณกากตะกอน องค์ประกอบต่าง ๆ เสียก่อนเพื่อนำมาพิจารณาในการเลือกเทคนิคในการหล่อแข็งและเลือกใช้วัสดุยึดประสานที่เหมาะสมต่อไป

5.2.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

1) ควรศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักจากแหล่งอื่นเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการหล่อแข็งด้วยวิธีนี้ เพราะกากตะกอนโลหะหนักแต่ละแหล่งมีปริมาณและประเภทของโลหะหนักที่แตกต่างกัน

2) ควรทำการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติและผสมกากตะกอนโลหะหนักมากกว่าร้อยละ 60 เพื่อหาแนวโน้มการเพิ่มปริมาณกากตะกอนโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งมากยิ่งขึ้น

3) ควรศึกษาแนวทางการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุพอลิโซลานชนิดอื่น ๆ เพื่อให้ได้วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการหล่อแข็ง

รายการอ้างอิง

- กฤษณา ผากานนท์ (2537). การกำจัดกากตะกอนนิกเกิลเกิดจากกระบวนการชุบโลหะโดยวิธี Solidification. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จักรพันธ์ วงษ์พา (2546). การใช้เถ้าเคลบ-เปลือกไม้เพื่อเป็นวัสดุ پوشโซลาน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิตติณี เจริญจิตต์ (2546). การหล่อแข็งกากตะกอนชุบโลหะโดยการกระตุ้นวัสดุยึดประสานประเภทปูนขาว และเถ้าเคลบ ด้วยสารเคมี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิตรพล พฤษภักทรกุล (2547). การจัดการกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิราภรณ์ นิจันท์พันธุ์ (2543). การศึกษาการดูดซับซัลไฟด์ในน้ำทิ้งโดยใช้ซีโอไลต์. โครงการวิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2542). ซิลิกาฟุ้ง. โยธาสาร ฉบับเดือน ตุลาคม.
- ชาตินัย โคนานาวิทย์ (2544). การหล่อแข็งกากตะกอนโรงชุบโลหะโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซิลิกาฟุ้งควบแน่นและตะกรันเตาหลอมเหล็ก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชูชัย เทียวประสงค์ (2539). การหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมโดยใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าลอย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2547). ผลกระทบของมลพิษตะกอนเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัด ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงในซีเมนต์เพสต์. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.
- ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ ชูวิทย์ นาเพีย และศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2550). ผลกระทบของซีโอไลต์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12 จังหวัดพิษณุโลก วันที่ 2-4 พฤษภาคม.

ธีรวัฒน์ สีนศิริ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ (2548). ผลกระทบของเถาถ่านหินต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของเพสต์. **สัมมนาวิชาการเรื่อง การนำเถาถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต ครั้งที่ 2** : 64-82.

บวรธรรม ไชยเอื้อ (2535). การศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมไมโครซิลิกา. **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น**.

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิมิตรยงสกุล (2537). ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตผสมซีเมนต์แม่เมาะ. **วารสารวิจัยสถานะแวดล้อม**. ปีที่ 16 เล่มที่ 2 หน้า 58-78.

ประทีป เลียงเพ็ชร (2539). การหล่อแข็งกากตะกอนตะกั่วโดยใช้ปูนซีเมนต์ ซีเมนต์แกลบและซีเมนต์ลอย. **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร (2528). ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แม่เมาะ. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2549). **Cement Pozzolan and Concrete**. บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.

ปรีดา พากเพียร สุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์ม โฟโรจน์ โสมนัส และพิชิต พงษ์สกุล (2535). แนวทางการใช้ซีไอโอไลต์เพื่อลดปัญหามลพิษและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร. **วารสารดินและปุ๋ย ฉบับเดือนตุลาคม-ธันวาคม**. : 337-341.

พจนีย์ ขุมมงคล และสิรินทรเทพ เต้าประยูร (2539). รายงานฉบับสมบูรณ์เรื่อง การบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีการหล่อแข็ง ของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

พวงรัตน์ ขจิตวิชยานุกูล และเอกชัย ทวีกิจวานิช (2548). ผลของโลหะหนักที่มีต่อเฟสของเม็ดปูนในซีเมนต์ที่ได้จากการเผาพร้อมกับของเสียอันตราย. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10 จังหวัดชลบุรี วันที่ 2-4 พฤษภาคม**. : ENV-74-79.

พวงรัตน์ ขจิตวิชยานุกูล และเอกชัย ทวีกิจวานิช (2548). การศึกษาการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์ที่ใช้กากของเสียอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิต. **วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**.

พิเชษฐ อธิภาคย์ (2542). การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานถลุงแร่สังกะสีโดยใช้ปูนซีเมนต์และฝุ่นทรายดำ. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**.

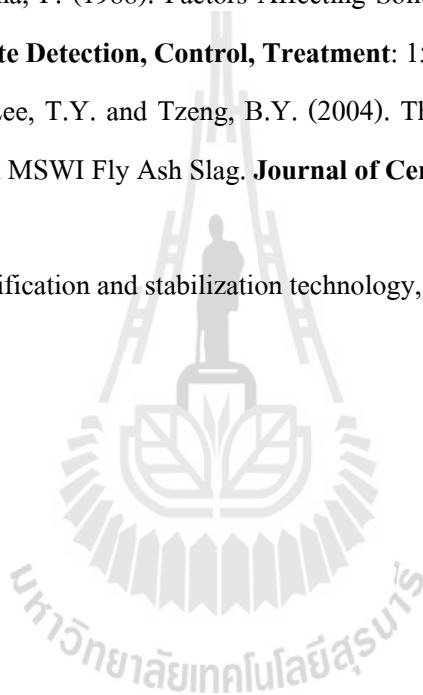
- พิณชูกรณ์ ชอบเที่ยงธรรม (2546). การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบโครเมียมด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์และฝุ่นทรายดำ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มัลลิกา ปัญญาคะโป (2542). เอกสารประกอบวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม เรื่องของเสียอันตราย. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ยุทธพงษ์ พิจารโชติ (2549). การหล่อแข็งกากตะกอนสังกะสีจากโรงชุบโลหะโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์. วิทยานิพนธ์สาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช.
- ฤทัยรัตน์ แพรอด (2548). ลักษณะทางกายภาพและชนิดของโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วราภรณ์ คุณาวนากิจ (2536). คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยลิกไนต์. เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์. สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. : 2-1 ถึง 2-15.
- วิฒนชัย อยู่ในวงศ์ (2546). การใช้ซีโอไลท์กำจัดแคดเมียม ตะกั่ว โปรท และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ศิริภัทร์ นาคศรีชุ่ม (2545). การหล่อแข็งกากตะกอนโรงชุบโลหะโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุยึดประสาน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สมชัย กกกำแหง (2542). การใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. การสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- สุธาทิพย์ อินทรวงศ์ (2545). การเปรียบเทียบวิธีทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุยึดประสาน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- โสภภาพรรณ จิรนิติศัย (2534). ปริมาณตะกั่ว ทองแดง แคดเมียมและสังกะสีในน้ำและดินตะกอนจากชั้นคุณภาพลุ่มน้ำต่าง ๆ ของลุ่มน้ำแม่กลอง. **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.**
- อุษา อ้นทอง (2549). การศึกษาการใช้ประโยชน์ของซีโลสต์ในการลดของเสียในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และการนำซีโอโลสต์ที่ผ่านการใช้ในการลดของเสียไปใช้เป็นปุ๋ยในการปลูกพืช. **มหาวิทยาลัยทักษิณ.**
- Aitcin, P.C. and Baalbaki, M. (1994). Concrete Admixtures-Key Components of Modern Concrete, In: Aguado, A., et al., Editor. Concrete Technology: New Trends, Industrial Application, **Proceeding of the International RILEM Workshop on Technology Transfer of the New Trends in Concrete**, Barcelona, November, pp. 33-47.
- Asavapisit, S., Nanthamontry, W. and Polprasert, C., (2001). Influence of Condensed Silica Fume on the Properties of Cement-based Solidified Wastes. **Journal of Cement and Concrete Research**. 31: 1147-1152.
- Asavapisit, S., Intarawong, S. and Harnwajanawong, N. (2003). Leaching Behavior of Heavy Metal from the Solidified Plating Sludge under Various Leaching Condition, **Thammasat Int. J.Sc. Tech.**, Vol. 8, No. 1 : 1-12
- ASTM D 4843-88 (1997). Standard test method for wetting and drying test of solid wastes. **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C618-00 (2001). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Concrete. **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Berke N.S. (1988). Microsilica and Concrete Durability. **In Transportation Research Record n 1204**. : 21-26.
- Bishop, M., Bott, S. G., and Barron, A.R. (2003). A New Mechanism for Cement Hydration Inhibition : Solid-State Chemistry of Calcium Nitrilotris(methylene)triphoshonate. **Chemistry of Materials**, 15(16): 3073-3088
- Brink, R.H. and Halstead, W.J. (1956). Studies relating to the testing of fly ash for use in concrete. **Proc. ASTM**, 56. : 1161-1206.

- Chang, C.L. (1989). Solidification of Heavy Metals Using Cement and Rice Husk Ash [Master Thesis in Engineer]. Bangkok: Asian Institute of Technology.
- Cheng, K.Y., Bishop, P. (1992). Metal distribution in solidified/stabilized waste forms after leaching **Journal of Hazardous Waste & Hazardous Materials**. Vol. 9: 163-171
- Chi Lo, I.M., Tang, C.I., Dong Li, X. and Sun Poon, C. (2000). Leaching and Microstructural Analysis of Cement-Based Solidified Waste, *Environmental Science & Technology*, Vol. 34 : 5038-5042.
- Chindapasirt, P., Ruangsiriyakul, S., Cao, H.T. and Bucea, L., Influence of Mae Moh Fly Ash Fineness on Characteristics, Strength and Drying Shrinkage Development of Blended Cement Mortars, **The Eighth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2001**. Singapore.
- Corner, J.R. (1990). Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Waste. **Van Nostrand Reinhold**, New York : 638-651.
- Curkovic, L., Cerjan-Stefanvic, S. and Filipan, T. (1996). Metal Ion Exchange and Modified Zeolite. **Wat.Res.** 31(6): 1379-1382.
- Dalton, J.L., Gardner, K.H., Seager, T.P., Weimer, M.L., Spear, J.C.M., and Magee, B.J. (2004). Properties of Portland cement made from contaminated sediments. **Resources, Conservation and Recycling** 41(3) : 227-241.
- Davis, L.M. and David, A.C. (1991). Introduction to environmental engineering. Singapore. McGraw-Hill: 650-653.
- Feng, N.-Q. and Peng, G.-F. (2005). Applications of Natural Zeolite to Construction and Building Materials in China. **Journal of Construction and Building Materials**. Vol. 19: 579-584.
- Feng, N.-Q., Xing, F. and Leng, F.-G. (2000). Zeolite Ceramsite Cellular Concrete. **Magazine of Concrete Research**, 52 (2): 117-122.
- Hills, C.D., Sollars, C.J., and Perry (1993). Ordinary Portland Cement Based Solidification of Toxic Wastes, *Cement and Concrete Research*, vol. 23 : 196-212
- Jaggi, N. (1988). **Solidification of hazardous waste using cementitious binders** [Master Thesis in Engineer]. Bangkok: Asian Institute of Technology.
- Jong, H.Y. (1990). **Solidification of laboratory waste by using ordinary portland cement and**

- rice husk ash cement** [Master Thesis in Engineer]. Bangkok: Asian Institute of Technology.
- Lane, R. O. and Best, J.F. (1982). Properties and Use of Fly Ash in Portland cement Concrete. **Concrete International : Design&Construction**. Vol. 4: 81- 92.
- Leangoon, K. (1993). **Solidification of hazardous waste by cement-based techniques** [Master Thesis in Engineer]. Bangkok: Asian Institute of Technology.
- Metha, J.L., Smith, L.A., Nehring, K.W., Brauning, S.E.,Gavaskar, A.R. and Sass, B.M. (1995). The application of solidification/stabilization to waste materials, London, Lewis Publishers: 107-108.
- Mindess, S. and Young, J. F. (1981). Concrete, Prentice-Hall Inc., **Englewood Cliffs, N.J.**
- Nai-Qian Feng and Jina-Hua Yan, (1998). Prevention of ARR in cement concrete with natural Zeolite. **Concrete Cement Products**, Vol. 2.
- Nai-Qian Feng and Li Gui-Zhi, (1991). Humidity-conditioning Materials. **Proceedings of the 24th academic conference of the Production Engineering**.
- Rattanasak, U., Jaturapitakkul, C., and Sudaprasert, T. (2001). Compressive strength and heavy metal leaching behaviour of mortars containing spent catalyst. **Journal of Waste Management and Research**. 19: 4-9.
- Rijal, S.P. (1990). Solidification of Laboratory waste using cementitious binder. [Master Thesis in Engineer].Bangkok: Asian Institute of Technology: 1990.
- Pandy, K. (1987). Fly Ash for The Treatment of Cd(II) Rich Effluents. **Environmental Technology**, 14 : 225-234.
- Peralta, 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 :160-167.
- Pojasek, R.B. (1980). Chemical engineering. New York. McGraw-Hill:307-3 11.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C. and Lin, Z. S. (1999). A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Paste. **Journal of Construction and Building Materials**. 13: 427-432.

- Qian, G.R., Sun, D.D. and Tay, J.W. (2003). Characterization of Mercury- and Zinc-doped Alkali-activated Slag Matrix Part II Zinc. *Cement and Concrete Research*, vol.33, : 1257-1262.
- Quanlin, N. and Naiqian, F. (2005). Effect of Modified Zeolite on Expansion of Alkaline Silica Reaction. **Journal of Cement and Concrete Research**. Vol. 35: 1784-1788.
- Shin, H.S., Her, N.Y. and Koo J.K. (1988). Design optimization for solidification of hazardous waste. **The institute of water and environment management**; 5: 239-250
- Shin, H.S. and Sujiwattana, P. (1988). Factors Affecting Solidification of Hazardous Materials. **Hazardous Waste Detection, Control, Treatment**: 1549-1560
- Wang, K.S., Lin, K.L., Lee, T.Y. and Tzeng, B.Y. (2004). The Hydration Characteristics when C_2S is Present in MSWI Fly Ash Slag. **Journal of Cement and Concrete Research**. 26: 323-330.
- 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 $90-95^{\circ}\text{C}$ 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



ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ ชูวิทย์ นาเพีย และศักดิ์สิทธิ์ พันทวี. (2550). ผลกระทบของซีโอไลท์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12 (The 12th National Convention on Civil Engineering)

ชูวิทย์ นาเพีย ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และปริญา จินดาประเสริฐ. (2552). การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกาคะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลท์เป็นวัสดุยึดประสาน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5 (Annual Concrete Conference 5)

วรวรรณชัย สายวาริน ชูวิทย์ นาเพีย และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. (2553). การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกาคะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยและซิลิกาฟูมเป็นวัสดุยึดประสาน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6 (Annual Concrete Conference 6)

CHUWIT NAPIA, THEERAWAT SINSIRI AND PRINYA CHINDAPRASIRT. (2008). **THE EFFECT OF ZEOLITE ON MICROSTRUCTURE OF BLENDED CEMENT PASTE.** Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-11)

Chuwit Napia, Theerawat Sinsiri, Chai Jaturapitakkul and Prinya Chindaprasirt. (2012). **Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder.** Waste Management Journal.



ผลกระทบของซีโอไลท์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์ผสม

THE EFFECT OF ZEOLITE ON MICROSTRUCTURE OF BLENDED CEMENT PASTE

ดร. ชีร์วัฒน์ สิ้นศิริ (Theerawat Sinsiri)¹ชูวิทย์ นาเพีย (Chuwit Napia)²ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (Saksith Pantawee)³¹อาจารย์, ²นักศึกษาระดับปริญญาเอก, ³หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้าง, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,นครราชสีมา, Email address : sinsiri@stn.ac.th

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, นครราชสีมา

Email address : sacred13@hotmail.com

บทคัดย่อ : บทความนี้นำเสนอผลกระทบของซีโอไลท์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์ผสม โดยนำซีโอไลท์จากการสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.35 ศึกษาผลกระทบของซีโอไลท์ต่อปฏิกิริยาปอซโซลานในพาสต์ โดยวิธี Thermal Diffractometer Gravity Analysis (TGA/DTA), X-Ray Diffractometer Analysis (XRD), ถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และทดสอบหาความพรุน โดยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

ผลการทดสอบพบว่าปริมาณการแทนที่ของซีโอไลท์มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลท์ในอัตราการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงและปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น และผลของภาพขยายพื้นผิวของตัวอย่างด้วย SEM พบว่าพาสต์ที่ผสมซีโอไลท์โครงสร้างของพาสต์มีความหนาแน่นขึ้น การแทนที่ซีโอไลท์ในพาสต์มีผลกระทบต่อปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาปิลลารีของพาสต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลท์ในอัตราการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดของพาสต์เพิ่มขึ้นแต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง และโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่โพรงคาปิลลารีขนาดกลางเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลท์

ABSTRACT : This paper presents the effect of zeolite on microstructure of hardened blended cement pastes. Synthesise zeolite was used to partially replace Portland cement type I at the rate of 0, 20, and 40% by weight of binder. The water to binder ratio (W/B) of 0.35 was used for all the blended cement paste mixtures. XRD and DTA were used to investigate the pozzolanic reaction of blended cement paste and fractured surface of blended cement paste was studied by SEM. The pore size distribution of blended cement paste was studied by MIP.

Test results indicated that the pozzolanic reaction of blended cement paste was significantly affected by the replacement of zeolite. The Ca(OH)_2 of blended cement paste decreased with an increase in zeolite content at the longer curing. SEM results revealed that the pastes with zeolite became denser. The porosity and pore size of blended cement paste was significantly affected by the replacement of zeolite. The replacement of Portland cement by zeolite increased the total porosity but decreased the average pore size of the paste. The large capillary porosity trended to decreased and medium capillary porosity increased as a result of the addition of zeolite.

