

การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
และผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล

พ.ศ. 2551

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยมหิดล

Copyright by Mahidol University

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
และผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน



..... ประภัสสร มณีรัตน์ .....

นางสาวประภัสสร มณีรัตน์  
ผู้วิจัย

.....  
รองศาสตราจารย์อูษณีย์ อุยะเสถียร, วศ.ม.  
ประธานคณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

.....  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วินัย นุตมากุล, Ph.D.  
กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

.....  
ศาสตราจารย์บรรจง มไหสวริยะ, พ.บ.

คณบดี

บัณฑิตวิทยาลัย

.....  
รองศาสตราจารย์สยาม อรุณศรีมรกต, วท.ม.

ประธานคณะกรรมการประจำหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสม

เพื่อการพัฒนาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม

วันที่ 19 กันยายน พ.ศ. 2551

..... ประภัสสร มณีรัตน์

นางสาวประภัสสร มณีรัตน์

ผู้วิจัย

..... มลลิกา ปัญญาตะโป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มลลิกา ปัญญาตะโป, D.Tech.Sc.

ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วินัย นุตมากุล, Ph.D.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

ศาสตราจารย์บรรจง มไหสวริยะ, พ.บ.

คณบดี

บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยมหิดล

.....

รองศาสตราจารย์อุษณีย์ อุยะเสถียร, วศ.ม.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิทธิพงษ์ ดิลกวิช, Ph.D.

คณบดี

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหิดล

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาจากบุคคลหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.อุษณีย์ อุษะเสถียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและสละเวลาตรวจแก้ วิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ และขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วินัย นุตมากุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และ ผศ.ดร.มัลลิกา ปัญญาคะโป ประธานคณะกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่างๆ ในงานวิจัยนี้ ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.บันลือ เอมะรุจิ อดีตผู้อำนวยการ โครงการจัดตั้งภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการของวิศวกรรม โยธาเพื่อทำการทดลอง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของวิศวกรรมโยธา ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่อง ทดสอบกำลังรับแรงอัด และเครื่องผสมปูน และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคณะ สิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

ขอขอบคุณบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ส่งปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นหัวใจหลักในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณบริษัทอีเอ็นซี จำกัด ที่ให้การอนุเคราะห์ กากตะกอนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณคุณเกษิณี สกกุลวงษ์ คุณพันธจิต จันทะกล และคุณพฤกษ์ จิรสัตยาภรณ์ รวมถึง เพื่อนๆ AT 20 ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือในทุกๆด้าน ขอขอบคุณคุณหมอบิยะ และคุณประภัสรา มณีรัตน์ ที่คอยช่วยเหลือในเรื่องคอมพิวเตอร์และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาเป็นอย่างสูง ที่ให้การสนับสนุนในด้านการศึกษา ตั้งแต่เล็กจนโต ทั้งยังให้กำลังใจและกำลังทรัพย์ ตลอดจนให้โอกาสในการศึกษาจนสามารถสำเร็จ การศึกษาลงได้

ประภัสสร มณีรัตน์

การหล่อแข็งกากตะกอน โลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์  
เป็นวัสดุประสาน (SOLIDIFICATION OF HEAVY METAL SLUDGE BY USING PORTLAND  
CEMENT AND CEMENT KILN DUST AS BINDERS)

ประภัสสร มณีรัตน์ 4837317 ENAT/M

วท.ม. (เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม)

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: อุษณีย์ อุษะเสถียร, วศ.ม., วินัย นุคมากุล, Ph.D.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอน โลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสีย  
ของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ในการหล่อ  
แข็งใช้อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1, 0.75 : 1 และ 1 : 1 โดยน้ำหนัก และแทนที่  
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยผงฝุ่นซีเมนต์ในปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30% โดยน้ำหนัก โดยทำการทดสอบ  
กำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)  
ของกากตะกอนหล่อแข็งเพื่อประเมินประสิทธิภาพในการปรับเสถียรและการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก

ผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เปรี่เซนต์การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์  
และระยะเวลาการบ่มมีผลต่อกำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักของกากตะกอนหล่อแข็ง โดยเมื่อ  
เพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานและเปอร์เซนต์การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ทำให้กำลังรับแรงอัด  
ลดลงและการชะละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น  
และการชะละลายของโลหะหนักลดลง ในการทดสอบกากตะกอนหล่อแข็งทุกส่วนผสมที่ทำการทดลอง ให้ผล  
ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในการทดสอบด้วยวิธี TCLP ซึ่งกำหนดไว้ใน US.EPA 40 CFR 261 และผ่านมาตรฐานตาม  
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และการทดสอบกำลังรับแรงอัดมีผลผ่านเกณฑ์มาตรฐานตาม  
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2540 จากส่วนผสมต่างๆที่ทำการทดลอง พบว่า ที่อัตราส่วนกากตะกอน  
โลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อผงฝุ่นซีเมนต์  
เท่ากับ 70 : 30 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากอัตราส่วนผสมนี้มีค่าใช้จ่าย  
ของวัสดุน้อยที่สุดเท่ากับ 4,778 บาท ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก 1,000 กก.

คำสำคัญ: การหล่อแข็ง / ผงฝุ่นซีเมนต์ / กากตะกอนโลหะหนัก / กำลังรับแรงอัด / การชะละลาย

136 หน้า

**SOLIDIFICATION OF HEAVY METAL SLUDGE BY USING PORTLAND CEMENT AND CEMENT KILN DUST AS BINDERS**

PRAPATSORN MANEERAT 4837317 ENAT/M

M.Sc. (APPROPRIATE TECHNOLOGY FOR RESOURCES AND ENVIRONMENT DEVELOPMENT)

THESIS ADVISORS: USANEE UYASATIAN, M.Eng., WINAI NUTMAGUL, Ph.D.

**ABSTRACT**

The purpose of this research was to study the solidification of heavy metal sludge from wastewater treatment plant of electroplating factory by using Portland cement and cement kiln dust as binders. The ratios of heavy metal sludge to binder at 0.5 : 1, 0.75 : 1, and 1 : 1 (by weight) and replacement of Portland cement by cement kiln dust at 0, 5, 10, 15, 20, 25, and 30% (by weight) were used in the solidification. Compressive strength and heavy metal leaching (by TCLP, Toxicity Characteristic Leaching Procedure) of solidified sludge were tested to assess the effectiveness of the stabilization and the solidification of heavy metal sludge.

The results of this research indicated the ratio of heavy metal sludge to binder, percentage of cement kiln dust used, and curing time affected by the compressive strength and heavy metal leaching of solidified sludge. When the ratio of heavy metal sludge to binder and percentage of cement kiln dust used increased, compressive strength decreased and the leaching of heavy metal increased. When curing time increased, compressive strength increased and leaching of heavy metal decreased. All solidified sludge was within regulatory limits of TCLP test as specified in US.EPA 40 CFR part 261, and the Notification of the Ministry of Industry (B.E. 2548), and of compressive strength test as specified in the Notification of the Ministry of Industry (B.E. 2540). Among the solidification mixtures, the mixture at heavy metal sludge to binder ratio of 1 : 1 (by weight), and Portland cement to cement kiln dust ratio of 70 : 30 (by weight) was most suitable as it had the lowest cost of materials used at 4,778 baht in solidification of 1,000 kilogram sludge.

**KEY WORDS:** SOLIDIFICATION / CEMENT KILN DUST / HEAVY METAL SLUDGE / COMPRESSIVE STRENGTH / LEACHING

136 pp.

## สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย	2
1.3 กรอบแนวความคิด	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
1.5 นิยามศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย	4
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม	
2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	6
2.2 การบำบัดและกำจัด ของเสียอันตราย	10
2.2.1 การบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมี	10
2.2.2 การบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพ	10
2.2.3 การปรับเสถียรและการหล่อแข็ง	11
2.2.4 การเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง	11
2.2.5 การฝังกลบอย่างปลอดภัย	11
2.3 การปรับเสถียรและการหล่อแข็ง	11
2.4 กลไกของการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง	14
2.4.1 Microencapsulation	14
2.4.2 Macroencapsulation	14
2.4.3 Adsorption	14
2.4.4 Absorption	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.5 Precipitation	14
2.4.6 Detoxification	15
2.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	15
2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์	15
2.5.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	16
2.5.3 ปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ	17
2.6 ผงฝุ่นซีเมนต์	18
2.6.1 องค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นซีเมนต์	19
2.6.2 การนำผงฝุ่นซีเมนต์มาใช้ประโยชน์	20
2.7 กลไกการตรึงโลหะหนัก	22
2.8 การทดสอบหลังผ่านการหล่อแข็ง	23
2.8.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด	24
2.8.2 การทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก	24
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	
3.1 วิธีการวิจัย	40
3.2 เครื่องมือ สารเคมี และวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	40
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	40
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	42
3.2.3 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	42
3.3 การดำเนินการวิจัย	42
3.3.1 การเก็บตัวอย่างผงฝุ่นซีเมนต์	42
3.3.2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างกากตะกอนโลหะหนัก	42
3.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของผงฝุ่นซีเมนต์	43
3.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของกากตะกอนโลหะหนัก	43
3.3.5 การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้อัตราส่วนต่าง ๆ	43
3.3.6 การประเมินผลกากตะกอนหล่อแข็ง	44

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล	48
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	
4.1 ลักษณะสมบัติของผงฝุ่นซีเมนต์และกากตะกอนโลหะหนัก	49
4.1.1 ผงฝุ่นซีเมนต์	49
4.1.2 กากตะกอนโลหะหนัก	51
4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด	54
4.3 ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก	63
4.4 ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนัก	77
4.5 ค่าใช้จ่ายในการหล่อแข็ง	79
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย	81
5.1.1 ลักษณะสมบัติของผงฝุ่นซีเมนต์	81
5.1.2 ลักษณะสมบัติของกากตะกอนโลหะหนัก	81
5.1.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด	82
5.1.4 ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก	82
5.1.5 ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอน	83
5.1.6 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการหล่อแข็ง	83
5.2 ข้อเสนอแนะ	83
<b>บทสรุปแบบสมบูรณ์ภาษาไทย</b>	85
<b>บทสรุปแบบสมบูรณ์ภาษาอังกฤษ</b>	105
<b>รายการอ้างอิง</b>	125
<b>ภาคผนวก</b>	130
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	136

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สารพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	7
ตารางที่ 2.2 เทคนิคในการหล่อแข็งและรายละเอียดของวิธีการ	13
ตารางที่ 2.3 สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	16
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของผงปูนซีเมนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	20
ตารางที่ 2.5 ค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบด้วยวิธี TCLP	27
ตารางที่ 2.6 ค่ามาตรฐานของสารอันตรายประเภทสารอินทรีย์ สำหรับการทดสอบด้วยวิธี WET	29
ตารางที่ 2.7 ค่ามาตรฐานของสารอันตรายประเภทสารอนินทรีย์ สำหรับการทดสอบด้วยวิธี WET	30
ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบระหว่างวิธี TCLP และวิธี WET	31
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมต่างๆในกระบวนการหล่อแข็งกากตะกอน โลหะหนัก	46
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีประเภทออกไซด์ของผงปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	50
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ผงปูนซีเมนต์กับค่ามาตรฐานต่าง ๆ	50
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กากตะกอนโลหะหนัก กับค่ามาตรฐานต่าง ๆ	52
ตารางที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์ผงปูนซีเมนต์ที่ใช้ และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ	55
ตารางที่ 4.5 การชะละลายของโครเมียมที่อัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์ผงปูนซีเมนต์ที่ใช้ และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ	64
ตารางที่ 4.6 การชะละลายของสังกะสีที่อัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์ผงปูนซีเมนต์ที่ใช้ และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ	65
ตารางที่ 4.7 การชะละลายของนิกเกิลที่อัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์ผงปูนซีเมนต์ที่ใช้ และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ	66
ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอนที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	78
ตารางที่ 4.9 ราคาวัสดุต่างๆที่ใช้ในการหล่อแข็ง	79
ตารางที่ 4.10 ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการหล่อแข็งกากตะกอน โลหะหนัก 1,000 กิโลกรัม	80

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 กรอบแนวความคิด	3
รูปที่ 2.1 กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	8
รูปที่ 2.2 กระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ	10
รูปที่ 2.3 การปรับเสถียรและการหล่อแข็งโลหะหนักโดยปฏิกิริยาไฮเดรชันของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์	22
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	41
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP	45
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหล่อแข็ง	47
รูปที่ 4.1 (ก) ลักษณะของกากตะกอนโลหะหนักที่ยังไม่ได้ผ่านการตาก อบ และบด (ข) ลักษณะของกากตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการตาก อบ และบด	52 52
รูปที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานและเปอร์เซ็นต์การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ที่แตกต่างกัน	56
รูปที่ 4.3 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานและเปอร์เซ็นต์การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ที่แตกต่างกัน	57
รูปที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานและเปอร์เซ็นต์การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ที่แตกต่างกัน	58
รูปที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานและเปอร์เซ็นต์การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ที่แตกต่างกัน	59
รูปที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 และปริมาณการใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ 0-30%	60
รูปที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 และปริมาณการใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ 0-30%	61
รูปที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 และปริมาณการใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ 0-30%	62

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 การชะละลายของโครเมียม ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%	67
รูปที่ 4.10 การชะละลายของโครเมียม ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%	68
รูปที่ 4.11 การชะละลายของโครเมียม ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%	69
รูปที่ 4.12 การชะละลายของสังกะสี ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%	70
รูปที่ 4.13 การชะละลายของสังกะสี ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%	71
รูปที่ 4.14 การชะละลายของสังกะสี ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%	72
รูปที่ 4.15 การชะละลายของนิกเกิล ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%	73
รูปที่ 4.16 การชะละลายของนิกเกิล ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%	74
รูปที่ 4.17 การชะละลายของนิกเกิล ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%	75

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมที่ใช้โลหะหนักเป็นวัตถุดิบมีหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมชุบโลหะ เป็นต้น โลหะหนักจะอยู่ในรูปของกากตะกอน ซึ่งในการกำจัดกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักจะต้องมีการพิจารณาถึงปริมาณของสารที่ถูกชะละลายออกมา ซึ่งต้องมีปริมาณไม่มากเกินไปกว่าค่าที่กฎหมายกำหนดไว้ ของเสียอันตรายมีวิธีการบำบัดหลายวิธี เช่น การบำบัดทางกายภาพ เคมี ชีวภาพ เป็นต้น การเลือกวิธีการบำบัดของเสียควรเลือกให้เหมาะสมกับของเสียประเภทต่างๆซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของของเสียและลักษณะเฉพาะตัวของของเสียนั้น โดยทั่วไปกากตะกอนที่มีโลหะหนักในปริมาณที่สูงไม่สามารถทำการกำจัดด้วยการฝังกลบได้โดยตรง เพราะจะมีผลกระทบต่อ การปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำใต้ดิน (Singh and Pant, 2006) จึงต้องมีการบำบัดด้วยวิธีอื่นก่อนที่จะนำมากำจัดโดยการฝังกลบ

การปรับเสถียรและการหล่อแข็ง (stabilization and solidification) เป็นกลไกของการผสมกันระหว่างกากตะกอนและวัสดุประสานจนกลายเป็นก้อนหล่อแข็ง วัสดุประสานที่ใช้ เช่น ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ordinary Portland cement, OPC) เถ้าลอยติกไนต์ ผงฝุ่นซีเมนต์ (cement kiln dust, CKD) วัสดุปอซโซลานอื่นๆ และผลิตภัณฑ์ได้จากอุตสาหกรรมต่างๆ (Roy et al., 1992) โดยการปรับเสถียรและการหล่อแข็งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดของเสียอันตราย ก่อนที่จะนำไปทำการฝังกลบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการนำไปกำจัด มีความเหมาะสมในการบำบัดของเสียอันตรายประเภทสารอนินทรีย์ เช่น โลหะหนัก การปรับเสถียรและการหล่อแข็งด้วยวิธี cement - based เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเพราะเป็นการปรับเสถียรทางเคมีของของเสียอันตรายที่ปนเปื้อนและทำให้เป็นก้อนหล่อแข็ง ซึ่งของเสียอันตรายจะถูกทำให้อยู่ในรูปที่มีความคงตัว (Singh and Pant, 2006) ดังนั้นการหล่อแข็งจึงเป็นวิธีการจำกัดความสามารถในการละลายและเคลื่อนที่ของของเสียอันตราย โดยการใช่วัสดุประสานต่างๆ ซึ่งจะเป็นการลด

การแพร่กระจายของของเสียอันตรายออกสู่สิ่งแวดล้อม และยังช่วยในการลดพื้นที่ผิวของของเสีย การขนส่งเคลื่อนย้ายทำได้สะดวกและง่ายต่อการนำไปกำจัดโดยการฝังกลบอย่างปลอดภัย

ปัจจุบันได้มีการนำของเหลือจากภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรมมาใช้ในกระบวนการหล่อแข็งมากขึ้น เพราะนอกจากจะเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของก้อนหล่อแข็งแล้วยังเพื่อทดแทนปริมาณวัสดุประสาน เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากราคาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในกระบวนการหล่อแข็งมีราคาสูงขึ้นจึงได้มีการหาวัสดุทดแทนเพื่อที่จะลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง (ม.ล. วิจิตอัจฉรา สรรพกิจจานง และคณะ, 2545) ซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีและเป็นประโยชน์ในการใช้ของเหลือจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด ผงฝุ่นซีเมนต์เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ได้จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งผงฝุ่นซีเมนต์ มีคุณสมบัติทางเคมีที่คล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้ผงฝุ่นซีเมนต์มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ในการหล่อแข็งกากของเสีย โดยใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อเป็นวัสดุประสาน

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษากากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน และใช้กำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักเป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิผลในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก

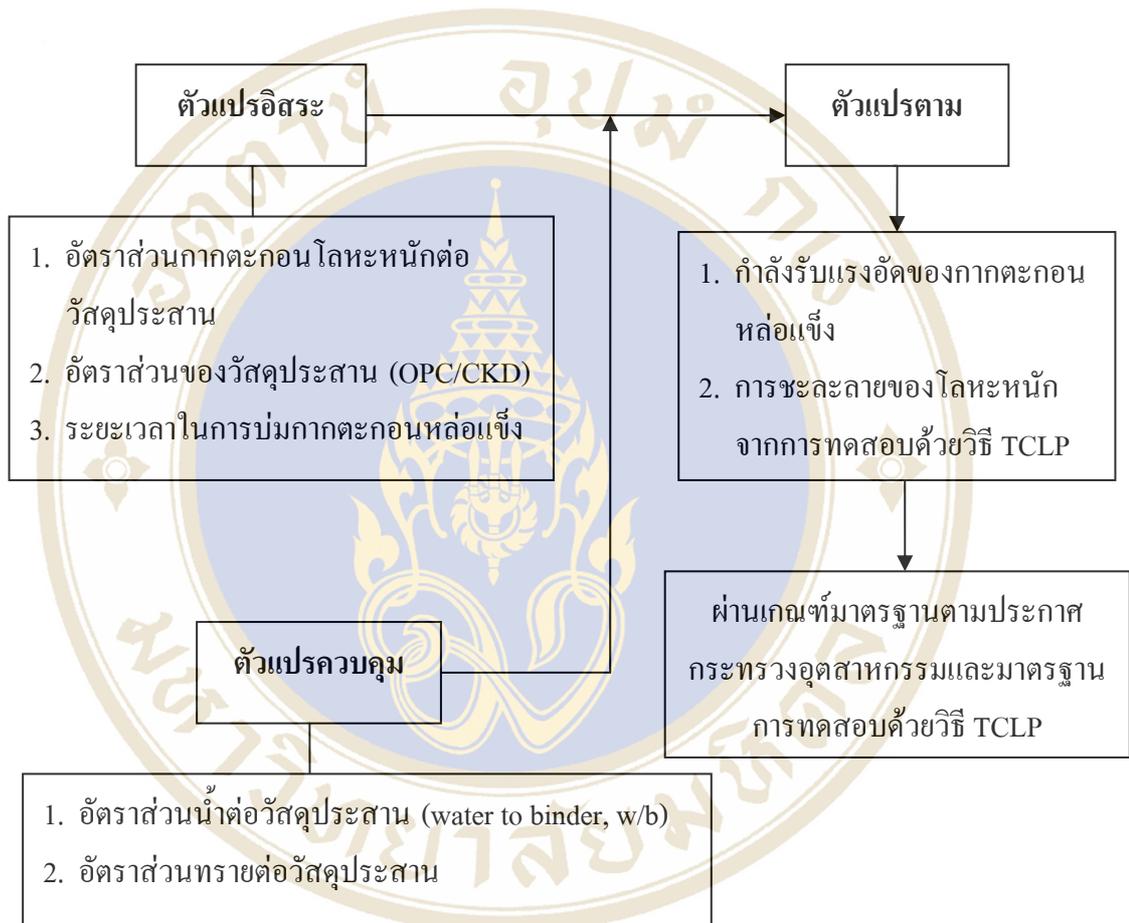
## 1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

1. ศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน
2. ประเมินประสิทธิผลของการหล่อแข็งโดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน
3. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนของวัสดุประสาน (OPC/CKD) ในการหล่อแข็ง

## 1.3 กรอบแนวความคิด

แนวคิดในการวิจัยครั้งนี้เป็นการนำกากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะมาบำบัดด้วยการหล่อแข็ง โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ซึ่งทำการแปรอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของ

วัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็ง จากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมและมีผลการทดสอบผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งสามารถนำกากตะกอนหล่อแข็งไปกำจัดโดยการฝังกลบได้อย่างปลอดภัย โดยกรอบแนวความคิดแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กรอบแนวความคิด

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ใช้กากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
2. โลหะหนักที่ทำการศึกษา คือ โครเมียม สังกะสี และนิกเกิล
3. ใช้กำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักเป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิผลในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก

4. การทดสอบกำลังรับแรงอัดจะใช้แบบหล่อขนาด 5×5×5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามมาตรฐานของ ASTM C 109
5. การบ่มกากตะกอนหล่อแข็งใช้วิธีการบ่มในน้ำ
6. การทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP จะประยุกต์การเขย่าสารสกัดในลักษณะหมุนรอบ (rotary agitating) ที่อัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที มาเป็นการใช้เครื่องเขย่าแบบไปมา (horizontal shaker) โดยใช้ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ในช่วงกว้างของการเขย่า 3 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง
7. ทำการแปรอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน แปรอัตราส่วนของวัสดุประสานคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์ และแปรระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งโดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานคงที่

### 1.5 นิยามศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่น โครเมียม สังกะสี นิกเกิล ตะกั่ว พรอท เป็นต้น (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2551)
2. การหล่อแข็ง หมายถึง กระบวนการที่มีการเติมวัสดุประสานลงไปผสมในกากตะกอนโลหะหนักและทำให้เป็นก้อนหล่อแข็ง (Means et al., 1995)
3. การปรับเสถียร หมายถึง การที่ของเสียถูกทำให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปทางเคมีที่คงตัวมากขึ้น ลดความเป็นพิษของกากของเสียเพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นสารเฉื่อยมากขึ้น ซึ่งก็หมายรวมถึงการหล่อแข็งด้วย (Means et al., 1995)
4. วัสดุประสาน หมายถึง วัสดุที่นำมาผสมในกระบวนการหล่อแข็ง มีคุณสมบัติในการยึดเกาะได้ดี ในงานวิจัยนี้หมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และผงฝุ่นซีเมนต์
5. ผงฝุ่นซีเมนต์เป็นผลิตภัณฑ์ได้จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ระหว่างการผลิตให้เป็นปูนเม็ด (clinker) โดยผงฝุ่นซีเมนต์จะถูกรวบรวมไว้ด้วยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitators, EP) ผงฝุ่นซีเมนต์มีลักษณะเป็นผงละเอียด มีความเป็นด่างสูงซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Siddique, 2006)
6. กากตะกอน หมายถึง กากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
7. กำลังรับแรงอัด หมายถึง ความสามารถของกากตะกอนหล่อแข็งตามมาตรฐานของ ASTM C 109 ซึ่งทดสอบโดยใช้แรงอัด มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

8. การชะละลายของโลหะหนัก หมายถึง ความเข้มข้นของน้ำชะละลายจากกากตะกอนหลอมแข็งที่ได้จากการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

#### 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. การใช้ผงปูนซีเมนต์ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในกระบวนการหลอมแข็งจะเป็นการช่วยลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
2. สามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้ได้ในการกำจัดกากตะกอนโลหะหนักประเภทอื่น และของเสียอันตรายจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ
3. เป็นการใช้ประโยชน์จากผลผลิตพลอยได้อย่างคุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด



## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการหล่อแข็งกาบตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ซึ่งวัตถุประสงค์ทั่วไปของการหล่อแข็งก็เพื่อตรึงโลหะหนักไว้ภายในก้อนหล่อแข็งและสามารถนำไปกำจัดโดยการฝังกลบได้อย่างปลอดภัย ซึ่งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ มีดังนี้

- 2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
- 2.2 การบำบัดและกำจัดของเสียอันตราย
- 2.3 การปรับเสถียรและการหล่อแข็ง
- 2.4 กลไกของการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง
- 2.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- 2.6 ผงฝุ่นซีเมนต์
- 2.7 กลไกการตรึงโลหะหนัก
- 2.8 การทดสอบหลังผ่านการหล่อแข็ง
- 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าคือกระบวนการที่ใช้ไฟฟ้าและสารเคมีทำให้ชิ้นงานที่เป็นโลหะหรือวัสดุอื่นมีผิวเคลือบเป็นโลหะอีกชนิดตามความต้องการ โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ชิ้นงานมีผิวที่สวยงามและคงทนต่อการสึกกร่อน ในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน คือ [Federation of Electroplating Industry Association (Japan), 2002: Online]

- (1) การเตรียมผิวชิ้นงานก่อนชุบ (Preparation)
- (2) การชุบรองพื้น (Post treatment)
- (3) การชุบชั้นสุดท้าย (Plating)
- (4) การกระทำหลังชุบ (Post treatment)

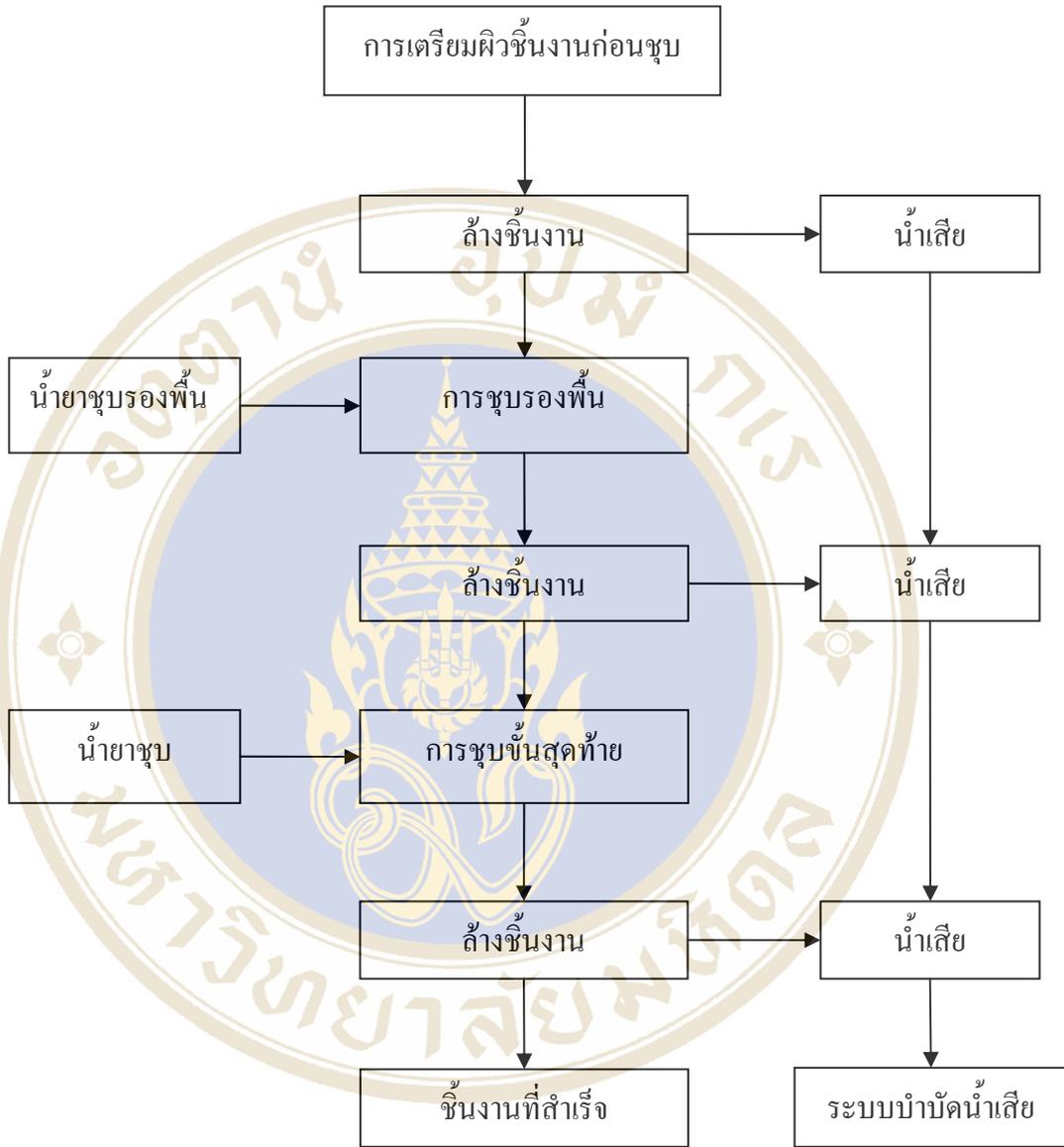
กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้ามีการใช้สารต่างๆและมีสารพิษที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนต่างๆ  
 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

กระบวนการ	ขั้นตอน	สารที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน	สารพิษที่เกิดขึ้น
1. การเตรียมผิวชิ้นงาน ก่อนชุบ	ขัดผิว ต้มล้างไขมัน  ล้างด้วยไฟฟ้า จุ่มกรดเพื่อกระตุ้นผิว	- ยาขัด กระดาษทราย - ต่าง เช่น โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียม ฟอสเฟต - โซยานาต์ - กรด เช่น กรดกำมะถัน กรดไนตริก กรดฟอสฟอริก	- ยาขัด - สารประเภทไขมัน โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมฟอสเฟต - สารประกอบโซยานาต์ - กรดกำมะถัน กรดไนตริก กรดฟอสฟอริก
2. การชุบรองพื้น	ชุบทองแดง หรือ ชุบนิกเกิล	- น้ำยาชุบทองแดง หรือ - น้ำยาชุบนิกเกิล	- โลหะหนักในรูปไอออน เช่น ทองแดง นิกเกิล
3. การชุบชั้นสุดท้าย	ชุบโครเมียม หรือ ชุบสังกะสี	- น้ำยาชุบโครเมียม หรือ - น้ำยาชุบสังกะสี	- โครเมียมในรูปกรดโครมิก - สังกะสี
4. การกระทำหลังชุบ	การเคลือบโครเมต	- น้ำยาเคลือบ	- กรดโครมิก

ที่มา: วลัยรัตน์ จันทรวงศ์, 2549: ออนไลน์

ในกระบวนการชุบโลหะ เช่น โครเมียม สังกะสี หรือทองแดงมีหลายขั้นตอน ซึ่งแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้กรด ต่าง และสารเคมีต่างๆในแต่ละขั้นตอนแตกต่างกัน หลังจากชุบโลหะแล้วมีการนำชิ้นงานที่ชุบแล้วไปล้างทำความสะอาด ดังนั้นน้ำเสียส่วนใหญ่มาจากกระบวนการชุบและล้างชิ้นงาน น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการชุบโลหะจะมีสารพิษเจือปนอยู่ จำเป็นที่จะต้องบำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ขั้นตอนต่างๆของกระบวนการชุบโลหะที่ทำให้เกิดน้ำเสีย แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

น้ำเสียที่มีคุณลักษณะทางเคมีต่างกันจะถูกแยกบำบัดโดยใช้วิธีการบำบัดทางเคมีที่แตกต่างกัน ดังนี้ (วัลย์รัตน์ จันทรวงศ์, 2549: ออนไลน์)

1. **ไซยาไนด์ (CN<sup>-</sup>)** ไซยาไนด์อยู่ในรูปที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตจำเป็นจะต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษน้อยลง คือ ไซยาเนต (CNO<sup>-</sup>) โดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) เปลี่ยน CN<sup>-</sup> ไปเป็น CNO<sup>-</sup> ก่อน แล้วทำปฏิกิริยาต่อไปเป็นก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>)

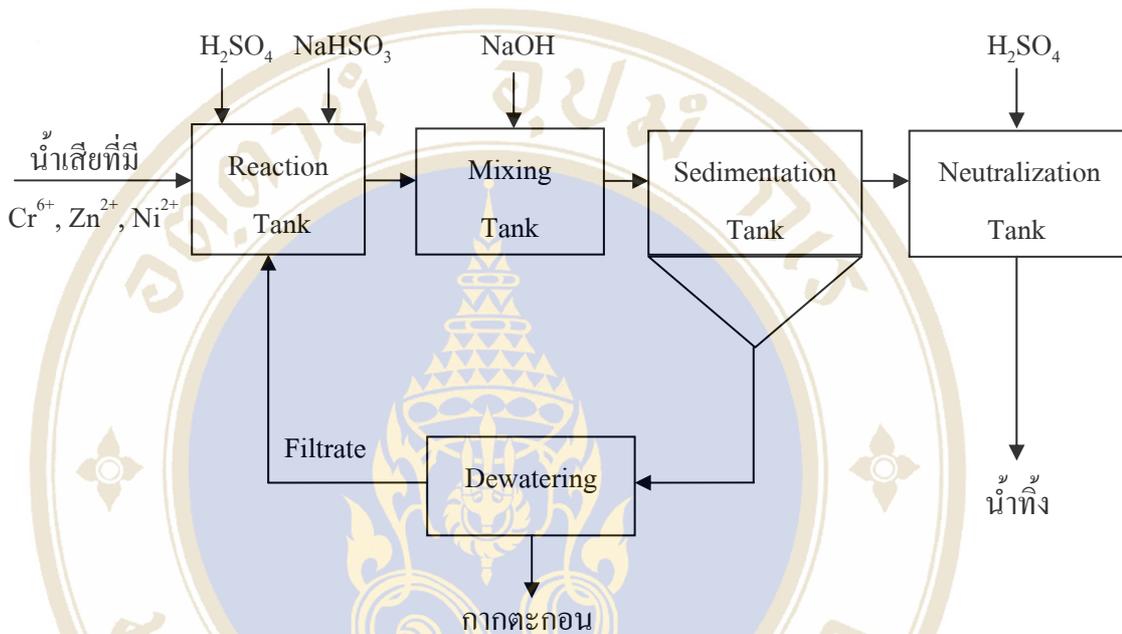
2. **เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม (Cr<sup>6+</sup>)** โครเมียมในน้ำที่ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของกรดโครมิก (H<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>) จากน้ำยาชุบโครเมียมหรือโซเดียมไดโครเมต (Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) ซึ่งโครเมียมที่อยู่ในรูป Cr<sup>6+</sup> (aq) ต้องเปลี่ยนให้เป็น Cr<sup>3+</sup> โดยใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO<sub>3</sub>) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) เปลี่ยน Cr<sup>6+</sup> ไปเป็น Cr<sup>3+</sup> แล้วกำจัด Cr<sup>3+</sup> ต่อไปโดยการตกตะกอนเป็น Cr(OH)<sub>3</sub>

3. **โลหะหนักอื่นๆ** โลหะหนักในน้ำที่มากจากการกัดผิวโลหะเพื่อกำจัดสนิมหรือกระตุ้นผิวก่อนการชุบหรือการขัดเงาชิ้นงานอลูมิเนียมด้วยโซดาไฟ โลหะหนักเหล่านี้ได้แก่ เหล็ก (Fe<sup>2+</sup>) ทองแดง (Cu<sup>2+</sup>) สังกะสี (Zn<sup>2+</sup>) นอกจากนี้ยังมีโลหะจากน้ำยาชุบโดยตรง ซึ่งเกิดจากการล้างชิ้นงานด้วยน้ำ ได้แก่ ทอง (Au<sup>3+</sup>) นิกเกิล (Ni<sup>2+</sup>) โครเมียม (Cr<sup>6+</sup>) โลหะหนักเหล่านี้จะถูกกำจัดด้วยการทำให้ตกตะกอนในรูปสารประกอบไฮดรอกไซด์ โดยใช้โซดาไฟ (NaOH) เป็นตัวทำให้ตกตะกอนซึ่งโลหะหนักแต่ละชนิดจะตกตะกอนที่ pH ต่างๆกัน

4. **กรดและด่าง** การกำจัดกรดและด่างจะทำหลังจากการกำจัดไซยาไนด์ เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม และโลหะหนักอื่นๆ โดยน้ำที่ผ่านการกำจัดไซยาไนด์ เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม และโลหะหนักอื่นๆ จะมี pH เป็นด่าง ซึ่งจะต้องทำการเติมกรดลงไปเพื่อปรับค่า pH ของน้ำให้เป็นกลาง (neutralization) ก่อนที่จะปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

ในการตกตะกอนโลหะหนักนอกจากจะตกตะกอนในรูปของไฮดรอกไซด์แล้ว ยังสามารถตกตะกอนในรูปซัลไฟด์ หรือคาร์บอเนตได้ด้วย (LaGrega, Buckingham and Evans, 1994)

ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นแบบ chemical treatment และกากตะกอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะที่ตกตะกอนโลหะหนักในรูปไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

## 2.2 การบำบัดและกำจัดของเสียอันตราย

การบำบัดและกำจัดของเสียอันตรายสามารถทำได้ 5 วิธีใหญ่ ๆ ดังนี้ [กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, (ม.ป.ป.): ออนไลน์]

### 2.2.1 การบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมี

การบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมีมีจุดประสงค์เพื่อทำให้ของเสียอันตรายลดความอันตรายลง เช่น ลดความเป็นพิษ มีความสามารถในการละลายต่ำ มีความคงตัวมากขึ้น

### 2.2.2 การบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพ

กระบวนการทางชีวภาพเป็นการกำจัดของเสียที่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์จะทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์และได้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ

ซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพนั้นมีทั้งกระบวนการแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดอยู่มาก เนื่องจากของเสียอันตรายจะยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์

### 2.2.3 การปรับเสถียรและการหล่อแข็ง

การปรับเสถียรและการหล่อแข็งเป็นการบำบัดขั้นกลางเพื่อเตรียมของเสียให้มีสภาพที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปกำจัด โดยวัตถุประสงค์ของการปรับเสถียรและการหล่อแข็งนั้นเพื่อลดความเป็นพิษของสาร ลดอัตราการเคลื่อนตัวของสาร ลดอัตราการละลาย (solubility) การชะละลายของสารอันตราย (leaching) ออกสู่สิ่งแวดล้อม ต้องทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการชะละลายของโลหะหนักก่อนนำไปทำการฝังกลบ

### 2.2.4 การเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง

การบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมีไม่สามารถทำลายของเสียอันตรายบางชนิดได้ จึงจำเป็นต้องทำการกำจัดโดยการนำมาเผาที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้ของเสียเปลี่ยนสภาพเป็นเถ้าแล้วนำเถ้านี้ไปฝังกลบต่อไป การเผาของเสียอันตรายต้องทำการเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,000 - 1,200°C วิธีการเผา นับเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดปริมาตรของของเสียได้อย่างมากและสามารถบำบัดได้ทั้งของเสียที่มีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการเผาของเสียที่ปะปนด้วยเชื้อโรคได้ด้วย

### 2.2.5 การฝังกลบอย่างปลอดภัย

ก่อนการฝังกลบต้องเปลี่ยนของเสียอันตรายให้อยู่ในสภาพที่มีความเป็นอันตรายน้อยลงหรือมีความคงตัวมากขึ้นซึ่งต้องผ่านการปรับเสถียรและการหล่อแข็งแล้วจึงนำไปทำการฝังกลบอย่างปลอดภัย ซึ่งการฝังกลบอย่างปลอดภัยจัดเป็นการกำจัดขั้นสุดท้าย ดังนั้นขั้นตอนในการฝังกลบจึงต้องทำด้วยความระมัดระวังอย่างยิ่งตั้งแต่การเลือกพื้นที่หลุมฝังกลบ การสร้างหลุมฝังกลบ การนำกากของเสียบรรจุลงหลุมฝังกลบ การปิดหลุมฝังกลบและการตรวจติดตามภายหลังการฝังกลบ

## 2.3 การปรับเสถียรและการหล่อแข็ง (Stabilization and Solidification)

การปรับเสถียรและการหล่อแข็งจะใช้อธิบายร่วมกันถึงกระบวนการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพเพื่อสะดวกต่อการขนส่งเคลื่อนย้าย ลดพื้นที่ผิวที่ของเสียสามารถที่จะชะละลายออกมา หรือการจำกัดความสามารถในการละลาย หรือลดความเป็นพิษของสารที่เป็นพิษ โดยการหล่อแข็งหมายถึง การที่มีการเติมวัสดุประสานลงไปในของเสียเพื่อทำให้เกิดเป็นก้อนหล่อแข็ง ซึ่งอาจจะเกิดหรือไม่เกิดพันธะทางเคมีระหว่างของเสียและวัสดุประสานก็ได้ ส่วนการปรับเสถียร หมายถึงการที่

ของเสียถูกทำให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปทางเคมีที่คงตัวมากขึ้นและลดความเป็นพิษของกากของเสีย เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นสารเนื้อเยื่อมากขึ้นซึ่งก็หมายรวมถึงการหล่อแข็งด้วย แต่จะหมายรวมเฉพาะ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เปลี่ยนสารที่มีพิษไปอยู่ในรูปใหม่ที่คงตัว ซึ่งเป็นการจำกัดความสามารถ ในการละลายหรือลดความเป็นพิษ ลักษณะทางกายภาพอาจจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ก็ได้โดยไม่ รวมถึงกระบวนการทางชีวภาพ (Means et al., 1995)

LaGrega, Buckingham และ Evans (1994) ได้ให้คำจำกัดความของคำว่า การปรับเสถียร และการหล่อแข็ง ไว้ดังนี้

**การปรับเสถียร (stabilization)** มีความหมายเหมือนกับคำว่า การตรึง (fixation) ซึ่งเป็นการ

1. ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของของเสียให้เหมาะสมในการเคลื่อนย้าย
2. การลดพื้นที่ผิวของของเสียเพื่อป้องกันหรือลดการสูญเสียสารมลพิษ
3. จำกัดความสามารถในการละลายของสารมลพิษที่อยู่ในของเสีย
4. การกำจัดสารพิษออกจากของเสีย

**ส่วนการหล่อแข็ง (solidification)** จะเป็นการ

1. เพิ่มกำลังรับแรงอัดหรือความแข็งแรงทนทาน
2. ลดความสามารถในการอัดตัว (compressibility)
3. ลดความสามารถในการซึมผ่านของของเสีย

ดังนั้น จุดประสงค์ของการปรับเสถียรและการหล่อแข็งคือการลดความเป็นพิษในของเสีย และลดความสามารถในการเคลื่อนย้ายของสารพิษ รวมถึงการปรับปรุงในด้านของคุณสมบัติ ทางวิศวกรรม (LaGrega, Buckingham and Evans, 1994) ซึ่งการบำบัดโดยการปรับเสถียรและการ หล่อแข็งไม่ได้เหมาะสมกับของเสียอันตรายทุกชนิด โดยทั่วไปเหมาะที่จะเป็นทางเลือกในการ บำบัดของเสียอันตรายที่เป็นสารอินทรีย์/สารระเหยได้เล็กน้อย หรือสารอินทรีย์ที่ไม่ระเหย (Means et al., 1995)

การปรับเสถียรและการหล่อแข็งด้วยวิธี cement - based เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง (Singh and Pant, 2006) โดยของเสียจะถูกผสมลงในซีเมนต์และปล่อยให้แห้งจนแข็งตัวเป็น ก้อนซีเมนต์ และเนื่องจากเนื้อซีเมนต์มีค่า pH สูง สามารถทำให้โลหะในรูปไอออนอิสระเปลี่ยนรูป เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ หรือ โลหะคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำทำให้ลดการถูกชะล้างได้ วิธีการนี้ ส่วนใหญ่ใช้กับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์มากกว่าของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ เนื่องจากของเสียที่เป็น สารอินทรีย์นั้นสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารที่เติมลงไปเพื่อช่วยในการแข็งตัวทำให้ของแข็งที่ได้มี ประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ยังทำให้ใช้เวลาในการแข็งตัวนานขึ้น

เทคนิคในการหล่อแข็งเพื่อการบำบัดของเสียมีหลายเทคนิค ซึ่งในแต่ละเทคนิคจะมีวิธีการที่แตกต่างกันเพื่อความเหมาะสมกับชนิดของวัสดุประสานและชนิดของของเสียที่ต้องการบำบัด ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เทคนิค ในการหล่อแข็งและรายละเอียดของวิธีการ

เทคนิคในการหล่อแข็ง	รายละเอียดของวิธีการ
1. Cement-based techniques	ของเสียจะถูกผสมลงในซีเมนต์ น้ำ และปล่อยให้แห้งจนแข็งตัวเป็นก้อนซีเมนต์
2. Lime-based techniques	ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาวและวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน เช่น ถ้ำลอยผงซีเมนต์ที่เตาเผา ซึ่งจะแข็งตัวได้เมื่อผสมกับน้ำ หลังผสมน้ำแล้วปล่อยให้แห้งตัว
3. Thermoplastic techniques	นำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมกระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น paraffin หรือ polyethylene แล้วปล่อยให้ส่วนผสมเย็นลงและแข็งตัว
4. Thermosetting techniques	ของเสียในขั้นแรกจะถูกผสมกับโพลีเมอร์ (gelling agent or urea formaldehyde) จากนั้นเติมสารแคลคาไลสต์ผสมให้เข้ากันก่อนที่สารโพลีเมอร์จะแข็งตัว
5. Encapsulation techniques	ของเสียจะถูกอัดตัวให้เกาะกันแน่นแล้วเคลือบผิวนอกของของเสียที่ถูกบดอัดด้วยสารเหนียว เช่น polyethylene หรือ organic resins
6. Self-cementing	สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซิลเฟต และแคลเซียมซิลไฟต์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียอุตสาหกรรมได้แก่ การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สามารถนำมาผสมกับตะกอนของเสีย เพื่อหล่อให้แข็งได้โดยวัสดุที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและมีความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้น้อย
7. Vitrification	สารที่เป็นอันตรายมาก เช่น กากสารกัมมันตภาพรังสี สามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็นส่วนผสมของแก้วได้ เพื่อป้องกันไม่ให้สารพิษถูกชะละลายด้วยน้ำ สามารถนำไปกำจัดต่อไปโดยไม่ต้องมีขบวนการห่อหุ้มอีกครั้ง

ที่มา: Shively, Bishop และ Brown, 1986

## 2.4 กลไกของการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง

กลไกของการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง อาศัยกลไกทางกายภาพและทางเคมีที่ส่งผลให้ของเสียนั้นถูกปกปิดหรือถูกยึดเกาะติดจนแน่นไม่สามารถหลุดออกมาได้ กลไกต่างๆอาจมีได้ดังต่อไปนี้ (LaGrega, Buckingham and Evans, 1994)

### 2.4.1 Microencapsulation

ของเสียนั้นจะอยู่ในแคปซูล และจะถูกบรรจุไว้ภายในโครงสร้างผลึกในระดับเล็กมากหรือเรียกว่าระดับ microscopic ของเสียนั้นถูกย่อยสลายจนได้ขนาดเล็กมาก ๆ

### 2.4.2 Macroencapsulation

ของเสียนั้นจะอยู่ในแคปซูล และจะถูกบรรจุไว้ภายในโครงสร้างในระดับที่ใหญ่กว่าของ microencapsulation พวกของเสียนั้นถูกบรรจุอยู่ในแคปซูลด้วยกลไกทางกายภาพ มีการแตกสลายในเชิงกายภาพ มีขนาดใหญ่แต่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อิสระ

### 2.4.3 Adsorption

Adsorption เป็นการดูดซับ การดูดแนบ หรือการดูดติดผิว บนพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นการดักทางกายภาพ มีการยึดเกาะกันแบบเคมีไฟฟ้า (electrochemical bond) โดยวัสดุหรือสารปรับเสถียรที่เกิดแรงยึดแบบ hydrogen bonding หรือแบบ van der Waal ทำให้การรั่วไหลหรือหลุดออกจากผิวของแข็งมีน้อยกว่าของ macroencapsulation และของ microencapsulation ซึ่งเป็นจุดเด่นของวิธีนี้

### 2.4.4 Absorption

Absorption เป็นการดูดซึมหรือการดูดกลืน ของเสียนั้นจะถูกดูดซึมเข้าไปภายในตัวดูดซึม คล้ายกับฟองน้ำดูดน้ำเข้าไป วิธีนี้จะใช้สารหรือตัวดูดซึมชนิดต่างๆ ทำการดูดของเหลวออกจากของเสียนั้น ทำให้ของเสียนั้นอยู่ในสภาพของแข็งมากขึ้น หรือเพิ่มค่าปริมาตรของแข็งมากขึ้น ตัวดูดซึมได้แก่ ดิน เถ้าลอย (fly ash) ผงฝุ่นซีเมนต์ (cement kiln dust) ผงฝุ่นปูนขาว (lime kiln dust) จีลีสาย หญาฟาง ฟางข้าว เป็นต้น ยังรวมไปถึง bentonite, kaolinite, vermiculite และ zeolite

### 2.4.5 Precipitation

การตกตะกอนผลึก หรือการนำของเสียนั้นซึ่งโดยมากเป็นของเสียนินทรีย์มาผสมร่วมกับสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนผลึก ถ้าอยู่ในสภาวะเหมาะสม เช่น มี pH ที่เหมาะสม ในที่นี้จะเกิดตะกอนผลึกอนินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ hydroxides, sulfides, silicates, carbonates, phosphates เป็นต้น โดยทั่วไปจะเป็นการกำจัดโลหะหนักด้วยการปรับ pH ให้สูงหรือให้เหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก ถ้าตะกอนผลึกนี้มี pH ลดลง เช่น ผสมกับกรดจะเกิดปัญหาของเสียนั้นหรือสารโลหะหนักละลายออกมาจากผลึก สร้างปัญหาให้สิ่งแวดล้อมต่อไป

### 2.4.6 Detoxification

การกำจัดสารพิษหรือความเป็นพิษออกจากของเสียอันตรายด้วยการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาเคมี เช่น ทำการเปลี่ยนจาก  $\text{Cr}^{6+}$  ซึ่งมีความเป็นพิษมาก ให้เป็น  $\text{Cr}^{3+}$  ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยลงในการเปลี่ยนจาก  $\text{Cr}^{6+}$  ให้เป็น  $\text{Cr}^{3+}$  อาจใช้ ferrous sulfate หรือ ferrous sulfate ร่วมกับ sodium sulfate

## 2.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นปูนไฮดรอลิก (hydraulic cement) เมื่อผสมกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสมจะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ พร้อมกับมีความร้อนเกิดขึ้น โดยที่ระยะเวลาการก่อตัว การแข็งตัว และปริมาณความร้อนจะขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของซีเมนต์ เมื่อใช้ซีเมนต์ผสมกับน้ำจะได้ซีเมนต์เพสต์ (cement paste) เมื่อนำทรายผสมเข้ากับซีเมนต์เพสต์ เราเรียกส่วนผสมนี้ว่า มอร์ตาร์ (mortar) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการผสมส่วนต่างๆ เช่น หินปูน (lime stone) หรือดินปูนขาว (marl) กับดินเหนียว (clay) หรือหินดินดาน (shale) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสารประกอบหลัก 4 ส่วนคือ

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate)  $3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ )
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate)  $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ )
3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate)  $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ )
4. เทตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium aluminoferrite)  $4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ )

สารประกอบแต่ละชนิดสามารถปรับปริมาณเพื่อทำให้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ ได้ตามความต้องการใช้งาน [สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), 2549 : ออนไลน์]

### 2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ (Chemical composition of Portland cement)

ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเมื่อวัตถุดิบต่างๆ ถูกเผาในเตาเผา ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. ออกไซด์หลัก ได้แก่  $\text{CaO}$  ,  $\text{SiO}_2$  ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ซึ่งรวมกันเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักซีเมนต์
2. ออกไซด์รอง ได้แก่  $\text{MgO}$  ,  $\text{Na}_2\text{O}$  ,  $\text{K}_2\text{O}$  ,  $\text{TiO}_2$  ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  และ ยิปซัม

สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารประกอบออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทออกไซด์	สารประกอบออกไซด์	ปริมาณ (%)
ออกไซด์หลัก	CaO	60-67
	SiO <sub>2</sub>	17-25
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-8
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5-6.0
ออกไซด์รอง	MgO	0.1-4.0
	Na <sub>2</sub> O	0.1-1.8
	K <sub>2</sub> O	0.1-1.8
	SO <sub>3</sub>	0.5-3.0

ที่มา: ปรินญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547

### 2.5.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปเป็นปูนซีเมนต์ที่นิยมใช้งานกันมากที่สุด สามารถจำแนกตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 15 ได้ 5 ประเภท คือ

#### 2.5.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง

##### (Type I Ordinary Portland cement)

จัดเป็นปูนซีเมนต์มาตรฐาน เหมาะกับงานก่อสร้างทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณสมบัติ นอกเหนือไปกว่าปกติ ส่วนใหญ่ใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ไม่เหมาะกับการที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟตที่มีความเข้มข้นสูง หรืองานที่ไม่ต้องการให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำมากจนเป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตเสียหาย

#### 2.5.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลงหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สอง

##### (Type II Modified Portland cement)

จัดเป็นปูนซีเมนต์ดัดแปลงเพื่อให้มีความต้านทานต่อซัลเฟตปานกลาง เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำต่ำ และค่อยๆ เพิ่มขึ้นในอัตราช้ากว่าปูนประเภทที่หนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถช่วยลดอุณหภูมิของคอนกรีตในอากาศร้อนได้ดี ปูนซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะกับการ

โครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น ตอม่อขนาดใหญ่ สะพานเทียบเรือ เขื่อนหรือกำแพงกันดิน รวมทั้งในบริเวณที่สัมผัสกับน้ำเค็มหรือน้ำทะเลเป็นครั้งคราว

### 2.5.2.3 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็วหรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่สาม

#### (Type III High-early strength Portland cement)

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทนี้จะมีเนื้อปูนละเอียดกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นผลทำให้แข็งตัวและรับแรงได้เร็วกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยปกติจะสามารถรับแรงที่อายุ 7 วัน เท่ากับที่อายุ 28 วัน ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นอกจากนี้ยังนิยมนำไปใช้กับงานที่ต้องถอดแบบเร็วๆ เช่น คอนกรีตสำเร็จรูปหรืองานซ่อมแซมถนนหรืออาคารต่างๆ เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างรวดเร็ว

### 2.5.2.4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำหรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่สี่

#### (Type IV Low-heat Portland cement)

เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่มีคุณสมบัติเหมาะกับงานซึ่งต้องการควบคุมทั้งปริมาณ และ อัตราความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตให้น้อยที่สุด ดังนั้นอัตราการเกิดกำลังของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะเป็นไปอย่างช้าๆ จึงนิยมใช้กับงานคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น เขื่อนกั้นน้ำ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ถ้ามากเกินไปจะเป็นอันตรายกับตัวโครงสร้างเขื่อน เนื่องจากจะทำให้เกิดขยายตัว เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิและทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวขึ้นได้

### 2.5.2.5 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ต้านทานซัลเฟตได้สูงหรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า (Type V Sulphate-resistance Portland cement)

เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่มีคุณสมบัติในการต้านทานซัลเฟตสูงจึงเหมาะกับงานก่อสร้างในบริเวณดินหรือน้ำที่มีส่วนประกอบของซัลเฟตเข้มข้นสูง

### 2.5.3 ปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำจะเริ่มขึ้น เรียกปฏิกริยานี้ว่า ไฮเดรชัน (hydration) ผลที่ได้จากปฏิกริยาไฮเดรชัน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

( $3 \text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  หรือ C-S-H) และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] ดังสมการ



ปฏิกิริยาตามสมการ ที่ (1) และ (2) ยังไม่สิ้นสุด หากส่วนผสมของปูนซีเมนต์มีสารปอซโซลานผสมอยู่ โดยสารปอซโซลานมีองค์ประกอบทางเคมี คือ ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซึ่งจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับค่า คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ [Ca(OH)<sub>2</sub>] ดังสมการที่ (3) และ (4)

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และสารปอซโซลาน มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)



ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction)



ผลที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (3) คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และที่ได้จากปฏิกิริยาในสมการที่ (4) คือ แคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C-A-H) โดยทั้ง C-S-H และ C-A-H จะทำให้กำลังอัดคอนกรีตหรือปูนซีเมนต์สูงขึ้นและลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง (ม.ล. วิจิตต์อักษร สรรพกิจงานง และคณะ, 2545)

## 2.6 ผงฝุ่นซีเมนต์ (Cement kiln dust)

ผงฝุ่นซีเมนต์เป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ระหว่างการผลิตให้เป็นปูนเม็ด โดยที่ผงฝุ่นซีเมนต์จะถูกรวบรวมไว้ด้วยเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitators) ผงฝุ่นซีเมนต์มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีเทา มีความเป็นด่างสูง และมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้องค์ประกอบในผงฝุ่นซีเมนต์ยังมีพวกโลหะ เช่น แคลเซียม ตะกั่ว ซิลิเนียม แต่พบว่ามีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.05% โดยน้ำหนัก (Siddique, 2006) ผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบสำคัญของหินปูน แข็งตัวได้เมื่อผสมกับน้ำ มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน และมีองค์ประกอบทางเคมี คือ alkali, chloride และ sulfate สูง ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาในการทำงานของเตาเผาและการผลิตปูนซีเมนต์ (Wang, Shah and Mishulovich, 2004) ได้มีการนำผงฝุ่นซีเมนต์กลับมาใช้อีกครั้งโดยนำมาเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งการนำผงฝุ่นซีเมนต์มาใช้อีกครั้งจะขึ้นอยู่กับ

1. องค์ประกอบต่างๆ ของผงฝุ่นซีเมนต์ เช่น alkalies, sulfur และ chlorine
2. เทคโนโลยีในการนำผงฝุ่นซีเมนต์กลับมาใช้ใหม่
3. ชนิดของปูนซีเมนต์ที่จะผลิต

ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจวัดองค์ประกอบต่างๆในปูนซีเมนต์ เช่น ระดับ alkali โดยมีการจำกัดระดับ alkali อยู่ที่ 0.6% ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งถ้าในปูนซีเมนต์มี alkali สูงจะเป็นปูนคุณภาพต่ำ ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานเพราะ alkali จะไปทำปฏิกิริยากับมวลรวมต่าง ๆ ของคอนกรีต ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว เช่นเดียวกับ chlorine สามารถทำปฏิกิริยากับ alkalis เกิดเป็น alkali chlorides ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างของคอนกรีต ส่วนซัลเฟอร์ซึ่งอยู่ในรูปของซัลเฟตจะสามารถลดคุณภาพของโครงสร้าง โดยทำให้โครงสร้างของคอนกรีตเสียหายได้เช่นกัน (US.EPA, 1993: Online)

ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุประสานจะถูกหน่วงปฏิกิริยาโดยโลหะหนัก ทำให้การก่อตัวและการแข็งตัวของก้อนหล่อแข็งช้าลง แต่สามารถปรับปรุงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้มีความเหมาะสมในการหล่อแข็งได้ โดยทำการผสมร่วมกับเถ้าลอย (fly ash) ปูนขาว (lime) slag ดินเหนียว (clay) หรือผงฝุ่นซีเมนต์ (cement kiln dust) เป็นต้น ซึ่งการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับผงฝุ่นซีเมนต์ในการหล่อแข็งนั้น ความเป็นต่างใน ผงฝุ่นซีเมนต์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเร็วขึ้น เป็นผลทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เร็วขึ้นและยังเพิ่มกำลังรับแรงอัดในช่วงแรก (Park, 2000)

### 2.6.1 องค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นซีเมนต์

ผงฝุ่นซีเมนต์มีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ประกอบด้วย calcium oxide, silica, alumina และ ferric oxide ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของผงปูนซีเมนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Parameter	Cement kiln dust (%) <sup>1</sup>	Cement kiln dust (%) <sup>2</sup>	Cement kiln dust (%) <sup>3</sup>	Cement kiln dust (%) <sup>4</sup>	Cement kiln dust (%) <sup>5</sup>	Portland cement (%) <sup>6</sup>
CaO	10-50	49.75	63.8	56.0	42.99	60-67
SiO <sub>2</sub>	1-17	11.95	15.8	11.5	13.37	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<12	1.12	3.6	4.38	3.36	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<5	2.45	2.8	2.04	2.29	0.5-6.0
MgO	<1.0	1.86	1.9	1.34	1.90	0.1-4.0
Na <sub>2</sub> O	<5	3.87	0.3	1.02	3.32	0.1-1.8
K <sub>2</sub> O	1-20	2.66	3.0	5.86	3.32	0.1-1.8
SO <sub>3</sub>	1-12	6.35	1.7	16.7	5.10	0.5-3.0
Cl <sup>-</sup>	-	6.80	1.1	0.73	7.50	-
LOI.(105 °C)	-	17.92	-	6.00	15.96	0.1-3.0

- ที่มา: <sup>1</sup> Cockburn cement Limited, 2005: Online  
<sup>2</sup> Shoaib, Balaha และ Abdel-Rahman, 2000  
<sup>3</sup> Al-Harthy, Taha และ Al-Maamary, 2003  
<sup>4</sup> Wang, Shah และ Mishulovich, 2004  
<sup>5</sup> El-Aleem และคณะ, 2005  
<sup>6</sup> ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547

### 2.6.2 การนำผงปูนซีเมนต์มาใช้ประโยชน์

การใช้ประโยชน์จากผงปูนซีเมนต์ ได้มีการนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งในงานด้านต่างๆ แต่วิธีที่ดีที่สุดคือการนำผงปูนซีเมนต์กลับมาเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้แล้วยังได้มีการนำผงปูนซีเมนต์มาใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ (Siddique, 2006) คือใช้แทนปูนขาวในการปรับสภาพดินจากการทำการเกษตรให้มีสภาพเป็นกลาง (Al-Harthy, Taha and Al-Maamary, 2003) ใช้ปรับสภาพดินก่อนการสร้างถนน ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในการก่อสร้าง ใช้บำบัดของเสียและอื่นๆ เป็นต้น ในการใช้ผงปูนซีเมนต์บำบัดของเสียแสดงถึงคุณสมบัติของผงปูนซีเมนต์ในการดูดซึมของเสีย และความเป็นด่างของผงปูนซีเมนต์ยังสามารถลดปริมาณความชื้นของของเสียได้

คุณสมบัติต่างๆของผงฝุ่นซีเมนต์ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ กระบวนการผลิต และการใช้เชื้อเพลิงในการผลิต (El-Aleem et al., 2005) การใช้ประโยชน์ของผงฝุ่นซีเมนต์มีดังต่อไปนี้ (Siddique, 2006)

1. **การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ในการปรับสภาพดิน (Soil stabilization)** ผงฝุ่นซีเมนต์สามารถใช้ในการปรับสภาพดิน ซึ่งถือเป็นทางเลือกอีกทางนอกจากการใช้ปูนขาว ในบางครั้งได้มีการนำผงฝุ่นซีเมนต์มาใช้ในการปรับสภาพดินก่อนการสร้างถนน ผงฝุ่นซีเมนต์ไม่เพียงแต่จะช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงของดิน แต่ผงฝุ่นซีเมนต์ยังลดขั้นตอน ราคา และระยะเวลาในการทำงานลงได้เมื่อเทียบกับการใช้ปูนขาว ปูนซีเมนต์ก็มีการใช้ในการปรับสภาพดินเพื่อที่จะทำการสร้างถนน แต่ผงฝุ่นซีเมนต์เป็นทางเลือกใหม่แทนการใช้ปูนซีเมนต์ เพราะปูนซีเมนต์มีราคาแพงกว่าผงฝุ่นซีเมนต์ ในสหรัฐอเมริกาประมาณ 10% ของผงฝุ่นซีเมนต์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการปรับสภาพดินก่อนการสร้างถนน

2. **ใช้ในการบำบัดของเสีย (Waste treatment)** ผงฝุ่นซีเมนต์มีการนำมาใช้ในการปรับเสถียรและการหล่อแข็งของเสียได้ โดยผงฝุ่นซีเมนต์มีคุณสมบัติในการดูดซึม (absorption) รวมทั้งมีสภาพที่เป็นด่าง ซึ่งมีผลต่อการบำบัดของเสีย นอกจากนั้นยังมีราคาถูก จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดของเสีย โดยการใช้ผงฝุ่นซีเมนต์แทนปูนซีเมนต์และปูนขาว ผงฝุ่นซีเมนต์มีการนำไปบำบัดของเสียหลายประเภท เช่น ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียจากชุมชน และกากตะกอนน้ำมัน ซึ่งผงฝุ่นซีเมนต์มีประสิทธิภาพทำให้เกิดการเสถียรได้

3. **การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์แทนปูนซีเมนต์ (Cement replacement)** มีการนำผงฝุ่นซีเมนต์มาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการก่อสร้างและยังใช้ในงานคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามการใช้ผงฝุ่นซีเมนต์แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังเป็นปัญหาในเรื่องของการทนแรงอัด และอาจเพิ่มความเสี่ยงในเรื่องของการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุประสานที่มีสภาพเป็นด่าง

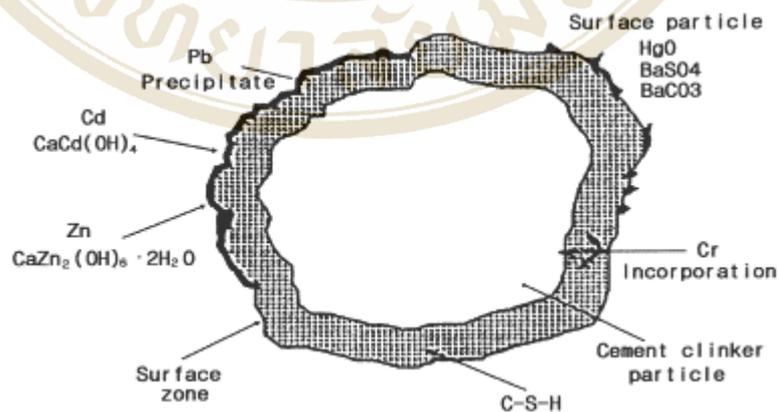
4. **การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์เป็นส่วนผสมในแอสฟัลท์เพื่อลาดถนน (Highway uses)** การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์เป็นส่วนผสมทำให้สามารถลดปริมาณแอสฟัลท์ซีเมนต์ที่ใช้ในการลาดถนนได้ถึง 15-25% โดยปริมาตร ซึ่งผงฝุ่นซีเมนต์สามารถต้านทานการหลุดลอกของพื้นผิวถนนที่ทำการลาดได้