KEYWORDS : Zeolite, Microstructure (XRD, TGA, SEM,), Porosity (MIP), Blend cement paste



1. บทนำ

ซีโอไลต์ (Zeolite) ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-30 อังสตรอม ($1 \text{ อังสตรอมเท่ากับ } 1 \times 10^{-10} \text{ เมตร}$) ปัจจุบันนิยมนำธาตุนิวเคลียร์มาใช้เป็นส่วนประกอบของผงซักฟอก และใช้ในการปรับปรุงปัญหาเกี่ยวกับมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม เช่น เป็นตัวดูดซับมลพิษทางอากาศ และใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

นอกจากนี้ได้มีการนำซีโอไลต์มาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านคอนกรีตมากขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์เป็นสารที่องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยสารซิลิกา และสารอลูมินาเป็นหลัก และมีขนาดอนุภาคเล็ก มีรูพรุนสูง จึงน่าจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี โดยเฉพาะในประเทศจีนมีการนำซีโอไลต์จากธรรมชาติมาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีตมากมาย เช่น มาทำเป็นคอนกรีตมวลเบา ทำเป็นสารผสมเพิ่มลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลในคอนกรีต ลดปัญหาการเกิดการเอี่ยม ลดการแยกตัว ลดการซึมผ่าน เพิ่มความทนทาน เพิ่มกำลัง ทำเป็นวัสดุปอซโซลาน เป็นต้น [1, 2, 3, 4]

ผู้วิจัยได้ศึกษาศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของซีเมนต์ผสมซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำซีโอไลต์มาเป็นวัสดุปอซโซลาน เพื่อนำมาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต [5] ดังนั้นในบทความนี้จึงมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยนำเสนอผลกระทบของซีโอไลต์โครงสร้างระดับอนุภาคของเพสต์ เช่น ปริมาตรโพรง และปฏิกิริยาปอซโซลาน เพื่อยืนยันว่าซีโอไลต์มีความเป็นปอซโซลาน สามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 ซีโอไลต์สังเคราะห์ จากบริษัทเอกชนในจังหวัดชลบุรี ใช้สัญลักษณ์คือ Ze น้ำ ใช้น้ำประปา

2.2 อัตราส่วนผสม

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถูกแทนที่ด้วยซีโอไลต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 หล่อตัวอย่างก้อนเพสต์รูปลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม ตามมาตรฐาน ASTM C 109 และคลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ หลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบออก และบ่มโดยการนำไปแช่น้ำจนท่วมตัวอย่างเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิห้อง ตามเวลาที่กำหนด นำไปทดสอบที่อายุ 28 วัน

3. วิธีการทดสอบ

3.1 ทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ และซีโอไลต์

3.1.1. การทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซีโอไลต์ โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตลิแอร์ (Le Chatelier Flask) ตาม ASTM C 188

3.1.2. ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซีโอไลต์ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.1.3. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซีโอไลต์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence

3.1.4. หากการกระจายขนาดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซีโอไลต์ โดยใช้เครื่อง Mastersizer

3.2 ทดสอบคุณสมบัติของเพสต์

นำตัวอย่างที่อายุครบ 28 วันจากการบ่มในน้ำมาทำให้แห้ง แล้วทุบตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาด



ประมาณ 10×10 มม.² นำขึ้นตัวอย่างไปแช่สาร Acetone ในโอแก้วที่ปิดมิดชิดเป็นเวลา 7 วัน เพื่อหยุดปฏิกิริยา หลังจากนั้นนำขึ้นตัวอย่างมาทำให้แห้งใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำเข้าเครื่องบดละเอียด ที่ความเร็ว 950 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 นาที แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (150 ไมครอน) นำตัวอย่างไปทดสอบ XRD และ TGA, DTA เพื่อวิเคราะห์หาแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อีกส่วนหนึ่งทุบก้อนตัวอย่างให้มีขนาดประมาณ 2×2 มม.² นำไปทดสอบปริมาณโพรงทั้งหมด การกระจายขนาดโพรง โดย MIP และ ทุบให้เป็นแผ่นขนาด 1×1 ซม.²หนา 0.5 ซม. นำไปถ่ายภาพขยายของผลด้วยเครื่อง SEM

3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

PC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ZE = ซีโอไลต์

PC100 = เฟสที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

PZE20 = เฟสที่ผสมด้วยซีโอไลต์ในอัตราแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

PZE40 = เฟสที่ผสมด้วยซีโอไลต์ในอัตราแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

4.1 คุณสมบัติของวัสดุ

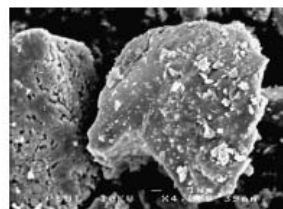
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์

ตารางที่ 1 แสดงความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์ และจากการที่นำตัวอย่างไปทำการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม แต่มีเนื้อแน่น ดังแสดงในรูปที่ 1 ก. และเมื่อพิจารณารูปที่ 1 ข พบว่าซีโอไลต์มีพื้นผิวเรียบ รูปร่างมีลักษณะเป็น 6 เหลี่ยม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 2.34 ไมครอน ขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 13.60 ไมครอน โดยกราฟแสดงการกระจายขนาดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

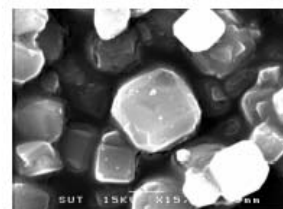
ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์ด้วยเครื่อง Mastersizer แสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์

Sample	Specific Gravity	Mean Particle Size d_{50} (micron)
PC	3.15	13.60
Ze	1.87	2.34

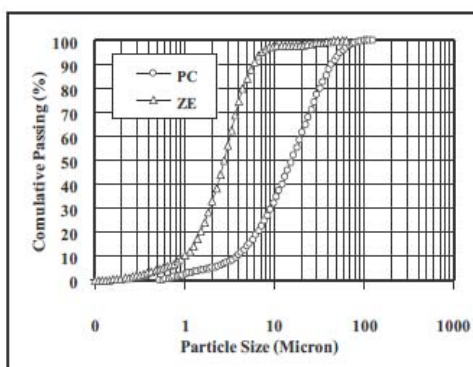


ก) ภาพถ่ายขยาย 4,000 เท่าของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1



ข) ภาพถ่ายขยาย 15,000 เท่าของซีโอไลต์

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายของวัสดุโดย SEM



รูปที่ 2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์

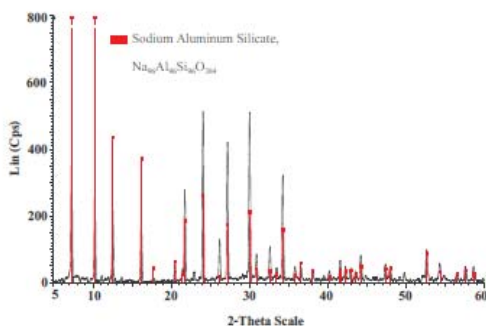


4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลต์ด้วยเครื่อง XRF พบว่าซีโอไลต์ที่มีออกไซด์ของซิลิกา และ อลูมินา เมื่อนำซีโอไลต์มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3 พบว่า Pattern ที่ได้สามารถระบุได้ว่าเป็นซีโอไลต์ชนิด A ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Sodium Aluminum Silicate โดยมุมของการเลี้ยวเบนที่ใช้คือ 2θ หรือประมาณ $0-60^\circ$ ซึ่ง Zeolite A มีสูตรทางโครงสร้างทางเคมีดังนี้ $\text{Na}_{40}\text{Al}_6\text{Si}_{36}\text{O}_{38}$

ตารางที่ 2 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซีโอไลต์

Chemical Composition (%)	Portland Cement Type 1 (PC1)	Zeolite (Ze)
SiO_2	20.9	67.08
Al_2O_3	4.76	21.12
Fe_2O_3	3.41	0.03
CaO	65.41	0.18
MgO	1.25	0.08
K_2O	0.35	2.87
LOI	0.96	6.27



รูปที่ 3 การหักเหของรังสีเอ็กซ์เรย์ของซีโอไลต์

4.2 คุณสมบัติของพาสต์

4.2.1 ผล การวิเคราะห์ปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงต่างๆของพาสต์เมื่อได้รับความร้อน (Thermal Analysis in Pastes)

Differential Thermal Analysis (DTA) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาต่างๆเมื่อพาสต์ได้รับความร้อน โดยปฏิกิริยาที่สามารถตรวจพบ (Detect) ได้โดยเทคนิคนี้

จะต้องมีการเปลี่ยนแปลง Enthalpy ระหว่างเกิดปฏิกิริยาก็คือ Endothermic Reaction คือ ปฏิกิริยาที่ดูดพลังงาน ความร้อนจากภายนอก หรือ Exothermic Reaction คือ ปฏิกิริยาที่คายความร้อนออกมาภายนอก ปฏิกิริยาทั้งสองแบบจะมีผลทำให้อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมเกิดการเปลี่ยนแปลง หลักการทำงานของเครื่อง DTA จะใช้พื้นฐานการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างเกิดปฏิกิริยาในการวิเคราะห์ หลักการทำงานของเครื่องจะวัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวอย่างและวัสดุเปรียบเทียบ (Inert Reference Materials, ผง Alumina) โดยที่ทั้งตัวอย่าง และ Reference จะได้รับความร้อนในสภาวะแบบเดียวกัน และจะบันทึกผลอย่างต่อเนื่องออกมาแสดงในรูปที่ 4

Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของพาสต์ตัวอย่าง ระหว่างปฏิกิริยาเมื่อได้รับความร้อน เช่น ปฏิกิริยาแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) ปฏิกิริยาการระเหยของน้ำในพาสต์ทั้ง Free และ Chemical Water เป็นต้น หลักการทำงานของเครื่อง TGA จะทำการวิเคราะห์โดยใช้ตัวอย่างในตาชั่งขนาดเล็กที่มีความละเอียดสูงมาก (Microbalance) ซึ่งจะทำการบินที่น้ำหนักของตัวอย่างอย่างต่อเนื่องในลักษณะกราฟเมื่อตัวอย่างได้รับความร้อน น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงระหว่างปฏิกิริยาจะสามารถอ่านได้โดยตรงจากกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 5

รูปที่ 4 และ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ DTA และ TGA ของพาสต์ PC100, PZE20, และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับพิจารณาการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิระหว่าง 450°C และ 580°C [6, 7, 8] ซึ่งจะสลายตัวในรูปแคลเซียมออกไซด์กับน้ำ ดังสมการที่ 1

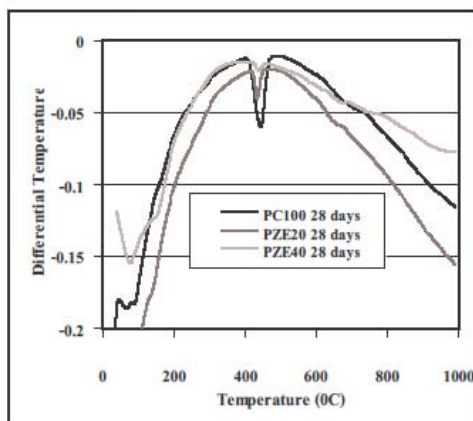


จากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4 และ 5 พบว่าการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ลดลงเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ (PZE20, PZE40) โดยเปรียบเทียบกับพาสต์ที่ผสมปูนซีเมนต์ล้วน (PC100) เมื่อแทนที่ซีโอไลต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วย นั้นแสดงว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก็ลดลงด้วย ในพาสต์ที่ผสมซีเมนต์ล้วนปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ส่วนใน

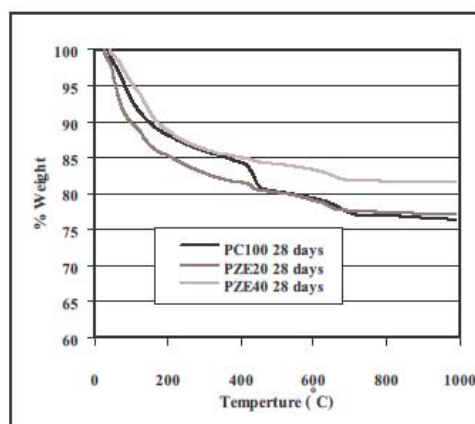




เฟสต์ผสมซีโอไลต์ ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซีโอไลต์



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาต่างๆเมื่อเฟสต์ได้รับความร้อน (DTA)



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักที่ลดลงของเฟสต์ เมื่อเฟสต์ได้รับความร้อน (TGA)

4.2.2 ผลกระทบของซีโอไลต์ต่อปริมาตรโพรงของเฟสต์

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณของโพรงชนิดต่างๆ, ขนาดโพรงเฉลี่ย, และพื้นที่โพรงทั้งหมดของเฟสต์ PC100, เฟสต์ PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน ส่วนรูปที่ 6 แสดงปริมาณโพรงทั้งหมดของเฟสต์ PC100, PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน จากผลการทดลองพบว่าปริมาณโพรงทั้งหมด (Total Porosity) และพื้นที่โพรงทั้งหมด (Total Pore Area) มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น

เมื่อมีการแทนที่ซีโอไลต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากคุณสมบัติของซีโอไลต์มีรูพรุนหรือโพรงขนาดเล็กเชื่อมต่อกัน ส่งผลให้ปริมาณโพรง และพื้นที่โพรงสูงขึ้น แต่ถ้าพิจารณาขนาดเฉลี่ยของโพรง (Average Pore) พบว่ามีขนาดเล็กลง เมื่อมีการแทนที่ซีโอไลต์ในปริมาณที่มากขึ้น เป็นเพราะว่าขนาดอนุภาคของซีโอไลต์มีขนาดเล็กมาก (ขนาดเฉลี่ยประมาณ 2.34 ไมครอน) เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 13.60 ไมครอน ขนาดที่เล็กของซีโอไลต์ไปแทรกตัวระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้ช่องว่างลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของโพรงคาปิลลารีขนาดกลาง (Medium Capillary, 10,000-50 nm) มีปริมาณที่มากขึ้น นั้นแสดงว่าเฟสต์ที่ใส่ซีโอไลต์ มีโพรงขนาดเล็กเพิ่มขึ้นในปริมาณที่มาก นอกเหนือจากขนาดอนุภาคที่เล็กของซีโอไลต์ อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซีโอไลต์ด้วย แต่ในการนำเสนอครั้งนี้ยังไม่มีการยืนยันชัดเจน

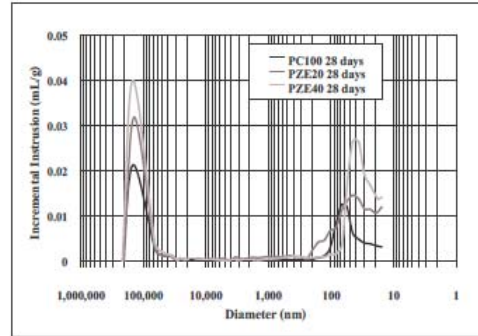
รูปที่ 7 แสดงขนาดโพรงและการสะสมของปริมาตรโพรงในเฟสต์ PC100, PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน และรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในเฟสต์ PC100, PZE20, และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน จากกราฟรูปที่ 7 เราพบว่า เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ การกระจายขนาดโพรงของเฟสต์ที่ผสมซีโอไลต์ มีความละเอียดกว่าซีเมนต์เฟสต์ล้วน สอดคล้องกับรูปที่ 8 พบว่าเฟสต์ PZE20 และ PZE40 มีขนาดโพรงคาปิลลารีลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเฟสต์ PC100 ที่อายุ 28 วัน จุดยอดโพรงคาปิลลารีของเฟสต์ PZE20 และ PZE40 มีค่าเท่ากับ 45.20 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.0146 มล/ก และ 36.20 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.0264 มล/ก ตามลำดับ ในขณะที่เฟสต์ PC100 มีค่าเท่ากับ 68.10 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.015 มล/ก ในช่วงอายุต้นกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานิกจากถ้ำอานหินเกิดขึ้นน้อย ดังนั้นเมื่อมีการแทนที่ซีโอไลต์ในปริมาณและขนาดที่เหมาะสม จะช่วยลดขนาดโพรงคาปิลลารีลงได้ โดยอาศัยอนุภาคขนาดเล็กช่วยอุดโพรงในเฟสต์



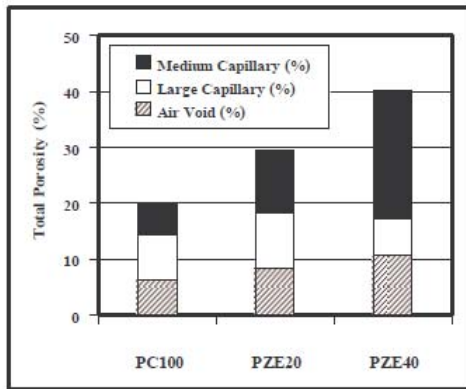


ตารางที่ 3 แสดงปริมาณของโพรงชนิดต่างๆ, ขนาดโพรงเฉลี่ย, และพื้นที่โพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน

	PC100	PZE20	PZE40
Air Void (%) (> 10,000 nm)	6.31	8.32	10.75
Large Capillary (%) (10,000-50 nm)	8.27	9.98	6.48
Medium Capillary (%) (5-10 nm)	5.24	11.26	23.03
Total Porosity (%)	19.83	29.56	40.26
Average Pore (nm)	47.90	44.00	40.25
Total Pore Area (m ² /g)	8.80	17.14	25.90



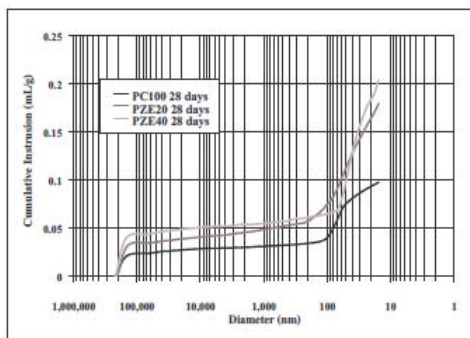
รูปที่ 8 ขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในเพสต์ PC100 เพสต์ PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน



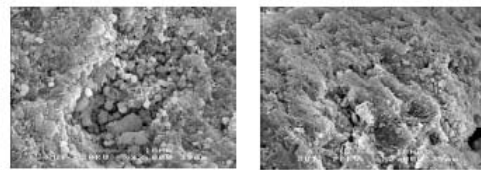
รูปที่ 6 ปริมาณโพรงทั้งหมดของเพสต์ PC100, PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน

4.2.3 การวิเคราะห์ Fracture Surface ของเพสต์ โดย Scanning Electron Microscope (SEM)

การพัฒนาโครงสร้างขนาดเล็กของเพสต์ PC100, PZE20, และ PCZE40 สังเกตจากภาพขยายโดยกล้อง SEM ที่อายุ 28 วันแสดงในรูปที่ 9ก, ข และ คตามลำดับ จากรูปพบว่าเพสต์ PC100 มีความพรุนและช่องว่างมาก พิจารณาเพสต์ PZE20 และ PZE40 พบว่าเพสต์มีความแน่นขึ้น สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.2.2 กล่าวคือมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ ทำให้ขนาดโพรงลดลง ทำให้เพสต์แน่นขึ้น อาจเป็นผลของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานบางส่วน นอกจากนี้อนุภาคของซีโอไลต์บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะในเพสต์ที่มีการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณมาก (PZE40) ทำหน้าที่อุดช่องว่างในเพสต์ ส่งผลให้โครงสร้างเพสต์แน่นขึ้น



รูปที่ 7 ขนาดโพรงและการสะสมของปริมาตรโพรงในเพสต์ PC100, PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน



ก. ภาพขยายของเพสต์ PC100 ข. ภาพขยายของเพสต์ PZE20



ค. ภาพขยายของเพสต์ PZE40

รูปที่ 9 ภาพถ่ายขยาย Fracture Surface ในเพสต์ PC100, PZE20 และ PZE40 ที่อายุ 28 วัน





5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาเพศของปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบกับเพศที่ผสมปูนซีเมนต์ล้วน
2. การแทนที่ซีโอไลต์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นในซีเมนต์เพศทำให้ปริมาณโพรงทั้งหมดสูงขึ้น แต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง
3. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ ทำให้ขนาดโพรงลดลง ส่งผลให้เพศมีโครงสร้างที่แน่นขึ้น อาจเป็นผลของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานบางส่วน นอกจากนี้อนุภาคของซีโอไลต์บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะในเพศที่มีการแทนที่ต่ำกว่าในปริมาณมากทำหน้าที่อุดช่องว่างในเพศ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการ ขอขอบคุณ นายนิรันดร์ กมลสดีกุล และ นายราชันต์ ปริละออง นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้จัดเตรียมวัสดุ และทำการทดสอบในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Feng, N.-Q., Xing, F. and Li, F.-G. 2000. Zeolite Ceramsite Cellular Concrete. *Magazine of Concrete Research*, 52 (2): 117-122.
- [2] Feng, N.-Q. and Peng, G. 2005. Applications of Natural Zeolite to Construction and Building Materials in China. *Construction and Building Materials*, 19: 579-584.
- [3] Quanlin, N. and Naiqian, F. 2005 Effect of Modified Zeolite on Expansion of Alkaline Silica Reaction. *Cement and Concrete Research*, 35 (9): 1784-1788.
- [4] Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C. and Lin, Z. S. 1999. A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Paste. *Construction and Building Materials*, 13: 427-432.