## 2.7 กลไกการตรึงโลหะหนัก

ไอออนของโลหะจะตรึงในซีเมนต์ ซึ่งอาจเกิดจาก (1) ถูกจับในซีเมนต์ ในรูปออกไซด์เดี่ยว หรือออกไซด์รวม (2) ถูกดูดซับที่ผิว หรือ (3) เกิดการผสมเข้าภายในเนื้อซีเมนต์ (Karamalidis and Voudrias, 2007)

Gougar, Scheetz และ Roy (1996) ศึกษาการทบทวนวรรณกรรมในขั้นตอนการเกิดเอททริงไกท์ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในกระบวนการตรึงไอออนของของเสีย กลไกในการตรึงที่เกิดขึ้นกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ประกอบด้วย การดูดซับที่ผิว การผสมกัน และการแทนที่ ถ้าไอออนของของเสียถูกผสมกับซีเมนต์และน้ำ มีความเป็นไปได้ที่ไอออนจะเข้าไปผสมรวมระหว่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาของไอออนของของเสียที่เกิดขึ้นภายใน โครงสร้างของซีเมนต์มีหลายแบบ เช่น การดูดซับทางเคมี การตกตะกอน การเกิดสารประกอบบนผิวของซีเมนต์ หรือการผสมรวมเข้าไปอยู่ภายใน โครงสร้างของซีเมนต์ หรืออาจเกิดขึ้นหลายๆแบบพร้อมกันได้

Conner (1990) ได้สรุปถึงกลไกการปรับเสถียรและการหล่อแข็งของโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าตะกั่ว (Pb) จะตกตะกอนบนผิวของไฮเดรต (ผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน) โครเมียม (Cr) จะผสมเข้าอยู่ในไฮเดรต โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) แคดเมียม (Cd) จะเข้าไปอยู่ใน Portlandite  $[Ca(OH)_2]$  ทำให้แคดเมียมเข้าไปแทนที่แคลเซียมและเกิดเป็น  $CdCa(OH)_4$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ผลของการปรับเสถียรและการหล่อแข็งโลหะหนัก ขึ้นกับปริมาณไฮเดรตที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.3 การปรับเสถียรและการหล่อแข็งโลหะหนักโดยปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ที่มา: Conner, 1990

Lin, Chen และ Lin (1996) ได้ศึกษาการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง โครเมียมโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ $\beta$ - $C_2S$  โดยใช้เทคนิค  $^{29}Si$  Solid State Magic Angle Spinning/Nuclear Magnetic Resonance ( $^{29}Si$  MAS/NMR) และ X-ray diffraction (XRD) ในการวิเคราะห์ พบว่าโครเมียมจะเข้าไปอยู่ใน  $\beta$ - $C_2S$  paste และผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ได้ง่าย โดยอยู่ในรูป  $\beta$ -Calcium chromium oxide hydrate ( $\beta$ - $CaCrO_4 \cdot 2H_2O$ ) ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของโครเมียมกับ  $\beta$ - $C_2S$  และอยู่ในรูป Calcium chromium oxide hydrate ( $CaCrO_4 \cdot 2H_2O$ ) ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของโครเมียมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้เห็นว่าโครเมียมเข้าไปแทนที่ซิลิกอนในผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงทำให้  $Cr^{3+}$  เสถียรและเป็นก้อนแข็งด้วยกลไกเช่นนี้

Ziegler, Giere และ Johnson (2001) ได้ศึกษาการดูดซับสังกะสี (Zn) ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ผลการศึกษาพบว่า สังกะสีจะเข้าไปอยู่ในอนุภาคของ C-S-H ด้วยกลไก (1) การเข้าไปอยู่ใน interlayer ของ C-S-H หรือ (2) การดูดซับบนผิวของผลึก มากที่สุด ส่วน Qian, Sun และ Tay (2003) ได้ศึกษาการเติมสังกะสี ที่ความเข้มข้น 0, 0.1, 0.5 และ 2% เข้าไปใน alkali-activated slag ซึ่งใช้เป็นวัสดุประสาน ผลการศึกษาพบว่า การเติมสังกะสีที่ความเข้มข้นต่ำ (0.1 และ 0.5%) จะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดเล็กน้อย แต่การเติมสังกะสีที่ความเข้มข้น 2% จะเกิดการหน่วงปฏิกิริยาอย่างมาก และเกิดการชะละลายของสังกะสีสูงกว่ามาตรฐานกำหนด หนึ่งกลไกในการตรึงโลหะมีผลต่อการลดการเคลื่อนที่ของไอออนของสังกะสี ที่ถูกเติมเข้าไปใน alkali-activated slag ซึ่งได้แก่ (1) การเกิด zinc silicate gel ที่ไม่ละลาย (2) การเกิดตะกอน calcium zincate ที่ไม่ละลาย และ (3) การเกิดการผสมรวมของไอออนของสังกะสีเข้าไปใน C-S-H ทั้งนี้ขึ้นกับความเข้มข้นของสังกะสีที่เติมเข้าไปใน alkali-activated slag ด้วย

Komarneni และ Roy, 1987 (อ้างถึงใน Gougar, Scheetz และ Roy, 1996) ศึกษาพบว่า นิกเกิลจะเข้าไปแทนที่แคลเซียมที่ผิวของ C-S-H และ Atkins และคณะ, 1993 (อ้างถึงใน Gougar, Scheetz และ Roy, 1996) ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาต่อกันระหว่างซีเมนต์กับนิกเกิล ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction แสดงให้เห็นว่านิกเกิลอยู่ในรูป  $Ni(OH)_2$  gel ซึ่งผสมอยู่กับ C-S-H phase

## 2.8 การทดสอบหลังผ่านการหล่อแข็ง

การทดสอบหลังผ่านการหล่อแข็งเป็นการทดสอบตามวัตถุประสงค์ของการปรับเสถียรและการหล่อแข็งคือเพื่อปรับปรุงให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมั่นคง จำกัดความสามารถในการละลายของสารอันตรายที่อยู่ในของเสีย ลดพื้นที่ผิวของของเสีย และเพิ่มกำลังรับแรงอัดหรือความแข็งแรง

ทนทาน ผลที่ได้จากการทดสอบหลังผ่านการหล่อแข็งจะสามารถประเมินประสิทธิภาพที่ได้จากการปรับเสถียรและการหล่อแข็งกากตะกอน โลหะหนัก

### 2.8.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การใช้การทดสอบกำลังรับแรงอัดเพื่อประเมินถึงประสิทธิภาพของการปรับเสถียรและการหล่อแข็งนั้นมีการใช้อย่างกว้างขวาง โดยวัสดุที่ถูกทำให้เสถียรและหล่อแข็งจะต้องมีกำลังรับแรงอัดที่เหมาะสมโดยสามารถรับน้ำหนักที่กดทับได้ ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดจะมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการปรับเสถียรของของเสียประเภทสารอนินทรีย์ เนื่องจากถูกจับอยู่ในผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การทดสอบกำลังรับแรงอัดยังมีข้อดีอื่น ๆ อีกมากมายในการประเมินผลที่ได้จากการปรับเสถียร เช่น การทดสอบทำได้รวดเร็วและเครื่องมือที่ใช้ทดสอบหาได้ง่าย การทดสอบกำลังรับแรงอัดเป็นการชี้วัดถึงความทนทานหรือเปราะบางของวัสดุที่ถูกทำให้เสถียร โดยทั่วไปไม่ว่าจะใช้สารเคมีใดในการปรับเสถียร เมื่อกำลังรับแรงอัดของของเสียอันตรายที่ถูกทำให้เสถียรเพิ่มขึ้นจะทำให้กระบวนการปรับเสถียรมีประสิทธิผลมากขึ้น โดยเฉพาะกับสารปนเปื้อนที่เป็นสารอนินทรีย์ ดังนั้นกำลังรับแรงอัดจึงใช้เป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิภาพที่ได้จากการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง (LaGrega, Buckingham and Evans, 1994) โดยใช้มาตรฐานการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามภาคผนวกที่ 2 ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งกำหนดลักษณะของของเสียที่ผ่านการปรับเสถียรและหล่อแข็งแล้วจะต้องมีความสามารถรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบได้อย่างปลอดภัย (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6, 2540)

### 2.8.2 การทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก

วิธีการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักหลายวิธีได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อเลียนแบบกระบวนการชะละลายของของเสียอันตรายภายในหลุมฝังกลบหรือการกำจัดแบบอื่นๆ เพื่อที่จะประเมินถึงความเสี่ยงที่มีต่อสุขภาพมนุษย์และ/หรือน้ำใต้ดิน โดยจุดประสงค์พื้นฐานของการทดสอบการชะละลายเพื่อ (Townsend, Jang and Tolaymat, 2003: Online)

- (1) แยกประเภทของของเสียว่าเป็นของเสียอันตราย หรือ ไม่นับอันตราย ตามกฎหมายกำหนด
- (2) เลียนแบบสภาวะของของเสียหรือสภาพพื้นที่ที่มีการชะละลาย เพื่อที่จะประเมินถึงความเป็นไปได้ในการเกิดการชะละลาย
- (3) เป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพในการบำบัดของเสีย เป็นต้น

### 2.8.2.1 การทดสอบด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

TCLP เป็นวิธีการทดสอบการชะละลายวิธีหนึ่ง ถูกนำมาใช้เมื่อ 7 พฤศจิกายน ค.ศ.1986 โดยนำมาใช้แทนวิธี Extraction Procedure Toxicity Characteristics (EP Tox) วิธี TCLP ถูกใช้อย่างกว้างขวาง (LaGrega, Buckingham and Evans, 1994) ค่าที่ได้จากวิธี TCLP (มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร) นำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนดเพื่อประเมินถึงประสิทธิผลที่ได้จากการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง การทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก ด้วยวิธี TCLP method 1311 (US.EPA, 1992: Online) มีขั้นตอนดังนี้

1. สำหรับของเสียที่มีปริมาณของแข็งน้อยกว่า 0.5% ให้กรองของเหลวออกจากของแข็งด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (glass fiber filter) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6-0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์

2. สำหรับของเสียที่มีของแข็งมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5% ให้กรองของเหลวออกจากของแข็งแล้วนำของเหลวไปวิเคราะห์ ส่วนของแข็งทำการบดให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ใหญ่กว่า 9.5 มิลลิเมตร แล้วนำมาทดสอบเพื่อเลือกสารสกัด โดย

**สารสกัดชนิดที่ 1** เป็นสารที่เตรียมจาก 5.7 มิลลิลิตร ของกรดอะซิติกเข้มข้นผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 11.4 มิลลิลิตร กับ 64.3 มิลลิลิตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล ผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 128.6 มิลลิลิตร นำสารทั้งสองผสมเข้าด้วยกันและทำให้เจือจางโดยการเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตร คนจนกระทั่งค่า pH คงที่ ทำการตรวจสอบ pH หาก pH สูงกว่า  $4.93 \pm 0.05$  ให้เติมกรดอะซิติกเข้มข้น หาก pH ต่ำกว่า  $4.93 \pm 0.05$  ให้เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล สารสกัดชนิดที่ 1 เมื่อเตรียมเสร็จแล้วหากยังไม่ได้ใช้งานจะต้องเก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิดและจะต้องใช้ภายในเวลา 48 ชั่วโมง

**สารสกัดชนิดที่ 2** เป็นสารสกัดที่ได้จากการนำ 5.7 มิลลิลิตรของกรดอะซิติกเข้มข้น ผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 11.4 มิลลิลิตร และทำให้เจือจางโดยการเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร ทำการตรวจสอบ pH หากสูงกว่า  $2.88 \pm 0.05$  ให้เติมกรดอะซิติกเข้มข้น หาก pH ต่ำกว่า  $2.88 \pm 0.05$  ให้เติมน้ำกลั่น สารสกัดชนิดที่ 2 เมื่อเตรียมเสร็จแล้วหากยังไม่ได้ใช้งานจะต้องเก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิดและจะต้องใช้ภายใน 48 ชั่วโมง

3. ในการเลือกสารสกัด ให้นำของแข็งจำนวน 5 กรัม ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่มากกว่า 9.5 มิลลิเมตร ผสมน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 5 นาที ถ้า pH น้อยกว่า 5 ให้ใช้สารสกัดชนิดที่ 1 แต่ถ้า pH มากกว่า 5 ให้เติม 3.5 มิลลิลิตรของกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล แล้วให้ความร้อน  $50^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 นาที เมื่อทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้ว pH น้อยกว่า 5 ให้ใช้สารสกัดชนิดที่ 1 ถ้า pH มากกว่า 5 ให้ใช้สารสกัดชนิดที่ 2 สำหรับของเสียที่เป็นสารระเหยได้ ใช้สารสกัดชนิดที่ 1 เท่านั้น

4. นำตัวอย่างมาปริมาณหนึ่งและใช้สารสกัดในปริมาณ 20 เท่าของน้ำหนักตัวอย่าง ถ้ามีสารระเหยง่ายต้องใช้ภาชนะบรรจุพิเศษ นำตัวอย่างที่ใส่สารสกัดแล้วมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุนรอบ (rotary agitator) อัตรา  $30 \pm 2$  รอบต่อนาที เป็นเวลา  $18 \pm 2$  ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างมากรองแยกของเหลวออกจากของแข็งด้วยกระดาษกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 - 0.8 ไมครอน นำของเหลวที่ผ่านการกรองไปทำการย่อยด้วยกรด จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักต่อไป

ค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบด้วยวิธี TCLP ต้องมีสารอันตรายในน้ำ  
ชะละลายน้อยกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบด้วยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด

สารอันตราย	ค่ามาตรฐาน (มก./ล.)	สารอันตราย	ค่ามาตรฐาน (มก./ล.)
Arsenic	5.0	Hexachlorobenzene	0.13
Barium	100.0	Hexachlorobutadiene	0.5
Benzene	0.5	Hexachloroethane	3.0
Cadmium	1.0	Lead	5.0
Carbon tetrachloride	0.5	Lindane	0.4
Chlordane	0.03	Mercury	0.2
Chlorobenzene	100.0	Methoxychlor	10.0
Chloroform	6.0	Methyl ethyl ketone	200.0
Chromium	5.0	Nitrobenzene	2.0
O – Cresol	200.0	Pentachlorophenol	100.0
m – Cresol	200.0	Pyridine	5.0
p – Cresol	200.0	Selenium	1.0
Cresol	200.0	Silver	5.0
2,4 – D*	10.0	Tetrachloroethylene	0.7
1,4 – Dichlorobenzene	7.5	Toxaphene	0.5
1,2 – Dichloroethane	0.5	Trichloroethylene	0.5
1,1 – Dichloroethylene	0.7	2,4,5 – Trichlorophenol	400.0
2,4 – Dinitrotoluene	0.13	2,4,6 - Trichlorophenol	2.0
Endrin	0.02	2,4,5 – TP (Silvex)**	1.0
Heptachlor	0.008	Vinyl chloride	0.2

ที่มา: Environment, Health and Safety Online, (n.d.): Online

หมายเหตุ: \* Dichlorophenol compound

\*\* Trichlorophenol compound

### 2.8.2.2 การทดสอบด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

วิธีการทดสอบการชะละลายอีกวิธีหนึ่ง ได้แก่ วิธี WET ซึ่งผลการทดสอบด้วยวิธี WET จะนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า Soluble Threshold Limit Concentrations (STLC) สารละลายที่ใช้ในวิธี WET ถูกออกแบบมาให้ใช้เพื่อเลียนแบบการชะละลายภายในหลุมฝังกลบ วิธีนี้จะรายงานผลในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร (California Integrated Waste Management Board, 1998: Online) การทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี WET มีขั้นตอนดังนี้ (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

1. นำตัวอย่างสารที่มีของเสียอันตรายปนอยู่มาทำการบดให้เป็นก้อนขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร
2. นำก้อนขนาดเล็กที่ได้ไปผสมกับสารสกัด ในสัดส่วนของสารสกัด คือ 10 มิลลิตรของสารสกัด ต่อ 1 กรัมของของแข็ง (10 : 1 โดยน้ำหนัก) ในวิธี WET ให้ใช้สารละลาย 0.2 M Sodium citrate ที่ pH 5.0±0.1 เป็นสารสกัด โดยเตรียมได้จากการนำสารละลาย Citric acid ในปริมาณที่เหมาะสมมาปรับ pH ให้เป็น 5.0 ด้วยสารละลาย 4.0 N NaOH [สำหรับการทดสอบการชะละลายของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr(VI)) ให้ใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารสกัด]
3. ผสมรวมกันในขวดพลาสติกและนำไปเขย่า ซึ่งสามารถทำให้ของผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมอยู่ตลอดเวลา เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
4. นำตัวอย่างในขวดพลาสติกมากรองด้วยกระดาษกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ผ่านการกรองมาทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก ถ้าผลการวิเคราะห์มีปริมาณโลหะหนักเกินมาตรฐาน แสดงว่าไม่ผ่านเกณฑ์การหล่อแข็งของเสียอันตราย

สิ่งปนื้อหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี WET และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดแล้วมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัดเท่ากับหรือมากกว่าค่า STLC ที่กำหนดไว้ ถือเป็นสิ่งปนื้อหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ดังนั้นค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบด้วยวิธี WET ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ต้องมีสารอันตรายในน้ำชะละลายน้อยกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และตารางที่ 2.7

**ตารางที่ 2.6** ค่ามาตรฐานของสารอันตรายประเภทสารอินทรีย์สำหรับการทดสอบด้วยวิธี WET

สารอินทรีย์	ค่ามาตรฐาน (มก./ล.)
แอลดริน (Aldrin)	0.14
คลอเดน (Chlordane)	0.25
ดีดีที ดีดีอี หรือ ดีดีดี (DDT, DDE, DDD)	0.1
2,4-ดี (2,4-Dichlorophenoxyacetic acid)	10
ดีลดริน (Dieldren)	0.8
ไดออกซิน (Dioxin (2,3,7,8-TCDD))	0.001
เอนดริน (Endrin)	0.02
เฮปตาคลอร์ (Heptachlor)	0.47
คีโปน (Kepone)	2.1
ลินเดน (Lindane)	0.4
เมททอกซีคลอร์ (Methoxychlor)	10
ไมเร็กซ์ (Mirex)	2.1
เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	1.7
โพลีคลอริเนตเต็ดไบฟีนิล (Polychlorinated biphenyls (PCBs))	5.0
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	0.5
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	204
ซิลเว็กซ์ (Silvex; 2,4,5-Trichlorophenoxypropionic acid)	1.0

ที่มา: ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2548

ตารางที่ 2.7 ค่ามาตรฐานของสารอันตรายประเภทสารอินทรีย์สำหรับการทดสอบด้วยวิธี WET

สารอินทรีย์	ค่ามาตรฐาน (มก./ล.)
สารหนูและ/หรือสารประกอบของสารหนู	5.0
แบเรียมและ/หรือสารประกอบแบเรียม	100
เบริลเลียมและ/หรือสารประกอบเบริลเลียม	0.75
แคดเมียมและ/หรือสารประกอบแคดเมียม	1.0
สารประกอบของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์	5.0
โครเมียมและ/หรือสารประกอบของโครเมียมไตรวาเลนต์	5.0
โคบอลต์และ/หรือสารประกอบของโคบอลต์	80
ทองแดงและ/หรือสารประกอบทองแดง	25
สารประกอบเกลือของฟลูออไรด์	180
ตะกั่วและ/หรือสารประกอบตะกั่ว	5.0
ปรอท และ/หรือสารประกอบปรอท	0.2
โมลิบดีนัมและ/หรือสารประกอบโมลิบดีนัม	350
นิกเกิลและ/หรือสารประกอบนิกเกิล	20
ซีลีเนียมและ/หรือสารประกอบซีลีเนียม	1.0
เงินและ/หรือสารประกอบของเงิน	5.0
ซัลเฟตและ/หรือสารประกอบซัลเฟต	7.0
วานาเดียมและ/หรือสารประกอบวานาเดียม	24
สังกะสีและ/หรือสารประกอบสังกะสี	250

ที่มา: ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2548

ในการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก สามารถเปรียบเทียบระหว่างวิธี TCLP และวิธี WET ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบระหว่างวิธี TCLP และวิธี WET

Parameter	TCLP method	WET method
Extraction solution	Acetate buffer	Citrate buffer
pH	pH 2.88±0.05	pH 5±0.1
Particle size	9.5 mm.	2 mm.
Liquid - to - solid ratio	20 : 1	10 : 1
Period of extraction	18 hours extraction	48 hours extraction
Temperature	22±3 °C	20-40 °C
Pore size of glass fiber filter	0.6-0.8 µm	0.45 µm
Results compared	Regulatory levels	STLC*
Type of agitated/speed	Rotary 30 RPM	Rotary 30 RPM
Results reported	mg/l	mg/l

ที่มา: Department of Toxic Substances Control - California Environmental Protection Agency, (n.d.): Online

หมายเหตุ: \* Soluble Threshold Limit Concentration

ปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนัก ได้แก่ ชนิดของสารสกัด pH ขนาดของอนุภาค อัตราส่วนของสารสกัดต่อของแข็ง ระยะเวลาในการสกัด และอุณหภูมิในการสกัด เป็นต้น โดยค่า pH มีผลต่อการชะละลายของสารปนเปื้อนออกจากของเสีย ขนาดของอนุภาคของของเสียมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารสกัด โดยของเสียที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีโอกาสที่สารปนเปื้อนจะชะละลายออกมาได้มาก อัตราส่วนของสารสกัดต่อของแข็งจะอธิบายถึงปริมาณของสารสกัดที่สัมผัสกับปริมาณของของเสีย โดยที่อัตราส่วนของสารสกัดต่อของแข็งที่มีค่าต่ำจะมีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนชะละลายออกมา และจะมีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนลดลงเมื่อมีอัตราส่วนของสารสกัดต่อของแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการเจือจางของของเสียกับสารสกัดได้น้อยลง ส่วนระยะเวลาที่สัมผัสกับสารสกัดเป็นเวลาที่สามารถได้สัมผัสกับของเสียซึ่งมีผลต่อความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ชะละลายออกมา (Townsend, Jang and Tolaymat, 2003: Online)

สารสกัดที่ใช้ในการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP มีความรุนแรงน้อยกว่าสารสกัดที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธี WET ดังนั้นความเข้มข้นของโลหะและสารระเหยง่ายที่ได้จากวิธี TCLP น่าจะมีค่าต่ำกว่าวิธี WET แต่โครเมียมเป็นหนึ่งในไม่กี่สารที่มีค่าความเข้มข้นจากการทดสอบด้วยวิธี TCLP สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี WET เนื่องจากรายงานผลของโครเมียมจะไม่แยกรายงานเป็น  $\text{Cr}^{3+}$  และ  $\text{Cr}^{6+}$  แต่จะรายงานเป็นผลของโครเมียมรวม (Total Chromium) ส่วนวิธี WET จะแยกรายงานผลเป็น  $\text{Cr}^{3+}$  และ  $\text{Cr}^{6+}$  (California Integrated Waste Management Board, 1998: Online)

California Environmental Protection Agency (Cal/EPA) ได้ศึกษาการทดสอบการชะละลายว่าวิธีการทดสอบการชะละลายวิธีใดสามารถเลียนแบบวิธีทดสอบการชะละลายด้วยน้ำชะขยะได้ดีที่สุด โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างวิธี TCLP, WET และ SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) กับการทดสอบการชะละลายด้วยน้ำชะขยะ ซึ่งทดสอบการชะละลายอย่างต่อเนื่อง 48-84 วัน และศึกษาการชะละลายจากของเสียประเภทต่างๆ ได้แก่ หางแร่ ของเสียที่เกิดจากการตกตะกอน ของเสียที่มีโลหะปนอยู่ และของเสียอื่นๆ ผลการทดลองสรุปได้ว่า วิธี TCLP ดีกว่าวิธี WET หรือวิธี SPLP ในการเลียนแบบวิธีทดสอบการชะละลายด้วยน้ำชะขยะของโลหะ beryllium, cadmium, chromium (III), cobalt, copper, lead, nickel และ zinc (Simmons, 1999: Online)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักประเภท โครเมียม สังกะสี และนิกเกิล ประกอบกับข้อจำกัดของเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะโครเมียมรวม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้การทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กุลเชษฐ เหลี่ยมสมบัติ (2548) ทำการศึกษาเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของซีเมนต์ ทราย หิน และผงเมงกานีสในถ่านไฟฉาย สำหรับกระบวนการปรับเสถียรและการหล่อแข็งของผงเมงกานีสในถ่านไฟฉายที่ทิ้งแล้ว โดยวัสดุดังกล่าวจะต้องได้ค่ามาตรฐานด้านการรับกำลังแรงอัด และได้กำหนดอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ผลของการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตลดลงเมื่อส่วนผสมของผงเมงกานีสเพิ่มขึ้น (p-value < 0.001) กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น (p-value < 0.001) การชะละลายของเมงกานีสเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของผงถ่านไฟฉายในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น (p-value < 0.001) ในขณะที่การชะละลายของเมงกานีสลดลง เมื่อระยะเวลาการบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้น (p-value < 0.001) และระยะเวลาในการแช่คอนกรีตในน้ำที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้การชะละลายของเมงกานีสเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนหล่อแข็งของเมงกานีสจากผงถ่านไฟฉายคือที่อัตราส่วน (ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน : ผงถ่านไฟฉาย) 1 : 2 : 2 : 0.06 โดยน้ำหนัก เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ที่ระยะเวลาการบ่มคอนกรีต 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 374 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าการชะละลายสูงสุดของเมงกานีสเท่ากับ 0.27 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม

จิตรรัตน์ ศรีสุโข (2540) ทำการศึกษาการกำจัดกากตะกอนโลหะหนักโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และทราย กากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษาเป็นกากตะกอนของโรงงานชุบโลหะหนัก ชนิดของโลหะหนักที่ทำการศึกษาคือ นิกเกิล และโครเมียม และได้ศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของโลหะหนักที่อยู่ในกากตะกอนโดยการทำให้เป็นก้อน โดยพิจารณาจากกำลังรับแรงอัดเป็นดัชนีบ่งชี้ รวมถึงการชะละลายของโลหะหนักตามมาตรฐานของสารอันตรายตามประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรม และหาปริมาณโลหะหนักที่ละลายออกมาจากก้อนคอนกรีตที่แช่น้ำปรับ pH ที่ 4.5 และ 5.8 ตามคุณลักษณะของน้ำฝนเป็นเวลา 5 วัน ถึง 10 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของกากตะกอนเพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต อัตราส่วนที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนต่อทรายคือ 1.5 : 1 : 2.5 โดยน้ำหนัก สำหรับการหาปริมาณโลหะหนักจากการชะละลาย พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งสองชนิดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนส่วนการหาปริมาณโลหะหนักโดยการแช่น้ำ พบว่าปริมาณโลหะหนักทั้งสองที่ละลายออกมาจากก้อนคอนกรีตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ระยะเวลาในการแช่มีผลต่อปริมาณการ

ชะละลายของโครเมียมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทางกลับกันระยะเวลาในการแช่กลับไม่มีผลต่อปริมาณการชะละลายของนิกเกิล

ชนินทร์ เลิศคนาวนิชกุล (2545) ศึกษาการนำฝุ่นทรายดำจากอุตสาหกรรมหล่อหลอมเหล็กมาบำบัดตะกั่วในกากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ โดยนำมาผสมเป็นกากตะกอนหล่อแข็งด้วยเทคนิค cement based ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง โดยชุดที่ 1 ใช้ปูน ทราย น้ำ และกากตะกอน ชุดที่ 2 ใช้ปูน ฝุ่นทรายดำ น้ำ และกากตะกอน โดยใช้ปริมาณกากตะกอนทั้ง 2 ชุด คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัม ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน แล้วนำกากตะกอนหล่อแข็งทั้ง 2 ชุด มาเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัด และปริมาณการชะละลายตะกั่วตามวิธีของ US.EPA (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP) และหากในชุดการทดลองใดยังให้ผลการทดสอบอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานให้เพิ่มปริมาณกากตะกอนเป็น 60, 70, 80, 90 และ 100 กรัม จนกว่าผลการทดสอบจะเกินค่ามาตรฐาน จากนั้นเปรียบเทียบความสามารถในการตรึงตะกั่วและค่าใช้จ่ายของการทดลองที่มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และการชะละลายตะกั่วไม่เกินมาตรฐาน ผลการศึกษาพบว่า ทั้งสองชุดการทดลองมีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน หลังจากผ่านการบ่มภายในระยะเวลา 7 วัน เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการตรึงตะกั่วพบว่าชุดที่มีฝุ่นทรายดำเป็นส่วนผสมจะมีความสามารถในการบำบัดกากตะกอนได้ถึง 90 กรัม ซึ่งชุดที่มีทรายเป็นส่วนผสมสามารถบำบัดกากตะกอนได้เพียง 30 กรัม และเมื่อคิดค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอน 30 กรัมเท่ากัน การใช้ฝุ่นทรายดำสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึงร้อยละ 76.7 จึงสามารถนำฝุ่นทรายดำมาแทนทราย โดยใช้เทคนิคการหล่อแข็งได้ เพราะสามารถตรึงตะกั่วได้ดีกว่าทรายและมีค่าใช้จ่ายถูกกว่า

นฤมล สราภัยวานิช (2544) ศึกษาการนำตะกอนโลหะหนักที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่มาหล่อให้เป็นก้อนแข็ง โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าเคลือบเจ้าลอยลิกไนต์และทรายในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อหาชนิดและอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุประสาน โลหะหนักที่ศึกษาคือ ตะกั่ว และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ทดสอบปริมาณการชะละลายของตะกั่วด้วยวิธี Extraction Procedure (EP) Toxicity Test ของ US.EPA มาประยุกต์ใช้เพื่อลดระยะเวลาในการเขย่าจาก 24 ชั่วโมงมาเป็น 6 ชั่วโมง และทดสอบด้วยวิธี Accumulated test ผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเจ้าลอยลิกไนต์ ประกอบด้วยปริมาณแคลเซียมออกไซด์ 10.66% ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ 39.60% ปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ 23.94% และเหล็กออกไซด์ 12.60% ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเจ้าลอยลิกไนต์ประกอบด้วยปริมาณแคลเซียมออกไซด์ 0.26%

ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ 52.60% และเหล็กออกไซด์ 0.04% ไม่พบปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ และพบว่ากากตะกอนมีค่าการชะละลาย 11.73 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณตะกั่ว 586.50 มิลลิกรัมต่อกรัมของ กากตะกอนแห้ง และมีค่าความชื้นเท่ากับ 72.15% และยังพบว่ากำลังรับแรงอัดและปริมาณการชะละลายของตะกั่วแปรผันตามชนิดของวัสดุประสาน ปริมาณกากตะกอนและระยะเวลาในการบ่ม โดยกำลังรับแรงอัดและการชะละลายของตะกั่วจะแตกต่างกันเมื่อใช้วัสดุประสานที่ต่างชนิดกัน วัสดุประสานที่เหมาะสมคือ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ผสมทราย ที่อัตราส่วน 0.5 : 0.5 : 2 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ส่วนการชะละลายของตะกั่วเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจะทำให้มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ส่วนการชะละลายของตะกั่วลดลง อัตราส่วนของวัสดุประสานต่อปริมาณกากตะกอนที่เหมาะสมคือ 1 : 0.025 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่มตั้งแต่ 14 วันขึ้นไป

พรสุดา ศิริเสวตวาริน (2548) ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดและการชะละลายของตะกั่วจากกระบวนการหล่อแข็งกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตแบตเตอรี่ โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตก๊าซเซทิลีนผสมกับซีเถ้าแกลบจากกระบวนการเผาอิฐ เพื่อศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหล่อแข็ง โดยทำการแปรผันอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และซีเถ้าแกลบที่ 0.3 : 0.7, 0.4 : 0.6, 0.5 : 0.5, 0.6 : 0.4 และ 0.7 : 0.3 โดยน้ำหนัก โดยคงที่อัตราส่วนของทราย : กากตะกอน : อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ 2.75 : 0.2 : 0.65 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำกากตะกอนหล่อแข็งมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดหลังจากทำการบ่มไว้เป็นเวลา 28 วัน และทดสอบการชะละลายของตะกั่วจากก้อนหล่อแข็งโดยวิธี Leachate Extraction หลังจากได้กากตะกอนหล่อแข็งที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด และปริมาณการชะละลายของตะกั่วที่น้อยที่สุดคือที่อัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ : ซีเถ้าแกลบเท่ากับ 0.4 : 0.6 จึงทำการแปรผันอัตราส่วนของกากตะกอนที่ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.25 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยแต่ละชุดการทดลองจะมีค่าอายุการบ่มที่ 1, 7, 14, 21 และ 28 วัน จากนั้นนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดและทดสอบการชะละลายของตะกั่วจากกากตะกอนหล่อแข็งโดยวิธี Leachate Extraction และ Accumulated Test ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนของกากตะกอน และระยะเวลาการบ่มต่างกัน ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) กำลังรับแรงอัดสูงสุดของกากตะกอนหล่อแข็ง คือ  $23.58 \pm 1.438$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อัตราส่วนกากตะกอน 0.25 โดยมีระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และพบว่าอัตราส่วนของกากตะกอนและระยะเวลาการบ่มต่างกันทำให้ปริมาณตะกั่วที่ชะละลายออกมามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) ปริมาณการชะละลายของตะกั่วจากกากตะกอนหล่อแข็งสูงสุด คือ  $2.657 \pm 0.036$  มิลลิกรัม