- [5] ชีร์วัฒน์ สิ้นศิริ, "ผลกระทบของซีโอไลต์ต่อคุณสมบัติของเพศและมอร์ตาร์", การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2, 25-27 ตุลาคม 2549, อุดรธานี, หน้า MAT12-MAT17.
- [6] El-Jazairi, B. and Illston, J.M. 1977. A Simultaneous Semi-Isothermal Method of Thermo-gravimetry and Derivative Thermogravimetry, and Its Application to Cement Pastes. *Cement and Concrete Research*, 7:247-258.
- [7] El-Jazairi, B. and Illston, J.M. 1980. The Hydration of Cement Paste using the Semi-Isothermal Method of Derivative Thermogravimetry, *Cement and Concrete*, 10: 361-366.
- [8] Wang, K.S., Lin, K.L., Lee, T.Y. and Tzeng, B.Y. 2004. The Hydration Characteristics when C_2S is Present in MSWI Fly Ash Slag. *Cement and Concrete Research*, 26: 323-330.



ต้องการข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อ
ดร.ชีร์วัฒน์ สิ้นศิริ, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา,
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000
โทร. 0-4422-4420-1, โทรสาร 0-4422-4220,
E-mail: sinsiri@sut.ac.th



การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งภาคตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
และซีโอไลต์เป็นวัสดุยึดประสาน

LEACHING OF HEAVY METALS FROM THE SOLIDIFIED WASTES USING
ORDINARY PORTLAND CEMENT AND ZEOLITE AS BINDER

ชูวิทย์ นาเพีย (Chuwit Napia)¹

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (Theerawat Sinsiri)²

ปริญญา จินดาประเสริฐ (Prinya Chindaprasirt)³

¹ นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี chuwit@ssku.ac.th

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี sinsiri@g.sut.ac.th

³ ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งภาคตะกอนโรงชุบโดยใช้ซีโอไลต์ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุยึดประสาน ในอัตราส่วนการแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลต์ร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก และผสมภาคตะกอนในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.40 ทำการศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็ง โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด, การรั่วไหลของโลหะหนักโดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), คุณสมบัติทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer Analysis (XRD) และ X-Ray Fluorescence Analysis (XRF), ถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และทดสอบหาความพรุนโดยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

ผลการทดสอบพบว่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีภาคตะกอนโลหะหนักในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีส่วนภาคตะกอนโลหะหนักผสมอยู่ ส่วนการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในสารชะมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่ US.EPA กำหนด ในขณะที่ผลของภาพถ่ายพื้นผิวของก้อนหล่อแข็งด้วย SEM และความพรุนของก้อนหล่อแข็งด้วย MIP พบว่าก้อนหล่อแข็งมีความหนาแน่น และปริมาตรโพรงทั้งหมดของก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นแต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลงเมื่ออัตราการแทนที่ซีโอไลต์เพิ่มขึ้น

ABSTRACT : This research work investigated the property of solidified wastes using zeolite and ordinary Portland cement as binder. Zeolite was used to partially replace ordinary Portland cement at the rate of 0, 20, and 40% by weight and 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 the mixtures. Compressive strength of solidified wastes were investigate. Moreover, leachability of heavy metals were determined by TCLP ; XRD and XRF was used chemical property ; fractured surface was studied by SEM and the pore size distribution was studied by MIP.

Test results indicated that the compressive strength of all solidified wastes made with 40, 50 and 60% by weight of plating sludge was decreased as compared to those samples without the wastes. TCLP results showed that concentration of heavy metals in leachates weren't exceeded the limit specified by US.EPA. SEM and MIP results revealed that the solidified wastes became denser and the replacement of Portland cement by zeolite increased the total porosity but decreased the average pore size.

KEYWORDS : Leaching, Heavy Metal, Solidified wastes, Zeolite



1. บทนำ

ของเสียอันตรายที่ถูกปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น น้ำทิ้งจากโรงงาน ถึงแม้ว่าจะผ่านการบำบัดกระบวนการต่าง ๆ เพื่อลดความเข้มข้นของสารพิษแล้ว แต่ก็ยังคงมีกากตะกอนตกค้าง ซึ่งนำมาตกแห้งเพื่อกำจัดขั้นสุดท้ายต่อไป การกำจัดกากตะกอนในลักษณะนี้ไม่ปลอดภัยต่อผู้เก็บและขนย้าย เนื่องจากโลหะหนักบางชนิดอยู่ในสภาพที่ไม่คงตัว ทำให้มีโอกาสแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดปัญหาได้ เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้จำเป็นต้องมีกระบวนการลดความเป็นพิษ หรือกักเก็บกากสารพิษอันตรายไม่ให้แพร่กระจายความเป็นพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยง่าย ซึ่งการหล่อแข็ง (Solidification) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอันตรายประเภทสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนเป็นโลหะหนัก โดยใช้ตัวยึดประสานชนิดต่าง ๆ ครึ่งของเสียอันตราย ซึ่งสารอันตรายจะถูกเก็บไว้ในโครงสร้างของตัวยึดประสานด้วยพันธะเคมีและทำให้สารอันตรายอยู่ในสภาพคงตัว ลดโอกาสการแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม ตัวยึดประสานที่ใช้มากที่สุดได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย ซิลิกา กากตะกอนจากเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ซึ่งการหล่อแข็งทำให้สามารถจกเก็บกักก่อนหล่อแข็งได้ง่ายและสะดวกต่อการนำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบอย่างปลอดภัย [1]

ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นแร่อลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) ชนิดหนึ่งซึ่งมีอลูมิเนียม (Al) และซิลิกา(Si) จับรวมตัวกับออกซิเจน 4 อะตอมเป็นรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) รูปทรงเหลี่ยมสี่หน้าดังกล่าวเมื่อเชื่อมต่อกันในลักษณะวงแหวน 3 มิติ จะเกิดเป็นผลึกของแร่ซีโอไลต์ที่ใหญ่ขึ้น มีช่องว่าง (Channels) ภายในเป็นอย่างมาก ลักษณะเด่นของซีโอไลต์คือ โครงสร้างที่เป็นรูพรุนอย่างเป็นระเบียบของซีโอไลต์ ที่ประกอบด้วยช่องว่าง และการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลจำนวนมาก ซึ่งมีแคตไอออน และโมเลกุลของน้ำเกาะอยู่ภายใน ทำให้สามารถแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนอื่นได้ นอกจากนี้โลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม ซิลเวอร์ไอออนก็สามารถแลกเปลี่ยนได้เช่นเดียวกัน [2, 3, 5, 6]

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงนำมาสู่แนวความคิดในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำซีโอไลต์มาใช้ในการเก็บกักหรือกรองโลหะหนักจากกากของเสียของโรงงานอุตสาหกรรม

2. วัตถุประสงค์

ศึกษาความสามารถในการเก็บกักสารปนเปื้อนโลหะหนัก และความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์ตามอัตราส่วนที่กำหนด

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (มาตรฐาน ASTM C150)
2. ซีโอไลต์สังเคราะห์ ประเภท Sodium Aluminum Silicate ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}$) จากบริษัทเอกชนในจังหวัดชลบุรี
3. ซีโอไลต์ธรรมชาติ ประเภท Clinoptilolite ($\text{Na, K, Ca}_6(\text{Si, Al})_{36}\text{O}_{72}\cdot 20\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัทเอกชนในจังหวัดปทุมธานี
4. กากตะกอนของเสียจากโรงชุบนิเกิล
5. น้ำประปา

3.2 การเตรียมวัสดุ

นำกากตะกอนของเสียจากโรงชุบนิเกิลมาอบให้แห้ง จากนั้นทำการบดให้มีขนาดเล็ก ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100

3.3 อัตราส่วนผสม

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยซีโอไลต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุยึดประสานและผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 หล่อตัวอย่างก้อนแปดรูปลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม ตามมาตรฐาน ASTM C 109 หลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบออก และทำการบ่มโดยการนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบเมื่ออายุครบ 7, 28 และ 90 วัน



3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย

OPC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ZS, ZN หมายถึง ซีโอไลด์สังเคราะห์ และซีโอไลด์ธรรมชาติ ตามลำดับ

20ZS, 40ZS, 20ZN, 40ZN หมายถึง การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์ และซีโอไลด์ธรรมชาติในอัตราร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก

S หมายถึง กากตะกอนของเสีย

40S, 50S, 60S หมายถึง การผสมกากตะกอนของเสียในอัตราร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

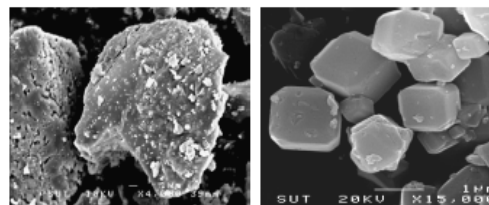
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

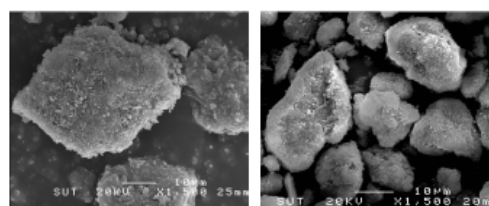
ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ซีโอไลด์สังเคราะห์, ซีโอไลด์ธรรมชาติ และ กากตะกอนของเสีย ซึ่งพบว่า ซีโอไลด์สังเคราะห์, ซีโอไลด์ธรรมชาติ และ กากตะกอนของเสีย มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และจากการนำตัวอย่างไปทำการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ซีโอไลด์ธรรมชาติ และ กากตะกอนของเสีย มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และมีเนื้อแน่น ดังแสดงในภาพที่ 1 ก., ค. และ ง. ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาภาพที่ 1 ข. พบว่า ซีโอไลด์สังเคราะห์ มีพื้นผิวเรียบรูปร่างมีลักษณะเป็น 6 เหลี่ยม ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ OPC, ZS, ZN และ S เท่ากับ 14.12, 2.51, 16.17 และ 34.81 ไมครอนตามลำดับ

ตารางที่ 1 ความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ย

Sample	Specific Gravity	Mean Particle Size d ₅₀ (micron)
OPC	3.15	14.12
ZS	1.87	2.51
ZN	2.09	16.17
S	2.14	34.81



น. ภาพถ่ายขยาย 4,000 เท่าของ OPC ข. ภาพถ่ายขยาย 15,000 เท่าของ ZS



ง. ภาพถ่ายขยาย 1,500 เท่าของ S

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยายของวัสดุโดย SEM

4.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2 องค์ประกอบเคมีของ OPC, ZS, ZN และ S

Chemical Composition (%)	OPC	ZS	ZN	S
SiO ₂	19.85	65.30	75.32	5.53
Al ₂ O ₃	4.49	26.18	10.28	3.78
Fe ₂ O ₃	3.56	0.03	2.66	-
CaO	66.96	0.12	3.95	25.32
MgO	1.36	0.08	1.20	-
K ₂ O	0.34	2.64	4.29	-
Na ₂ O	-	1.87	0.89	-
NiO	-	-	-	40.88
CuO	-	-	-	13.08
ZnO	-	-	-	10.33
CrO	-	-	-	0.64
LOI	0.98	5.65	2.30	0.44

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ซีโอไลด์สังเคราะห์, ซีโอไลด์ธรรมชาติ และ กากตะกอนของเสียด้วยเครื่อง XRF พบว่า ซีโอไลด์สังเคราะห์ และซีโอไลด์ธรรมชาติมีออกไซด์ของซิลิกา และ อลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนกากตะกอนของ



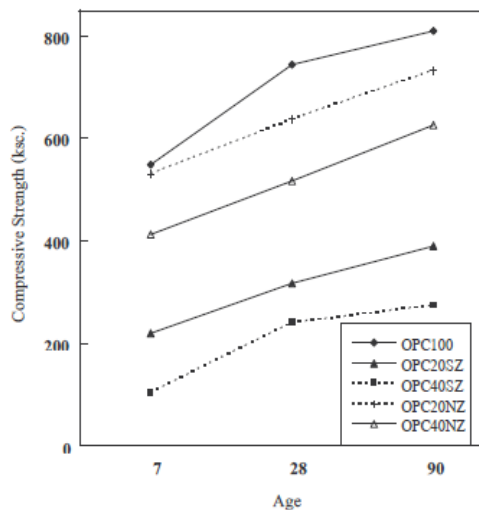
เสียมือออกไซด์ของโลหะหนัก คือ นิกเกิล, ทองแดง, สังกะสีและโครเมียม นอกจากนี้ยังมีมือออกไซด์ของแคลเซียมด้วย

4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของก้อนตัวอย่าง

ตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์และซีโอไลด์ธรรมชาติ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน พบว่า เมื่อมีการแทนที่ด้วยซีโอไลด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดของก้อนตัวอย่างจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนซีเมนต์เพสต์ควบคุม และการแทนที่ด้วยซีโอไลด์ธรรมชาติจะมีกำลังอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์ทุกอายุของก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 2

ตารางที่ 3 กำลังอัดของก้อนซีเมนต์เพสต์

Sample	Compressive Strength (ksc.) - (Percentag. %)		
	7 Days	28 Days	90 Days
OPC100	548 (100)	743 (100)	809 (100)
OPC20ZS	220 (40.1)	317 (42.7)	389 (48.1)
OPC40ZS	104 (19.0)	239 (32.1)	274 (33.8)
OPC20ZN	530 (96.7)	636 (85.6)	731 (90.4)
OPC40ZN	413 (75.4)	517 (69.6)	625 (77.2)



ภาพที่ 2 กำลังอัดของก้อนซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 4 กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง

Sample	Compressive Strength (ksc.)		
	7 Days	28 Days	90 Days
OPC40S	9	13	15
OPC50S	6	10	12
OPC60S	5	8	11
OPC20ZS40S	21	138	164
OPC20ZS50S	13	50	109
OPC20ZS60S	8	14	20
OPC40ZS40S	3	61	177
OPC40ZS50S	3	43	139
OPC40ZS60S	1	5	33
OPC20ZN40S	442	584	665
OPC20ZN50S	364	500	595
OPC20ZN60S	311	421	513
OPC40ZN40S	199	369	443
OPC40ZN50S	155	321	401
OPC40ZN60S	123	265	345

ตารางที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมภาคตะกอนของเสียในอัตราร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มตัวในแต่ละอัตราส่วนผสม และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณภาคตะกอนในส่วนผสม เนื่องจากปริมาณภาคตะกอนของเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของวัสดุประสานในส่วนผสมลดลง ซึ่งจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้น้อย [4] และภาคตะกอนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ช่องว่างภายในก้อนหล่อแข็งมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมภาคตะกอนของเสียบางอัตราส่วนมีกำลังอัดต่ำกว่าค่ามาตรฐานความสามารถในการรับแรงอัดของการหล่อแข็งของเสียเพื่อการฝังกลบ ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานจะต้องมากกว่า 10 กก./ซม.² [7]

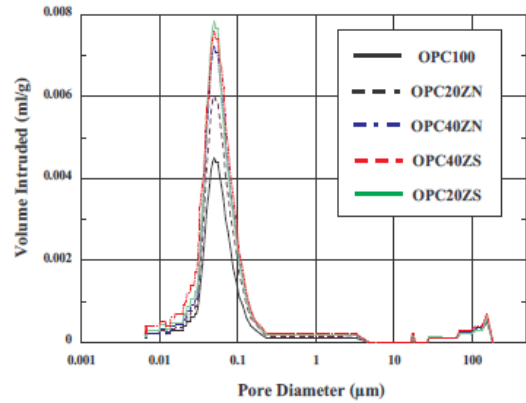


4.4 ปริมาตรและการกระจายตัวของโพรงของก้อนหล่อแข็ง

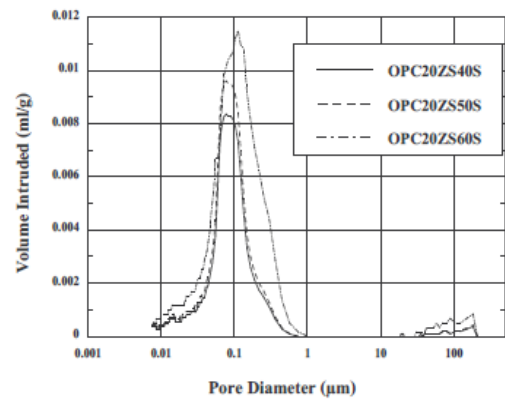
ตารางที่ 5 แสดงปริมาณของโพรงชนิดต่างๆ, ขนาดโพรงเฉลี่ย, และพื้นที่โพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 28 วัน จากผลการทดลองพบว่าปริมาณโพรงทั้งหมด (Total Porosity) และพื้นที่โพรงทั้งหมด (Total Pore Area) มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ซีโอโลดสังเคราะห์และซีโอโลดธรรมชาติในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของ ซีโอโลดมีรูพรุนหรือโพรงขนาดเล็กเชื่อมต่อกัน ส่งผลให้ปริมาณโพรง และพื้นที่โพรงสูงขึ้น แต่ถ้าพิจารณาขนาดเฉลี่ยของโพรง (Average Pore) พบว่ามีขนาดเล็กลง เมื่อมีการแทนที่ซีโอโลดสังเคราะห์ในปริมาณที่มากขึ้น เป็นเพราะว่าขนาดอนุภาคของซีโอโลดมีขนาดเล็กมาก (ขนาดเฉลี่ยประมาณ 2.51 ไมครอน) เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 14.12 ไมครอน ขนาดที่เล็กของซีโอโลดไปแทรกตัวระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้ช่องว่างลดลง ส่วนการแทนที่ด้วยซีโอ โลดธรรมชาติมีขนาดเฉลี่ยของโพรงใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากขนาดอนุภาคของซีโอ โลดธรรมชาติกับปูนซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5 แสดงปริมาณของโพรงชนิดต่างๆ, ขนาด โพรงเฉลี่ย, และพื้นที่โพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 28 วัน

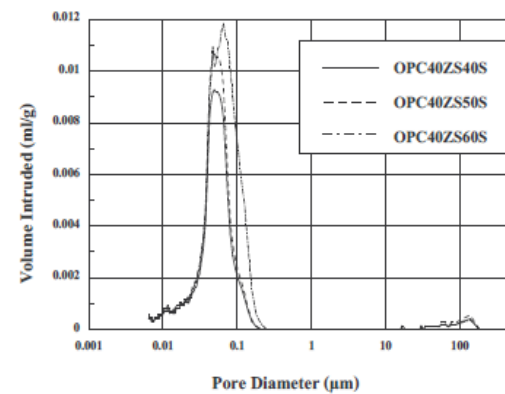
	OPC100	OPC20ZS	OPC40ZS	OPC20ZN	OPC40ZN
Air Void (%) (> 1.0 μm)	6.36	8.37	10.75	7.11	9.24
Large Capillary (%) (0.05-1.0 μm)	8.12	9.72	6.54	12.32	11.41
Medium Capillary (%) (0.01-0.05 μm)	5.31	11.75	23.30	6.19	10.52
Total Porosity (%)	19.79	29.84	40.59	25.62	31.17
Average Pore (nm)	47.11	44.00	40.25	46.68	45.99
Total Pore Area (m ² /g)	8.80	17.14	25.90	13.84	21.57



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงของซีเมนต์เพสต์ อายุ 28 วัน



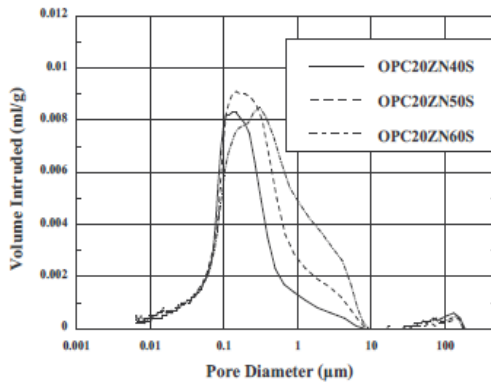
ก. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีโอโลดสังเคราะห์ ร้อยละ 20



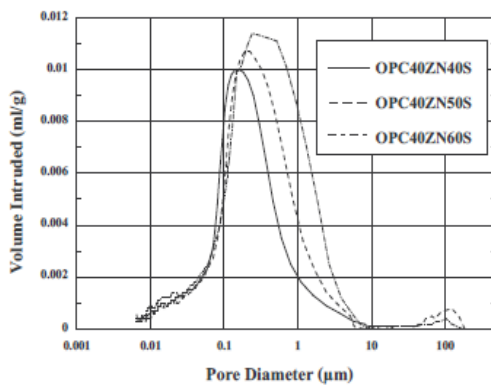
ข. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีโอ โลดสังเคราะห์ ร้อยละ 40

ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงของก้อนหล่อแข็ง อายุ 28 วัน





ค. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีไอไลต์ธรรมชาติ ร้อยละ 20

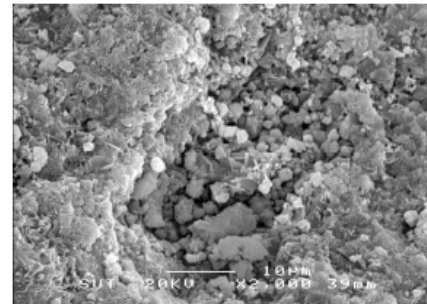


จ. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีไอไลต์ธรรมชาติ ร้อยละ 40

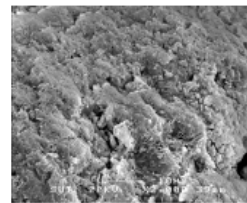
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงของก้อนหล่อแข็ง อายุ 28 วัน (ต่อ)

4.5 การวิเคราะห์ Fracture Surface ของก้อนหล่อแข็ง

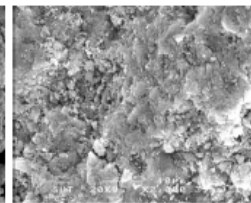
จากภาพที่ 5 พบว่าพาสต์ OPC100 มีความพรุนและช่องว่างมาก เมื่อพิจารณาพาสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีไอไลต์ พบว่าพาสต์มีความแน่นขึ้น สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.4 กล่าวคือเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีไอไลต์ ทำให้อายุโพรงลดลง ทำให้พาสต์แน่นขึ้น อาจเป็นผลของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานบางส่วน นอกจากนี้อนุภาคของซีไอไลต์บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะในพาสต์ที่มีการแทนที่ด้วยซีไอไลต์ในปริมาณมาก ซึ่งทำหน้าที่อุดช่องว่างในพาสต์ ส่งผลให้โครงสร้างพาสต์แน่นขึ้น



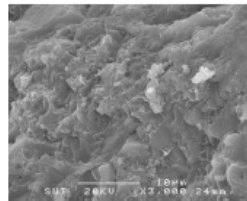
ก. ภาพขยายของ OPC100



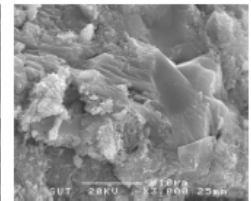
ข. ภาพขยายของ OPC20Zn



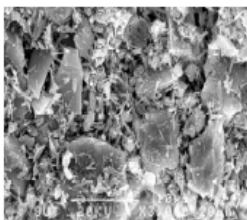
ค. ภาพขยายของ OPC40Zn



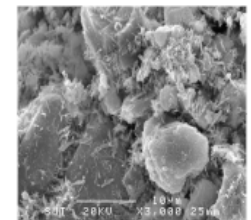
ง. ภาพขยายของ OPC20Zn



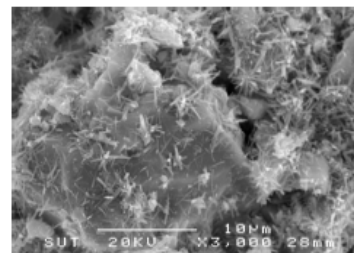
จ. ภาพขยายของ OPC40Zn



ฉ. ภาพขยายของ OPC40S

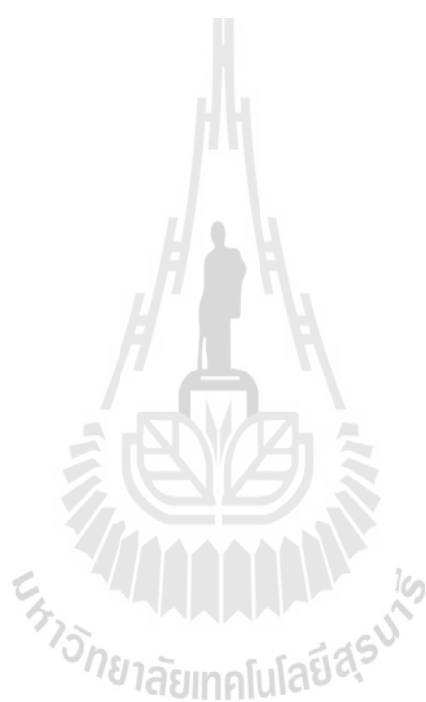


ช. ภาพขยายของ OPC50S



ซ. ภาพขยายของ OPC60S

ภาพที่ 5 ภาพถ่ายขยาย Fracture Surface ที่อายุ 28 วัน



4.6 การวิเคราะห์การชะละลายของก้อนหล่อแข็ง

จากการวิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนัก โดยวิธีการชะละลาย พบว่าประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของก้อนหล่อแข็งที่มีเฉพาะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานจะมีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์และซีโอไลด์ธรรมชาติ และพบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนของกากตะกอนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการลดการชะละลายจะลดลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์และซีโอไลด์ธรรมชาติ จะพบว่าการแทนที่ด้วย ซีโอไลด์ธรรมชาติจะมีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายได้ดีกว่า ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วัน

ก้อนตัวอย่าง	ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย (%)			
	Ni	Cu	Zn	Cr
OPC40S	63.21	61.64	68.31	82.21
OPC50S	55.72	58.47	60.09	78.42
OPC60S	51.43	53.71	61.11	78.10
OPC20ZS40S	83.54	80.85	86.42	100.0
OPC20ZS50S	81.93	83.31	84.61	98.81
OPC20ZS60S	77.22	76.63	85.72	97.33
OPC40ZS40S	82.13	83.80	84.2	99.73
OPC40ZS50S	81.02	87.87	79.51	99.34
OPC40ZS60S	74.35	70.02	82.10	99.33
OPC20ZN40S	92.56	91.67	94.11	100.0
OPC20ZN50S	92.72	91.43	94.33	100.0
OPC20ZN60S	91.40	91.34	92.83	100.0
OPC40ZN40S	90.84	90.31	94.0	100.0
OPC40ZN50S	90.22	91.11	94.24	100.0
OPC40ZN60S	90.41	90.15	90.06	100.0

5. สรุป

จากผลการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็ง กากตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลด์เป็นวัสดุยึดประสานสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์และซีโอไลด์ธรรมชาติ ทำให้ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง ส่งผลให้เพสต์มีโครงสร้างที่แน่นขึ้น อาจเป็นผลของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานบางส่วน นอกจากนี้อนุภาคของซีโอไลด์บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะในเพสต์ที่มีการแทนที่ซีโอไลด์ในปริมาณมากทำหน้าที่อุดช่องว่างในเพสต์

2. กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งมีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม โดยเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ผสมปูนซีเมนต์ล้วน

3. ความสามารถในการชะละลายของก้อนหล่อแข็งมีค่ามากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนและพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลด์ธรรมชาติจะมีกำลังอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลด์สังเคราะห์ และมีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายได้ดีกว่าด้วย

4. ความสัมพันธ์ของปริมาณโพรง กำลังรับแรงอัดและประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย คือ ปริมาณโพรงมากจะรับกำลังอัดได้น้อยและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายก็จะต่ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ และ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ภายใต้โครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา



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] Feng, N.-Q., Xing, F. and Leng, F.-G. 2000. Zeolite Ceramsite Cellular Concrete. Magazine of Concrete Research. 52 (2): 117-122.
- [3] Feng, N.-Q. and Peng, G.-F. 2005. Applications of Natural Zeolite to Construction and Building Materials in China. Construction and Building Materials, 19: 579-584.
- [4] 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.
- [5] Quanlin, N. and Naiqian, F. 2005 Effect of Modified Zeolite on Expansion of Alkaline Silica Reaction. Cement and Concrete Research, 35 (9): 1784-1788.
- [6] Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C. and Lin, Z. S. 1999. A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Paste. Construction and Building Materials. 13: 427-432.
- [7] Wiles, C.C. 1990. Solidification and stabilization technology, U.S.EPA, USA.



การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
เถ้าลอยและซิลิกาฟูมเป็นวัสดุยึดประสาน

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

วรวรรณชัย สายวาริน(Worawanchai Saiwarin)¹

ชิววิทย์ นาเพีย (Chuwit Napia)²

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (Theerawat Sinsiri)³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²นักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโรงชุบโดยใช้เถ้าลอย 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 โดยน้ำหนักลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกากตะกอนโลหะหนักผสมอยู่ และพบว่าก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซิลิกาฟูมมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ส่วนการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในสารชะมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่ US.EPA กำหนด ในขณะที่ผลของภาพถ่ายพื้นผิวของก้อนหล่อแข็งด้วย 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 ตัวยึดประสานที่ใช้มากได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปอร์แลนด์ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย ซิลิกาฟุ้ง ตะกรันเตาหลอมเหล็ก 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 ได้เป็นอนุภาคนาโนขนาดเล็ก



หลายๆของซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก (Glassy Phase) และถูกคักจับเพื่อบรรจุใส่ลงไว้ 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. กากตะกอนของเสียจากโรงชุบนิเกิล
5. น้ำประปา

3.2 การเตรียมวัสดุ

นำกากตะกอนของเสียจากโรงชุบนิเกิลมาอบให้แห้ง จากนั้นทำการบดให้มีขนาดเล็ก ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (รูเปิด 9 ไมครอน)

3.3 อัตราส่วนผสม

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วย ซิลิกาฟูม ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุยึดประสาน (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

IOSI 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

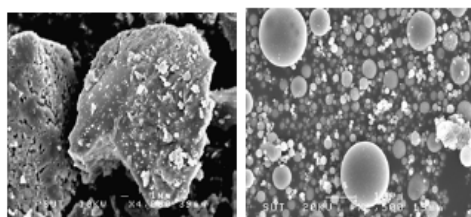
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

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 และเมื่อพิจารณารูปที่ 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 ไมครอนตามลำดับ

ตารางที่ 1 ความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ย

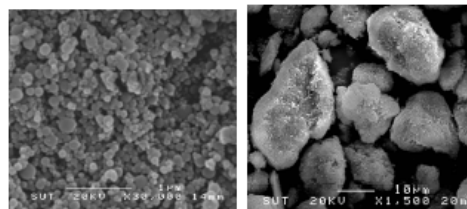
Samples	Specific Gravity	Mean Particle Size, d50 (micron)
OPC	3.15	14.12
SI	2.24	25.35
FA	2.21	20.13
S	2.14	34.81

(หมายเหตุ : ซิลิกาฟุ่มที่ใช้เป็นแบบ Condensed Silica Fume)



(ก) ซีเมนต์

(ข) เถ้าลอย



(ค) ซิลิกาฟุ่ม

(ง) กากตะกอน

ภาพที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุโดย SEM

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , ซึ่งรวมกันเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก และออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , Ti_2O_3 , P_2O_5 และอิพิซึม เมื่อออกไซด์หลักรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด จะเกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิด คือ ไครแคลเซียมซิลิเกต (C_3S), ไครแคลเซียมซิลิเกต (C_2S), ไครแคลเซียมอะลูมินेट (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมินโอฟอไรด์ (C_4AF) เมื่อเม็ดปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้สารประกอบเกิดขึ้นใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมอลูมินेटไฮเดรต (C-A-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2), แคลเซียมซัลโฟลูมินेट หรือ เอททริงไกต์ (Ettringite) และสารประกอบอื่นอีกไม่มาก

องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ่มคือ SiO_2 ซึ่งควรจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ คือพร้อมทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซิลิกาฟุ่มที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมักมี SiO_2 ที่สูงมากคือมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O และออกไซด์อื่นๆ ร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับของ SiO_2 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
ประมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดย
น้ำหนัก และเถ้าลอย Class C มีปริมาณออกไซด์ดังกล่าว
ระหว่างร้อยละ 50 – 70 โดยน้ำหนัก [4]

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางเคมีโดยการทดสอบ
XRF ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ซิลิกาฟูม
และเถ้าลอย ส่วนตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติทางเคมีโดย
การทดสอบ 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	

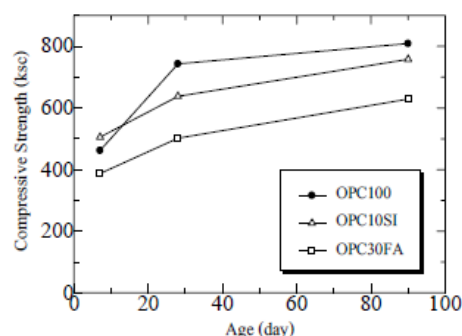
4.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของก้อนตัวอย่าง

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 แสดงค่ากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกาก ตะกอนของเสียในอัตราร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของ วัสดุประสานที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มตัวในแต่ละอัตราส่วนผสม และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม เนื่องจากปริมาณกากตะกอนของเสียที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของวัสดุยึดประสานในส่วนผสมลดลง ซึ่งจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นได้น้อย [5] จึงทำให้กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียบางอัตราส่วนมีกำลังอัดต่ำกว่าค่ามาตรฐานความสามารถในการรับแรงอัดของการหล่อแข็งของเสียเพื่อการฝังกลบ ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานจะต้องมากกว่า 10 กก./ซม² [6]

4.3 ปริมาตรและการกระจายตัวของโพรงของก้อนหล่อแข็ง

ตารางที่ 6 จากการทดลองด้วยเครื่อง MIP พบว่า ปริมาณโพรงทั้งหมด (Total Porosity) และพื้นที่โพรงทั้งหมด (Total Pore Area) มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ปริมาณโพรงทั้งหมดของเพสต์ที่ผสมเถ้าลอย, ซิลิกาฟุ่ม ทุกอัตราส่วน การแทนที่มีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากช่องว่างที่สูงขึ้นระหว่างอนุภาคของวัสดุและรูพรุนในอนุภาคบางส่วนของวัสดุที่นำมาแทนที่ แต่ถ้าพิจารณาขนาดเฉลี่ยของโพรง (Average Pore) ในระยะแรกพบว่ามีความเล็กลง เมื่อมีการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มีอนุภาคขนาดเล็ก อันเนื่องมาจากรูพรุนในอนุภาคของวัสดุปอซโซลานและอนุภาคขนาดบางส่วนช่วยอุดช่องว่างของโพรงได้ดี ทำให้โครงสร้างของโพรงแน่นขึ้น และอนุภาคของวัสดุปอซโซลานที่มี

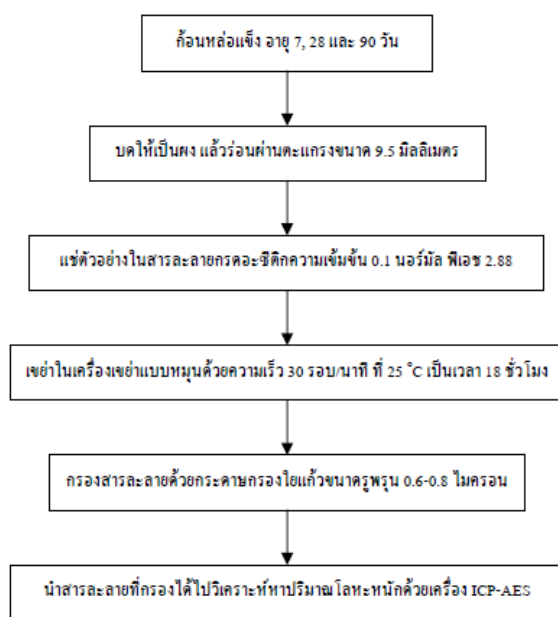
ขนาดเล็กเมื่อผสมในเพสต์จะทำให้อนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์สามารถกระจายตัวในเพสต์ได้ดี

ตารางที่ 6 แสดงปริมาณของโพรงชนิดต่างๆ, ขนาดโพรงเฉลี่ย, และ พื้นที่โพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 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