ต่อลิตร ที่อัตราส่วนกากตะกอน 0.25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ : ซีเมนต์ : อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน : ทราช : กากตะกอน คือ 0.4 : 0.6 : 0.65 : 2.75 : 0.25 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดและปริมาณการชะละลายของตะกั่วผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

อรรวรรณ มานูญวงศ์ (2542) ศึกษากำลังรับแรงอัดและการชะละลายของตะกั่วและนิกเกิลจากกากตะกอนโลหะหนักที่ทำให้เป็นกากตะกอนหล่อแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ โดยใช้อัตราส่วนของกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 : 1, 0.65 : 1 และ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 3, 7 และ 14 วัน และค่าพีเอชของสารละลายที่ใช้ในการสกัดคือ 5, 7 และ 9 ผลการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่ออัตราส่วนของกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น การเพิ่มระยะเวลาการบ่มทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมคือ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ส่วนการชะละลายของตะกั่วและนิกเกิลพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนต่อวัสดุประสานมีผลทำให้ปริมาณการชะละลายของตะกั่วเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม และการเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนต่อวัสดุประสานทำให้ปริมาณการชะละลายของนิกเกิลเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ในทางกลับกัน ปริมาณการชะละลายของนิกเกิลจะลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม ปริมาณการชะละลายของโลหะหนักทุกสภาวะการทดลองมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน

Al-Harthy, Taha และ Al-Maamary (2003) ทำการศึกษาผลของก้อนมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมโดยผงฝุ่นซีเมนต์ โดยศึกษาการใช้ผงฝุ่นซีเมนต์มาเป็นวัสดุผสมซีเมนต์ในคอนกรีตและมอร์ตาร์ อัตราส่วนการแทนที่ด้วยผงฝุ่นซีเมนต์ในปูนซีเมนต์คือ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30% โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50, 0.60 และ 0.70 โดยน้ำหนัก ระยะเวลาบ่ม 3, 7 และ 28 วัน โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ความสามารถในการซึมน้ำ และความทนทานของคอนกรีต ผลการทดลองพบว่า การใส่ผงฝุ่นซีเมนต์ลงไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมจะไม่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด ในส่วนของก้อนมอร์ตาร์ที่มีการใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมก็จะไม่มีผลต่อความสามารถในการซึมน้ำ แต่การใส่ผงฝุ่นซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้การซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น และมีกำลังรับแรงอัดลดลง สรุปได้ว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงฝุ่นซีเมนต์ทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและมอร์ตาร์ลดลง ในกรณีที่ใส่ผงฝุ่นซีเมนต์ในการแทนที่ไม่เกิน 5% จะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด โดยคอนกรีตที่มีการผสมด้วยผงฝุ่นซีเมนต์ในอัตราส่วน

การแทนที่ที่ต่ำ (5%) จะมีกำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกับกลุ่มควบคุม (แทนที่ 0 %) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

Asavapisit, Naksrichum และ Harnwajanawong (2005) ศึกษากำลังรับแรงอัด ความสามารถในการชะละลาย และลักษณะโครงสร้าง (microstructure) ของกากตะกอนจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่หล่อแข็งด้วยวิธี cement-based โดยทำการหล่อแข็งกากตะกอนจากการชุบโลหะ(ที่สังกะสีและโซเดียมไนต์ถูกทำให้เสถียร) ด้วยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน โดยใช้กากตะกอนที่ระดับ 0, 10, 20 และ 30% ของน้ำหนักแห้ง และใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ 0, 10, 20 และ 30% ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อมีการเติมกากตะกอนจากการชุบโลหะ จากการวิเคราะห์โดยใช้ scanning electron microscopy (SEM) พบว่า มีการเคลือบของกากตะกอนบนพื้นผิวของวัสดุประสานเป็นเหตุให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของโครเมียมจากการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

Bishop (1988) ทำการศึกษากลไกของการตรึงโลหะหนักของการหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์ โดยโลหะหนักที่ศึกษา ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว จากการศึกษาสามารถสรุปกลไกการยึดจับโลหะหนักได้ดังนี้ (1) แคดเมียมจะอยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ที่แทรกตัวอยู่ตามรูพรุนหรือช่องว่างภายในก้อนหล่อแข็ง และ(2)โครเมียมและตะกั่วจะทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ เกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนกับซิลิกา

El-Aleem และคณะ (2005) ทำการศึกษาผลของการใช้ผงปูนซีเมนต์แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็ก (slag cement) ที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และกำลังรับแรงอัด โดยใช้ผงปูนซีเมนต์แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตั้งแต่ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10% และแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็ก ที่ 0, 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก ทำการบ่มที่ระยะเวลา 3, 7, 28 และ 100 วัน จึงทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ผลการทดลองพบว่า การแทนที่โดยผงปูนซีเมนต์ในระดับที่มากขึ้นทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวลดลง นั่นคือจะมีการแข็งตัวเร็วขึ้น ซึ่งโดยปกติในการเติมผงปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงเป็นการลดระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะเวลาการบ่มนานขึ้น การแทนที่ใน slag cement ที่ระดับ 5 -10% จะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดเล็กน้อย แต่กำลังรับแรงอัดจะลดลงมากเมื่อมีการแทนที่ถึง 20% สรุปได้ว่า การแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยผงปูนซีเมนต์ที่ 6% จะ

ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด แต่ถ้ามากกว่า 6% จะมีผลต่อกำลังรับแรงอัด ส่วนการแทนที่ใน slag cement ที่ระดับ 5 -10% ของผงปูนซีเมนต์อยู่ในเกณฑ์ดี แต่การแทนที่ที่ระดับ 15 และ 20% จะทำให้ slag cement มีกำลังรับแรงอัดลดลง

Park (2000) ทำการศึกษาวัสดุที่นำมาใช้ในการยึดประสานในการทำให้เป็นก้อนหล่อแข็ง และการปรับเสถียรของของเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยวัสดุที่ใช้ศึกษามี 3 อย่างคือ ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ผงปูนซีเมนต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และผงปูนซีเมนต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารเร่งการก่อตัวเร็ว ผลการศึกษาพบว่า ผงปูนซีเมนต์มีความเป็นด่างสูงจะช่วยเร่งการก่อตัวและปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ส่วนสารเร่งการก่อตัวเร็วมีผลต่อความเร็วในการก่อตัวและเพิ่มกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ สำหรับการปรับเสถียรและการทำก้อนหล่อแข็งจากตะกอนโลหะหนักในโรงงานผลิตเหล็ก ผงปูนซีเมนต์ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความเป็นด่างซึ่งจะช่วยลดปริมาณโลหะหนักที่ชะละลายออกมาจากของเสียและเพิ่มกำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็ง สำหรับผงปูนซีเมนต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารเร่งการก่อตัวเร็วทำให้ปริมาณการชะละลายของโลหะหนักออกมาน้อยที่สุด และมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด

Shoaib, Balaha และ Abdel-Rahman (2000) ทำการศึกษาผลของการใช้ผงปูนซีเมนต์ในการแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ผสมตระกรันจากเตาหลอมโลหะ และปูนซีเมนต์ชนิดต้านทานซัลเฟต เปรอ์เซ็นต์ในการแทนที่ด้วยผงปูนซีเมนต์เท่ากับ 0, 10, 20, 30 และ 40% โดยใช้การแทนที่ 0% เป็นตัวควบคุม ระยะเวลาในการบ่มเท่ากับ 1, 3 และ 6 เดือน ผลการทดลองพบว่า กำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของผงปูนซีเมนต์ โดยมีข้อจำกัดในการแทนที่ด้วยผงปูนซีเมนต์ในปูนซีเมนต์ชนิดต้านทานซัลเฟตไม่เกิน 30% การแทนที่ ในปูนซีเมนต์ผสมตระกรันจากเตาหลอมโลหะไม่เกิน 20% และแทนที่ไม่เกิน 10% ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งจะทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สูง

Wang, Shah และ Mishulovich (2004) ทำการศึกษาอุณหภูมิในการบ่มและการเติมสาร NaOH ที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่เกิดจากการผสมกันระหว่าง 50% ของผงปูนซีเมนต์ (CKD) และ 50% ของเถ้าลอย (FA) ในการศึกษาที่มีการเติมสาร NaOH ในปริมาณ 0, 2 และ 5% และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 24, 38 และ 50°C โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.52 ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนการผสมระหว่าง CKD 50% + FA 50% และ เติมน้ำ NaOH 2% โดยทำการบ่มที่อุณหภูมิ 38°C จะทำให้ก้อนหล่อแข็งมีกำลังรับ

แรงอัดสูงสุดที่ระยะเวลาบ่ม 56 วัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มเป็น 50°C และเติมสาร NaOH 2% ทำให้มีกำลังรับแรงอัดลดลง ส่วนการเติม NaOH 5% จะเป็นการเพิ่มกำลังรับแรงอัดในช่วงแรกเท่านั้น เมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 24°C และ 38°C สรุปได้ว่า อุณหภูมิในการบ่มมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ เพสท์มากกว่าการเติมสาร NaOH ดังนั้นการบ่มในอุณหภูมิที่เหมาะสมและมีการเติมสาร NaOH ในปริมาณเล็กน้อยจะเป็นการเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้กับวัสดุประสานได้

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้ส่วนใหญ่ เท่ากับ 0.5 : 1 โดยน้ำหนัก เนื่องจากจะทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ซึ่งผงปูนซีเมนต์มีความละเอียดจึงมีพื้นที่ผิวมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และมีความต้องการน้ำในการผสมมากกว่า (Park, 2000) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 : 1 โดยน้ำหนัก คงที่ตลอดการทดลอง และใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2 : 1 โดยน้ำหนัก คงที่ตลอดการทดลอง เนื่องจากอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปูน : ทราย : หิน ในงานคอนกรีตทั่วไปคือที่อัตราส่วน 1 : 2 : 4 โดยน้ำหนัก (วินิต ช่อวิเชียร, 2529) สำหรับวัสดุประสานในงานวิจัยนี้ ใช้ผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้ผงปูนซีเมนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30% โดยน้ำหนัก โดยพิจารณาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีการใช้ผงปูนซีเมนต์ในปริมาณต่างๆกันโดยส่วนใหญ่ใช้ไม่เกิน 50% โดยน้ำหนัก ในส่วนของอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการใช้กากตะกอนหลายประเภท และมีการใช้อัตราส่วนต่างๆ แต่การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการชุบโลหะมีอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.75 : 1 และ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้อัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1, 0.75 : 1 และ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วิธีกรวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) ซึ่งทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน และมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1

#### 3.2 เครื่องมือ สารเคมี และวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการหล่อแข็งและการทดสอบกำลังรับแรงอัด

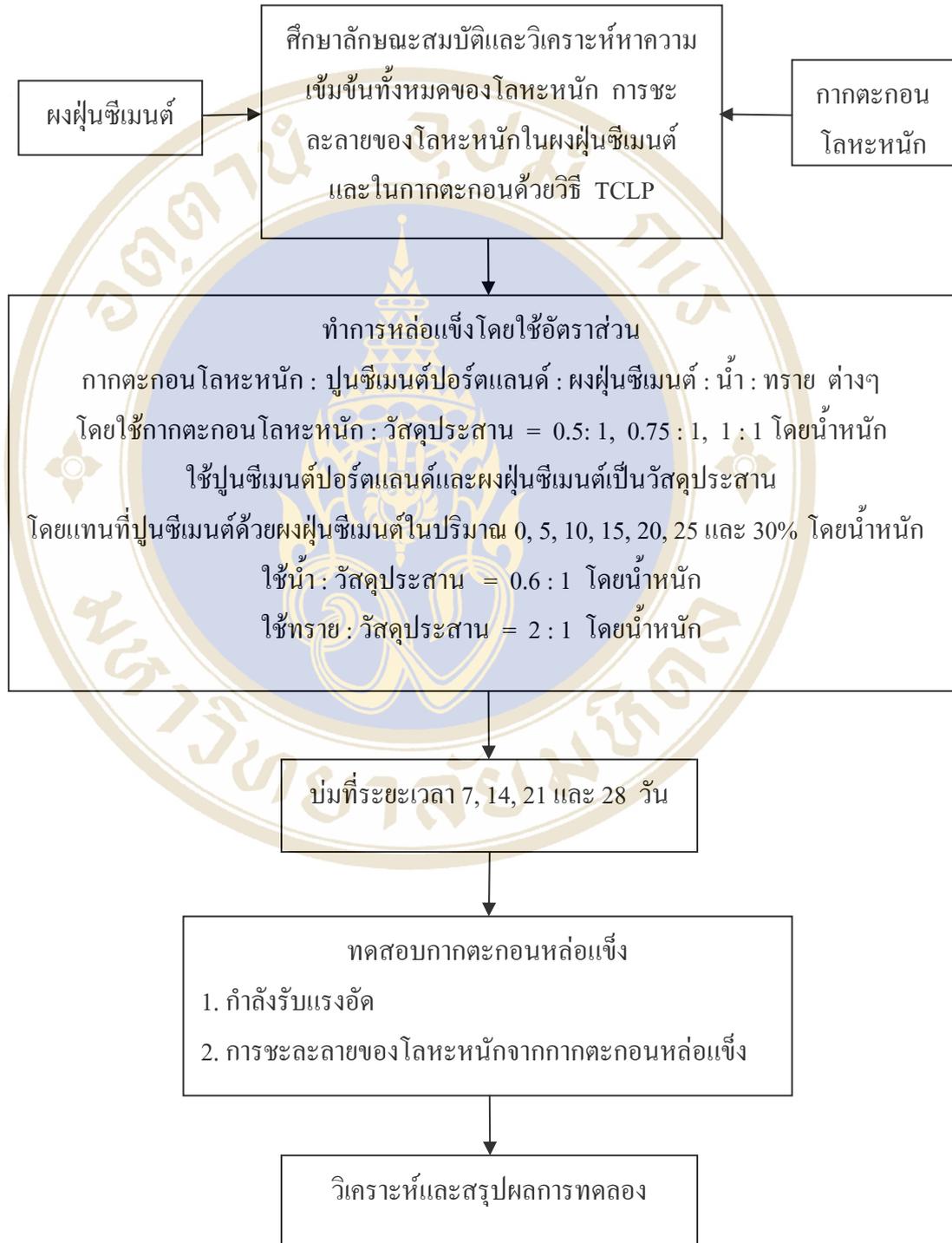
1. เครื่องชั่ง
2. ตะแกรงร่อนเบอร์ 10
3. เครื่องผสมปูนซีเมนต์ (แสดงรูปในภาคผนวก ก) ถึงผสม พายกวณผสม
4. แบบหล่อ ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร (แสดงรูปในภาคผนวก ก) ตามมาตรฐาน ASTM C 109
5. ไม้กระทุ้ง
6. เกรียง
7. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด ยี่ห้อ ELE รุ่น AUTOTEST 3000 (แสดงรูปในภาคผนวก ก)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการชะละลาย

1. ตะแกรงร่อนขนาดช่องเปิด  $3/8$  นิ้ว
2. pH Meter ยี่ห้อ Orion รุ่น EA 940
3. เครื่องเขย่าแบบไปมา (horizontal shaker) ยี่ห้อ IKA รุ่น HS 501 (แสดงรูปในภาคผนวก ก)

4. เครื่อง Microwave digester ยี่ห้อ Milestone รุ่น ETHOS TC

5. ICP (Inductively Coupled Plasma) Emission Spectrometer ยี่ห้อ Varian รุ่น Liberty 220  
(แสดงรูปในภาคผนวก ก)



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

### 3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย ส่วนใหญ่ใช้เพื่อการย่อย (digest) และการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก โดยสารเคมีที่ใช้ในการวิจัยมีดังนี้

1. กรดอะซิติกเข้มข้น (Glacial acetic acid)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
3. กรดไนตริก (HNO<sub>3</sub> 65%)
4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl 37%)
5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)
6. น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

### 3.2.3 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. ผงฝุ่นซีเมนต์ จากเครื่องดักจับฝุ่น ไฟฟ้าสถิตย์ของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์
3. กากตะกอนโลหะหนัก จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
4. ทราฮายาบ
5. น้ำประปา

## 3.3 การดำเนินการวิจัย

### 3.3.1 การเก็บตัวอย่างผงฝุ่นซีเมนต์

เก็บตัวอย่างผงฝุ่นซีเมนต์จากเครื่องดักจับฝุ่น ไฟฟ้าสถิตย์ของ โรงงานผลิตปูนซีเมนต์เพื่อนำมาหาปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) องค์กรประกอบทางเคมี ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก (มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักเปียก) และความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนัก (มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร) ทดสอบด้วยวิธี TCLP method 1311 ตามมาตรฐานของ US.EPA จากนั้นทำการเก็บรักษาไว้ใช้ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก

### 3.3.2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างกากตะกอนโลหะหนัก

1. เก็บตัวอย่างกากตะกอนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อนำมาหาปริมาณความชื้นและความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก
2. เตรียมตัวอย่างกากตะกอนโลหะหนักเพื่อนำมาหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และหาความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP โดยนำกากตะกอนไปตากจนแห้ง

จากนั้นนำมาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บดกากตะกอนและร่อนผ่านตะแกรงให้มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร แล้วเก็บใส่ในถุงพลาสติกปิดสนิทสำหรับใช้ในการหล่อแข็ง

### 3.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของผงปูนซีเมนต์

1. วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทั่วไปของผงปูนซีเมนต์ ได้แก่ ปริมาณความชื้น และค่าความเป็นกรด-ด่าง
2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงปูนซีเมนต์ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
3. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี นิกเกิล และทองแดง โดยวิธีการย่อยผงปูนซีเมนต์ แสดงในภาคผนวก ข
4. วิเคราะห์หาความเข้มข้นจากการชะละลายของโครเมียม สังกะสี นิกเกิล ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม ด้วยวิธี TCLP ซึ่งการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP จะประยุกต์การเขย่าสารสกัดในลักษณะหมุนรอบ (rotary agitating) ที่อัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที มาเป็นการใช้เครื่องเขย่าแบบไปมา (horizontal shaker) โดยใช้ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 3 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมงขั้นตอนการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP แสดงในรูปที่ 3.2

### 3.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของกากตะกอนโลหะหนัก

1. วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทั่วไปของกากตะกอนโลหะหนัก ได้แก่ ปริมาณความชื้น และค่าความเป็นกรด-ด่าง
2. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี นิกเกิล ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม โดยวิธีการย่อยกากตะกอนโลหะหนัก แสดงในภาคผนวก ค
3. วิเคราะห์หาความเข้มข้นจากการชะละลายของโครเมียม สังกะสี นิกเกิล ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียมด้วยวิธี TCLP โดยขั้นตอนการทดสอบการชะละลาย แสดงในรูปที่ 3.2

### 3.3.5 การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ใช้อัตราส่วนของกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5 : 1, 0.75 : 1 และ 1 : 1 โดยน้ำหนัก
2. ใช้ผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยผงปูนซีเมนต์ในปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30% โดยน้ำหนัก จำนวน 7

อัตราส่วน โดยอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต่อ ผงฝุ่นซีเมนต์ เท่ากับ 100 : 0, 95 : 5, 90 : 10, 85 : 15, 80 : 20, 75 : 25 และ 70 : 30 โดยน้ำหนัก

3. ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 : 1 และใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2 : 1 โดยน้ำหนัก คงที่ตลอดการทดลอง

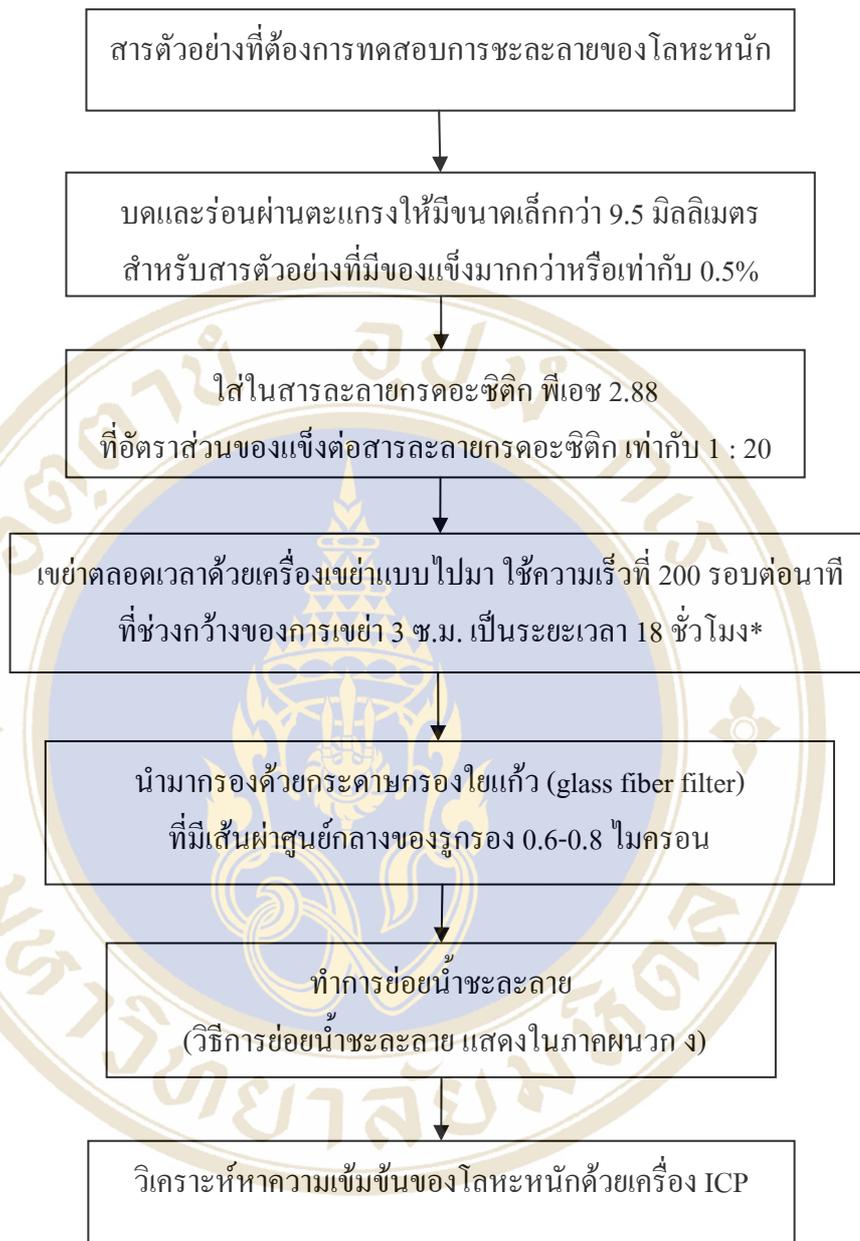
4. ใช้ส่วนผสมระหว่างกากตะกอนโลหะหนัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผงฝุ่นซีเมนต์ น้ำ และทราย ในอัตราส่วนต่างๆดังแสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นทำการหล่อแข็ง ขึ้นตอนในการหล่อแข็ง แสดงในรูปที่ 3.3 แล้วนำกากตะกอนหล่อแข็งมาทำการบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน

### 3.3.6 การประเมินผลกากตะกอนหล่อแข็ง

1. ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำจนครบตามระยะเวลาที่กำหนดตามมาตรฐานของ ASTM C 109 โดยขั้นแรกทำการเช็ดผิวให้แห้ง ปิดเม็ดทรายที่ติดผิวหน้าออกเพื่อปรับพื้นผิวให้เรียบแล้วบันทึกค่าน้ำหนัก และวัดขนาดของกากตะกอนหล่อแข็ง จากนั้นนำไปวางที่เครื่องทดสอบโดยจัดตำแหน่งของกากตะกอนหล่อแข็งให้อยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่นทดสอบ กำหนดให้เครื่องทดสอบกดน้ำหนักลงบนกากตะกอนหล่อแข็งด้วยอัตราที่สม่ำเสมอจนกากตะกอนหล่อแข็งเกิดรอยแตกร้าว ทำการบันทึกค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2. ทำการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนหล่อแข็งด้วยวิธี TCLP ตามขั้นตอนในรูปที่ 3.2

ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP จากกากตะกอนหล่อแข็งจะทำการทดสอบจำนวน 2 ซ้ำ จากนั้นนำผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์ และสรุปผล

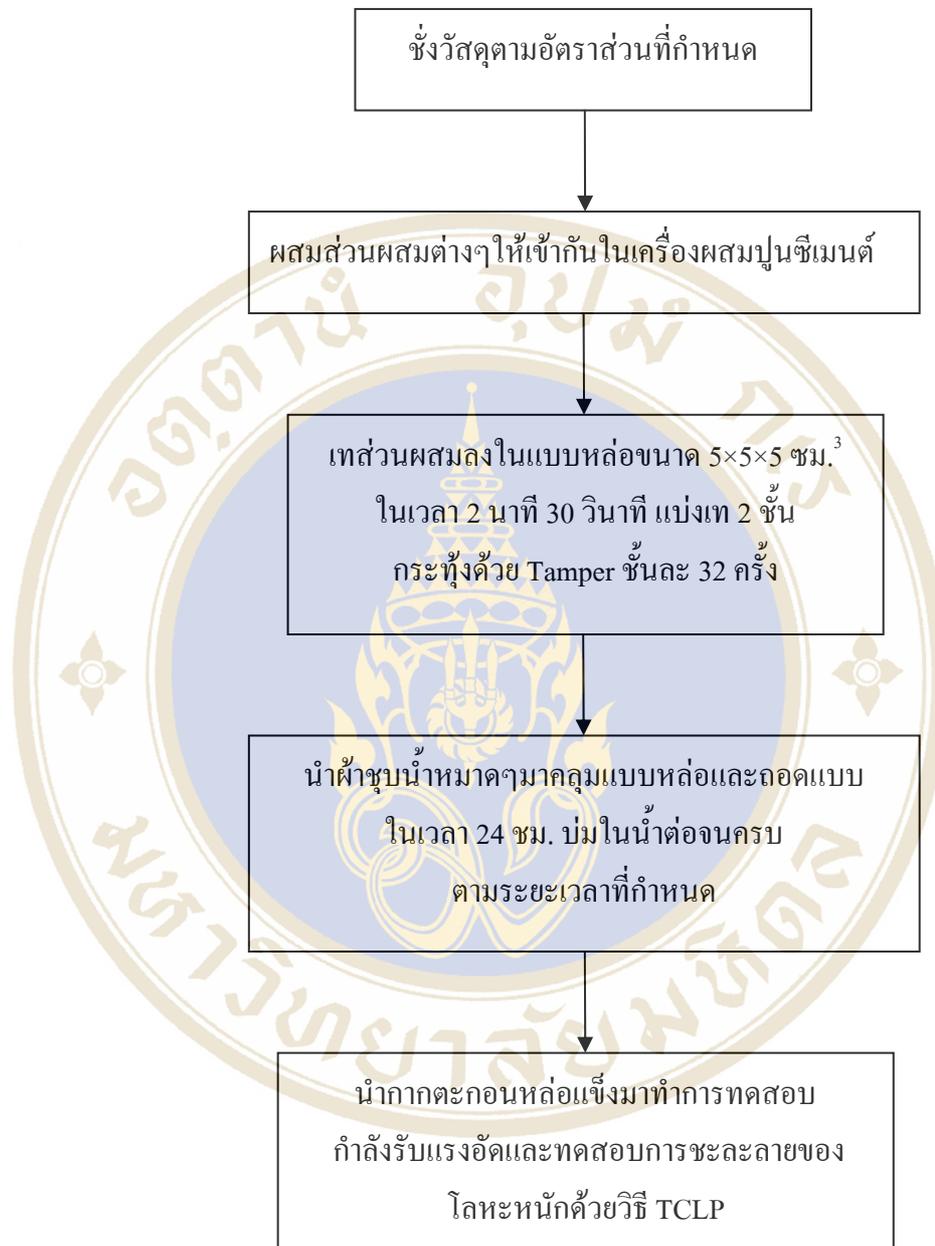


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP

หมายเหตุ: \* ประยุกต์การเขย่าสารสกัดในลักษณะหมุนรอบ (rotary agitating) ที่อัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที มาเป็นการเขย่าแบบไปมา (horizontal shaking) โดยใช้ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ในช่วงกว้างของการเขย่า 3 ซม. เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมต่างๆ ในกระบวนการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก

กากตะกอน โลหะหนัก (กรัม)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ (กรัม)	ผงฟูซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ทราย (กรัม)
50 75 100	100	0	60	200
50 75 100	95	5	60	200
50 75 100	90	10	60	200
50 75 100	85	15	60	200
50 75 100	80	20	60	200
50 75 100	75	25	60	200
50 75 100	70	30	60	200



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหล่อแข็ง

ที่มา: ศิริวัฒน์ ไชยชนะ, 2542

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

1. ผลการศึกษาจะนำเสนอข้อมูลในรูปค่าเฉลี่ย ตาราง และกราฟ
2. ผลการศึกษากำลังรับแรงอัดจะเทียบกับค่ามาตรฐานกำลังรับแรงอัด ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)
3. ผลการศึกษาการชะละลายของโครเมียมจะเทียบกับค่ามาตรฐานของสารอันตราย ในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด สำหรับสังกะสีและนิกเกิลจะเทียบกับค่ามาตรฐานของสารอันตราย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548)
4. ศึกษาประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอนและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการหล่อแข็งกากตะกอน โลหะหนัก



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการบำบัดโลหะหนักในกากตะกอนโดยกระบวนการหล่อแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ซึ่งผลการศึกษาประกอบด้วยผลการศึกษากำลังรับแรงอัดและผลการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนหล่อแข็ง รวมถึงการศึกษาประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอนและค่าใช้จ่ายในการหล่อแข็ง โดยผลการศึกษาที่มีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 ลักษณะสมบัติของผงฝุ่นซีเมนต์และกากตะกอนโลหะหนัก

##### 4.1.1 ผงฝุ่นซีเมนต์ (Cement kiln dust)

ผงฝุ่นซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ทำการเก็บจากเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitators) ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีเทา ซึ่งจากการวิเคราะห์ ผงฝุ่นซีเมนต์มีองค์ประกอบทางเคมีประเภทออกไซด์ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) 67.12% ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) 21.96% อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 5.12% และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 2.71% ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 มีความชื้นเท่ากับ 0.18% ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 11.53 ความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี นิกเกิล และทองแดง เท่ากับ 75, 102, 34 และ 68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีความเข้มข้นจากการชะละลายของโครเมียม สังกะสี นิกเกิล ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม โดยการทดสอบด้วยวิธี TCLP เท่ากับ 0.821, 0.856, 0.239, 0.018, 0.022 และ 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.1** องค์ประกอบทางเคมีประเภทออกไซด์ของผงฝุ่นซีเมนต์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบทางเคมี	ผงฝุ่นซีเมนต์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1*
CaO (%)	67.12	60-67
SiO <sub>2</sub> (%)	21.96	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.12	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2.71	0.5-6.0

หมายเหตุ: \* ข้อมูลจากปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547

**ตารางที่ 4.2** การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ผงฝุ่นซีเมนต์กับค่ามาตรฐานต่าง ๆ

พารามิเตอร์	Cement kiln dust	ค่ามาตรฐาน
ปริมาณความชื้น (%)	0.18	-
pH	11.53	-
<b>ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนักที่เจือปน</b>		<b>ค่ามาตรฐานของสารที่เจือปนตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548</b>
โครเมียม	75 มก./กก.	2,500 มก./กก.
สังกะสี	102 มก./กก.	5,000 มก./กก.
นิกเกิล	34 มก./กก.	2,000 มก./กก.
ทองแดง	68 มก./กก.	2,500 มก./กก.
ตะกั่ว	-	1,000 มก./กก.
แคดเมียม	-	100 มก./กก.

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ผงฝุ่นซีเมนต์กับค่ามาตรฐานต่าง ๆ

ความเข้มข้นจากการชะละลาย ของโลหะหนัก ในผงฝุ่นซีเมนต์ ทดสอบโดยวิธี TCLP*		ค่ามาตรฐาน ของสารอันตราย ตามที่ US. EPA กำหนด ในการทดสอบโดย วิธี TCLP*	ค่ามาตรฐาน ของสารอันตราย ตามประกาศกระทรวง อุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ในการทดสอบโดย วิธี WET**
โครเมียม	0.821 มก./ล.	5 มก./ล.	5 มก./ล.
สังกะสี	0.856 มก./ล.	ไม่กำหนด	250 มก./ล.
นิกเกิล	0.239 มก./ล.	ไม่กำหนด	20 มก./ล.
ทองแดง	0.018 มก./ล.	ไม่กำหนด	25 มก./ล.
ตะกั่ว	0.022 มก./ล.	5 มก./ล.	5 มก./ล.
แคดเมียม	0.005 มก./ล.	1 มก./ล.	1 มก./ล.