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยวิธีการชะละลาย (โดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure: TCLP) ดังตารางที่ 7, 8 และ 9 พบว่า ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของก้อนหล่อแข็งจะดีขึ้นตามอายุการบ่มของก้อนหล่อแข็ง แต่ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของกากตะกอนเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะก้อนหล่อแข็งที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานจะมีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟุ่ม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟุ่ม พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 3 ผังการทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLP ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ตารางที่ 7 แสดงประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะหนัก ของก้อนหล่อแข็งอายุ 7 วัน

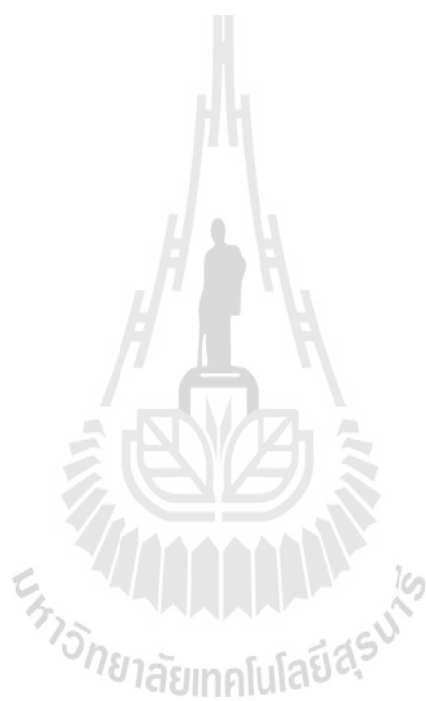
ตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการลดการชะละลาย (%)			
	Ni	Cu	Zn	Cr
OPC40S	50.66	49.21	55.6	65.65
OPC50S	45.57	46.7	48.23	61.55
OPC60S	41.24	43.05	48.88	62.38
OPC10SI40S	66.13	65.68	68.36	79.56
OPC10SI50S	65.44	66.74	66.98	78.54
OPC10SI60S	61.87	62.04	68.56	78.54
OPC30FA40S	65.74	67.4	68.06	79.5
OPC30FA50S	64.86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

จากผลการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากก้อน
หล่อแข็ง กากตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ซิลิกา
ฟูมและเถ้าลอยเป็นวัสดุยึดประสาน สามารถสรุปได้
ดังนี้

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและซิลิกาฟูม
ทำให้ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง ส่งผลให้เพสต์มี
โครงสร้างที่แน่นขึ้น อาจเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน
และปฏิกิริยาปอซโซลาน

2. ก้อนหล่อแข็งที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้า
ลอยจะมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าก้อนหล่อแข็งที่ใช้
ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย
ซิลิกาฟูม ค่ากำลังอัดจะเพิ่มสูงขึ้นทั้งในในระยะต้นและ
ปลาย และเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม จะทำ
ให้กำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อเทียบกับก้อนหล่อแข็งที่ไม่
มีกากตะกอนในส่วนผสม

3. ความสามารถในการชะละลายของก้อนหล่อแข็ง
มีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนและพบว่า
การแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมจะมีกำลังอัดมากกว่า
การแทนที่ ด้วยเถ้าลอย และมีประสิทธิภาพในการลด
การ ชะละลายได้ดีกว่าด้วย

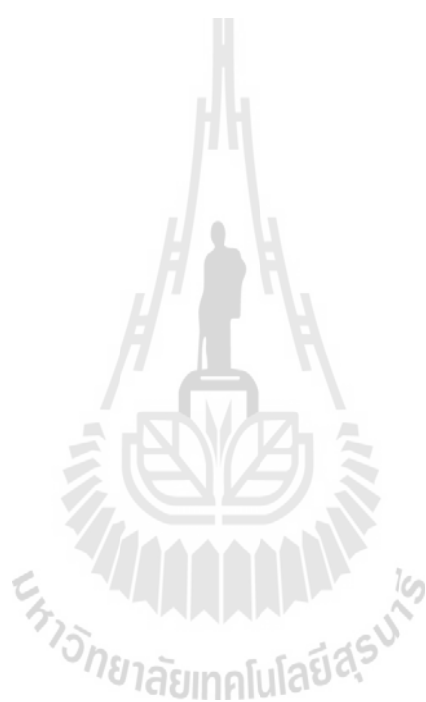
4. ความสัมพันธ์ของปริมาตรโพรง กำลังรับแรงอัด
และประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย คือ ปริมาตร
โพรงมากจะรับกำลังอัดได้น้อยและเกิดการชะละลายสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชา
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ และสำนักงาน
คณะกรรมการการอุดมศึกษา ภายใต้งานโครงการเครือข่าย
เชิงกลยุทธ์ เพื่อการผลิตและพัฒนาอาจารย์ใน
สถาบันอุดมศึกษา

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] ฤทัยรัตน์ แพรอด, 2548. ลักษณะทางกายภาพและชนิดของโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิต. 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.



Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural
Engineering & Construction (EASEC-11)
"Concrete Technology"
November 19-21, 2008, Taipei, TAIWAN

THE EFFECT OF ZEOLITE ON MICROSTRUCTURE OF BLENDED CEMENT PASTE

CHUWIT NAPIA¹, THEERAWAT SINSIRI¹, PRINYA CHINDAPRASIRT²

ABSTRACT : This paper presents the effect of zeolite on microstructure of hardened blended cement pastes. Synthesise zeolite was used to partially replace Portland cement type I at the rate of 0, 20, and 40% by weight of binder. The water to binder ratio (W/B) of 0.35 was used for all the blended cement paste mixtures. XRD and DTA were used to investigate the pozzolanic reaction of blended cement paste and fractured surface of blended cement paste was studied by SEM. The pore size distribution of blended cement paste was studied by MIP.

Test results indicated that the pozzolanic reaction of blended cement paste was significantly affected by the replacement of zeolite. The $\text{Ca}(\text{OH})_2$ of blended cement paste decreased with an increase in zeolite content at the longer curing. SEM results revealed that the pastes with zeolite became denser. The porosity and pore size of blended cement paste was significantly affected by the replacement of zeolite. The replacement of Portland cement by zeolite increased the total porosity but decreased the average pore size of the paste. The large capillary porosity trended to decreased and medium capillary porosity increased as a result of the addition of zeolite.

KEYWORDS: Zeolite, Microstructure (XRD, TGA, SEM,), Porosity (MIP), Blend cement paste

1. INTRODUCTION

Zeolite are crystalline aluminosilicates, their structure is made up of a framework of SiO_4 and AlO_4 tetrahedra linked to each other at the corners by sharing their oxygens. The tetrahedra make up a three-dimensional network, with lots of voids and open spaces. It is these voids that define the many special properties of zeolites, such as the adsorption of molecules in the huge internal channels. Zeolite has a small size about 2-30 Å, which make this zeolite an interesting molecular sieve and a high-cation exchange material. Nowadays, zeolites to use is the components of detergent and use in problem adaptation about way environment contamination, such as be formed absorb the air pollution, and use in dirty water cure, etc.

Besides, have the lead zeolite come to apply in the work of the concrete increases. Natural zeolite has also been applied as mineral admixture for concrete production in China. It can prevent bleeding, segregation and delamination of fresh concrete so as to make pumping process easier decrease permeability of hardened concrete, enhance durability especially the resistance to alkali-aggregate reaction, increase concrete strength, pozzolanic materials, etc. [1, 2, 3, 4]

¹ Graduate Student, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakorn Ratchasima 30000, Thailand.

¹ Lecturer, of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakorn Ratchasima 30000, Thailand.

² Professor, Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand.

The researcher has studied the base property of the cement paste has mixed synthesized zeolite. There is the possibility will to use zeolite are pozzolanic materials for use replace some part cement in concrete work [5]. Thus in this present paper then have the education adds by present the effect of zeolite on microstructure of hardened blended cement pastes, such as capacity porosity and pozzolanic reaction. For insist that , zeolite have the be pozzolan has can to apply in concrete product.

2. THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION

2.1 Materials

Materials used in this experiment consist of :

Portland cement : ordinary Portland cement type I was used ASTM C150

Zeolite : synthesized zeolite form Chonburee (use Ze)

Mixing water : tap water was used.

2.2 Mix ratio

Synthesized zeolite was used to partially replace Portland cement type I at the rate of 0, 20, and 40 % by weight of binder. A constant water to binder ratio (w/b) of 0.35 was used to control the workability of pastes. The pastes were mixed in a mechanical mixer and the specimens were cast in 50 mm cube moulds. The fresh samples were covered with plastic sheet to prevent water evaporation. After casting 24 hours, the sample were removed from the mould and cured in saturated lime water. The samples were tested at the ages of 28 day.

3. TEST PROGRAMS

3.1 The properties of cement and zeolite test.

3.1.1 Specific Gravity of Portland cement and zeolite by Le Chatelier Flask (ASTM C188).

3.1.2 Take photographs of Portland cement and zeolite by using a scanning electron microscope (SEM).

3.1.3 Chemical composition of Portland cement and zeolite by using X- Ray fluorescence.

3.1.4 Particle size analysis of Portland cement and zeolite by using Mastersizer.

3.2 The properties of pastes

The paste cube at the specified ages 28 days were broken into small fragments (about 10 x 10 mm). The samples were cured in Acetone for 7 days to half hydration reaction. After that, the sample were dried by oven at 80-100 °C for 30 minutes. The dried sample pastes were ground in a ball mill at speed of 950 round/minute for 2 minute and sieved through 100 mesh (150 μ m). The samples was testing by XRD and TGA, DTA for analyze of Ca(OH)₂. The representative sample of 2x2 mm² were obtained to characterize the distribution of pore size by MIP test and the samples were broken into 1x1x0.5 cm³ for SEM.

3.3 The symbol use the education

PC = Portland cement type I

ZE = Zeolite

PC100 = Portland cement type I paste

PZE20 = Paste are replacement of zeolite at 20 % by weight of total binder

PZE40 = Paste are replacement of zeolite at 40 % by weight of total binder

4. RESULTS AND DISCUSSION

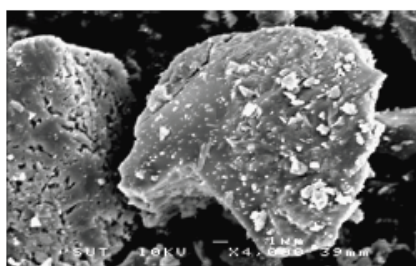
4.1 Properties of Materials

4.1.1 physical result of Portland cement type I and zeolite

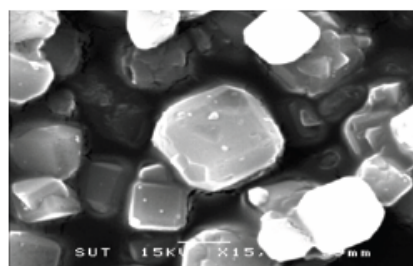
Table 1 shows specific gravity and median particle size of Portland cement type I and zeolite. The particle shape of Portland cement type I is solid and angular (Figure 1a) whereas that zeolite surface is smooth and has the character is hexagon (Figure 1b). The median particle size of zeolite and Portland cement type I were 2.34 and 13.60 microns, respectively. The particle size distributions of Portland cement type I and zeolite by Mastersizer are shown in Figure 2.

Table 1. specific gravity and median particle size of Portland cement type I and zeolite

Sample	Specific Gravity	Mean Particle Size d_{50} (micron)
PC	3.15	13.60
Ze	1.87	2.34



(a)



(b)

Figure 1. SEM : (a) Portland cement type I at 4,000 time, (b) zeolite at 15,000 time

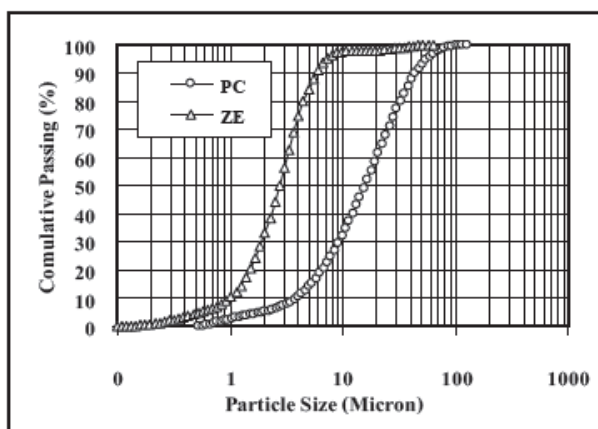


Figure 2. Particle size distribution of Portland cement type I and zeolite

4.1.2 Chemical composition of Portland cement type I and zeolite

Table 2 present the chemical composition of Portland cement type I and zeolite determined by XRF. The chemical composition of zeolite is SiO_2 and Al_2O_3 . Figure 3 shown the XRD pattern of zeolite. The result show that the intensity peak of Sodium Aluminum Silicate ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}$) appeared at 2θ or 0-60 degrees. The classified zeolite is type A known as Sodium Aluminum Silicate ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}$)

Table 2. Chemical composition of Portland cement type I and zeolite

Chemical Composition (%)	Portland Cement Type I (PC1)	Zeolite (Ze)
SiO_2	20.9	67.08
Al_2O_3	4.76	21.12
Fe_2O_3	3.41	0.03
CaO	65.41	0.18
MgO	1.25	0.08
K_2O	0.35	2.87
LOI	0.96	6.27

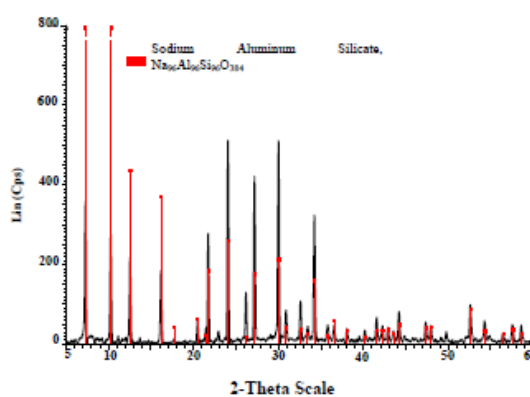


Figure 3. XRD pattern of zeolite

4.2 Properties of Pastes

4.2.1 Thermal Analysis in Pastes

Differential Thermal Analysis (DTA) involves heating or cooling a test sample and an inert reference under identical conditions, while recording any temperature difference between the sample and reference. This differential temperature is then plotted against time, or against temperature. Changes in the sample which lead to the absorption or evolution of heat can be detected relative to the inert reference, shows that in Figure 4.

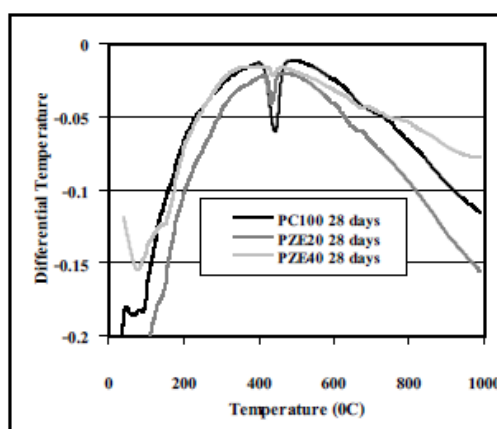


Figure 4. Differential temperature during the DTA of pastes

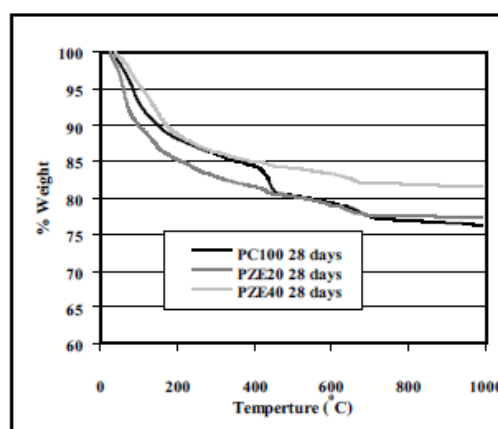


Figure 5. Weight loss during the TGA of pastes

Thermogravimetric Analysis (TGA) is a technique that measure the change in weight of pastes when subjected to a temperature program under controlled atmosphere. such as , the decomposition of materials , the evaporation of water in pastes, etc. TGA analysis of the samples was performed using thermal analyzer. Computer controlled graphics can calculate weight percent losses. The graph referring to the weight loss during each peak compared with the original weight of substances prior to the test, shows that in Figure 5.

Figure 4 and 5 shows Differential Thermal Analysis and Thermogravimetric of pastes at 28 days with rate of 0, 20, and 40% by weight of binder. When heating the cement paste at the temperature between 450-580 °C, [6, 7, 8] Ca(OH)_2 will be decomposed into calcium oxide (CaO) and water as in equation 1.



For Figure 4 and 5 the disintegration of Ca(OH)_2 decreased with an increase in the zeolite replacement level (PZE20, PZE40). The amount of Ca(OH)_2 of the blended cement paste with zeolite decreased with increasing replacement percentage of zeolite and were lower than that of PC paste. For PC paste the Ca(OH)_2 was produced by the hydration reaction. The Ca(OH)_2 of PZE20 and PZE40 pastes was produced by the hydration reaction and pozzolanic reaction of zeolite.

4.2.2 Effect of zeolite on pore volume of paste

Table 3 shows all pore volume, average pore diameter and total porosity of PC100, PZE20 and PZE40 at 28 days. Figure 6. show that the total porosity of PC100, PZE20 and PZE40 at 28 days. The results total porosity and total pore area increased with an increase in replacement by zeolite. Because the smaller hole particle or blended small pore size of zeolite resulting pore volume and pore area increase. The average pore diameter decreased with an increase in zeolite replacement level. This was because the small particle of zeolite (2.34 μm) at compare with the cement (13.60 μm). The small particle of zeolite dispersed in blended cement paste, then the pore size decreased but medium capillary (10,000-50 nm) an increase. The replacement of Portland cement by zeolite increased the small pore except the small particle of zeolite. This effect form pozzolanic reaction, but in the presents have no result to insist

Figure 7 shows the pore size and accumulation pore volume of PC100, PZE20 and PZE40 paste at 28 days. Figure 8 shows pore size and incremental pore volume of PC100, PZE20 and PZE40 paste at 28 days. From Figure 7, The replacement of Portland cement by zeolite spread pore size are powdery more than PC100. Correspond Figure 8, the replacement of Portland cement by zeolite decreased the capillary porosity compare with PC100 at 28 days. The peak of capillary pores of PZE20 and PZE40 pastes was 45.20 nm at the incremental pore volume of 0.0146 mL/g and 36.20 nm at incremental pore volume of 0.0264 mL/g, respectively. These values were lower than those of PC100 was 68.10 nm at the first peak, at incremental pore volume of 0.015 mL/g. The results also showed that the blended cement paste containing by hydration reaction more than pozzolanic reaction from zeolite. Then the replacement of Portland cement by zeolite with the quantity and the size that are appropriate decreased the capillary porosity.

Table 3. Pore volume, average pore diameter and total porosity of PC100, PZE20 and PZE40

	PC100	PZE20	PZE40
Air Void (%) (> 10,000 nm)	6.31	8.32	10.75
Large Capillary (%) (10,000-50 nm)	8.27	9.98	6.48
Medium Capillary (%) (5-10 nm)	5.24	11.26	23.03
Total Porosity (%)	19.83	29.56	40.26
Average Pore (nm)	47.90	44.00	40.25
Total Pore Area (m^2/g)	8.80	17.14	25.90

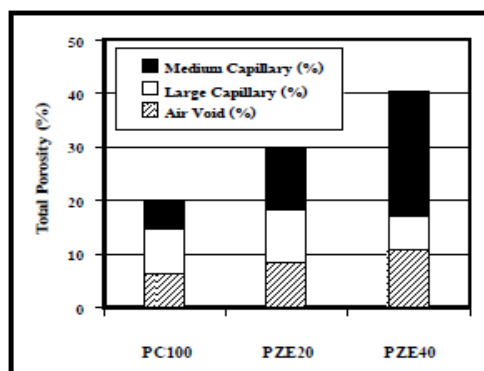


Figure 6. Total porosity of PC100, PZE20 and PZE40 at 28 days

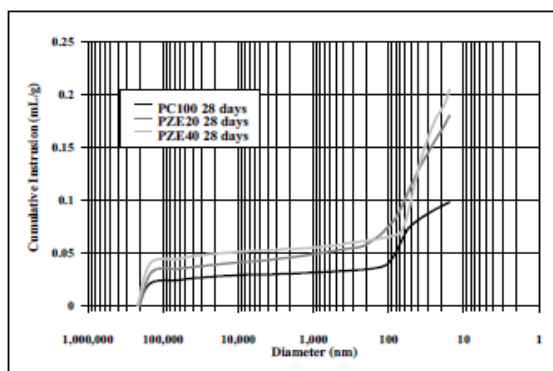


Figure 7. Pore size and accumulation pore volume of PC100, PZE20 and PZE40 paste at 28 days

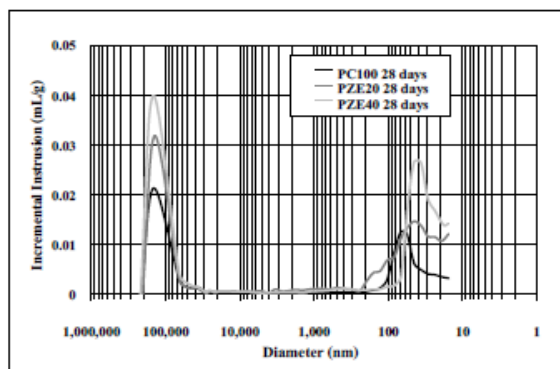


Figure 8. Pore size and incremental pore volume of PC100, PZE20 and PZE40 paste at 28 day

4.2.3 Fracture Surface Analysis by Scanning Electron Microscope (SEM)

The microstructure morphology of fractured surface pastes PC100, PZE20 and PZE40 at 28 and 90 days by SEM are shown in Figs. 9a, b and c respectively. The microstructure of PC100 was porous and had many voids, while PZE20 and PZE40 were formed exhibited a very dense structure. Correspond to 4.2.2 topic, there is The replacement of Portland cement by zeolite decreased the pore size and the structure of paste very dense. It was effect of chemical compound of hydration or either pozzolanic reaction. It was concluded that the replacement of Portland cement by zeolite large amount (PZE40) the structure of paste very dense.

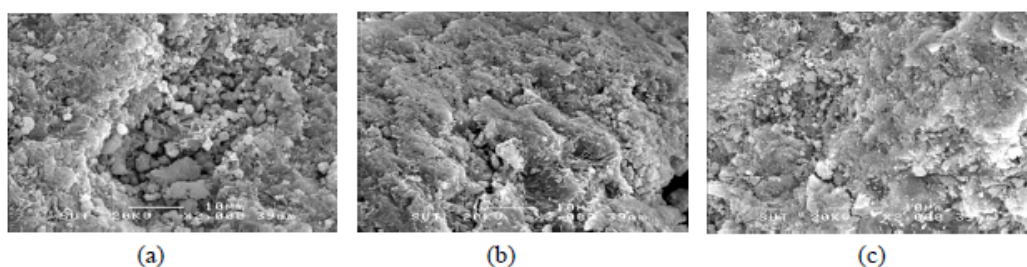


Figure 9. Fracture Surface (a) PC100, (b) PZE20 and (c) PZE40 paste at 28 days by SEM

5. CONCLUSIONS

Based on the results of this study, the following conclusions can be drawn :

1. the disintegration of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ decreased with an increase in the zeolite replacement level (PZE20, PZE40) by compare PC100.
2. The replacement of Portland cement by zeolite increased the total porosity but decreased the average pore size of the paste.
3. The replacement of Portland cement by zeolite decreased pore size, then the structure of paste was crowded. This effect form hydration reaction and some part of pozzolanic reaction.

6. ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial supports from the School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology for providing facilities and equipments.

7. REFERENCES

- [1] Feng, N.-Q., Xing, F. and Leng, F.-G. 2000. Zeolite Ceramsite Cellular Concrete. Magazine of Concrete Research. 52 (2): pp. 117-122.
- [2] Feng, N.-Q. and Peng, G.-F. 2005. Applications of Natural Zeolite to Construction and Building Materials in China. Construction and Building Matyerials, 19: 579-584.
- [3] Quanlin, N. and Naiqian, F. 2005 Effect of Modified Zeolite on Expansion of Alkaline Silica Reaction. Cement and Concrete Research, 35 (9): pp. 1784-1788.
- [4] Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C. and Lin, Z. S. 1999. A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Paste. Construction and Building Materials. 13: pp. 427-432.
- [5] Theerawat Sinsiri, "Effect of Zeolite on Properties of Paste and Mortar", Concrete meeting yearly 2, 25-27 October 2006, Udonthanee, page MAT12-MAT17.
- [6] El-Jazairi, B. and Illston, J.M. 1977. A Simultaneous Semi-Isothermal Method of Thermogravimetry and Derivative Thermogravimetry, and Its Application to Cement Pastes. Cement and Concrete Research, 7: pp. 247-258.
- [7] El-Jazairi, B. and Illston, J.M. 1980. The Hydration of Cement Paste using the Semi-Isothermal Method of Derivative Thermogravimetry, Cement and Concrete, 10: pp. 361-366.
- [8] Wang, K.S., Lin, K.L., Lee, T.Y. and Tzeng, B.Y. 2004. The Hydration Characteristics when C_2S is Present in MSWI Fly Ash Slag. Cement and Concrete Research, 26: pp. 323-330.



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Waste Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/wasman



Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder

Chuwit Napia^a, Theerawat Sinsiri^{a,*}, Chai Jaturapitakkul^b, Prinya Chindaprasirt^c

^a School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakom Ratchasima 30000, Thailand

^b Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

^c Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 July 2011

Accepted 27 February 2012

Available online xxx

Keywords:

Leaching
Heavy metal
Solidified waste
Zeolite

ABSTRACT

This study investigated the properties of solidified waste using ordinary Portland cement (OPC) containing synthesized zeolite (SZ) and natural zeolite (NZ) as a binder. Natural and synthesized zeolites were used to partially replace the OPC at rates of 0%, 20%, and 40% by weight of the binder. Plating sludge was used as contaminated waste to replace the binder at rates of 40%, 50% and 60% by weight. A water to binder (w/b) ratio of 0.40 was used for all of the mixtures. The setting time and compressive strength of the solidified waste were investigated, while the leachability of the heavy metals was determined by TCLP. Additionally, XRD, XRF, and SEM were performed to investigate the fracture surface, while the pore size distribution was analyzed with MIP.

The results indicated that the setting time of the binders marginally increased as the amount of SZ and NZ increased in the mix. The compressive strengths of the pastes containing 20 and 40 wt.% of NZ were higher than those containing SZ. The compressive strengths at 28 days of the SZ solidified waste mixes were 1.2–31.1 MPa and those of NZ solidified waste mixes were 26.0–62.4 MPa as compared to 72.9 MPa of the control mix at the same age. The quality of the solidified waste containing zeolites was better than that with OPC alone in terms of the effectiveness in reducing the leachability. The concentrations of heavy metals in the leachates were within the limits specified by the US EPA. SEM and MIP revealed that the replacement of Portland cement by zeolites increased the total porosity but decreased the average pore size and resulted in the better containment of heavy ions from the solidified waste.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Currently, over 80% of the hazardous wastes are from industrial processes. The sludge, heavy metals, oils and infectious waste are the most abundant hazardous wastes. The amount of industrial waste and hazardous waste from industrial plants increases every year. The toxic wastes containing heavy metals are, therefore, causing serious environmental problems in the contamination of water, air and soil. It is an issue that deserves attention to find ways to properly and appropriately capture the waste.

The hazardous waste water from industries is released from industrial facilities and is also causing critical environmental problems. The treatment processes could reduce the concentrations of the toxic waste depending on the condition of the sediment's dry residue. However, the final disposal of the waste sediment is still not safe in terms of storage and transportation because some heavy metals remain unstable and may leak into the environment. To solve the problem, the method of reducing or storing hazardous

toxic waste is required to stop the leaching of toxic substances to the environment.

Solidification is a process used to treat hazardous waste from industrial plants, particularly hazardous substances or inorganic substances contaminated by heavy metals. The hazardous substances are stored in the structure by chemical bonding which neutralizes them and reduces the chance of spreading. The placeholder used in this process is normally Portland cement blended with pozzolanic materials such as fly ash, rice husk ash and silica fume. Solidification eases the safe transport of the solid cast mass and allows disposal in a landfill.

Zeolites are framework silicates consisting of interlocking tetrahedrons of SiO₄ and AlO₄. The alumino-silicate structure is negatively charged and attracts the positive ions that reside within the zeolites. This results in large vacant spaces or cages in their structures that allow space for large cations such as sodium, potassium, barium, calcium and even relatively large molecules as well as cation groups of water, ammonia, carbonate ions and nitrate ions (Feng et al., 2000). The spaces are interconnected and form long and wide channels of various sizes depending on the minerals. These channels allow easy movement of the resident ions and molecules into and

* Corresponding author. Tel: +66 4422 4420; fax: +66 4422 4607.
E-mail address: sinsiri@sut.ac.th (T. Sinsiri).

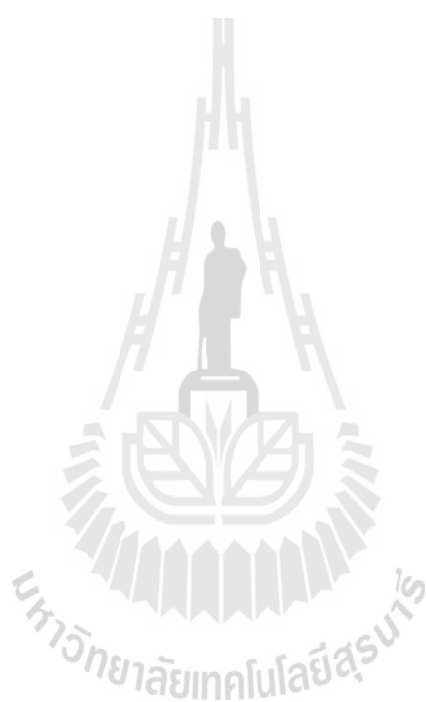


Table 1
Sample mix proportions (by weight).

Binder			S (%)	w/b	Symbol
OPC (%)	SZ (%)	NZ (%)			
100	–	–	–	0.4	OPC100
			40	0.4	OPC40S
			50	0.4	OPC50S
			60	0.4	OPC60S
80	20	–	–	0.4	OPC20SZ
			40	0.4	OPC20SZ40S
			50	0.4	OPC20SZ50S
			60	0.4	OPC20SZ60S
60	40	–	–	0.4	OPC40SZ
			40	0.4	OPC40SZ40S
			50	0.4	OPC40SZ50S
			60	0.4	OPC40SZ60S
80	–	20	–	0.4	OPC20NZ
			40	0.4	OPC20NZ40S
			50	0.4	OPC20NZ50S
			60	0.4	OPC20NZ60S
60	–	40	–	0.4	OPC40NZ
			40	0.4	OPC40NZ40S
			50	0.4	OPC40NZ50S
			60	0.4	OPC40NZ60S

out of the structure. The zeolites are thus characterized by their ability to lose and absorb water without damaging their crystal structures (Quanlin and Naiqian, 2005).

Clinoptilolite is a naturally occurring zeolite that forms through the devitrification (the conversion of glassy material to crystalline material) of volcanic ash in lake and marine waters. It is the most studied of all zeolites and is widely regarded as the most useful. Clinoptilolite has a particularly high cation exchange capacity which provides many useful properties (Poon et al., 2000). Clinoptilolite is used in many applications such as chemical sieves, gas absorbers, feed additives, food additives, odor control agents and water filters for municipality, residential drinking water and aquariums (Feng and Peng, 2005). Clinoptilolite is well suited for these applications because of its large amount of pore space, high resistance to extreme temperatures and chemically neutral basic structure.

Sludge produced by the metal plating industry is generally considered to be "hazardous waste" because of its toxic heavy metal content. Solidification techniques applied prior to the deposition of this waste in landfills provide good results allowing the safe disposal of inorganic sludge. The use of materials such as zeolite with its pozzolanic property and the ability to bind metal ions generally gives a good performance. The solidification can store a large amount of sludge and help protecting the environment. This study, therefore, aims to investigate an effective solidification technique for sludge from a metal plating factory using both natural and synthesized zeolites in corporation with Portland cement.

2. Experimental investigation

2.1. Materials

The materials used were ordinary Portland cement (OPC) per ASTM C150, sodium aluminum silicate ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}$) as synthesized zeolite (SZ), clinoptilolite ($(\text{Na,K,Ca})_6(\text{Si-Al})_{36}\text{O}_{72}\cdot 20\text{H}_2\text{O}$) as natural zeolite (NZ), sludge (S) from the treatment of wastewater from a nickel plating plant and tap water. The S contained 35% water and 65% solid. It was dried and then sieved through a No. 100 sieve.

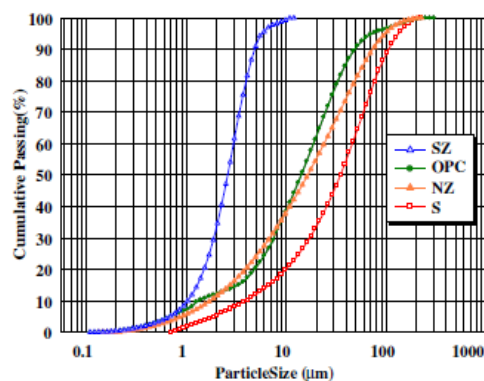


Fig. 1. Particle size distribution of OPC, SZ, NZ and S.

2.2. Mixture proportions

The sludge waste was solidified using OPC containing SZ and NZ as a binder. Zeolites were used to partially replace OPC at rates of 0%, 20%, and 40% by weight of the binder. The plating sludge was used to replace the binders at the rates of 40%, 50% and 60% by weight. A constant water to binder (*w/b*) ratio of 0.40 was used. The pastes were mixed in a mechanical mixer, and the specimens were cast in 50-mm cube molds. The fresh samples were covered with a plastic sheet to prevent water evaporation. After casting for 24 h, the samples were removed from the molds and cured in saturated lime water (Table 1).

3. Test programs

3.1. Specific gravity and particle size

The specific gravity of OPC, SZ, NZ and S was measured in accordance with ASTM C188, and their particle sizes were measured using laser particle size analysis.

3.2. Normal consistency

The normal consistency of the pastes was measured in accordance with ASTM C187 using Vicat apparatus.

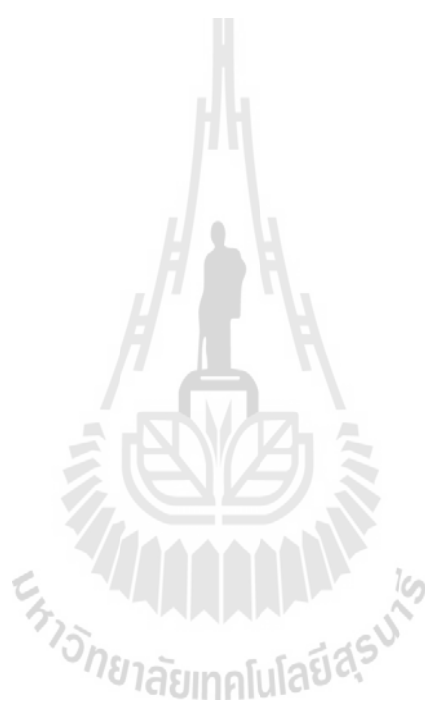
3.3. Compressive strength

The compressive strength of the solidified waste was tested in accordance with ASTM C109 at ages of 7, 28, and 90 days. Five samples were tested for each age group.

Table 2
Specific gravity, median particle size and surface area of OPC, SZ, NZ and S.

Sample	Specific gravity	Mean particle size d_{50} (μm)	Surface area* (cm^2/g)
OPC	3.15	14.12	2600
SZ	1.87	2.51	32,500
NZ	2.09	16.17	5400
S	2.14	34.81	1900

* BET analysis.



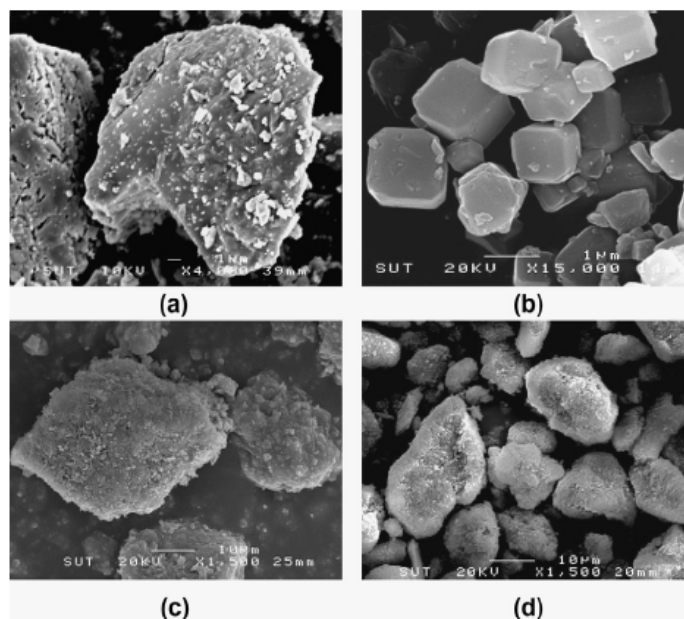


Fig. 2. SEM micrographs of (a) OPC at 4000 time, (b) SZ at 15,000 time, (c) NZ at 1500 time and (d) S at 1500 times.

Table 3
Chemical composition of materials.