หมายเหตุ: \* TCLP : Toxicity Characteristic Leaching Procedure

\*\*WET : Waste Extraction Test

#### 4.1.2 กากตะกอนโลหะหนัก

กากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) มีสีเขียว กลิ่นฉุน เมื่อนำกากตะกอนมาทำการตาก อบ และบดให้ละเอียดจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข) มีความชื้นเท่ากับ 83.60% ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 10.87 ความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี นิกเกิล ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียมในกากตะกอนโลหะหนัก เท่ากับ 85,125, 77,605, 12,315, 68.50, 233.25 และ 0.875 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีความเข้มข้นจากการชะละลายของโครเมียม สังกะสี นิกเกิล ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม โดยการทดสอบด้วยวิธี TCLP เท่ากับ 12.70, 326.25, 53.61, 0.928, 0.047 และ 0.004 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 (ก) ลักษณะของกากตะกอน โลหะหนักที่ยังไม่ผ่านการตาก อบ และบด

(ข) ลักษณะของกากตะกอน โลหะหนักที่ผ่านการตาก อบ และบด

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กากตะกอนโลหะหนักกับค่ามาตรฐานต่าง ๆ

พารามิเตอร์	กากตะกอนโลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน
ปริมาณความชื้น (%)	83.60	-
pH	10.87	-
ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนักที่เจือปน		ค่ามาตรฐานของสารที่เจือปนตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548
โครเมียม	85,125 มก./กก.	2,500 มก./กก.
สังกะสี	77,605 มก./กก.	5,000 มก./กก.
นิกเกิล	12,315 มก./กก.	2,000 มก./กก.
ทองแดง	68.50 มก./กก.	2,500 มก./กก.
ตะกั่ว	233.25 มก./กก.	1,000 มก./กก.
แคดเมียม	0.875 มก./กก.	100 มก./กก.

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กากตะกอน โลหะหนักกับค่ามาตรฐานต่าง ๆ

ความเข้มข้นจากการชะละลาย ของโลหะหนัก ในกากตะกอน ทดสอบโดยวิธี TCLP*		ค่ามาตรฐาน ของสารอันตราย ตามที่ US. EPA กำหนด ในการทดสอบโดย วิธี TCLP*	ค่ามาตรฐาน ของสารอันตราย ตามประกาศกระทรวง อุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ในการทดสอบโดย วิธี WET**
โครเมียม	12.70 มก./ล.	5 มก./ล.	5 มก./ล.
สังกะสี	326.25 มก./ล.	ไม่กำหนด	250 มก./ล.
นิกเกิล	53.61 มก./ล.	ไม่กำหนด	20 มก./ล.
ทองแดง	0.928 มก./ล.	ไม่กำหนด	25 มก./ล.
ตะกั่ว	0.047 มก./ล.	5 มก./ล.	5 มก./ล.
แคดเมียม	0.004 มก./ล.	1 มก./ล.	1 มก./ล.

หมายเหตุ : \* TCLP : Toxicity Characteristic Leaching Procedure

\*\* WET : Waste Extraction Test

เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผงฝุ่นซีเมนต์และกากตะกอนโลหะหนักกับค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด พบว่าผงฝุ่นซีเมนต์มีความเข้มข้นของโลหะหนักในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบด้วยวิธี TCLP ไม่เกินมาตรฐาน ดังนั้นในการทดลองนี้ผงฝุ่นซีเมนต์จึงไม่จัดเป็นของเสียอันตราย ส่วนกากตะกอนโลหะหนัก มีความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล เกินมาตรฐานของสารที่เจือปน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และมีความเข้มข้นจากการชะละลายของโครเมียม เกินค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด ส่วนความเข้มข้นจากการชะละลายของสังกะสี และนิกเกิลในกากตะกอนโลหะหนัก มีค่าเกินมาตรฐานของสารอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 จึงสรุปได้ว่ากากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการทดลองนี้จัดเป็นของเสียอันตราย ซึ่งต้องมีการบำบัดโลหะหนักในกากตะกอน โดยหมายถึง โครเมียม สังกะสี และนิกเกิลให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

#### 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

ตารางที่ 4.4 แสดงกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่มีการใช้อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานต่างกัน พบว่าทุกการทดลองมีกำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ที่กำหนดไว้คือไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกากตะกอนหล่อแข็งที่ใช้อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 มีกำลังรับแรงอัดต่ำสุดมีค่าอยู่ในช่วง 42.13 - 66.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 150.25 - 253.40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

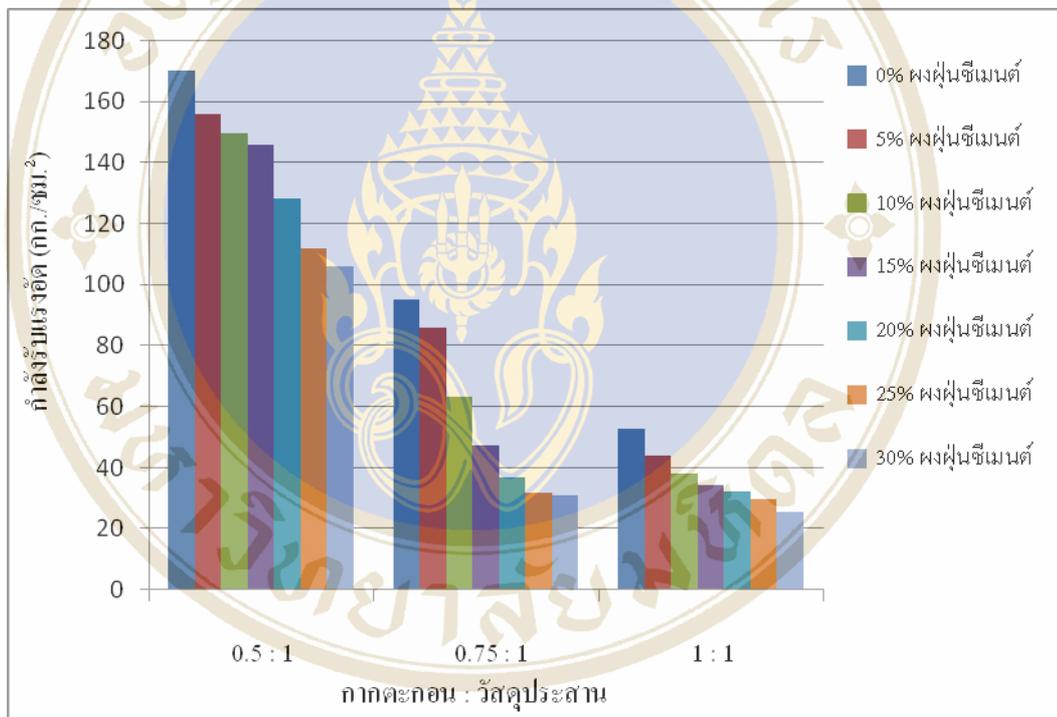


**ตารางที่ 4.4** กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่อัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุ  
ประสาน อัตราส่วนของวัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มต่างๆ

อัตราส่วน กากตะกอนต่อ วัสดุประสาน	อัตราส่วน วัสดุประสาน (OPC:CKD)	กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ (กก./ซม. <sup>2</sup> )			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5 : 1	100 : 0	169.90	225.77	234.50	253.40
	95 : 5	155.70	206.50	225.45	234.90
	90 : 10	149.55	188.35	212.60	216.65
	85 : 15	145.55	163.05	187.05	195.35
	80 : 20	128.00	155.15	181.35	191.05
	75 : 25	111.60	150.50	166.00	176.50
	70 : 30	105.70	132.55	148.65	150.25
0.75 : 1	100 : 0	95.16	142.50	164.50	175.10
	95 : 5	85.97	123.30	143.50	158.55
	90 : 10	63.08	93.95	111.40	122.78
	85 : 15	47.46	76.46	99.63	113.20
	80 : 20	36.75	61.62	80.13	94.98
	75 : 25	31.64	55.47	73.46	82.21
	70 : 30	30.79	47.27	59.92	68.71
1 : 1	100 : 0	52.63	59.77	63.43	66.18
	95 : 5	43.82	52.82	57.28	61.47
	90 : 10	38.20	46.47	55.21	59.60
	85 : 15	34.45	42.32	51.76	56.28
	80 : 20	32.25	39.87	47.81	51.46
	75 : 25	29.52	37.27	42.35	45.15
	70 : 30	25.46	33.55	38.58	42.13

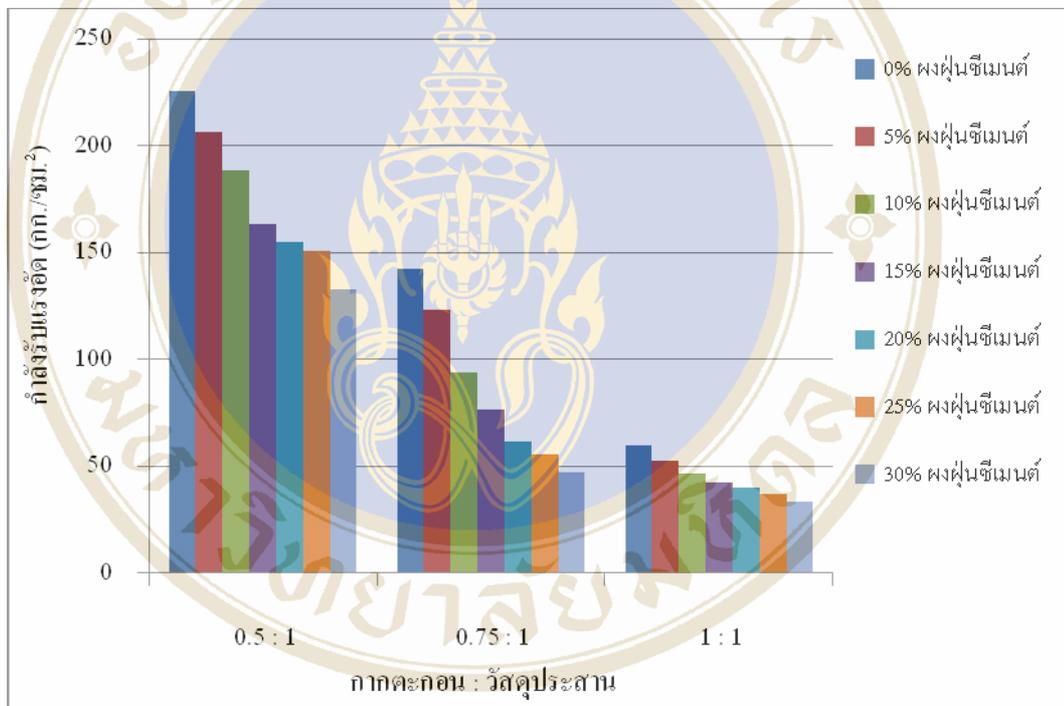
หมายเหตุ: ค่ามาตรฐานของกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตาม  
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

รูปที่ 4.2 แสดงกำลังรับแรงอัดที่มีการใช้อัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน โดยมีระยะเวลาการบ่ม 7 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง โดยที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 105.70 - 169.90 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 30.79 - 95.16 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 25.46 - 52.63 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



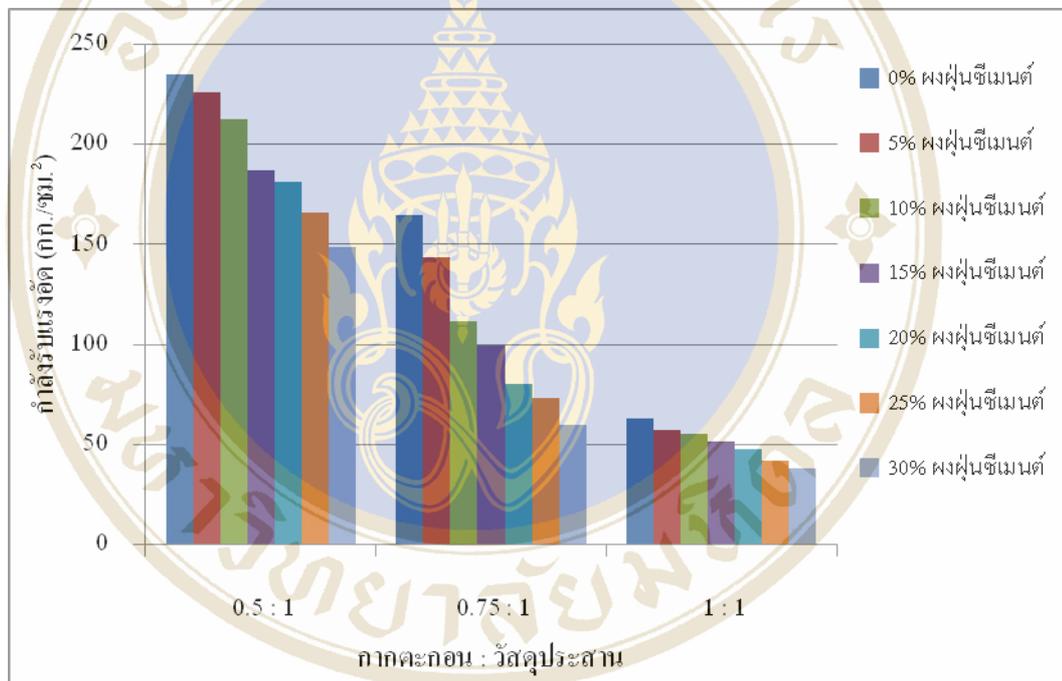
รูปที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานและเปอร์เซ็นต์การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.3 แสดงกำลังรับแรงอัดที่มีการใช้อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน โดยมีระยะเวลาการบ่ม 14 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง โดยที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 132.55 - 225.77 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 47.27 - 142.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 33.55 - 59.77 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



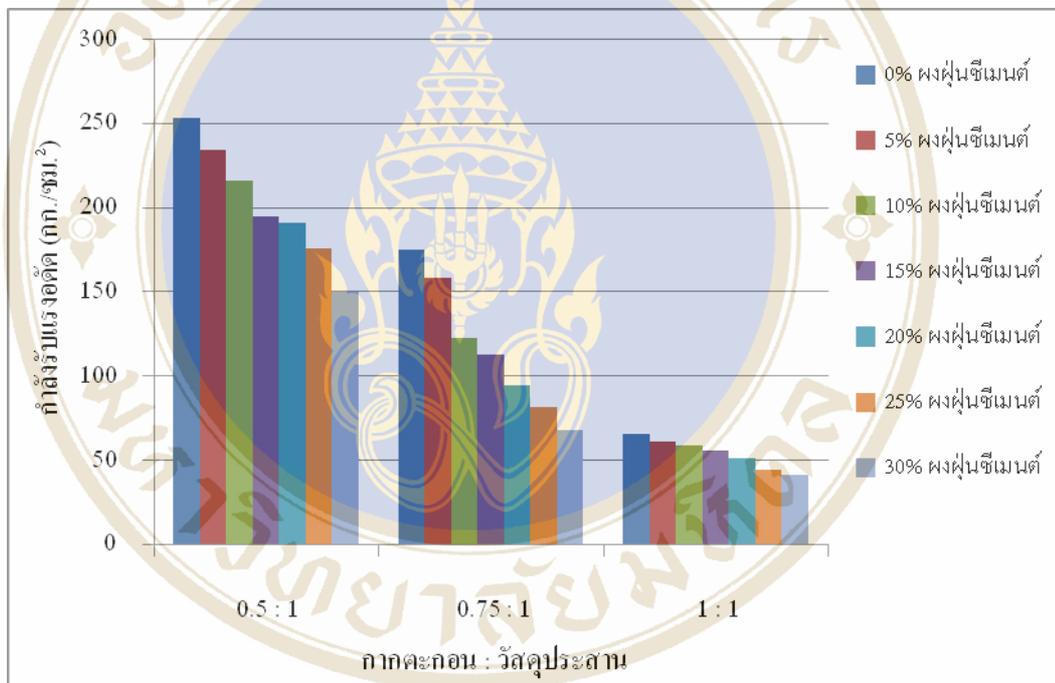
รูปที่ 4.3 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานและเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.4 แสดงกำลังรับแรงอัดที่มีการใช้อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน โดยมีระยะเวลาการบ่ม 21 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง โดยที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 148.65 - 234.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 59.92 - 164.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 38.58 - 63.43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานและเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกัน

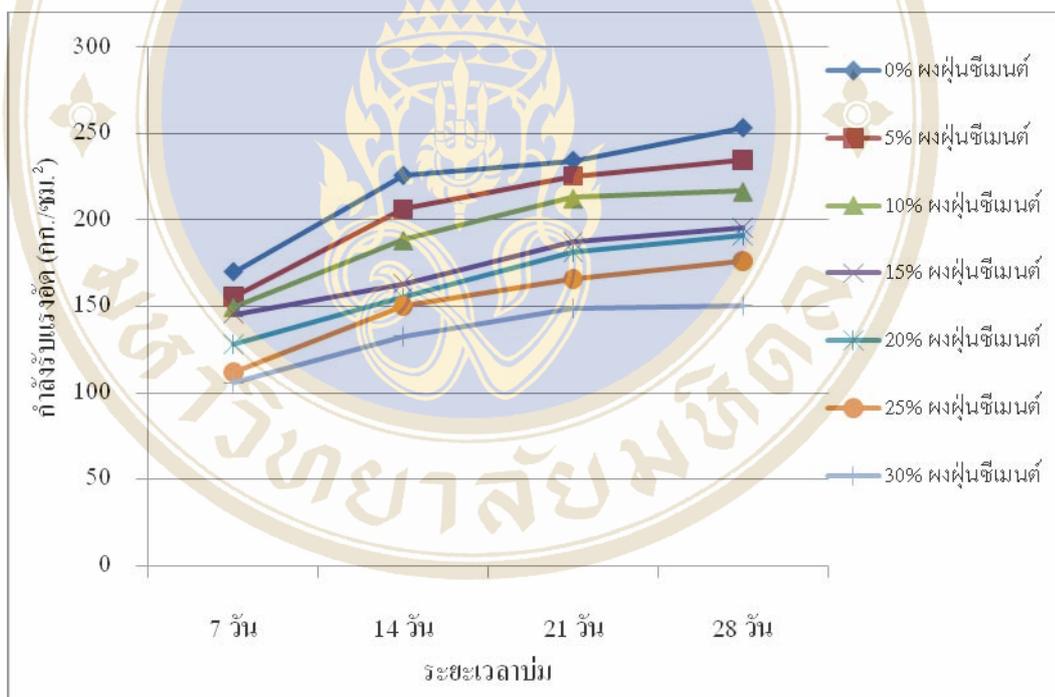
รูปที่ 4.5 แสดงกำลังรับแรงอัดที่มีการใช้อัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน โดยมีระยะเวลาการบ่ม 28 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง โดยที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 150.25 - 253.40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 68.71 - 175.10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 42.13 - 66.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน โดยมีอัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสานและเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกัน

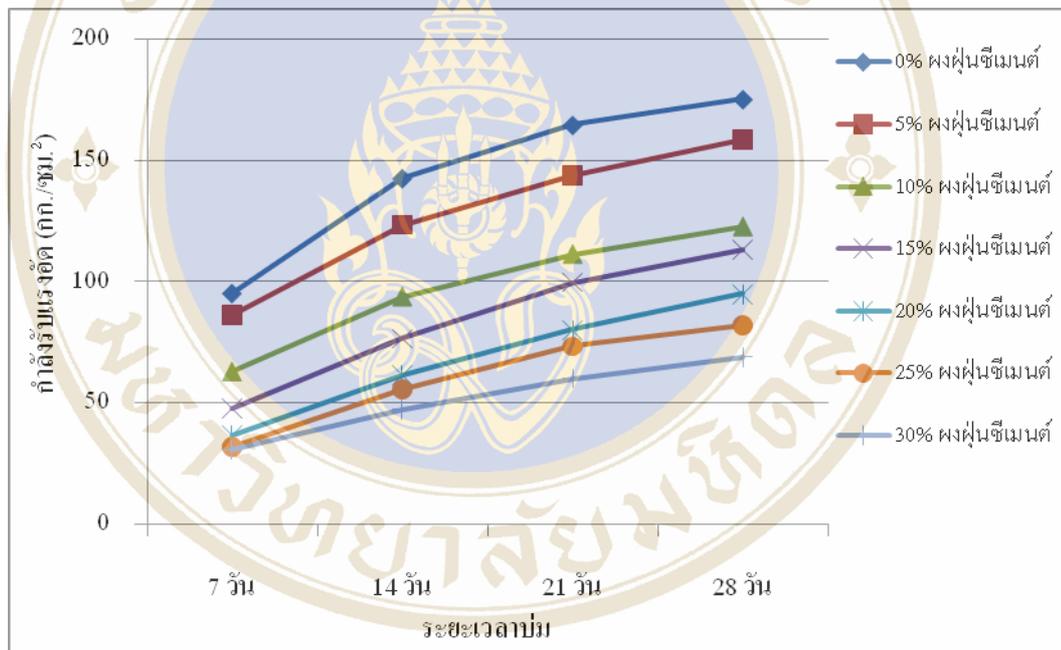
จากรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.5 ยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเริ่มต้นจาก 0% จนถึง 30% ที่อัตราการใช้กากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากันมีผลต่อกำลังรับแรงอัด กล่าวคือ เมื่อมีการเพิ่มเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์จะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงทุกระยะเวลาการบ่มทั้ง 7, 14, 21 และ 28 วัน

ในส่วนของระยะเวลาในการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งซึ่งมีผลต่อกำลังรับแรงอัด ดังรูปที่ 4.6 แสดงถึงกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็ง โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 มีปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ที่ 0-30% ที่ระยะเวลาการบ่ม 7-28 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 105.70 - 253.40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 105.70 - 169.90 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 132.55 - 225.77 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 148.65 - 234.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 150.25 - 253.40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



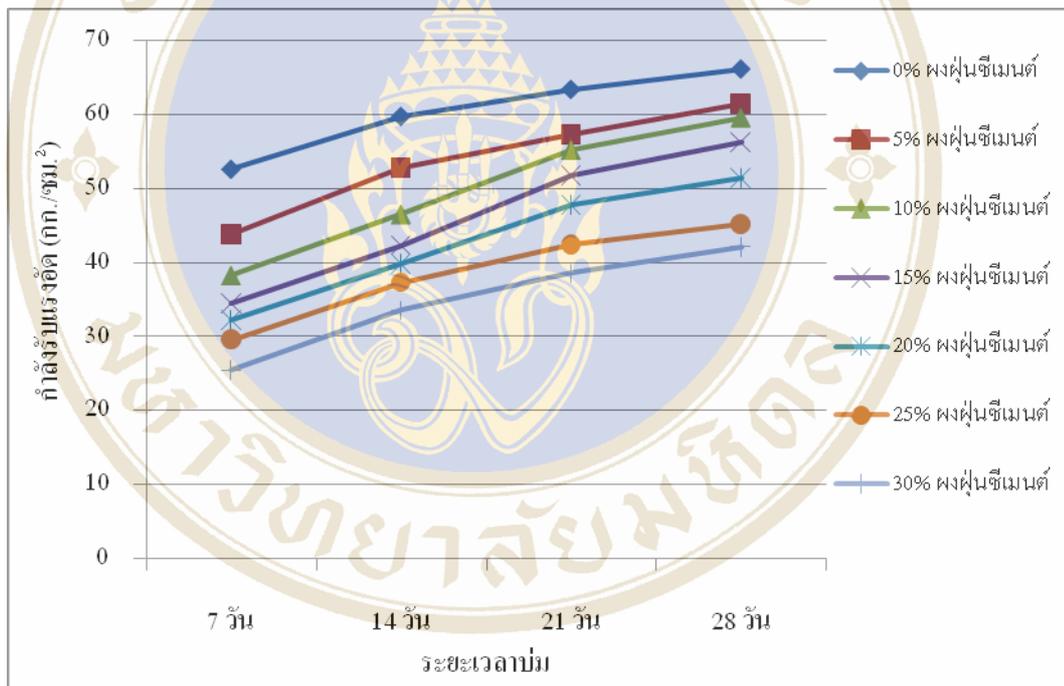
รูปที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%

รูปที่ 4.7 แสดงกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็ง โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 มีปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ที่ 0-30% ที่ระยะเวลาการบ่ม 7-28 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 30.79 - 175.10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่า กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 30.79 - 95.16 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 47.27 - 142.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 59.92 - 164.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 68.71 - 175.10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%

รูปที่ 4.8 แสดงกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็ง โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 มีปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ที่ 0-30% ที่ระยะเวลาการบ่ม 7-28 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 25.46 - 66.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่า กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 25.46 - 52.63 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 33.55 - 59.77 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 38.58 - 63.43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 42.13 - 66.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%

จากรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.8 ยังแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดที่มีระยะเวลาการบ่ม 7-14 วัน มีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเห็นได้จากความชัน (slope) ของเส้นกราฟ แต่ที่ระยะเวลาการบ่มจาก 14-21 วัน กำลังรับแรงอัดยังคงมีแนวโน้มที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น แต่มีอัตราการเพิ่มที่ลดลงกว่าในช่วงระยะเวลาการบ่มที่ 7-14 วัน และที่ระยะเวลาการบ่มจาก 21-28 วันพบว่า มีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีอัตราการเพิ่มที่ลดลงเมื่อเทียบกับที่ระยะเวลาการบ่ม 14-21 วัน

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสานทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการเพิ่มกากตะกอน โลหะหนักในการหล่อแข็ง กากตะกอนจะไปเคลือบบนผิวของวัสดุประสาน ซึ่งมีผลในการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Asavapisit, Naksrichum and Harnwajanawong, 2005) ในกระบวนการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกหน่วงได้ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของของเสีย (Malviya and Chaudhary, 2006) นอกจากนี้การเพิ่มเปอร์เซ็นต์การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ยังทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้เกิดช่องว่างภายในโครงสร้างมาก ซึ่งเกิดจากคลอไรด์และซัลเฟตที่มีมากในผงฝุ่นซีเมนต์ เป็นผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง (El-Aleem et al., 2005) ในส่วนของระยะเวลาการบ่มนั้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้อย่างต่อเนื่อง ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นและไปอุดช่องว่างภายในโครงสร้างทำให้โครงสร้างอัดตัวแน่นขึ้น (El-Aleem et al., 2005)

ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด สรุปได้ว่า กำลังรับแรงอัดมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็ง กล่าวคือเมื่อเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสานและเพิ่มเปอร์เซ็นต์การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

#### 4.3 ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก

ตารางที่ 4.5 ถึงตารางที่ 4.7 แสดงความเข้มข้นจากการชะละลายของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล ที่อัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์ผงฝุ่นซีเมนต์ที่ใช้ และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ พบว่า ทุกการทดลองมีผลของความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ผ่านค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด ซึ่งกำหนดให้โครเมียมมีค่าไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนความเข้มข้นจากการชะละลายของสังกะสี และนิกเกิลมีค่าไม่เกินมาตรฐานของสารอันตราย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ซึ่งได้กำหนดให้สังกะสีมีค่าไม่เกิน 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และนิกเกิลมีค่าไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

**ตารางที่ 4.5** การชะละลายของโครเมียมจากกากตะกอนหล่อแข็งที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของวัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

อัตราส่วน กากตะกอนต่อ วัสดุประสาน	อัตราส่วน วัสดุประสาน (OPC:CKD)	ความเข้มข้นของโครเมียมที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ (มก./ล.)			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5 : 1	100 : 0	1.079	0.959	0.828	0.818
	95 : 5	1.163	1.047	0.974	0.894
	90 : 10	1.308	1.179	1.092	1.018
	85 : 15	1.425	1.345	1.282	1.233
	80 : 20	1.641	1.533	1.477	1.398
	75 : 25	1.858	1.739	1.697	1.633
	70 : 30	2.063	1.969	1.895	1.845
0.75 : 1	100 : 0	1.517	1.401	1.328	1.268
	95 : 5	1.630	1.528	1.469	1.419
	90 : 10	1.762	1.652	1.557	1.497
	85 : 15	1.908	1.819	1.729	1.715
	80 : 20	2.043	1.932	1.834	1.779
	75 : 25	2.132	2.008	1.947	1.914
	70 : 30	2.260	2.170	2.128	2.039
1 : 1	100 : 0	2.145	2.020	1.937	1.873
	95 : 5	2.296	2.158	2.089	2.032
	90 : 10	2.508	2.395	2.297	2.236
	85 : 15	2.833	2.721	2.673	2.608
	80 : 20	3.120	3.052	2.972	2.905
	75 : 25	3.475	3.367	3.307	3.269
	70 : 30	3.727	3.640	3.580	3.520

**หมายเหตุ:** ค่ามาตรฐานการชะละลายของโครเมียมไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามมาตรฐานของ  
สารอันตรายในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด  
ค่า detection limit ของโครเมียม เท่ากับ 0.004 มิลลิกรัมต่อลิตร

**ตารางที่ 4.6** การชะละลายของสังกะสีจากกากตะกอนหล่อแข็งที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของวัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

อัตราส่วน กากตะกอนต่อ วัสดุประสาน	อัตราส่วน วัสดุประสาน (OPC:CKD)	ความเข้มข้นของสังกะสีที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ (มก./ล.)			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5 : 1	100 : 0	14.87	13.75	12.98	12.49
	95 : 5	16.10	15.38	14.61	13.90
	90 : 10	17.38	16.37	15.69	15.16
	85 : 15	18.04	16.90	16.23	15.51
	80 : 20	18.61	17.50	16.85	16.21
	75 : 25	19.28	18.51	17.77	17.33
	70 : 30	19.91	19.02	18.44	17.92
0.75 : 1	100 : 0	16.08	14.93	14.00	13.31
	95 : 5	19.17	17.87	16.84	16.10
	90 : 10	22.18	20.89	19.85	19.03
	85 : 15	25.16	23.98	22.77	21.85
	80 : 20	28.40	26.28	25.38	24.67
	75 : 25	28.57	27.50	26.47	25.68
	70 : 30	30.23	29.65	28.73	27.57
1 : 1	100 : 0	22.73	21.46	20.50	19.68
	95 : 5	23.38	22.10	21.30	20.76
	90 : 10	25.05	23.83	22.90	22.19
	85 : 15	29.07	27.79	26.87	26.10
	80 : 20	32.10	30.76	29.09	28.48
	75 : 25	35.10	33.95	33.03	32.48
	70 : 30	38.21	37.08	36.07	35.60

หมายเหตุ: ค่ามาตรฐานการชะละลายของสังกะสีไม่เกิน 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามประกาศ

กระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548

ค่า detection limit ของสังกะสีเท่ากับ 0.0009 มิลลิกรัมต่อลิตร

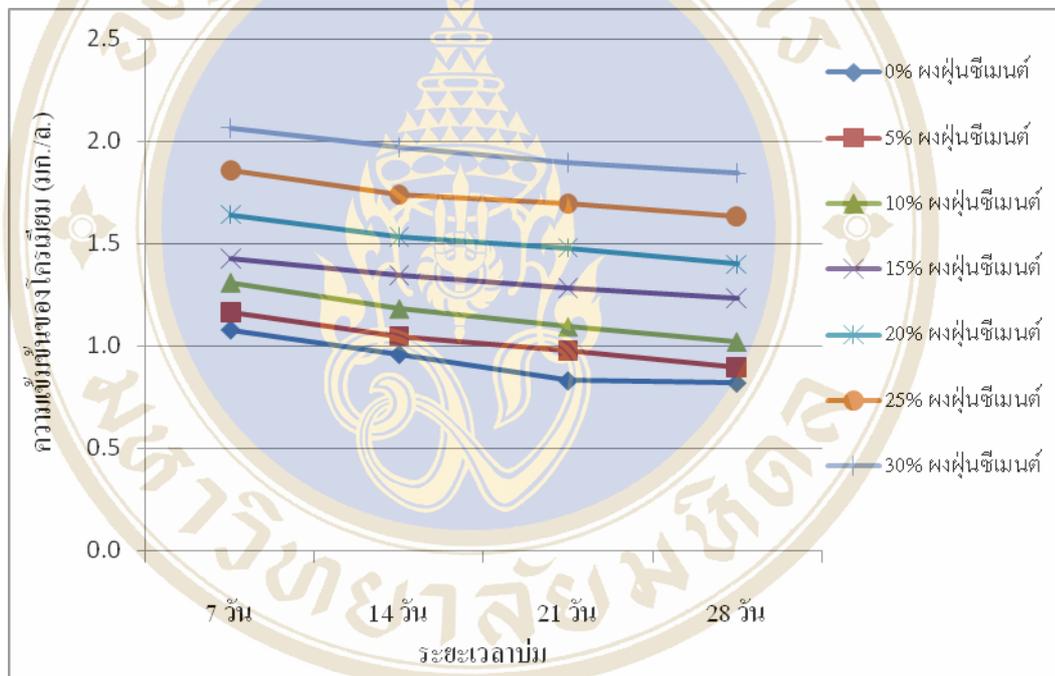
**ตารางที่ 4.7** การชะละลายของนิกเกิลจากกากตะกอนหล่อแข็งที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของวัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

อัตราส่วน กากตะกอนต่อ วัสดุประสาน	อัตราส่วน วัสดุประสาน (OPC:CKD)	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ (มก./ล.)			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5 : 1	100 : 0	0.375	0.282	0.227	0.170
	95 : 5	0.512	0.411	0.352	0.303
	90 : 10	0.636	0.549	0.494	0.449
	85 : 15	0.715	0.642	0.604	0.570
	80 : 20	0.839	0.755	0.682	0.619
	75 : 25	0.942	0.865	0.794	0.747
	70 : 30	1.154	1.075	0.992	0.940
0.75 : 1	100 : 0	1.108	1.007	0.938	0.866
	95 : 5	1.229	1.145	1.088	1.030
	90 : 10	1.429	1.321	1.238	1.175
	85 : 15	1.488	1.403	1.320	1.246
	80 : 20	1.639	1.543	1.477	1.433
	75 : 25	1.712	1.617	1.567	1.515
	70 : 30	1.836	1.747	1.688	1.635
1 : 1	100 : 0	1.693	1.587	1.539	1.475
	95 : 5	1.737	1.664	1.592	1.539
	90 : 10	1.883	1.783	1.722	1.653
	85 : 15	1.984	1.914	1.863	1.814
	80 : 20	2.037	1.980	1.927	1.876
	75 : 25	2.109	2.035	1.962	1.900
	70 : 30	2.205	2.119	2.062	2.019