Chemical composition (%)	OPC	SZ	NZ	S
SiO ₂	19.85	65.3	75.32	5.53
Al ₂ O ₃	4.49	26.18	10.28	3.78
Fe ₂ O ₃	3.56	0.03	2.66	–
CaO	66.96	0.12	3.95	25.32
MgO	1.36	0.08	1.2	–
K ₂ O	0.34	2.64	4.29	–
Na ₂ O	–	1.87	0.89	–
NiO	–	–	–	40.88
CuO	–	–	–	13.08
ZnO	–	–	–	10.33
CrO	–	–	–	0.64
LOI	0.98	5.65	2.3	0.44

3.4. Scanning electron microscopy (SEM)

A JEOL scanning electron microscope (model JSM6400) was used to examine the phase development and microstructure of the solidified plating waste. The paste cubes at the ages of 7 and 28 days were broken and the fractions in the middle part of the specimens were used for the analyses. The solid was placed on a brass stub sample holder with double stick carbon tape. Then, the sample was dried using infrared light for 5 min. Subsequently, the sample was coated with a layer of gold approximately 20–25 Å thick using a blazer sputtering coater. Micrographs were recorded at 12 kV and 500–10,000× magnifications (Chindaprasirt et al., 2005).

3.5. X-ray diffractometer (XRD) and X-ray fluorescence (XRF) analyses

The XRD scans were performed for 2θ° between 10° and 70°, with an increment of 0.03°/step and a scan speed of 0.5 s/step.

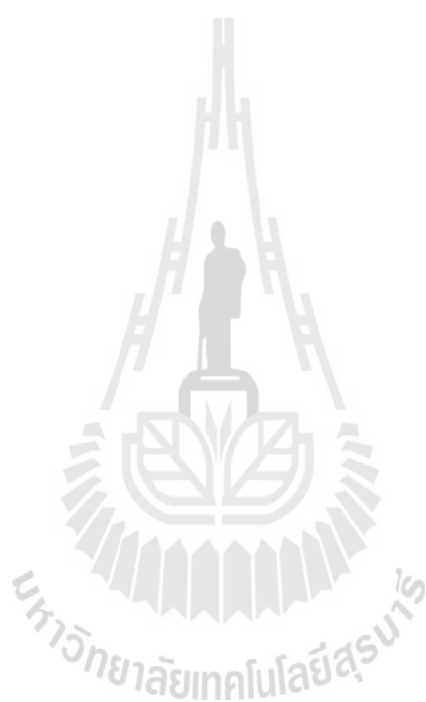
XRD analysis using Bruker's TOPAS software and using wavelength dispersive XRF (WDXRF). The positions of the diffraction peaks were identified by comparison to reference database compounds (Chindaprasirt et al., 2005).

3.6. Mercury intrusion porosimetry procedure (MIP)

The pore diameter distribution in the hardened cement pastes was measured by mercury intrusion porosimetry (MIP) at a pressure capacity of 228 MPa. After curing for 7, 28 and 90 days, the samples were split from the middle portion of the hardened blended cement paste. To stop the hydration reaction, the samples were submerged directly into liquid nitrogen for 5 min and were then evacuated at a pressure of 0.5 Pa at –40 °C for 48 h. This method has been used previously to stop the hydration reaction of cement paste (Chindaprasirt et al., 2007).

3.7. Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP)

The metal leaching from the solidified plating waste cured for 7, 28 and 90 days and was assessed using the TCLP as defined by the US EPA (Li et al., 2001). The samples were crushed to reduce the particle size to less than 9.5 mm. The crushed sample was extracted using an acetic acid solution (pH 2.88) in a volume with a weight equal to 20 times the weight of the sample. The extraction vessels were rotated in an end-over-end manner at 30 rpm for 18 h. The leachate was filtered through a 0.45-μm membrane filter to remove suspended solids and was then divided into two portions. One portion was used for a pH measurement, and the other was used for the determination of the metals present in the leachate by ICP-AES. Each extraction was performed in triplicate, and the average value was reported to ensure the reproducibility of the data (Asavapisit et al., 2005).



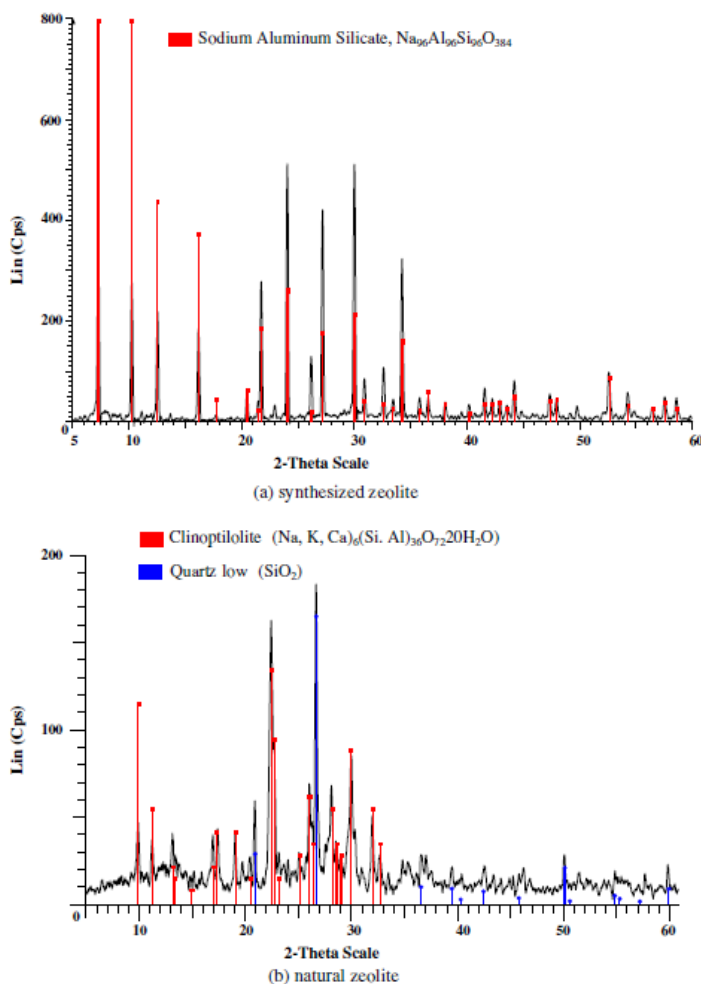


Fig. 3. XRD patterns of synthesized zeolite and natural zeolites.

4. Results and discussion

4.1. Properties of materials

4.1.1. Physical results for OPC, SZ, NZ and S

The specific gravity and median particle size (d_{50}) of the OPC, SZ, NZ and S are shown in Table 2. The median particle size (d_{50}) of the OPC was approximately 14.1 μm , while those of SZ, NZ and S were 2.5, 16.2 and 34.8 μm , respectively. The surface areas of the OPC, SZ, NZ and S were 2600, 32,500, 5400 and 1900 cm^2/g , respectively. The particle size distribution for the OPC, SZ, NZ and S was measured with a Mastersizer and is graphically shown in Fig. 1. For the OPC, NZ and S, the particle shape was solid and angular, whereas the surface of the SZ was smooth and exhibited a hexagonal character (Fig. 2).

4.1.2. Chemical composition and material patterns

Table 3 shows the chemical composition of the OPC, SZ, NZ and S, which was analyzed by XRF. SZ and NZ were found to be mainly

SiO_2 and Al_2O_3 . As can be seen, these two components were 90% for SZ and 85% for NZ. Additionally, the main elements of S were NiO (40.88%), CaO (25.32%), CuO (13.08%) and ZnO (10.33%).

Fig. 3 shows the XRD patterns for the SZ and NZ. The figure indicates that the intensity peak of sodium aluminum silicate ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}$) and $(\text{Na,K,Ca})_6(\text{Si,Al})_{36}\text{O}_{72}\cdot 20\text{H}_2\text{O}$ appeared at 0–60° (2θ).

4.2. Properties of pastes

4.2.1. Normal consistency of pastes

The normal consistency of OPC100 was found to be 25.5%. Higher replacement of SZ and NZ resulted in a higher normal consistency. For example, the normal consistencies of pastes OPC20SZ, OPC40SZ, OPC20NZ and OPC40NZ were 32.4%, 34.4%, 31.2% and 32.0%, respectively. The normal consistency of pastes containing SZ and NZ, which have a higher fine content, was higher than those containing coarser zeolites. This occurs because the particles of SZ and NZ have a higher fine content and a higher porosity; thus, they absorb more water, which results in greater water consumption.

Table 4
Setting time and compressive strength of the solidified wastes.

Sample	Time (min)		Compressive Strength (MPa)		
	Initial setting time	Final setting time	7-day	28-day	90-day
OPC100	132	181	53.8	72.9	79.4
OPC40S	148	192	0.9	1.3	1.5
OPC50S	151	195	0.6	1.0	1.2
OPC60S	154	197	0.5	0.8	1.1
OPC20SZ	141	185	21.6	31.1	38.2
OPC20SZ40S	149	186	2.1	13.5	16.1
OPC20SZ50S	152	186	1.3	4.9	10.7
OPC20SZ60S	156	185	0.8	1.4	2.0
OPC40SZ	143	187	10.2	23.4	26.9
OPC40SZ40S	149	188	0.3	6.0	17.4
OPC40SZ50S	151	189	0.3	4.2	13.6
OPC40SZ60S	152	190	0.1	1.2	3.2
OPC20NZ	133	183	52.0	62.4	71.1
OPC20NZ40S	135	184	43.4	57.3	65.2
OPC20NZ50S	135	185	35.7	49.1	58.4
OPC20NZ60S	136	186	30.5	41.3	50.3
OPC40NZ	134	184	40.5	50.7	61.3
OPC40NZ40S	135	184	19.5	36.2	43.4
OPC40NZ50S	136	185	15.2	31.5	39.3
OPC40NZ60S	136	187	12.1	26.0	33.8

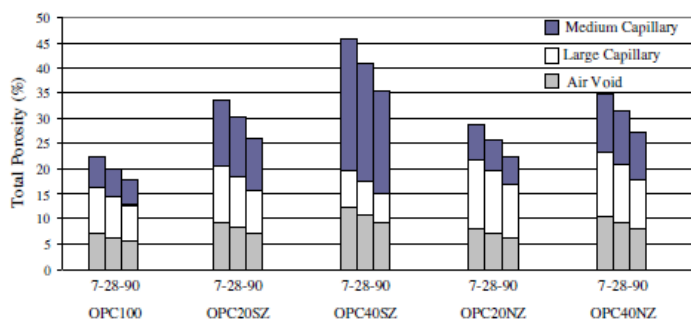


Fig. 4. Total porosity of cement paste and blended cement pastes at 7, 28 and 90 days.

4.2.2. Setting time of blended cement pastes and pastes containing solidified plating waste

The setting times of the blended cement pastes containing SZ and NZ were similar to those of the Portland cement paste. For example, the final setting times of OPC paste, was 181 min. The initial setting time of mixes with SZ was 185 and 187 min and those with NZ were 183 and 184 min. For the incorporation of S, the initial setting time was increased to 148–154 min and the final setting times to 191–192 min. The similar or slightly increase in the setting time were probably due to the pastes mixed with zeolites have higher water contents at normal consistency than Portland cement paste. Moreover, the use of zeolite to replace Portland cement resulted in a smaller amount of cement and thus caused a longer setting time to be observed. For the use of S, the reductions in the amount of cement and pozzolan resulted in an even smaller amount of cementing material and hence the setting times increased.

4.2.3. Compressive strength of the blended cement pastes

Table 4 shows the development of compressive strength in the cement paste in relation to the cement replacement level for the case of synthesized zeolites and natural zeolites. Concerning the use of SZ and NZ, replacement of 20% and 40% zeolites led to lower

compressive strengths at all ages. It was observed that the compressive strengths of the cement pastes containing NZ were higher than those with SZ for the same replacement conditions and age, because more silica dioxide (the main component of nat-

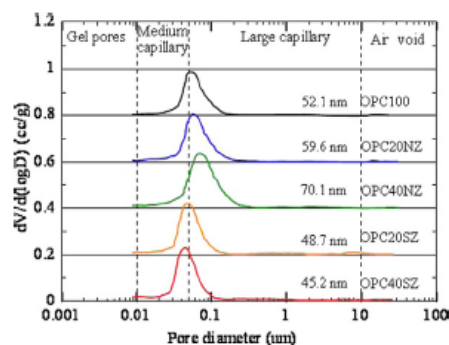
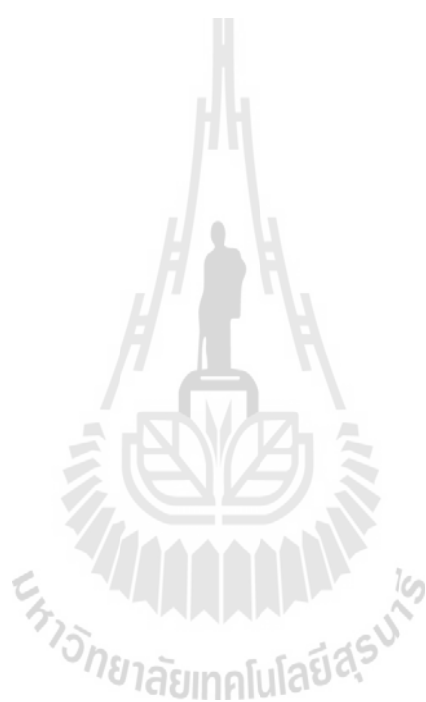


Fig. 5. Relationship between pore diameter and volume intruded of the blended cement pastes at 28 days.



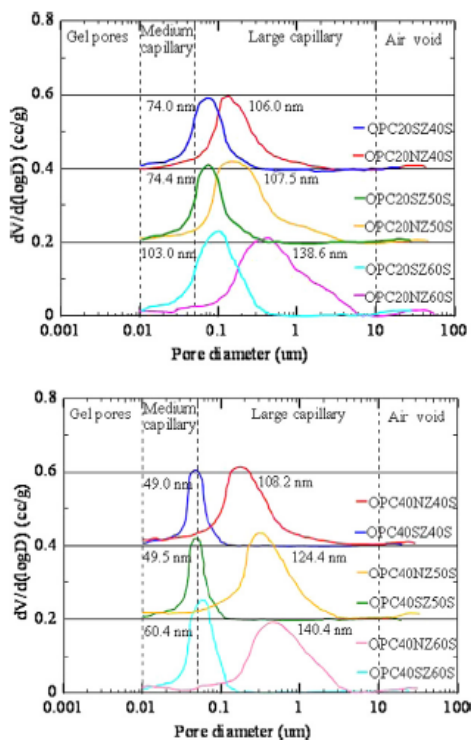


Fig. 6. Relationship between pore diameter and volume intruded of the solidified plating wastes using OPC, NZ and SZ as binders at 28 days.

ural zeolite) is contained than in the synthesized zeolites and cement. The pozzolanic activity of zeolite normally depends on the amount of the active amorphous phases of silica and alumina. As indicated in the XRD patterns in Fig. 3, the amount of the active amorphous phases of NZ is higher than that of SZ. The results of the compressive strengths of pastes OPC20SZ, OPC40SZ, OPC20NZ and OPC40NZ at 28 days of 31.1, 23.4, 62.4 and 50.7 MPa, respectively confirms the observation.

4.2.4. Compressive strength of pastes containing solidified plating waste

The experimental results showed that the rates of strength development in the solidified waste using SZ and NZ as solidification binders were higher than that with OPC. The composition of OPC hydration product is dominated by calcium silicate hydrate (C–S–H) which typically comprises 70–80% of the product (Deja, 2002). The metals may react with calcium hydroxide to produce insoluble compounds as a form of metal hydroxide; this mechanism inhibited the hydration and decreased the strength of the wastes, especially when the concentration of metal in the solidified waste was more than 0.3% by weight (Li et al., 2001; Asavapisit et al., 2001; Qin et al., 2003). The strength of these solidified wastes could be very low due to the inhibition of the cement reactions by the metal ions in the waste. Additionally, the strength of the solidified waste decreased when the amount of waste increased. For example, the strengths of pastes OPC20NZ40S, OPC20NZ50S, and OPC20NZ60S at 28 days were 57.3, 49.1 and 41.3 MPa, respectively. The results indicated that the plating sludge can be loaded in a pro-

portion as high as 60 wt.% of the cement blended with 40 wt.% SZ and NZ at a 28-day compressive strength that meets the minimum requirement for disposal in a secure landfill (0.34 MPa).

4.2.5. Porosity and average pore diameter of blended cement pastes

The total porosity, capillary porosity and average pore diameter of the pastes at 7, 28 and 90 days are shown in Fig. 4. The incorporation of SZ and NZ increased the total porosity of the blended cement pastes as compared with the OPC paste at all ages. The total porosity increased with an increase in replacement by SZ and NZ. The increase in total porosity as a result of the utilization of zeolite was mainly due to the decrease in capillary porosity. Note that the compressive strength decreased, while the porosity of the blended cement paste increased (Poon et al., 2000; Isaia et al., 2003). The capillary porosity of the cement paste blended with NZ at all replacement levels decreased in comparison to that with SZ.

Fig. 4 shows the effect of the percent replacement of SZ and NZ on the average pore size in the cement pastes at age 7, 28 and 90 days. It can be observed that the average pore size of the additives decreased at the respective period of hydration because of the gradual filling of large pores by hydration products of cementitious materials; however, the extent of the decrease was variable. A greater decrease was observed for replacement by SZ, whereas the decrease was comparatively less for replacement by NZ. The average pore size tends to decrease as the percent replacement increases. The relationship between the pore diameter and incremental pore volume of the blended cement paste at 28 days is shown in Fig. 5. The critical pore sizes of the OPC100, OPC20NZ and OPC40NZ pastes were 52.1, 59.6 and 70.1 nm, respectively, and the pores were distributed as large capillary pores. The critical pore sizes of the OPC20SZ and OPC40SZ pastes were 48.7 and 45.2 nm, respectively, and these were distributed as medium capillary pores. These values were lower than that of the OPC100 paste. This suggests that the greater fineness of the zeolite was more effective in reducing the pore diameter of the paste. The results also showed that the blended cement paste containing zeolite presented a smaller pore size than the Portland cement paste. The pore size decreased with an increase in zeolite replacement. Similar results have also been reported in other studies (Poon et al., 1997, 1999a,b).

The relationship between the pore diameter and incremental pore volume of the solidified waste using OPC, SZ and NZ as binders at 28 days is shown in Fig. 6. The critical pore sizes of OPC20SZ40S, OPC20SZ50S and OPC20SZ60S were 74.0, 74.4 and 103.0 nm, respectively, and these pores were distributed as large capillary pores. Additionally, the critical pore sizes of the OPC40SZ40S, OPC40SZ50S and OPC40SZ60S pastes were 49.0, 49.5 and 60.4 nm, respectively. These results suggested that the increase in the amount of the plating waste resulted in increase in pore diameter of the paste. In contrast, the increase in the amount of SZ resulted in the decrease in the pore diameter of the paste.

As shown in Fig. 6, the critical pore sizes of OPC20NZ40S, OPC20NZ50S, OPC20NZ60S, OPC40NZ40S, OPC40NZ50S and OPC40NZ60S were 106.0, 107.5, 138.6, 108.2, 124.4 and 140.4 nm, respectively. These results suggested that as the amount of plating sludge increased, the pore diameter of the paste increased.

4.2.6. Fracture surface analysis by scanning electron microscopy (SEM)

The microstructure morphology of the fractured surface was determined by SEM for OPC100, OPC20SZ, OPC40SZ, OPC20NZ and OPC40NZ pastes at 28 days (see Fig. 7). The microstructure of OPC100 was porous and exhibited many voids, while OPC20SZ, OPC40SZ, OPC20NZ and OPC40NZ showed uniform and dense pastes. The incorporation of zeolites resulted in the increased hydration and pozzolanic reaction and thus reduced the pore sizes.



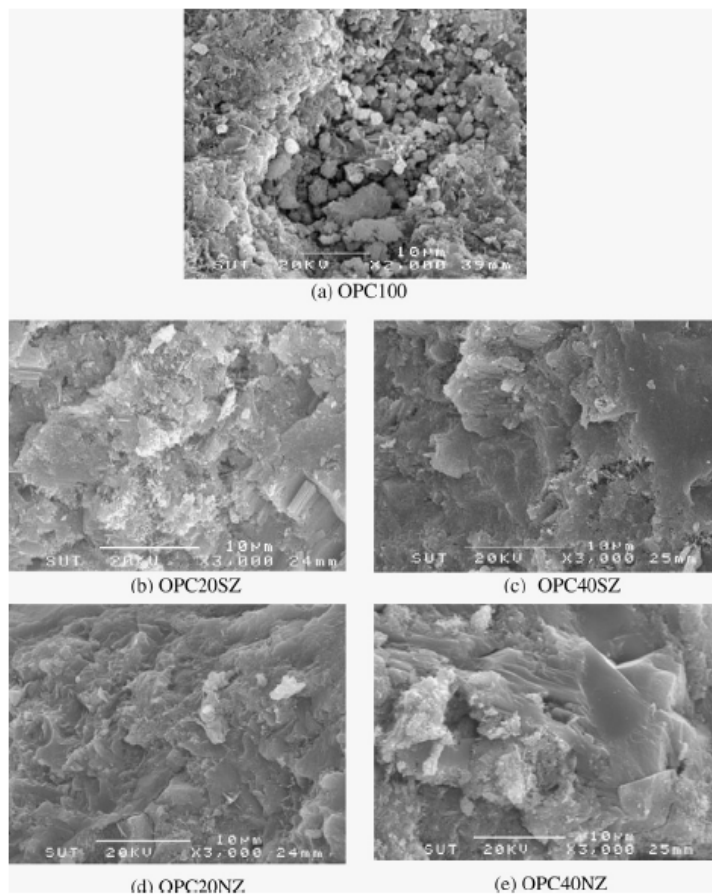


Fig. 7. Fracture surface of the blended cement pastes at 28 days.

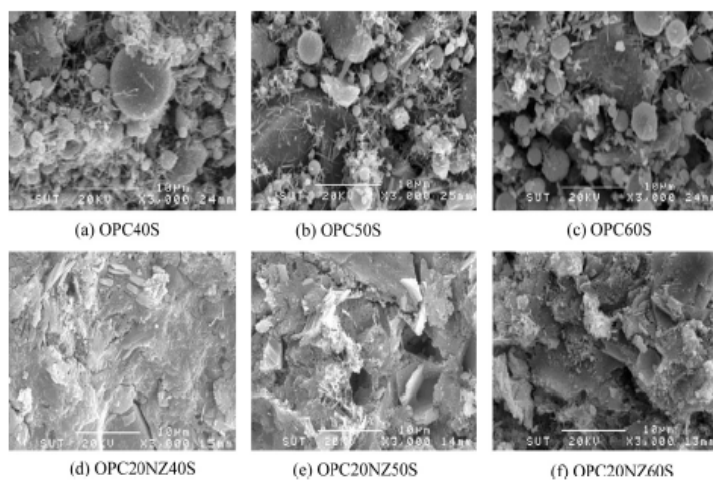


Fig. 8. Fracture surfaces of the solidified plating wastes at 28 days.

Table 5
Leachate pHs in TCLP leachates.

Sample	pH		
	Age 7 days	Age 28 days	Age 90 days
OPC100	6.3	6.5	6.6
OPC40S	6.4	6.6	6.7
OPC50S	7.1	7.2	7.2
OPC60S	7.7	7.7	7.7
OPC20SZ40S	7.6	7.5	7.4
OPC20SZ50S	7.9	7.9	7.8
OPC20SZ60S	7.8	7.9	7.9
OPC40SZ40S	9.8	9.5	9.5
OPC40SZ50S	8.8	8.8	8.7
OPC40SZ60S	8.5	8.5	8.6
OPC20NZ40S	11.4	11.5	11.5
OPC20NZ50S	11.2	11.2	11.2
OPC20NZ60S	11.1	11.1	11.1
OPC40NZ40S	11.2	11.1	11.1
OPC40NZ50S	10.8	10.8	10.9
OPC40NZ60S	9.7	9.6	9.6

Thus, replacing the Portland cement with some zeolites resulted in a dense paste.

Fig. 8 shows the fractured surfaces of the solidified plating waste at 28 days, as determined by SEM. The paste with more

plating sludge showed a lower density because the proportion of binder in the mixture decreased. Because heavy metals inhibit hydration, the cement reaction was not completed, and some heavy metals did not react (Bishop et al., 2003). The replacement of Portland cement by zeolites showed a higher density than used Portland cement alone. The consequences of this are that the solidified waste was more porous, and the compressive strength of the solidified waste decreased significantly compared with those with the absence of plating sludge in the mixture.

4.2.7. Leaching analysis

Table 5 shows the leachate pH values in the TCLP leachates at 7, 28 and 90 days. The pH of the solution extracted from the solidified waste is increased from the initial pH. For example, the pH of pastes OPC100, OPC40S, OPC20SZ40S and OPC20NS40S pastes at 28 days were 6.5, 6.6, 7.5 and 11.5, respectively. The pH values increased because calcium hydroxide in the pores dissolved into the acid. Fig. 9 shows the metal concentrations in TCLP leachates, the results showed that the concentration of Cr in the leachate for all solidified waste samples was lower than the limit specified by the standards of the US EPA (<5.0 mg/l). It should be noted here that the untreated sludge also meets US EPA criteria for Cr. For example, the concentrations of Cr in the leachate of pastes

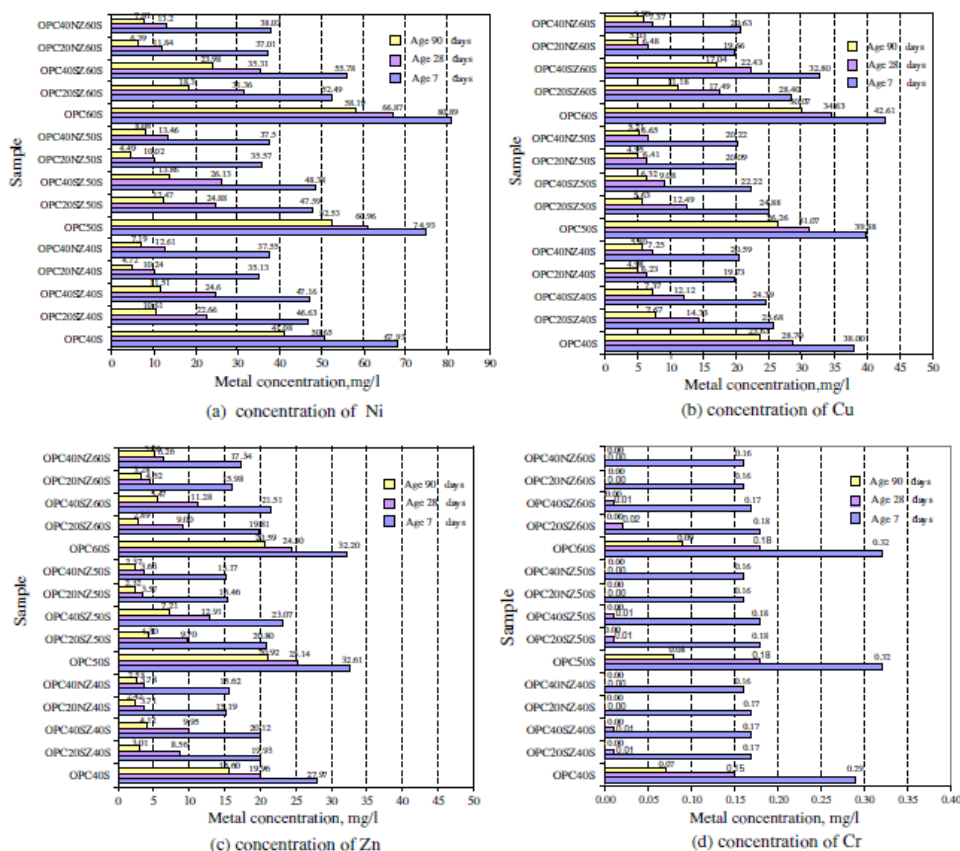
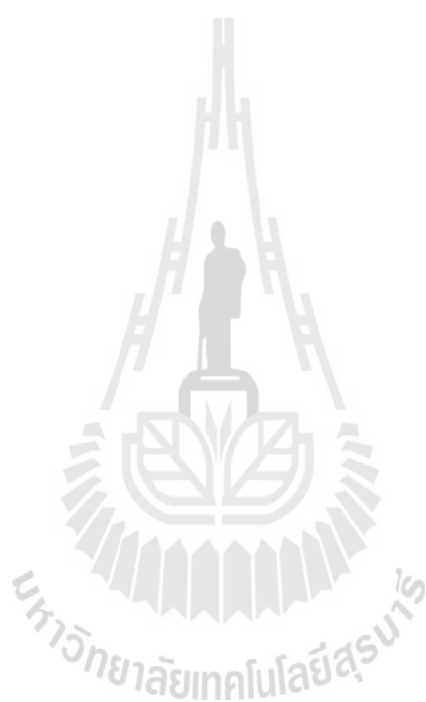


Fig. 9. Metal concentrations in TCLP leachates.



OPC20SZ40S, OPC20SZ50S, OPC20NZ40S and OPC20SZ50S at 7 days were 0.17, 0.18, 0.17 and 0.16 mg/l respectively. The Ni, Cu and Zn have no regulatory standards because these three metals are not classified as hazardous waste by the US EPA. The results showed that when sample age increased the effectiveness in reducing the leachability increased. For example, it was detected that OPC20NZ40S contained Ni of 35.13 mg/l at 7 days and this decreased to only 10.24 mg/l at 90 days. Using NZ as a binder effectively reduced leaching more than using SZ. For example, the concentrations of Ni in the leachate of pastes OPC40NZ40S and OPC40SZ40S at 28 days were 12.61 and 24.60 mg/l respectively. Additionally, the metal concentrations in the TCLP leachates that were extracted from the cement-based solidified plating waste were much lower than that extracted from the plating sludge. Effectiveness in reducing the leachability of solidified waste using SZ and NZ to replace OPC as a binder was higher than 80.0% at all ratios. This was because SZ and NZ mainly composed of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 ; and the structures of zeolites consist of three-dimensional frameworks of SiO_4 and AlO_4 tetrahedra. The aluminum ion is small enough to occupy the position in the center of the tetrahedron of four oxygen atoms, and the isomorphous replacement of Si^{4+} by Al^{3+} produces a negative charge in the lattice. The net negative charge is balanced by the exchangeable cation (Cheng and Bishop, 1992; Peralta et al., 1992). Thus, the effectiveness in reducing the leachability was higher using SZ and NZ than that with OPC alone. These results indicated that during the ion-exchange process, the metal ions had to move through the pores of zeolite mass and through channels of the lattice, and they had to replace exchangeable cations. The diffusion was fast through the pores, but was retarded when the ions moved through the smaller diameter channels. In this case, the metal ions uptake could mainly be attributed to the ion-exchange reactions in the microporous minerals of zeolite (Erdem et al., 2004).

5. Conclusions

On the basis of the results of this study, the following conclusions can be drawn.

1. The blended cement pastes containing synthesized zeolite and natural zeolite exhibited higher total porosity and capillary porosity than those containing Portland cement alone. This resulted in the lower compressive strengths of blended cement pastes compared to that of the control Portland cement paste.
2. The pore size distribution and the average pore diameter of the blended cement paste containing zeolites decreased with an increase in zeolite content which resulted in the dense structure of the paste. This effect was caused by the hydration reaction and the pozzolanic reaction.
3. The use of zeolites to partially replace Portland cement as a solidification binder produced solidified waste with lower strength. However, it is more effectiveness in terms of leachability than the use of Portland cement alone.
4. The application of natural zeolite as a binder with Portland cement to reduce the leaching of heavy metals resulted in a better outcome than using synthetic zeolites with cement, or cement alone. The use of natural zeolite with Portland cement

as a binder to solidify waste sludge is appropriate as the leachability was reduced and the compressive strength complied with the US EPA standard.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the financial support by the Higher Education Research Promotion and National Research University Project of Thailand, Office of the Higher Education Commission, through the Advanced Functional Materials Cluster of Khon Kaen University, and the Strategic Scholarships for Frontier Research Network for the Joint Ph.D. Program, Thai Doctoral degree. Thanks are also extended to the Thailand Research Fund (TRF) for financial support under the TRF Senior Research Scholar, Grant No. RTA5480004 and the TRF New Researcher Scholar, Grant No. MRG5280178.

References

- Asavapitit, S., Nanthamontry, W., Polprasert, C., 2001. Influence of condensed silica fume on the properties of cement-based solidified wastes. *Cement and Concrete Research* 31, 1147–1152.
- Asavapitit, S., Naksrichum, S., Harmwajanawong, N., 2005. Strength, leachability and microstructure characteristics of cement-based solidified plating sludge. *Cement and Concrete Research* 35, 1042–1049.
- Bishop, M., Bott, S.G., Barron, A.R., 2003. A new mechanism for cement hydration inhibition: solid-state chemistry of calcium nitrilotris(methylene)triphosphonate. *Chemistry of Materials* 15 (16), 3073–3088.
- Cheng, K.Y., Bishop, P.L., 1992. Metals distribution in solidified/stabilized waste forms after leaching. *Hazardous Waste and Hazardous Materials* 9, 163–312.
- Chindaprasit, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T., 2005. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites* 27, 425–428.
- Chindaprasit, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T., 2007. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials* 21, 1534–1541.
- Deja, J., 2002. Immobilization of Cr^{6+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} and Pb^{2+} in alkali-activated slag binder. *Cement and Concrete Research* 32, 1971–1979.
- Erdem, E., Karapinar, N., Donat, R., 2004. The removal of heavy metal cations by natural zeolites. *Journal of Colloid and Interface Science* 280, 309–314.
- Feng, N.-Q., Peng, G.-F., 2005. Applications of natural zeolite to construction and building materials in China. *Construction and Building Materials* 19, 579–584.
- Feng, N.-Q., Xing, F., Leng, F.-G., 2000. Zeolite ceramic cellular concrete. *Magazine of Concrete Research* 52, 117–122.
- Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G., Moraes, R., 2003. Physical and pozzolanic action of mineral addition on the mechanical strength of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research* 25, 69–76.
- Li, X.D., Poon, C.S., Sun, H., Lo, I.M.C., Kirk, D.W., 2001. Heavy metal speciation and leaching behaviours in cement based solidified/stabilized waste materials. *Journal of Hazardous Materials A* 82, 215–230.
- Peralta, G.L., Ballsteros, F.C., Cepeda, M.L., 1992. Treatment and Disposal of Heavy Metal Waste Using Cementitious Solidification. *Nation Engineering Center, Philippines*, pp. 2–37.
- Poon, C.S., Wong, Y.L., Lam, L., 1997. The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly ash cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials* 11, 383–393.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Lin, Z.S., 1999a. A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement paste. *Construction and Building Materials* 13, 427–432.
- Poon, C.S., Lam, L., Wong, Y.L., 1999b. Effect of fly ash and silica fume on interfacial porosity of concrete. *ACI Material Journal*, 197–205.
- Poon, C.S., Lam, L., Wong, Y.L., 2000. A study on high strength concrete prepared with large volume of low calcium fly ash. *Cement and Concrete Research* 30, 447–455.
- Qin, G., Sun, D.D., Tay, J.H., 2003. Characterization of mercury- and zinc-doped alkali-activated slag matrix Part II. Zinc. *Cement and Concrete Research* 33, 1257–1262.
- Quanlin, N., Naigian, F., 2005. Effect of modified zeolite on expansion of alkaline silica reaction. *Cement and Concrete Research* 35, 1784–1788.



ประวัติผู้เขียน

นายชววิทย์ นาเพีย เกิดเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2517 ที่อำเภอภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ ปัจจุบันมีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภออุทุมพรพิสัย จังหวัดศรีสะเกษ เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนภูมิวิทยา จังหวัดชัยภูมิ ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมขนส่ง) เมื่อ พ.ศ.2540 จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หลังจากสำเร็จการศึกษา ในปี พ.ศ.2540 เข้าปฏิบัติงานตำแหน่ง “ผู้ช่วยสอนและวิจัย” ประจำสาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ระหว่างทำงานทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้กับตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา (โครงสร้าง) ที่มหาวิทยาลัยรังสิต จังหวัดปทุมธานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท เมื่อปี พ.ศ. 2544 จากนั้น ได้เข้าทำงานในตำแหน่ง “อาจารย์” ประจำโปรแกรมวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมแขนงเทคโนโลยีก่อสร้าง มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ จนถึงปัจจุบัน

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาเอกมีบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ จำนวน 5 บทความดังต่อไปนี้

- 1) ในงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12 (The 12th National Convention on Civil Engineering)
 - 2) ในงานการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5 (Annual Concrete Conference 5)
 - 3) ในงานการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6 (Annual Concrete Conference 6)
 - 4) ในงานการประชุม Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-11)
 - 5) ในวารสาร Waste Management.
- ดังปรากฏในภาคผนวก ข.

รายการอ้างอิง (เพิ่มเติม)

- Lombardi, F., Mangialardi, T., Piga, L. and Sirini, P. (1998). Mechanical and Leaching Properties of Cement Solidified hospital solid waste incinerator fly ash. **Waste Management**, vol. 18 : 99- 106.
- Serclerat, I., Moszkowicz, P. and Pollet, B. (1999). Retention Mechanisms in Mortars of the trace metals contained in Portland Cement clinkers. **Waste Management**, Vo1.20 (213) : 259-264.
- Paul L. Bishop. (1988). Leaching of Inorganic Hazardous Constituents from Stabilization / Solidified Hazardous Waste. **Hazardous Waste and Hazardous Materials**, Vo1.5 (2) : 129-143.
- ASTM C305 (1997). Standard Oractice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic. **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C187 (1997). Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement. **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C188 (1997). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C191 (1997). Standard Test Method for Time of Setting of hydraulic Cement by Vicat Needle. **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 109 (1997). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- วีณา นันทมนตรี (2554). การศึกษากระบวนการหล่อแข็งโลหะไฮดรอกไซด์สังเคราะห์โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมฝุ่นซิลิกาควบแน่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.