หมายเหตุ: ค่ามาตรฐานการชะละลายของนิกเกิลไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548

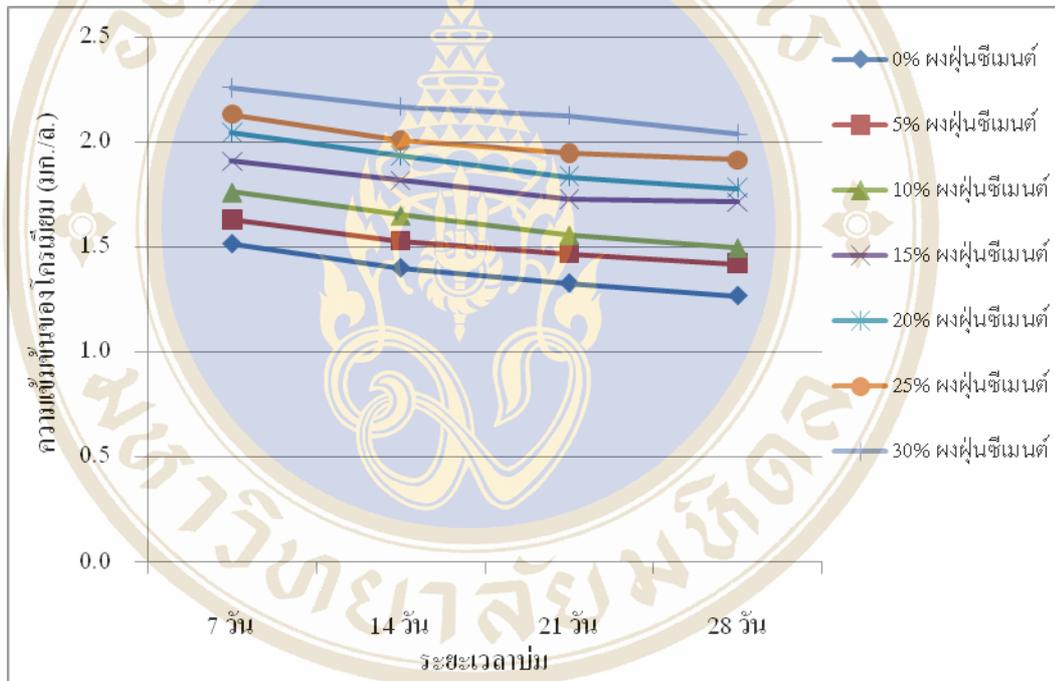
ค่า detection limit ของนิกเกิลเท่ากับ 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตร

รูปที่ 4.9 แสดงความเข้มข้นจากการชะละลายของโครเมียมซึ่งทดสอบด้วยวิธี TCLP โดยใช้ อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 ปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% ระยะเวลาการบ่ม 7-28 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งมีผลทำให้การชะละลายของโครเมียมลดลง โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.079 - 2.063 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 0.959 - 1.969 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 0.828 - 1.895 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 0.818 - 1.845 มิลลิกรัมต่อลิตร



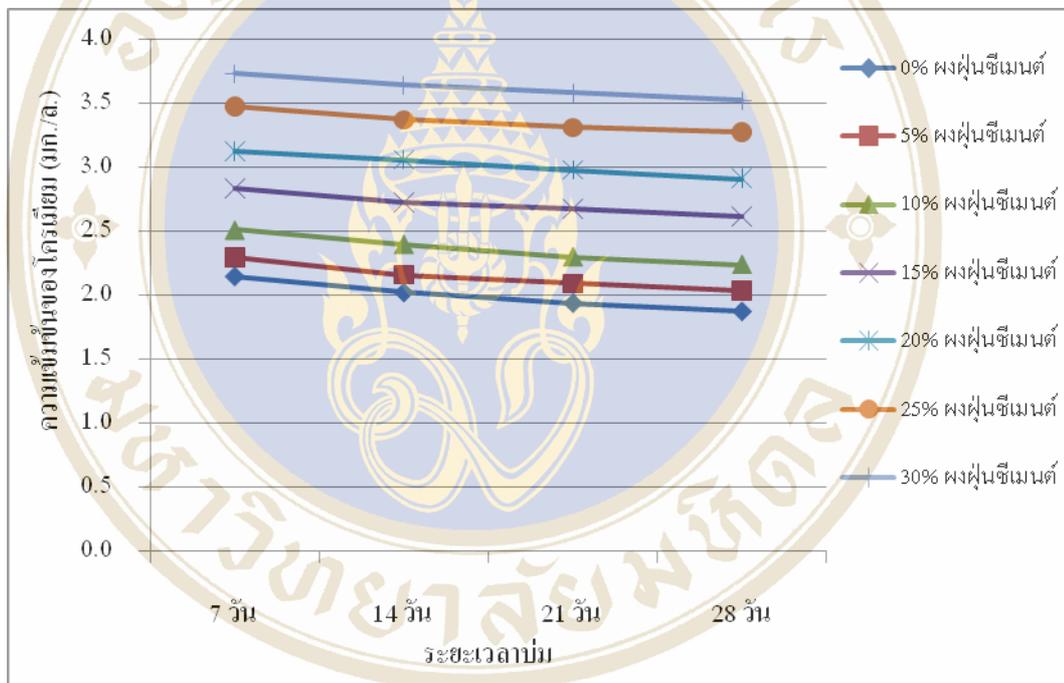
รูปที่ 4.9 การชะละลายของโครเมียมจากกากตะกอนหล่อแข็ง ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%

รูปที่ 4.10 แสดงความเข้มข้นจากการชะละลายของโครเมียมซึ่งทดสอบด้วยวิธี TCLP โดยใช้อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 ปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% ระยะเวลาการบ่ม 7-28 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งมีผลทำให้การชะละลายของโครเมียมลดลง โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.517 - 2.260 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.401 - 2.170 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.328 - 2.128 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.268 - 2.039 มิลลิกรัมต่อลิตร



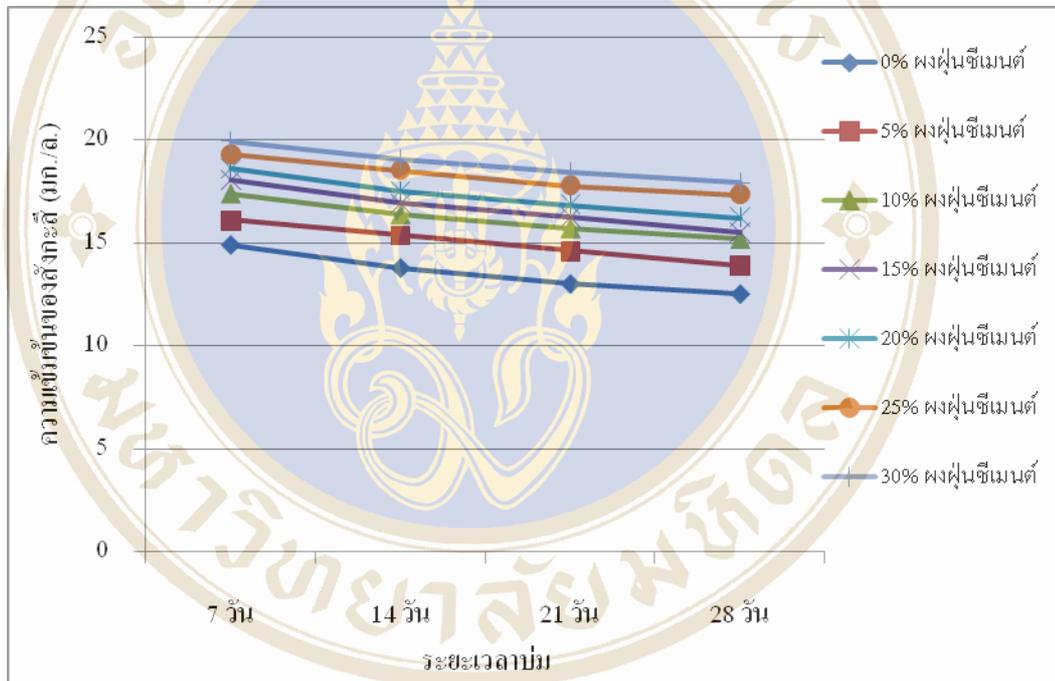
รูปที่ 4.10 การชะละลายของโครเมียมจากกากตะกอนหล่อแข็ง ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%

รูปที่ 4.11 แสดงความเข้มข้นจากการชะละลายของโครเมียมซึ่งทดสอบด้วยวิธี TCLP โดยใช้อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 ปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% ระยะเวลาการบ่ม 7-28 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งมีผลทำให้การชะละลายของโครเมียมลดลง โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 2.145 - 3.727 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 2.020 - 3.640 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.937 - 3.580 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.873 - 3.520 มิลลิกรัมต่อลิตร



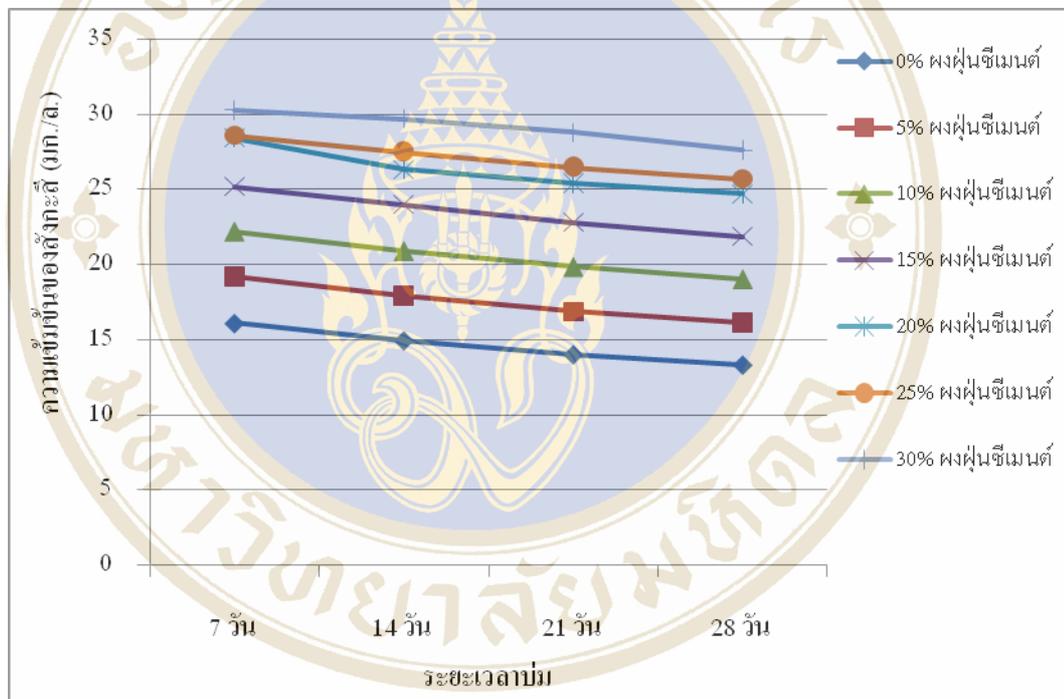
รูปที่ 4.11 การชะละลายของโครเมียมจากกากตะกอนหล่อแข็ง ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%

รูปที่ 4.12 แสดงความเข้มข้นจากการชะละลายของสังกะสีซึ่งทดสอบด้วยวิธี TCLP โดยใช้ อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 ปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% ระยะเวลาการบ่ม 7-28 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งมีผลทำให้การชะละลายของสังกะสีลดลง โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 14.87 - 19.91 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 13.75 - 19.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 12.98 - 18.44 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 12.49 - 17.92 มิลลิกรัมต่อลิตร



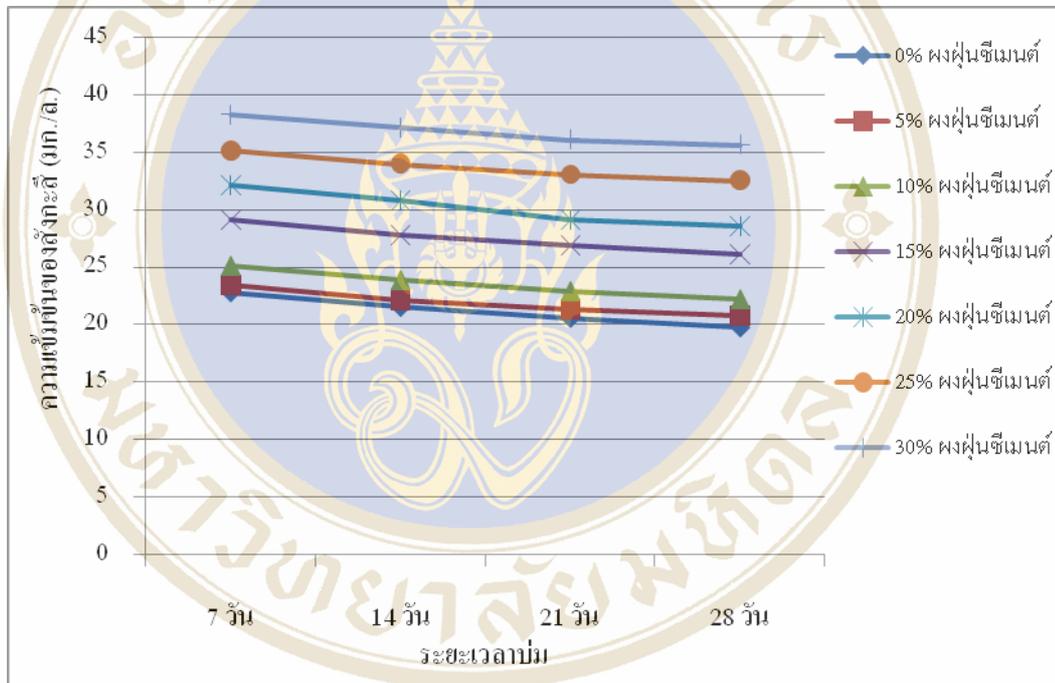
รูปที่ 4.12 การชะละลายของสังกะสีจากกากตะกอนหล่อแข็ง ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%

รูปที่ 4.13 แสดงความเข้มข้นจากการชะละลายของสังกะสีซึ่งทดสอบด้วยวิธี TCLP โดยใช้ อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 ปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% ระยะเวลาการบ่ม 7-28 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งมีผลทำให้ การชะละลายของสังกะสีลดลง โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 16.08 - 30.23 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 14.93 - 29.65 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 14.00 - 28.73 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา การบ่ม 28 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 13.31 - 27.57 มิลลิกรัมต่อลิตร



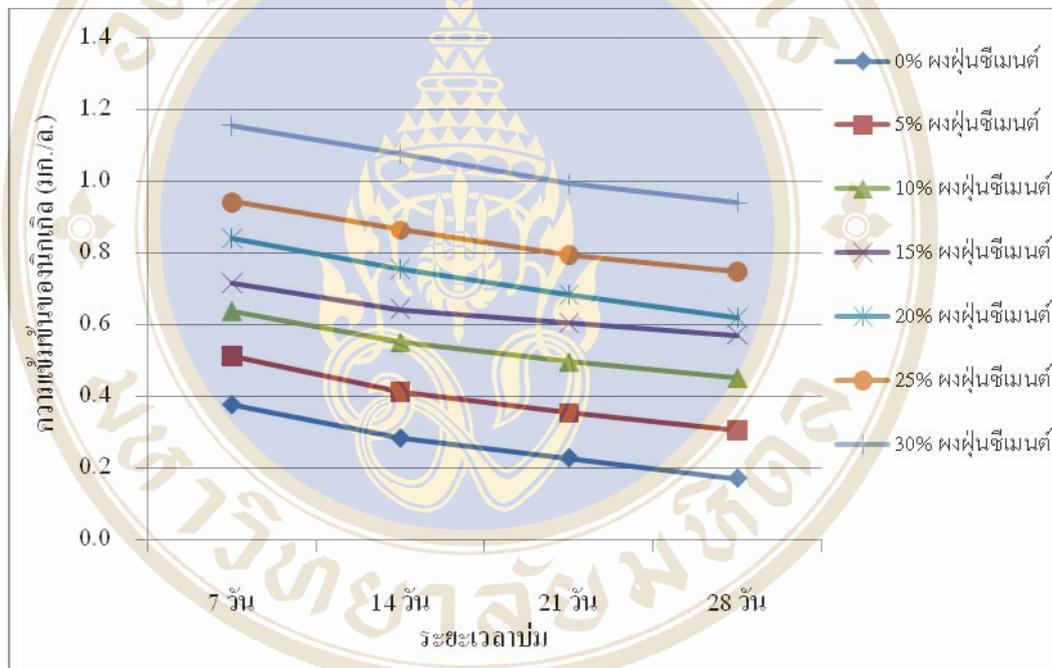
รูปที่ 4.13 การชะละลายของสังกะสีจากกากตะกอนหล่อแข็ง ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลา การบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 และ ปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%

รูปที่ 4.14 แสดงความเข้มข้นจากการชะละลายของสังกะสีซึ่งทดสอบด้วยวิธี TCLP โดยใช้ อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 ปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% ระยะเวลาการบ่ม 7-28 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งมีผลทำให้การชะละลายของสังกะสีลดลง โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 22.73 - 38.21 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 21.46 - 37.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 20.50 - 36.07 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 19.68 - 35.60 มิลลิกรัมต่อลิตร



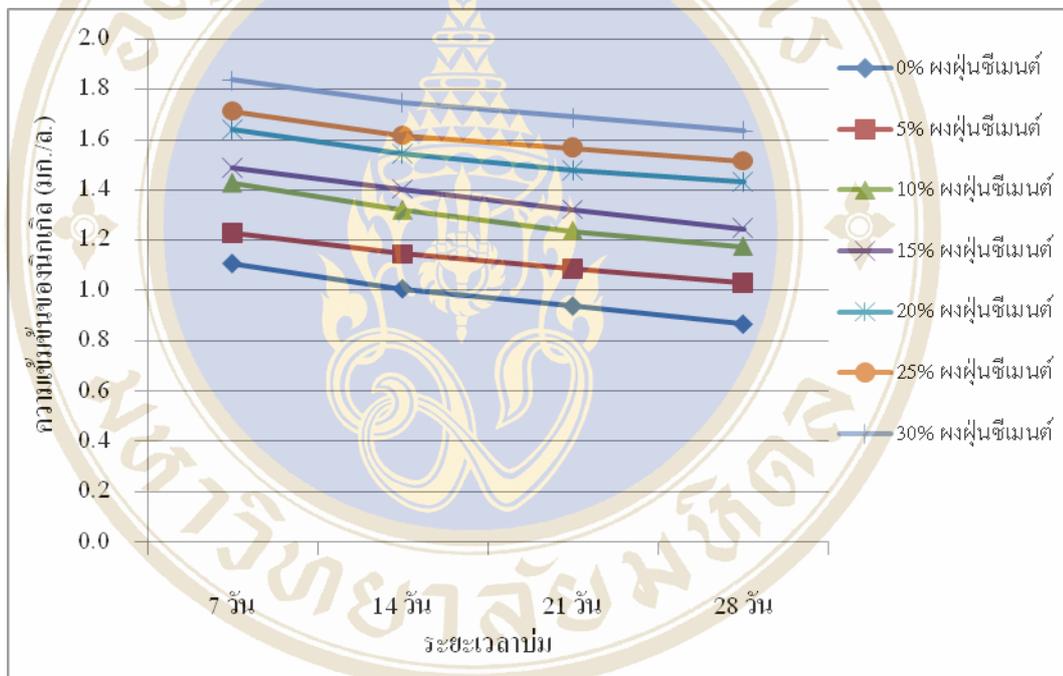
รูปที่ 4.14 การชะละลายของสังกะสีจากกากตะกอนหล่อแข็ง ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%

รูปที่ 4.15 แสดงความเข้มข้นจากการชะละลายของนิกเกิลซึ่งทดสอบด้วยวิธี TCLP โดยใช้ อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 ปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% ระยะเวลาการบ่ม 7-28 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งมีผลทำให้การชะละลายของนิกเกิลลดลง โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 0.375 - 1.154 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 0.282 - 1.075 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 0.227 - 0.992 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 0.170 - 0.940 มิลลิกรัมต่อลิตร



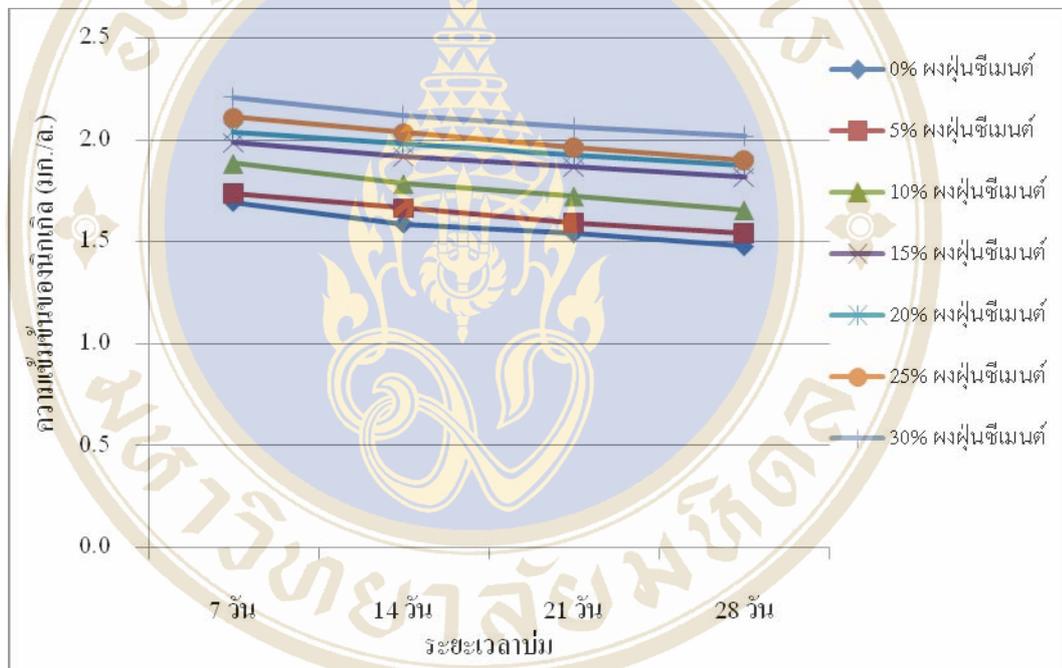
รูปที่ 4.15 การชะละลายของนิกเกิลจากกากตะกอนหล่อแข็ง ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%

รูปที่ 4.16 แสดงความเข้มข้นจากการชะละลายของนิกเกิลซึ่งทดสอบด้วยวิธี TCLP โดยใช้ อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 ปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% ระยะเวลาการบ่ม 7-28 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งมีผลทำให้ การชะละลายของนิกเกิลลดลง โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.108 - 1.836 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.007 - 1.747 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 0.938 - 1.688 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา การบ่ม 28 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 0.866 - 1.635 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.16 การชะละลายของนิกเกิลจากกากตะกอนหล่อแข็ง ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลา การบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 และ ปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%

รูปที่ 4.17 แสดงความเข้มข้นจากการชะละลายของนิกเกิลซึ่งทดสอบด้วยวิธี TCLP โดยใช้อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 ปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% ระยะเวลาการบ่ม 7-28 วัน พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งมีผลทำให้การชะละลายของนิกเกิลลดลง โดยที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.693 - 2.202 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.587 - 2.119 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 21 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.539 - 2.062 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีการชะละลายอยู่ในช่วง 1.475 - 2.019 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.17 การชะละลายของนิกเกิลจากกากตะกอนหล่อแข็ง ทดสอบด้วยวิธี TCLP ที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ โดยมีอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 และปริมาณการใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30%

ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนหล่อแข็ง พบว่า การชะละลายของโลหะหนักมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็ง กล่าวคือ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน และเพิ่มเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์มีผลทำให้การชะละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจะมีผลทำให้การชะละลายของโลหะหนักลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าเกิดจากโครงสร้าง (microstructure) ที่สมบูรณ์น้อยกว่า ซึ่งคาดว่าจะนำไปสู่การชะละลายที่เพิ่มขึ้น (Glasser, 1993 อ้างถึงใน Asavapisit, Naksrichum และ Harnwajanawong, 2005) การที่โลหะหนักในกากตะกอนที่ตรึงด้วยวัสดุประสานประเภทซีเมนต์ชะละลายออกมาน้อยลง เนื่องจากโลหะหนักถูกตรึงด้วยกลไกต่างๆ เช่น ถูกจับในซีเมนต์ในรูปออกไซด์ ถูกดูดซับที่ผิว หรือเกิดการผสมเข้าภายในเนื้อซีเมนต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนัก (Karamalidis and Voudrias, 2007)

ในกรณีของโครเมียมจะอยู่ในรูปของ Calcium chromium oxide hydrate ( $\text{CaCrO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของโครเมียมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยโครเมียมเข้าไปแทนที่ซิลิกอนในผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงทำให้โครเมียมเสถียรและเป็นก้อนแข็ง (Lin, Chen and Lin, 1996) ส่วนสังกะสีจะเข้าไปอยู่ในอนุภาคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ด้วยกลไกต่อไปนี้มากที่สุด (1) เข้าไปอยู่ใน interlayer ของ C-S-H หรือ (2) การดูดซับในผลึก (Ziegler, Giere and Johnson, 2001) ส่วนนิกเกิลถูกตรึงด้วยซีเมนต์โดยอยู่ในรูป  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  gel ซึ่งผสมอยู่ใน C-S-H phase (Atkins et al., 1993 อ้างถึงใน Gougar, Scheetz and Roy, 1996)

#### 4.4 ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนัก

ในการหาประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ได้คำนวณ (ดังสมการที่ 1) เฉพาะที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เนื่องจากที่ระยะเวลาการบ่มดังกล่าว เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสมบูรณ์ที่สุด

$$\text{ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนัก (\%)} = \frac{A-B}{A} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ A คือ การชะละลายของโลหะหนักในกากตะกอนก่อนการตรึง

B คือ การชะละลายของโลหะหนักในกากตะกอนหลังการตรึง

จากประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอน คือ โครเมียม สังกะสี และนิกเกิล ในกระบวนการหล่อแข็งเมื่อใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ 0-30% โดยน้ำหนัก พบว่า ประสิทธิภาพในการตรึงนิกเกิลสูงกว่าสังกะสี และโครเมียม ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 มีประสิทธิภาพในการตรึงโครเมียม สังกะสี และนิกเกิลอยู่ในช่วง 85.47 - 93.56%, 94.51 - 96.17% และ 98.25 - 99.68% ตามลำดับ ที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 มีประสิทธิภาพในการตรึงโครเมียม สังกะสี และนิกเกิลอยู่ในช่วง 83.94 - 90.02%, 91.55 - 95.92% และ 96.95 - 98.38% ตามลำดับ และที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 มีประสิทธิภาพในการตรึงโครเมียม สังกะสี และนิกเกิลอยู่ในช่วง 72.28 - 85.25%, 89.09 - 93.97% และ 96.23 - 97.25% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอนที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

อัตราส่วน กากตะกอนต่อ วัสดุประสาน	อัตราส่วน วัสดุประสาน (OPC:CKD)	ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอน (%)		
		โครเมียม	สังกะสี	นิกเกิล
0.50 : 1	100 : 0	93.56	96.17	99.68
	95 : 5	92.96	95.74	99.43
	90 : 10	91.98	95.35	99.16
	85 : 15	90.29	95.25	98.94
	80 : 20	88.99	95.03	98.85
	75 : 25	87.14	94.69	98.61
	70 : 30	85.47	94.51	98.25
0.75 : 1	100 : 0	90.02	95.92	98.38
	95 : 5	88.83	95.07	98.08
	90 : 10	88.21	94.17	97.81
	85 : 15	86.50	93.30	97.68
	80 : 20	85.99	92.44	97.33
	75 : 25	84.93	92.13	97.17
	70 : 30	83.94	91.55	96.95
1 : 1	100 : 0	85.25	93.97	97.25
	95 : 5	84.00	93.64	97.13
	90 : 10	82.39	93.20	96.92
	85 : 15	79.46	92.00	96.62
	80 : 20	77.13	91.27	96.50
	75 : 25	74.26	90.04	96.46
	70 : 30	72.28	89.09	96.23

#### 4.5 ค่าใช้จ่ายในการหล่อแข็ง

การศึกษาค่าใช้จ่ายในการหล่อแข็งได้คำนวณจากค่าวัสดุที่ใช้ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักเท่านั้น โดยราคาวัสดุต่างๆ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทราย และน้ำ ที่ใช้ในการคำนวณใช้ตามราคาท้องตลาด โดยไม่คิดราคาของผงปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่า ที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อผงปูนซีเมนต์ เท่ากับ 70 : 30 โดยน้ำหนัก มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดคือ 4,778 บาท ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก 1,000 กิโลกรัม ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.10 และถ้าสามารถเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานได้อีกจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักลดลงกว่านี้

ตารางที่ 4.9 ราคาวัสดุต่างๆที่ใช้ในการหล่อแข็ง

วัสดุที่ใช้ในการหล่อแข็ง	ราคา (บาท/1,000 กก.)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2,532
ผงปูนซีเมนต์	-
ทราย	1,500
น้ำ	10 (บาทต่อลูกบาศก์เมตร)

**ตารางที่ 4.10** ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการหล่อแข็งกาทะคอนโลหะหนัก 1,000 กิโลกรัม ที่อัตราส่วน  
กาทะคอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน และเปอร์เซ็นต์การใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ต่าง ๆ

อัตราส่วน กาทะคอน ต่อ วัสดุ ประสาน	อัตราส่วน วัสดุประสาน (OPC:CKD)	ปริมาณการใช้วัสดุต่างๆ ต่อการหล่อแข็งกาทะคอน 1,000 กก.								* ราคารวม =1+2+3+4 (บาท)
		OPC (2.532 บ./กก.)		CKD (0.00 บ./กก.)		ทราย (1.50 บ./กก.)		น้ำ (0.01 บ./ล.)		
		กก.	บาท 1*	กก.	บาท 2*	กก.	บาท 3*	ลิตร	บาท 4*	
0.5:1	100:0	2000	5064.00	0	0	4000	6000	1200	12	11,076.00
	95:5	1900	4810.80	100	0	4000	6000	1200	12	10,822.80
	90:10	1800	4557.60	200	0	4000	6000	1200	12	10,569.60
	85:15	1700	4304.40	300	0	4000	6000	1200	12	10,316.40
	80:20	1600	4051.20	400	0	4000	6000	1200	12	10,063.20
	75:25	1500	3798.00	500	0	4000	6000	1200	12	9,810.00
	70:30	1400	3544.80	600	0	4000	6000	1200	12	9,556.80
0.75:1	100:0	1333.33	3375.99	0	0	2666.66	4000	800	8	7,383.99
	95:5	1266.66	3207.18	66.67	0	2666.66	4000	800	8	7,215.18
	90:10	1200.00	3038.40	133.33	0	2666.66	4000	800	8	7,046.40
	85:15	1133.33	2869.59	200.00	0	2666.66	4000	800	8	6,877.59
	80:20	1066.66	2700.78	266.67	0	2666.66	4000	800	8	6,708.78
	75:25	1000.00	2532.00	333.33	0	2666.66	4000	800	8	6,540.00
	70:30	933.33	2363.19	400.00	0	2666.66	4000	800	8	6,371.19
1 : 1	100:0	1000	2532.00	0	0	2000	3000	600	6	5,538.00
	95:5	950	2405.40	50	0	2000	3000	600	6	5,411.40
	90:10	900	2278.80	100	0	2000	3000	600	6	5,284.80
	85:15	850	2152.20	150	0	2000	3000	600	6	5,158.20
	80:20	800	2025.60	200	0	2000	3000	600	6	5,031.60
	75:25	750	1899.00	250	0	2000	3000	600	6	4,905.00
	70:30	700	1772.40	300	0	2000	3000	600	6	4,778.40

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 ลักษณะสมบัติของผงปูนซีเมนต์

ผงปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ทำการเก็บจากเครื่องคัดจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีเทา องค์ประกอบทางเคมีของผงปูนซีเมนต์คล้ายกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีแคลเซียมออกไซด์ 67.12% ซิลิกอนไดออกไซด์ 21.96% อะลูมิเนียมออกไซด์ 5.12% และเฟอร์ริกออกไซด์ 2.71% มีความชื้นเท่ากับ 0.18% ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11.53 มีความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิลเท่ากับ 75, 102 และ 34 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล จากการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP เท่ากับ 0.821, 0.856 และ 0.239 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากความเข้มข้นของโลหะหนักและความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักในผงปูนซีเมนต์เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด สรุปได้ว่าผงปูนซีเมนต์ไม่จัดเป็นของเสียอันตราย

##### 5.1.2 ลักษณะสมบัติของกากตะกอนโลหะหนัก

กากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า มีสีเขียว กลิ่นฉุน มีความชื้นเท่ากับ 83.60% ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.87 มีความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิลเท่ากับ 85,125, 77,605 และ 12,315 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล จากการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP เท่ากับ 12.70, 326.25 และ 53.61 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากความเข้มข้นของโลหะหนักและความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักในกากตะกอนเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด สรุปได้ว่ากากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการทดลองนี้จัดเป็นของเสียอันตราย

### 5.1.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด สรุปได้ว่า กำลังรับแรงอัดมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็ง กล่าวคือ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน และเพิ่มเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์ มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง และเมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งจะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่า ทุกอัตราส่วนที่ใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% โดยน้ำหนัก จะมีกำลังรับแรงอัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งกำหนดให้กำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกากตะกอนหล่อแข็งที่ใช้อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 มีกำลังรับแรงอัดต่ำสุดมีค่าอยู่ในช่วง 42.13 - 66.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 150.25 - 253.40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

### 5.1.4 ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก

ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนหล่อแข็ง พบว่า การชะละลายของโลหะหนักมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็ง กล่าวคือ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน และเพิ่มเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์มีผลทำให้การชะละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งจะมีผลทำให้การชะละลายของโลหะหนักลดลง ซึ่งผลการทดสอบการชะละลายของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล พบว่า ทุกอัตราส่วนที่ใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% โดยน้ำหนัก มีผลของความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด ซึ่งกำหนดให้โครเมียมมีค่าไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนความเข้มข้นจากการชะละลายของสังกะสีและนิกเกิลมีค่าไม่เกินมาตรฐานของสารอันตราย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ซึ่งกำหนดให้สังกะสีมีค่าไม่เกิน 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และนิกเกิลมีค่าไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการหล่อแข็งที่ใช้อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 และใช้ผงปูนซีเมนต์ที่ 0-30% โดยน้ำหนัก มีความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักสูงสุด โดยมีการชะละลายของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิลอยู่ในช่วง 1.873 - 3.520, 19.68 - 35.60 และ 1.475 - 2.019 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5 : 1 และใช้ผง

ฝุ่นซีเมนต์ 0-30% โดยน้ำหนัก มีความเข้มข้นจากการชะละลายของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิลต่ำสุดโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.818 - 1.845, 12.49 - 17.92 และ 0.170 - 0.940 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

### 5.1.5 ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอน

ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอนในกระบวนการหล่อแข็งเมื่อใช้ผงฝุ่นซีเมนต์ 0-30% โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน พบว่าประสิทธิภาพในการตรึงนิกเกิลสูงกว่า สังกะสี และโครเมียม ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 มีประสิทธิภาพในการตรึงโครเมียม สังกะสี และนิกเกิลอยู่ในช่วง 85.47 - 93.56%, 94.51 - 96.17% และ 98.25 - 99.68% ตามลำดับ ที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 มีประสิทธิภาพในการตรึงโครเมียม สังกะสี และนิกเกิลอยู่ในช่วง 83.94 - 90.02%, 91.55 - 95.92% และ 96.95 - 98.38% ตามลำดับ และที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 มีประสิทธิภาพในการตรึงโครเมียม สังกะสี และนิกเกิลอยู่ในช่วง 72.28 - 85.25%, 89.09 - 93.97% และ 96.23 - 97.25% ตามลำดับ

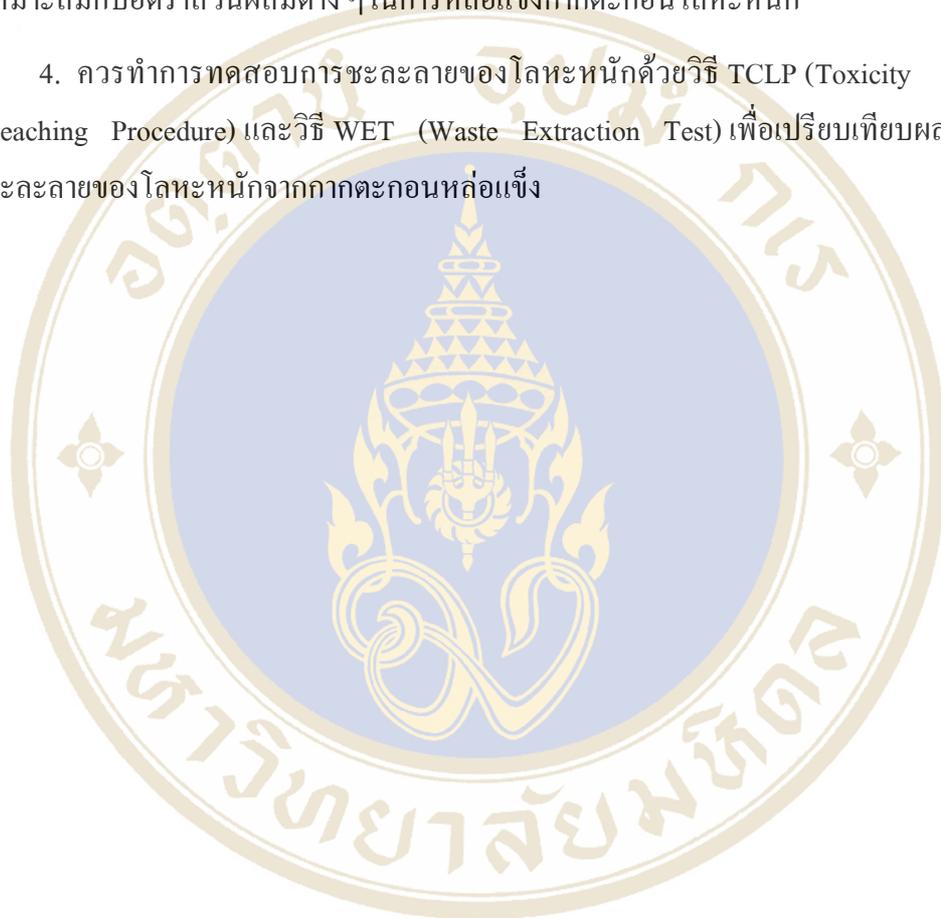
### 5.1.6 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการหล่อแข็ง

จากอัตราส่วนผสมที่ทำการทดลอง พบว่า ที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อผงฝุ่นซีเมนต์ เท่ากับ 70 : 30 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากที่อัตราส่วนผสมนี้มีค่าการชะละลายของโครเมียม สังกะสีและนิกเกิล และค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบโดยวิธีTCLP ตามที่ US.EPA กำหนด มาตรฐานของสารอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และมาตรฐานกำลังรับแรงอัดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) และเมื่อพิจารณาในด้านค่าใช้จ่ายในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก 1,000 กิโลกรัม พบว่า ที่อัตราส่วนนี้มีค่าใช้จ่ายในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักน้อยที่สุด คือ 4,778 บาท

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม

1. ควรทำการเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเพื่อศึกษาถึงอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่ยังให้ผลของการชะละลายของโลหะหนักและกำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

2. ควรทำการเพิ่มปริมาณผงปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยเพิ่มให้มากกว่า 30% โดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบผลของการชะละลายของโลหะหนักและกำลังรับแรงอัดจากการใช้ผงปูนซีเมนต์ในปริมาณต่าง ๆ
3. ควรทำการแปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพื่อให้ได้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมกับอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก
4. ควรทำการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) และวิธี WET (Waste Extraction Test) เพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนหล่อแข็ง



การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์  
เป็นวัสดุประสาน (SOLIDIFICATION OF HEAVY METAL SLUDGE BY USING  
PORTLAND CEMENT AND CEMENT KILN DUST AS BINDERS)

ประภัสสร มณีรัตน์ 4837317 ENAT/M

วท.ม. (เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม)

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: อุษณีย์ อุษะเสถียร, วศ.ม., วินัย นุตมากุล, Ph.D.

## บทสรุปแบบสมบูรณ์

### 1. บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมที่ใช้โลหะหนักเป็นวัตถุดิบมีหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมชุบโลหะ เป็นต้น กากตะกอนที่มีโลหะหนักในปริมาณสูงจัดเป็นของเสียอันตราย วิธีการบำบัดของเสียอันตรายมีหลายวิธี เช่น การบำบัดทางกายภาพ เคมี ชีวภาพ การเลือกวิธีการบำบัดของเสียควรเลือกให้เหมาะสมกับของเสียประเภทต่างๆซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของของเสียและลักษณะเฉพาะตัวของของเสียนั้น โดยทั่วไปกากตะกอนที่มีโลหะหนักในปริมาณที่สูงไม่สามารถทำการกำจัดด้วยการฝังกลบได้โดยตรง เพราะจะมีผลกระทบต่อกรปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำใต้ดิน (Singh and Pant, 2006) จึงต้องมีการบำบัดด้วยวิธีอื่นก่อนที่จะนำมากำจัดโดยการฝังกลบ

การปรับเสถียรและการหล่อแข็ง (stabilization and solidification) เป็นกลไกของการผสมกันระหว่างกากตะกอนและวัสดุประสานจนกลายเป็นก้อนหล่อแข็ง วัสดุประสานที่ใช้ เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ordinary Portland cement, OPC) เถ้าลอยลิกไนต์ ผงฝุ่นซีเมนต์ (cement kiln dust, CKD) วัสดุปอชโซลานอื่นๆ และผลิตภัณฑ์ได้จากอุตสาหกรรมต่างๆ (Roy et al., 1992) โดยการปรับเสถียรและการหล่อแข็งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดของเสียอันตรายก่อนที่จะนำไปทำการฝังกลบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการนำไปกำจัด มีความเหมาะสมในการ

บำบัดของเสียอันตรายประเภทสารอนินทรีย์ เช่น โลหะหนัก การปรับเสถียรและการหล่อแข็ง ด้วยวิธี cement - based เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเพราะเป็นการปรับเสถียรทางเคมีของของเสียอันตรายที่ปนเปื้อนและทำให้เป็นก้อนหล่อแข็ง ซึ่งของเสียอันตรายจะถูกทำให้อยู่ในรูปที่มีความคงตัว (Singh and Pant, 2006) ดังนั้นการหล่อแข็งจึงเป็นวิธีการจำกัดความสามารถในการละลายและเคลื่อนที่ของของเสียอันตราย โดยการใช้วัสดุประสานต่างๆ ซึ่งจะเป็นการลดการแพร่กระจายของของเสียอันตรายออกสู่สิ่งแวดล้อม และยังช่วยในการลดพื้นที่ผิวของของเสีย การขนส่งเคลื่อนย้ายทำได้สะดวกและง่ายต่อการนำไปกำจัดโดยการฝังกลบอย่างปลอดภัย

ปัจจุบันได้มีการนำของเหลือจากภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรมมาใช้ในการกระบวนการหล่อแข็งมากขึ้น เพราะนอกจากจะเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของกากตะกอนหล่อแข็งแล้ว ยังเพื่อทดแทนปริมาณวัสดุประสาน เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากราคาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในกระบวนการหล่อแข็งมีราคาสูง ผงฝุ่นซีเมนต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งผงฝุ่นซีเมนต์มีคุณสมบัติทางเคมีที่คล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้ผงฝุ่นซีเมนต์มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ในการหล่อแข็งกากของเสียโดยใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อเป็นวัสดุประสาน

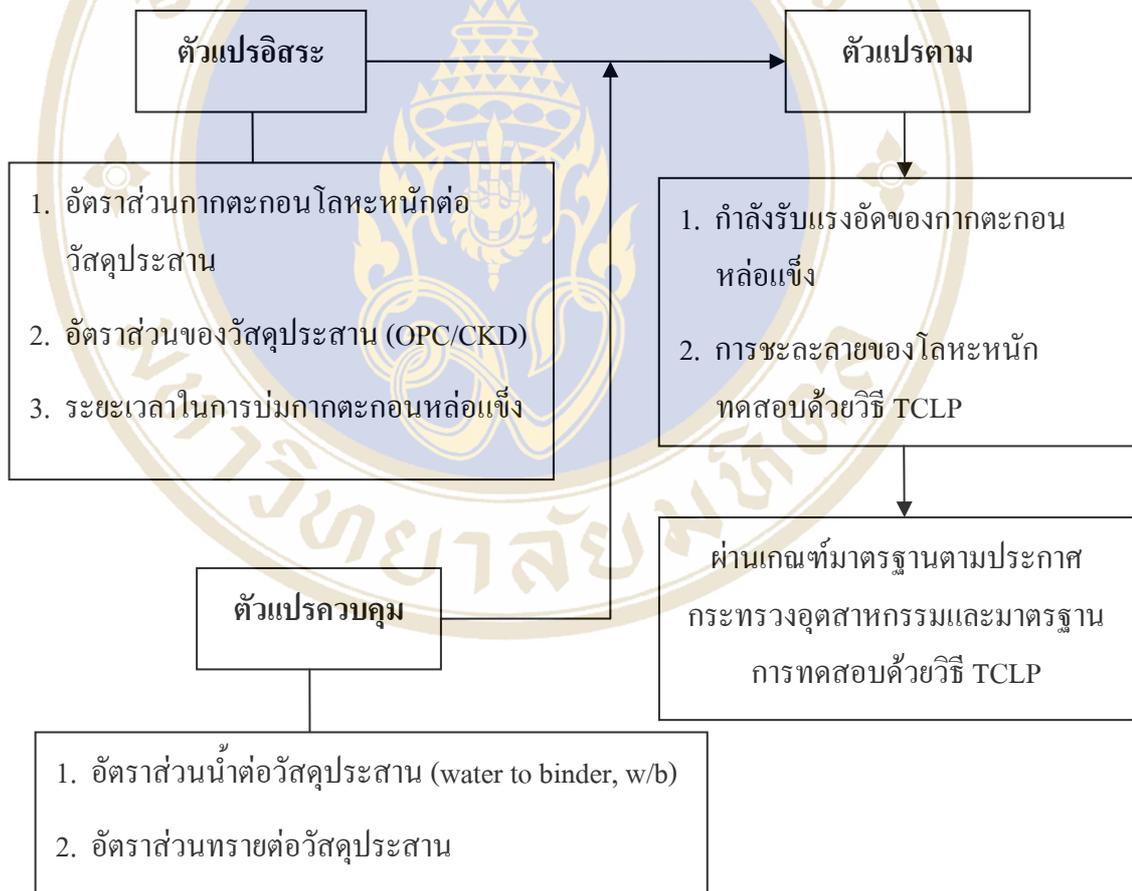
งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน และใช้กำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักเป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิผลในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก

## 1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

1. ศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนที่ปนเปื้อน โลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน
2. ประเมินประสิทธิผลของการหล่อแข็งโดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน
3. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนของวัสดุประสาน (OPC/CKD) ในการหล่อแข็ง

### 1.3 กรอบแนวความคิด

แนวคิดในการวิจัยครั้งนี้เป็นการนำกากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะมาบำบัดด้วยการหล่อแข็ง โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ซึ่งทำการแปรอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของวัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็ง จากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมและมีผลการทดสอบผ่านเกณฑ์มาตรฐานซึ่งสามารถนำกากตะกอนหล่อแข็งไปกำจัดโดยการฝังกลบได้อย่างปลอดภัย โดยกรอบแนวความคิดแสดงดังรูปที่ 1



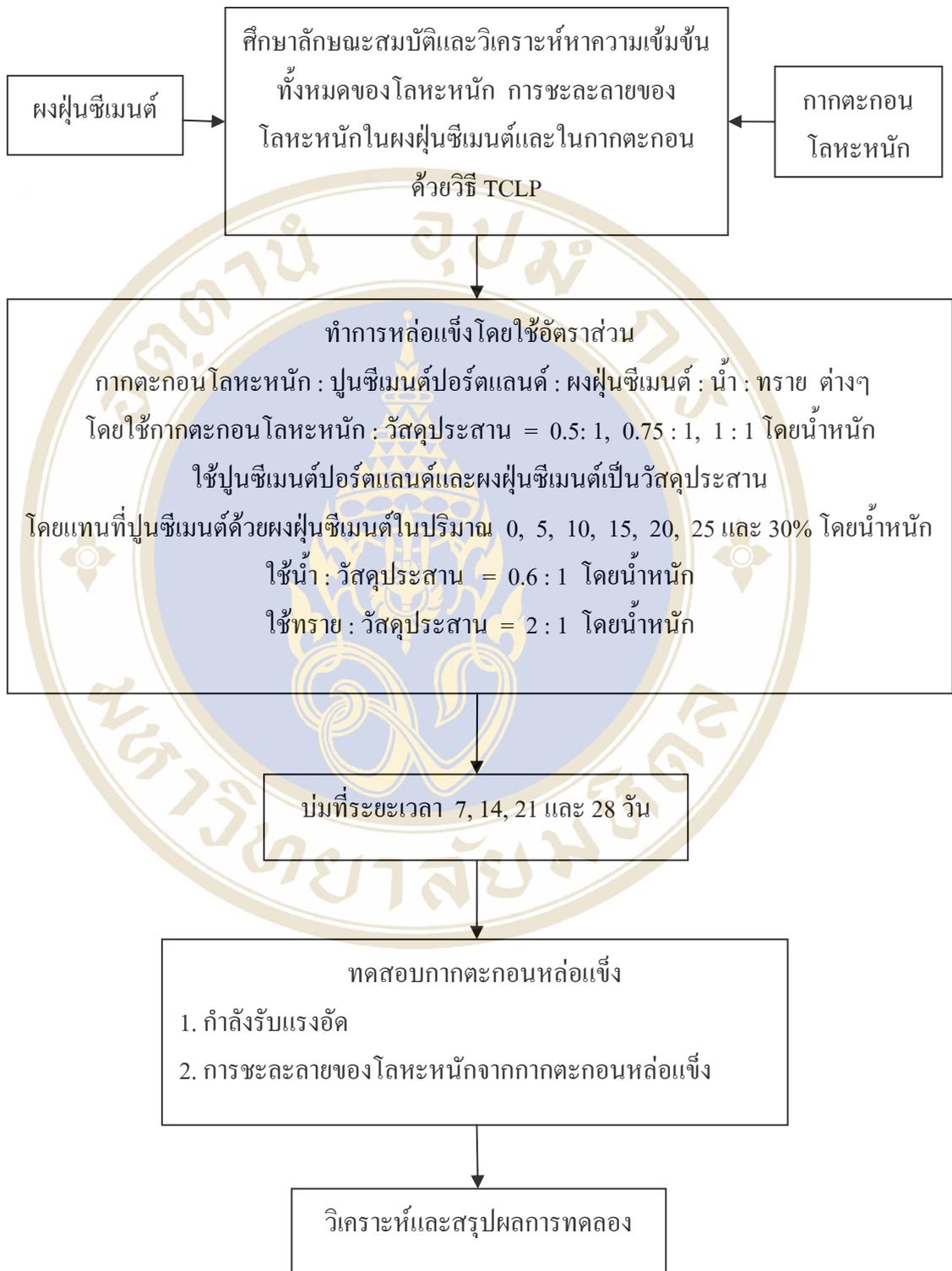
รูปที่ 1 กรอบแนวความคิด

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ใช้กากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
2. โลหะหนักที่ทำการศึกษา คือ โครเมียม สังกะสี และนิกเกิล
3. ใช้กำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักเป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิผลในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก
4. การทดสอบกำลังรับแรงอัดจะใช้แบบหล่อขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามมาตรฐานของ ASTM C 109
5. การบ่มกากตะกอนหล่อแข็งใช้วิธีการบ่มในน้ำ
6. การทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP จะประยุกต์การเขย่าสารสกัดในลักษณะหมุนรอบ (rotary agitating) ที่อัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที มาเป็นการใช้เครื่องเขย่าแบบไปมา (horizontal shaker) โดยใช้ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 3 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง
7. ทำการแปรอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน แปรอัตราส่วนของวัสดุประสานคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์ และแปรระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็ง โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานคงที่

#### 2. วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองซึ่งทำการทดลองภายในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงฝุ่นซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน และมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

## 2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

### 2.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการหล่อแข็งและการทดสอบกำลังรับแรงอัด

1. เครื่องชั่ง
2. ตะแกรงร่อนเบอร์ 10
3. เครื่องผสมปูนซีเมนต์ ถังผสม พายกววนผสม
4. แบบหล่อ ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109
5. ไม้กระทุ้ง
6. เกรียง
7. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด ยี่ห้อ ELE รุ่น AUTOTEST 3000

### 2.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการชะละลาย

1. ตะแกรงร่อนขนาดช่องเปิด  $3/8$  นิ้ว
2. pH Meter ยี่ห้อ Orion รุ่น EA 940
3. เครื่องเขย่าแบบไปมา (horizontal shaker) ยี่ห้อ IKA รุ่น HS 501
4. เครื่อง Microwave digester ยี่ห้อ Milestone รุ่น ETHOS TC
5. ICP (Inductively Coupled Plasma) Emission Spectrometer ยี่ห้อ Varian รุ่น Liberty 220

## 2.2 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. ผงฝุ่นซีเมนต์ จากเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์
3. กากตะกอนโลหะหนัก จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
4. ทราฮายาบ
5. น้ำประปา

## 2.3 การดำเนินการวิจัย

### 2.3.1 การเก็บตัวอย่างผงฝุ่นซีเมนต์

เก็บตัวอย่างผงฝุ่นซีเมนต์จากเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์เพื่อนำมาหาปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) องค์ประกอบทางเคมี ความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก (มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักเปียก) และความเข้มข้นจากการชะละลาย

ของโลหะหนัก (มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร) ทดสอบด้วยวิธี TCLP method 1311 ตามมาตรฐานของ US.EPA จากนั้นทำการเก็บรักษาไว้ใช้ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก

### 2.3.2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างกากตะกอนโลหะหนัก

1. เก็บตัวอย่างกากตะกอนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อนำมาหาปริมาณความชื้นและความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก
2. เตรียมตัวอย่างกากตะกอนโลหะหนักเพื่อนำมาหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และหาความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP โดยนำกากตะกอนไปตากจนแห้ง จากนั้นนำมาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บดกากตะกอนและร่อนผ่านตะแกรงให้มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร แล้วเก็บใส่ในถุงพลาสติกปิดสนิทสำหรับการใช้ในการหล่อแข็ง

### 2.3.3. การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของผงฝุ่นซีเมนต์

1. วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทั่วไปของผงฝุ่นซีเมนต์ ได้แก่ ปริมาณความชื้นและค่าความเป็นกรด-ด่าง
2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นซีเมนต์ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
3. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี นิกเกิล และทองแดง
4. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี นิกเกิล ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียมจากการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP ซึ่งการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP จะประยุกต์การเขย่าสารสกัดในลักษณะหมุนรอบ (rotary agitating) ที่อัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที มาเป็นการใช้เครื่องเขย่าแบบไปมา (horizontal shaker) โดยใช้ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 3 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง

### 2.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของกากตะกอนโลหะหนัก

1. วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทั่วไปของกากตะกอนโลหะหนัก ได้แก่ ปริมาณความชื้นและค่าความเป็นกรด-ด่าง
2. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี นิกเกิล ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม
3. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี นิกเกิล ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียมจากการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP

### 2.3.5 การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ใช้อัตราส่วนของกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5 : 1, 0.75 : 1 และ 1 : 1 โดยน้ำหนัก
2. ใช้ผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยผงปูนซีเมนต์ในปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30% โดยน้ำหนัก จำนวน 7 อัตราส่วน โดยอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อผงปูนซีเมนต์ เท่ากับ 100 : 0, 95 : 5, 90 : 10, 85 : 15, 80 : 20, 75 : 25 และ 70 : 30 โดยน้ำหนัก
3. ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 : 1 และใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2 : 1 โดยน้ำหนัก คงที่ตลอดการทดลอง
4. ใช้ส่วนผสมระหว่างกากตะกอนโลหะหนัก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผงปูนซีเมนต์ น้ำ และทราย ในอัตราส่วนต่างๆดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นทำการหล่อแข็ง แล้วนำกากตะกอนหล่อแข็งมาทำการบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน

### 2.3.6 การประเมินผลกากตะกอนหล่อแข็ง

1. ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่บ่มในน้ำจนครบตามระยะเวลาที่กำหนดตามมาตรฐานของ ASTM C 109 โดยขั้นแรกทำการเขี่ยผิวให้แห้ง ปิดเม็ดทรายที่ติดผิวหน้าออกเพื่อปรับพื้นผิวให้เรียบแล้วบันทึกค่าน้ำหนัก และวัดขนาดของกากตะกอนหล่อแข็ง จากนั้นนำไปวางที่เครื่องทดสอบโดยจัดตำแหน่งของกากตะกอนหล่อแข็งให้อยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่นทดสอบ กำหนดให้เครื่องทดสอบกดน้ำหนักลงบนกากตะกอนหล่อแข็งด้วยอัตราที่สม่ำเสมอจนกากตะกอนหล่อแข็งเกิดรอยแตกร้าว ทำการบันทึกค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
2. ทำการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนหล่อแข็งด้วยวิธี TCLP  
ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP จากกากตะกอนหล่อแข็งจะทำการทดสอบจำนวน 2 ซ้ำ จากนั้นนำผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์และสรุปผล

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมต่างๆที่ใช้ในกระบวนการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก

กากตะกอน โลหะหนัก (กรัม)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ (กรัม)	ผงฟูซีเมนต์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ทราย (กรัม)
50 75 100	100	0	60	200
50 75 100	95	5	60	200
50 75 100	90	10	60	200
50 75 100	85	15	60	200
50 75 100	80	20	60	200
50 75 100	75	25	60	200
50 75 100	70	30	60	200

### 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 3.1 ลักษณะสมบัติของผงปูนซีเมนต์และกากตะกอนโลหะหนัก

##### 3.1.1 ลักษณะสมบัติของผงปูนซีเมนต์

ผงปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ทำการเก็บจากเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีเทา องค์ประกอบทางเคมีของผงปูนซีเมนต์คล้ายกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยมีแคลเซียมออกไซด์ 67.12% ซิลิกอนไดออกไซด์ 21.96% อะลูมิเนียมออกไซด์ 5.12% และเฟอร์ริกออกไซด์ 2.71% มีความชื้นเท่ากับ 0.18% ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11.53 มีความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล เท่ากับ 75, 102 และ 34 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล จากการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP เท่ากับ 0.821, 0.856 และ 0.239 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากความเข้มข้นของโลหะหนักและความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักในผงปูนซีเมนต์เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด สรุปได้ว่าผงปูนซีเมนต์ไม่จัดเป็นของเสียอันตราย

##### 3.1.2 ลักษณะสมบัติของกากตะกอนโลหะหนัก

กากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า มีสีเขียว กลิ่นฉุน มีความชื้นเท่ากับ 83.60% ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.87 มีความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล เท่ากับ 85, 125, 77, 605 และ 12, 315 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล จากการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP เท่ากับ 12.70, 326.25 และ 53.61 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากความเข้มข้นของโลหะหนักและความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักในกากตะกอนเมื่อเทียบกับ ค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด สรุปได้ว่ากากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการทดลองนี้จัดเป็นของเสียอันตราย

#### 3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่า ทุกอัตราส่วนที่ใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% จะมีกำลังรับแรงอัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งกำหนดให้มีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยกากตะกอนหล่อแข็งที่ใช้อัตราส่วน

กากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 มีกำลังรับแรงอัดต่ำสุดมีค่าอยู่ในช่วง 42.13 - 66.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 150.25 - 253.40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 2

การเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการเพิ่มกากตะกอนโลหะหนักในการหล่อแข็ง กากตะกอนจะไปเคลือบบนผิวของวัสดุประสาน ซึ่งมีผลในการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Asavapisit, Naksrichum and Harnwajanawong, 2005) ในกระบวนการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกหน่วงได้โดยขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของของเสี่ย (Malviya and Chaudhary, 2006) นอกจากนี้ การเพิ่มเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์ยังทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากการใช้ผงปูนซีเมนต์ในปริมาณ ที่มากขึ้นทำให้เกิดช่องว่างภายใน โครงสร้างมาก ซึ่งเกิดจากคลอไรด์และซัลเฟตที่มีมากในผงปูนซีเมนต์ เป็นผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง (El-Aleem et al., 2005) ในส่วนของระยะเวลาการบ่มนั้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้อย่างต่อเนื่อง ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นและไปอุดช่องว่างภายใน โครงสร้างทำให้โครงสร้างอัดตัวแน่นขึ้น (El-Aleem et al., 2005)

ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด สรุปได้ว่า กำลังรับแรงอัดมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็ง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานและเพิ่มเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

**ตารางที่ 2** กำลังรับแรงอัดของกากตะกอนหล่อแข็งที่อัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุ  
ประสาน อัตราส่วนของวัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

อัตราส่วน กากตะกอนต่อ วัสดุประสาน	อัตราส่วน วัสดุประสาน (OPC:CKD)	กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ (กก./ซม. <sup>2</sup> )			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5 : 1	100 : 0	169.90	225.77	234.50	253.40
	95 : 5	155.70	206.50	225.45	234.90
	90 : 10	149.55	188.35	212.60	216.65
	85 : 15	145.55	163.05	187.05	195.35
	80 : 20	128.00	155.15	181.35	191.05
	75 : 25	111.60	150.50	166.00	176.50
	70 : 30	105.70	132.55	148.65	150.25
0.75 : 1	100 : 0	95.16	142.50	164.50	175.10
	95 : 5	85.97	123.30	143.50	158.55
	90 : 10	63.08	93.95	111.40	122.78
	85 : 15	47.46	76.46	99.63	113.20
	80 : 20	36.75	61.62	80.13	94.98
	75 : 25	31.64	55.47	73.46	82.21
	70 : 30	30.79	47.27	59.92	68.71
1 : 1	100 : 0	52.63	59.77	63.43	66.18
	95 : 5	43.82	52.82	57.28	61.47
	90 : 10	38.20	46.47	55.21	59.60
	85 : 15	34.45	42.32	51.76	56.28
	80 : 20	32.25	39.87	47.81	51.46
	75 : 25	29.52	37.27	42.35	45.15
	70 : 30	25.46	33.55	38.58	42.13

หมายเหตุ: ค่ามาตรฐานของกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตาม  
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

### 3.3 ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก

จากการทดสอบการชะละลายของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล พบว่า ทุกอัตราส่วนที่ใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% มีผลของความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด ซึ่งกำหนดให้โครเมียมมีค่าไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนความเข้มข้นจากการชะละลายของสังกะสีและนิกเกิลมีค่าไม่เกินมาตรฐานของสารอันตราย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ซึ่งกำหนดให้สังกะสีมีค่าไม่เกิน 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และนิกเกิลมีค่าไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการหล่อแข็งที่ใช้อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 และใช้ผงปูนซีเมนต์ที่ 0-30% โดยน้ำหนัก มีความเข้มข้นจากการชะละลายของโลหะหนักสูงสุด โดยมีการชะละลายของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิลอยู่ในช่วง 1.873 - 3.520, 19.68 - 35.60 และ 1.475 - 2.019 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5 : 1 และใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% โดยน้ำหนัก มีความเข้มข้นจากการชะละลายของโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล ต่ำสุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.818 - 1.845, 12.49 - 17.92 และ 0.170 - 0.940 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 3 ถึงตารางที่ 5

การชะละลายของโลหะหนักมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็ง กล่าวคือ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน และเพิ่มเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์มีผลทำให้การชะละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจะมีผลทำให้การชะละลายของโลหะหนักลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกำลังรับแรงอัดที่ต่ำจะเป็นตัวชี้ว่าโครงสร้าง (microstructure) ไม่ดี ซึ่งคาดว่าจะนำไปสู่การชะละลายที่เพิ่มขึ้น (Glasser, 1993 อ้างถึงใน Asavapisit, Naksrichum และHarnwajanawong, 2005) การที่โลหะหนักในกากตะกอนที่ตรึงด้วยวัสดุประสานประเภทซีเมนต์ชะละลายออกมาน้อยลง เนื่องจากโลหะหนักถูกตรึงด้วยกลไกต่าง ๆ เช่น ถูกจับในซีเมนต์ในรูปออกไซด์ ถูกดูดซับที่ผิว หรือเกิดการผสมเข้าภายในเนื้อซีเมนต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนัก (Karamalidis and Voudrias, 2007) ในกรณีของโครเมียมจะอยู่ในรูปของ Calcium chromium oxide hydrate ( $\text{CaCrO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของโครเมียมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยโครเมียมเข้าไปแทนที่ซิลิกอนในผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงทำให้โครเมียมเสถียรและเป็นก้อนแข็ง (Lin, Chen and Lin, 1996) ส่วนสังกะสีจะเข้าไปอยู่ในอนุภาคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ด้วยกลไกต่อไปนี้มากที่สุด (1) เข้าไปอยู่ใน interlayer ของ C-S-H หรือ (2) การดูดซับในผลึก (Ziegler, Giere and Johnson,

2001) ส่วนนิกเกิลถูกตรึงด้วยซีเมนต์โดยอยู่ในรูป  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  gel ซึ่งผสมอยู่ใน C-S-H phase (Atkins et al., 1993 อ้างถึงใน Gougar, Scheetz and Roy, 1996)

### 3.4 ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอน

ในกระบวนการหล่อแข็งเมื่อใช้ผงปูนซีเมนต์ 0-30% ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน พบว่า ประสิทธิภาพในการตรึงนิกเกิลสูงกว่าสังกะสี และโครเมียม ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 : 1 มีประสิทธิภาพในการตรึงโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล ในช่วง 85.47 - 93.56%, 94.51 - 96.17% และ 98.25 - 99.68% ตามลำดับ ที่อัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 : 1 มีประสิทธิภาพในการตรึงโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล ในช่วง 83.94 - 90.02%, 91.55 - 95.92% และ 96.95 - 98.38% ตามลำดับ และที่อัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 มีประสิทธิภาพในการตรึงโครเมียม สังกะสี และนิกเกิล ในช่วง 72.28 - 85.25%, 89.09 - 93.97% และ 96.23 - 97.25% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6

### 3.5 ค่าใช้จ่ายในการหล่อแข็ง

การศึกษาค่าใช้จ่ายในการหล่อแข็งได้คำนวณค่าวัสดุที่ใช้ตามราคาท้องตลาด โดยวัสดุที่ใช้ในการหล่อแข็งได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทราย และน้ำ โดยไม่คิดราคาของผงปูนซีเมนต์ พบว่า ที่อัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อผงปูนซีเมนต์ เท่ากับ 70 : 30 โดยน้ำหนัก มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดคือ 4,778 บาท ในการหล่อแข็งกากตะกอน โลหะหนัก 1,000 กิโลกรัม และถ้าสามารถเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสานได้อีกจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการหล่อแข็งกากตะกอน โลหะหนักลดลงกว่านี้

**ตารางที่ 3** การชะละลายของโครเมียมจากกากตะกอนหล่อแข็งที่อัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนัก ต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของวัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

อัตราส่วน กากตะกอนต่อ วัสดุประสาน	อัตราส่วน วัสดุประสาน (OPC:CKD)	ความเข้มข้นของโครเมียมที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ (มก./ล.)			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5 : 1	100 : 0	1.079	0.959	0.828	0.818
	95 : 5	1.163	1.047	0.974	0.894
	90 : 10	1.308	1.179	1.092	1.018
	85 : 15	1.425	1.345	1.282	1.233
	80 : 20	1.641	1.533	1.477	1.398
	75 : 25	1.858	1.739	1.697	1.633
	70 : 30	2.063	1.969	1.895	1.845
0.75 : 1	100 : 0	1.517	1.401	1.328	1.268
	95 : 5	1.630	1.528	1.469	1.419
	90 : 10	1.762	1.652	1.557	1.497
	85 : 15	1.908	1.819	1.729	1.715
	80 : 20	2.043	1.932	1.834	1.779
	75 : 25	2.132	2.008	1.947	1.914
	70 : 30	2.260	2.170	2.128	2.039
1 : 1	100 : 0	2.145	2.020	1.937	1.873
	95 : 5	2.296	2.158	2.089	2.032
	90 : 10	2.508	2.395	2.297	2.236
	85 : 15	2.833	2.721	2.673	2.608
	80 : 20	3.120	3.052	2.972	2.905
	75 : 25	3.475	3.367	3.307	3.269
	70 : 30	3.727	3.640	3.580	3.520

หมายเหตุ: ค่ามาตรฐานการชะละลายของโครเมียมไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามมาตรฐานของ  
สารอันตรายในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด  
ค่า detection limit ของโครเมียม เท่ากับ 0.004 มิลลิกรัมต่อลิตร

**ตารางที่ 4** การชะละลายของสังกะสีจากกากตะกอนหล่อแข็งที่อัตราส่วนกากตะกอน โลหะหนักต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของวัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

อัตราส่วน กากตะกอนต่อ วัสดุประสาน	อัตราส่วน วัสดุประสาน (OPC:CKD)	ความเข้มข้นของสังกะสีที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ (มก./ล.)			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5 : 1	100 : 0	14.87	13.75	12.98	12.49
	95 : 5	16.10	15.38	14.61	13.90
	90 : 10	17.38	16.37	15.69	15.16
	85 : 15	18.04	16.90	16.23	15.51
	80 : 20	18.61	17.50	16.85	16.21
	75 : 25	19.28	18.51	17.77	17.33
	70 : 30	19.91	19.02	18.44	17.92
0.75 : 1	100 : 0	16.08	14.93	14.00	13.31
	95 : 5	19.17	17.87	16.84	16.10
	90 : 10	22.18	20.89	19.85	19.03
	85 : 15	25.16	23.98	22.77	21.85
	80 : 20	28.40	26.28	25.38	24.67
	75 : 25	28.57	27.50	26.47	25.68
	70 : 30	30.23	29.65	28.73	27.57
1 : 1	100 : 0	22.73	21.46	20.50	19.68
	95 : 5	23.38	22.10	21.30	20.76
	90 : 10	25.05	23.83	22.90	22.19
	85 : 15	29.07	27.79	26.87	26.10
	80 : 20	32.10	30.76	29.09	28.48
	75 : 25	35.10	33.95	33.03	32.48
	70 : 30	38.21	37.08	36.07	35.60

หมายเหตุ: ค่ามาตรฐานการชะละลายของสังกะสีไม่เกิน 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามประกาศ

กระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548

ค่า detection limit ของสังกะสีเท่ากับ 0.0009 มิลลิกรัมต่อลิตร

**ตารางที่ 5** การชะละลายของนิกเกิลจากกากตะกอนหล่อแข็งที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของวัสดุประสาน และระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

อัตราส่วน กากตะกอนต่อ วัสดุประสาน	อัตราส่วน วัสดุประสาน (OPC:CKD)	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ (มก./ล.)			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5 : 1	100 : 0	0.375	0.282	0.227	0.170
	95 : 5	0.512	0.411	0.352	0.303
	90 : 10	0.636	0.549	0.494	0.449
	85 : 15	0.715	0.642	0.604	0.570
	80 : 20	0.839	0.755	0.682	0.619
	75 : 25	0.942	0.865	0.794	0.747
	70 : 30	1.154	1.075	0.992	0.940
0.75 : 1	100 : 0	1.108	1.007	0.938	0.866
	95 : 5	1.229	1.145	1.088	1.030
	90 : 10	1.429	1.321	1.238	1.175
	85 : 15	1.488	1.403	1.320	1.246
	80 : 20	1.639	1.543	1.477	1.433
	75 : 25	1.712	1.617	1.567	1.515
	70 : 30	1.836	1.747	1.688	1.635
1 : 1	100 : 0	1.693	1.587	1.539	1.475
	95 : 5	1.737	1.664	1.592	1.539
	90 : 10	1.883	1.783	1.722	1.653
	85 : 15	1.984	1.914	1.863	1.814
	80 : 20	2.037	1.980	1.927	1.876
	75 : 25	2.109	2.035	1.962	1.900
	70 : 30	2.205	2.119	2.062	2.019

หมายเหตุ: ค่ามาตรฐานการชะละลายของนิกเกิลไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามประกาศกระทรวง  
อุตสาหกรรม พ.ศ. 2548

ค่า detection limit ของนิกเกิลเท่ากับ 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอนที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

อัตราส่วนกาก ตะกอนต่อวัสดุ ประสาน	อัตราส่วน วัสดุประสาน (OPC:CKD)	ประสิทธิภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอน (%)		
		โครเมียม	สังกะสี	นิกเกิล
0.50 : 1	100 : 0	93.56	96.17	99.68
	95 : 5	92.96	95.74	99.43
	90 : 10	91.98	95.35	99.16
	85 : 15	90.29	95.25	98.94
	80 : 20	88.99	95.03	98.85
	75 : 25	87.14	94.69	98.61
	70 : 30	85.47	94.51	98.25
0.75 : 1	100 : 0	90.02	95.92	98.38
	95 : 5	88.83	95.07	98.08
	90 : 10	88.21	94.17	97.81
	85 : 15	86.50	93.30	97.68
	80 : 20	85.99	92.44	97.33
	75 : 25	84.93	92.13	97.17
	70 : 30	83.94	91.55	96.95
1 : 1	100 : 0	85.25	93.97	97.25
	95 : 5	84.00	93.64	97.13
	90 : 10	82.39	93.20	96.92
	85 : 15	79.46	92.00	96.62
	80 : 20	77.13	91.27	96.50
	75 : 25	74.26	90.04	96.46
	70 : 30	72.28	89.09	96.23

#### 4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

##### 4.1 สรุปผลการวิจัย

1. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด สรุปได้ว่า กำลังรับแรงอัดมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็ง กล่าวคือ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน และเพิ่มเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์ มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง และเมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งจะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

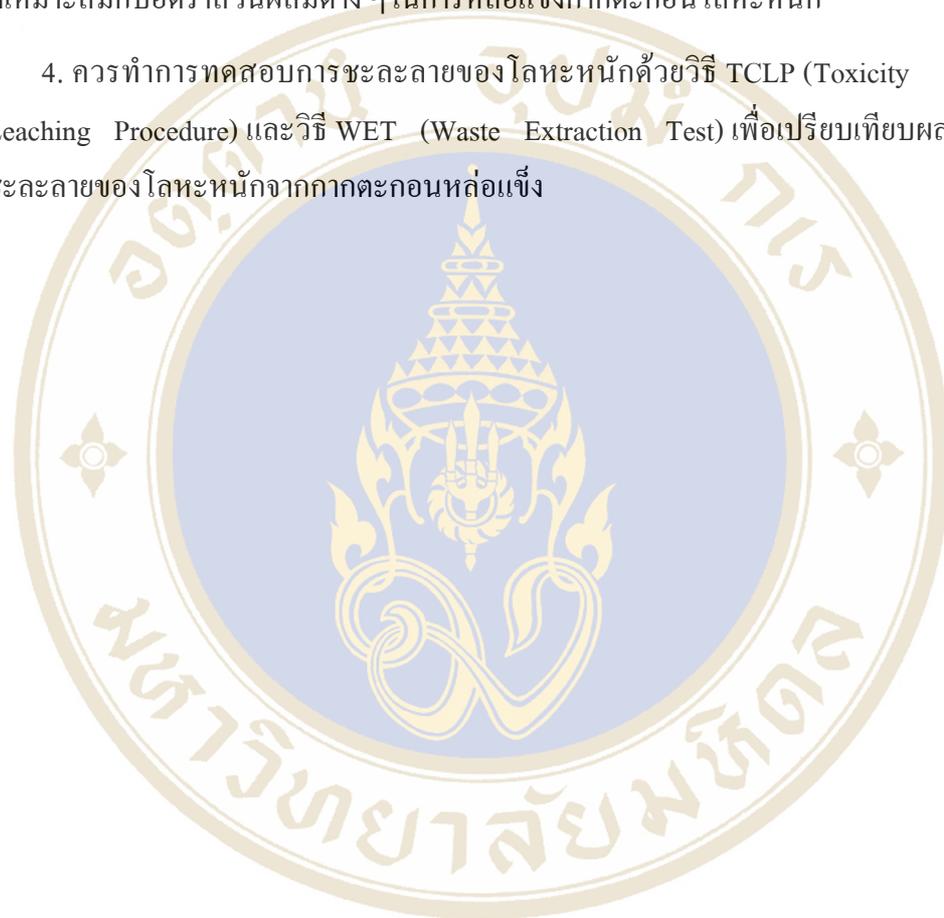
2. ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนหล่อแข็ง พบว่า การชะละลายของโลหะหนักมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และระยะเวลาการบ่มกากตะกอนหล่อแข็ง กล่าวคือ เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน และเพิ่มเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์ มีผลทำให้การชะละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มกากตะกอนหล่อแข็งจะมีผลทำให้การชะละลายของโลหะหนักลดลง

3. จากอัตราส่วนผสมที่ทำการทดลอง พบว่า ที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อผงปูนซีเมนต์ เท่ากับ 70 : 30 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากที่อัตราส่วนผสมนี้มีค่าการชะละลายของโครเมียม สังกะสีและนิกเกิล และค่ากำลังรับแรงอัด ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบโดยวิธี TCLP ตามที่ US.EPA กำหนด มาตรฐานของสารอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และมาตรฐานกำลังรับแรงอัดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) และเมื่อพิจารณาในด้านค่าใช้จ่าย พบว่า ที่อัตราส่วนนี้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด คือ 4,778 บาท ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก 1,000 กิโลกรัม

##### 4.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาเพิ่มเติม

1. ควรทำการเพิ่มอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเพื่อศึกษาถึงอัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่ยังให้ผลของการชะละลายของโลหะหนักและกำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

2. ควรทำการเพิ่มปริมาณผงปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยเพิ่มให้มากกว่า 30% โดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบผลของการชะละลายของโลหะหนักและกำลังรับแรงอัดจากการใช้ผงปูนซีเมนต์ในปริมาณต่าง ๆ
3. ควรทำการแปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เพื่อให้ได้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมกับอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก
4. ควรทำการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) และวิธี WET (Waste Extraction Test) เพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนหล่อแข็ง



SOLIDIFICATION OF HEAVY METAL SLUDGE BY USING PORTLAND CEMENT AND CEMENT KILN DUST AS BINDERS

PRAPATSORN MANEERAT 4837317 ENAT/M

M.Sc. (APPROPRIATE TECHNOLOGY FOR RESOURCES AND ENVIRONMENTAL DEVELOPMENT)

THESIS ADVISORS: USANEE UYASATIAN, M.Eng., WINAI NUTMAGUL, Ph.D.

**EXTENDED SUMMARY**

**1. INTRODUCTION**

**1.1 Statement of the problem**

Many types of industries use heavy metals as raw material such as paint, battery, and plating industries. Industrial sludge containing high level of heavy metal is considered as hazardous waste. There are many processes used for treatment of hazardous waste, for example physical, chemical, and biological processes. Selection of suitable treatment method is depended on type and characteristic of waste. The sludge generated with high level of heavy metal could not be disposed of directly into the landfill due to risk of underground water contamination (Singh and Pant, 2006). Therefore, treatment is required before disposal to a landfill.

Stabilization and solidification is a process in which materials are added to the waste to produce a solid. Binders often consist of Type I Portland cement, fly ash, cement kiln dust, other pozzolanic and industrial by-products (Roy et al., 1992). Stabilization and solidification is used as pre-landfill, waste treatment technology that aim to make hazardous wastes safe for disposal. It is suitable for treatment of inorganic wastes, especially those contain heavy metal. Cement-based stabilization and solidification technology is widely used because it offer assurance of chemical

stabilization of many contaminants and produce a stable form of waste (Singh and Pant, 2006). Therefore, stabilization and solidification is a process that limits the solubility and migrations of pollutants contained in hazardous waste. It is accomplished by the addition of binders that minimize the rate of contaminant migration into the environment, decrease the surface area across which the transfer of pollutants can occur and improve the handling and physical characteristics of the wastes for more convenient transportation to disposal at secure landfill.

Nowadays, residues from agriculture and industry are used in solidification process to improve properties of solidified material and also to replace a certain amount of cementitious binder, for example Portland cement, because of the high price of Portland cement. Cement kiln dust is by-product from manufacturing of Portland cement. Cement like properties of cement kiln dust also makes it a potential replacement of Portland cement in stabilization and solidification of waste.

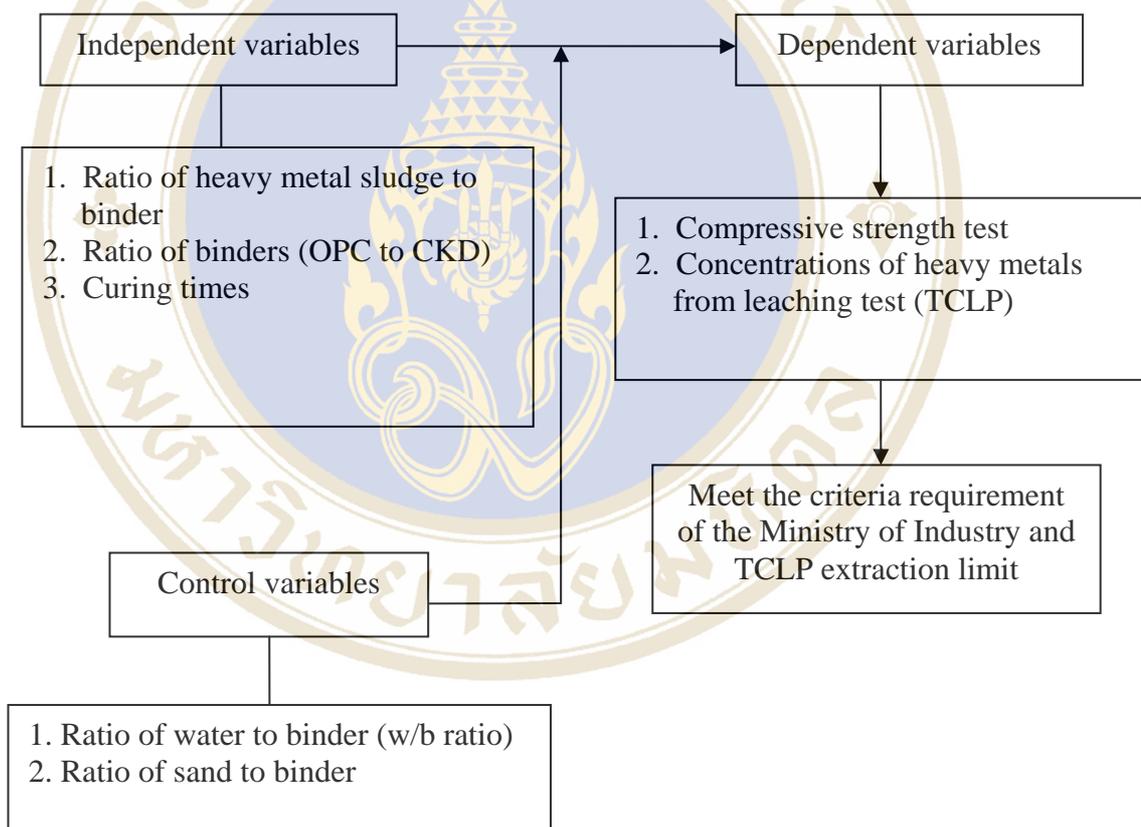
In this study, the solidification of heavy metal sludge by using Portland cement and cement kiln dust as binders was conducted with the investigation of development of compressive strength and leaching concentrations of heavy metals from solidified sludge.

## 1.2 Objectives of study

1. To study solidification of heavy metal sludge by using Portland cement and cement kiln dust as binders.
2. To evaluate the effectiveness of solidification by study the development of compressive strength of solidified sludge and leaching concentrations of heavy metals from solidified sludge.
3. To determine the optimum ratio of heavy metal sludge to binder, and ratio of binders (OPC to CKD) in solidification.

### 1.3 Conceptual framework

Based on concept in this study, heavy metal sludge from wastewater treatment plant of electroplating factory is treated by solidification. Portland cement and cement kiln dust are used as binders. Ratios of heavy metal sludge to binder, ratios of binders (OPC to CKD), and curing time of solidification are varied for testing of compressive strength and leaching of heavy metals by Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) to get the optimum ratio of mixture that meet standards for further disposal by secure landfill. The details of conceptual framework are presented in Figure 1.



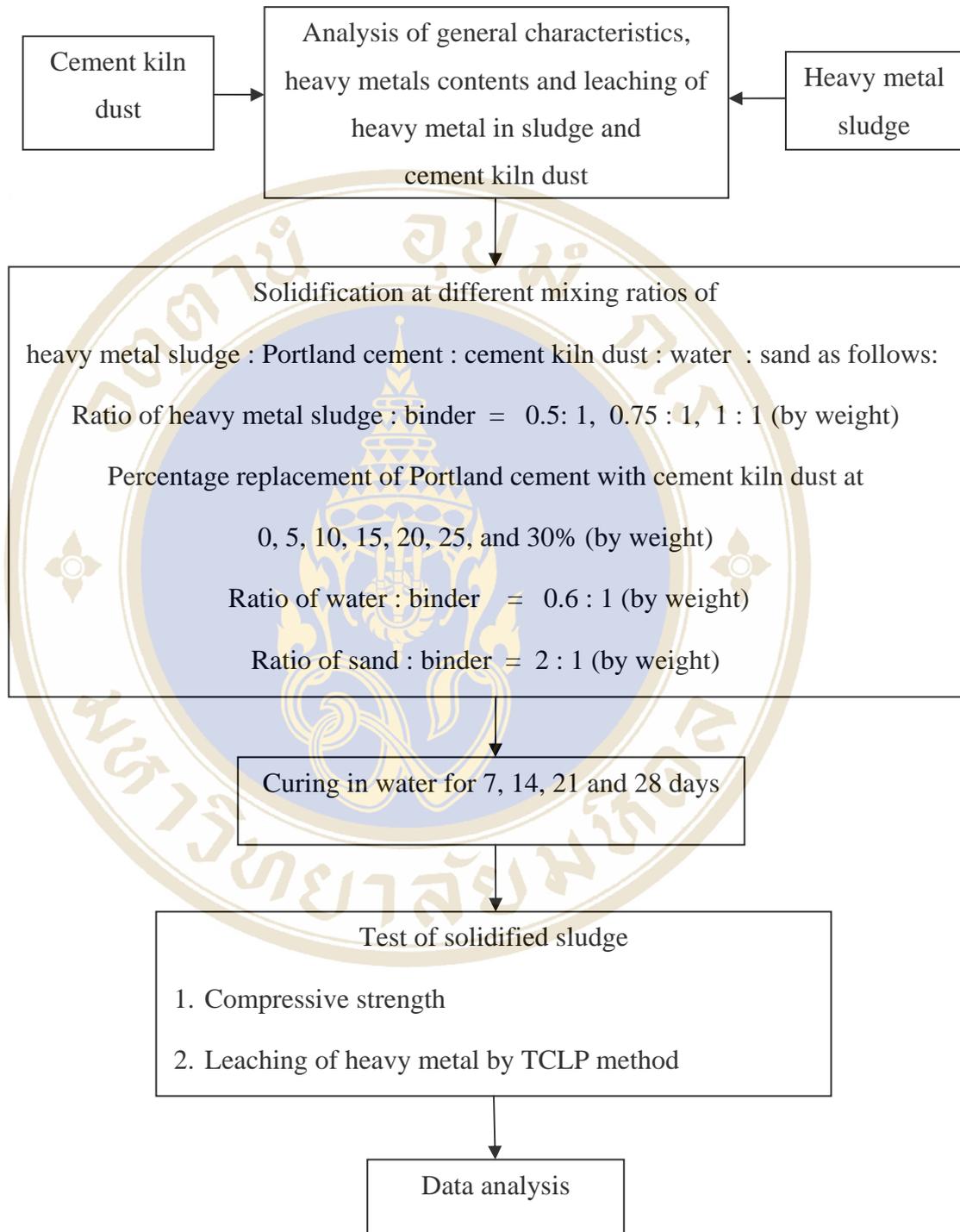
**Figure 1** Conceptual framework

#### 1.4 Scope of the study

1. Heavy metal sludge in this research is taken from wastewater treatment plant of electroplating factory.
2. Heavy metals concerned in this study are Cr, Zn, and Ni.
3. Compressive strength and concentrations of heavy metals from leaching test are indicators for solidification efficiency.
4. In compressive strength test, specimen size of  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  are used in accordance with ASTM C 109 (Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars).
5. Solidified specimens are cured in water.
6. In the leaching test (by TCLP method), agitating at 200 rpm, 30 mm. stroke by horizontal shaker for 18 hours is used instead of rotary agitating at 30 rpm.
7. Ratios of heavy metal sludge to binder, OPC to CKD, and curing times are varied while ratio of water to binder and sand to binder are fixed.

#### 2. Materials and Methods

This research is an experimental research which was conducted in laboratory in order to study the solidification of heavy metal sludge by using Portland cement and cement kiln dust as binders. The experimental stages are presented in Figure 2.



**Figure 2** Experimental stages

## 2.1 Apparatus

### 2.1.1 Apparatus for solidification and compressive strength test

1. Weighing scale
2. Sieve NO. 10
3. Mixer, Mixing bowl, Mixing paddle
4. Specimen molds (specimen size of  $5 \times 5 \times 5$  cm<sup>3</sup> according to ASTM C 109)
5. Tamper
6. Trowel
7. Compressive strength testing machine (ELE, model AUTOTEST 3000)

### 2.1.2 Apparatus for leaching test

1. Sieve 3/8 in. opening
2. pH Meter (Orion, model EA 940)
3. Horizontal shaker (IKA, model HS 501)
4. Microwave digester (Milestone, model ETHOS TC)
5. Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer (ICP-ES) (Varian, model Liberty 220)

## 2.2 Materials

1. Portland cement Type I
2. Cement kiln dust from electrostatic precipitators of cement factory
3. Heavy metal sludge from wastewater treatment plant of electroplating factory
4. Coarse sand
5. Tap water

## 2.3 Methods

### 2.3.1 Cement kiln dust sampling

Cement kiln dust sample was collected from electrostatic precipitators of cement factory for analysis of moisture content, pH, chemical composition, heavy metal content (mg/kg wet weight), and leaching of heavy metal (mg/l) by US.EPA method 1311, TCLP. It was stored for use in solidification of heavy metal sludge.

### 2.3.2 Heavy metal sludge sampling and preparation

1. Heavy metal sludge sample was collected from wastewater treatment plant of electroplating factory for analysis of moisture content and heavy metal content.

2. Heavy metal sludge was prepared for analysis of pH, and leaching of heavy metal (by TCLP method) by the following steps: (1) air-dry the heavy metal sludge, (2) oven-dry at 105°C for 24 hours, (3) grind heavy metal sludge and screen to get particle size less than 2 mm., and (4) put the sample in plastic bag for use in solidification.

### 2.3.3 Analysis of characteristics of cement kiln dust

1. Analyze general characteristics of cement kiln dust, namely moisture content and pH.

2. Analyze chemical composition of cement kiln dust, namely CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

3. Analyze Cr, Zn, Ni, and Cu contents.

4. Analyze concentrations of heavy metals (Cr, Zn, Ni, Cu, Pb, and Cd) from leaching test by TCLP method. TCLP method in this research was adapted by using horizontal shaker of 30 mm. stroke, at 200 rpm speed for 18 hours instead of rotary agitator at 30 rpm speed.

### 2.3.4 Analysis of characteristics of heavy metal sludge

1. Analyze general characteristics of heavy metal sludge, namely moisture content and pH.

2. Analyze Cr, Zn, Ni, Cu, Pb, and Cd contents.
3. Analyze concentrations of heavy metals (Cr, Zn, Ni, Cu, Pb, and Cd) from leaching test by TCLP method.

### **2.3.5 Solidification of heavy metal sludge at different mixing ratios as follows:**

1. The ratios of heavy metal sludge to binder at 0.5: 1, 0.75 : 1, and 1 : 1 (by weight) was used.
2. Portland cement was replaced by cement kiln dust at 0, 5, 10, 15, 20, 25, and 30% (by weight). Therefore, ratios of Portland cement to cement kiln dust were at 100 : 0, 95 : 5, 90 : 10, 85 : 15, 80 : 20, 75 : 25, and 70 : 30 (by weight).
3. Ratio of water to binder and ratio of sand to binder were fixed at 0.6 : 1 and 2 : 1 (by weight), respectively.
4. Solidify all mixing ratios as specified in Table 1, then cure solidified specimens in water for 7, 14, 21 and 28 days.

### **2.3.6 Test of solidified sludge**

1. Compressive strength was tested in accordance with ASTM C 109 by the following steps: (1) remove the solidified specimens from the curing tank, (2) wipe to a surface dry condition and remove any loose sand grains for test surfaces, (3) determine the unit weight and measure the dimensions of each solidified specimens, and (4) place solidified specimen below the center of the upper bearing block of the testing machine and control the testing machine while solidified specimen is yielding prior to failure. Record the compressive strength value in kg/cm<sup>2</sup>.
2. Leaching of heavy metal from solidified specimens was tested by TCLP method.

Compressive strength and leaching from solidified sludge were determined on two replicated specimens. The data were then analyzed.

**Table 1 Different mixing ratios used in solidification of heavy metal sludge**

Heavy metal sludge (g)	Portland cement (g)	Cement kiln dust (g)	Water (g)	Sand (g)
50 75 100	100	0	60	200
50 75 100	95	5	60	200
50 75 100	90	10	60	200
50 75 100	85	15	60	200
50 75 100	80	20	60	200
50 75 100	75	25	60	200
50 75 100	70	30	60	200

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Characteristics of cement kiln dust and heavy metal sludge

##### 3.1.1 Characteristics of cement kiln dust

Cement kiln dust used in this research was collected from electrostatic precipitator of cement factory. Cement kiln dust is fine powdery material in gray color. It had chemical composition similar to that of the Portland cement type I. The major constituents were 67.12% CaO, 21.96% SiO<sub>2</sub>, 5.12% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 2.71% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. It had 0.18% of moisture content. The pH of cement kiln dust water mixture was 11.53. Cr, Zn and Ni contents in cement kiln dust were 75, 102, and 34 mg/kg CKD, respectively. Leaching of Cr, Zn and Ni from cement kiln dust by TCLP method were 0.821, 0.856 and 0.239 mg/l, respectively. From the heavy metals contents and leaching of heavy metals by TCLP method, cement kiln dust is not classified as a hazardous waste.

##### 3.1.2 Characteristics of heavy metal sludge

Heavy metal sludge from wastewater treatment plant of electroplating factory was odorous and green in color. It had 83.60% of moisture content. The pH of heavy metal sludge water mixture was 10.87. Cr, Zn and Ni contents in heavy metal sludge were 85,125, 77,605 and 12,315 mg/kg sludge, respectively. Leaching of Cr, Zn and Ni from heavy metal sludge by TCLP method were 12.70, 326.25 and 53.61 mg/l, respectively. The heavy metal sludge has Cr, Zn and Ni contents exceed the standard limits as specified in the Notification of the Ministry of Industry (B.E. 2548), and has leached Cr exceed the TCLP standard limit set by US.EPA, while leached Zn and Ni exceed the standard limits as specified in the Notification of the Ministry of Industry (B.E. 2548). Therefore, the heavy metal sludge in this study is classified as a hazardous waste.

#### 3.2 Compressive strength test

The compressive strength values of solidified sludges at every mixing ratios containing 0-30% of cement kiln dust met the standard limit (not less than 3.5 kg/cm<sup>2</sup>) as specified in the Notification of the Ministry of Industry No.6 (B.E. 2540). Solidified samples at heavy metal sludge to binder ratio of 1 : 1 had lowest compressive strength

values which were in the range of 42.13 - 66.18 kg/cm<sup>2</sup>, and solidified samples at heavy metal sludge to binder ratio of 0.5 : 1 had highest compressive strength values which were in the range of 150.25 - 253.40 kg/cm<sup>2</sup> at the curing time of 28 days, as shown in Table 2.

The results showed that the compressive strength decreased when ratio of heavy metal sludge to binder increased. The deposition of the heavy metal sludge on the surface of cement clinkers could cause hydration retardation of cement (Asavapisit, Naksrichum and Harnwajanawong, 2005). Hydration can be retarded in the solidified/stabilized product and the extent depends upon the quantity and type of waste species (Malviya and Chaudhary, 2006). Moreover, the compressive strength decreased with high percentage of cement kiln dust content. This is due to high chloride and sulfate contents of cement kiln dust which lead to an increase in pore size in hydration product and a decline in the compressive strength (El-Aleem et al., 2005). The compressive strength increased with curing time. This is due to the continuous hydration and accumulation of hydration products in water filled pores to form a more compact body (El-Aleem et al., 2005).

The results indicated that the compressive strength values related to the ratio of heavy metal sludge to binder, percentage of cement kiln dust used, and curing time. When heavy metal sludge to binder ratio and percentage of cement kiln dust used increased, compressive strength decreased, and when curing time increased, compressive strength increased.

**Table 2** Compressive strength of solidified sludges at different ratios of heavy metal sludge to binder, ratios of binders, and curing times

Sludge : Binder ratio	Binders ratio (OPC : CKD)	Compressive strength values at indicated curing time (kg/cm <sup>2</sup> )			
		7 days	14 days	21 days	28 days
0.50 : 1	100 : 0	169.90	225.77	234.50	253.40
	95 : 5	155.70	206.50	225.45	234.90
	90 : 10	149.55	188.35	212.60	216.65
	85 : 15	145.55	163.05	187.05	195.35
	80 : 20	128.00	155.15	181.35	191.05
	75 : 25	111.60	150.50	166.00	176.50
	70 : 30	105.70	132.55	148.65	150.25
0.75 : 1	100 : 0	95.16	142.50	164.50	175.10
	95 : 5	85.97	123.30	143.50	158.55
	90 : 10	63.08	93.95	111.40	122.78
	85 : 15	47.46	76.46	99.63	113.20
	80 : 20	36.75	61.62	80.13	94.98
	75 : 25	31.64	55.47	73.46	82.21
	70 : 30	30.79	47.27	59.92	68.71
1 : 1	100 : 0	52.63	59.77	63.43	66.18
	95 : 5	43.82	52.82	57.28	61.47
	90 : 10	38.20	46.47	55.21	59.60
	85 : 15	34.45	42.32	51.76	56.28
	80 : 20	32.25	39.87	47.81	51.46
	75 : 25	29.52	37.27	42.35	45.15
	70 : 30	25.46	33.55	38.58	42.13

**Note:** The standard limit of compressive strength is not less than 3.5 kg/cm<sup>2</sup> as specified in the Notification of the Ministry of Industry No.6 (B.E. 2540)

### 3.3 Leaching test

The leaching of Cr, Zn and Ni from solidified sludges at every mixing ratios containing 0-30% of cement kiln dust met the TCLP standard limit of Cr set by US.EPA which should not be more than 5 mg/l., and the standard limit of Zn and Ni according to the Notification of the Ministry of Industry (B.E. 2548) which should not be more than 250 and 20 mg/l, respectively. Solidified samples at heavy metal sludge to binder ratio of 1 : 1 and 0-30% of cement kiln dust used had highest concentrations of leached heavy metals. The leached Cr, Zn and Ni were in the range of 1.873 - 3.520, 19.68 - 35.60 and 1.475 - 2.019 mg/l, respectively. While solidified samples at heavy metal sludge to binder ratio of 0.5 : 1 and 0-30% of cement kiln dust used had lowest concentrations of leached Cr, Zn and Ni at curing time of 28 days that were in the range of 0.818 - 1.845, 12.49 - 17.92 and 0.170 - 0.940 mg/l, respectively, as shown in Table 3 to Table 5.

The results indicated that the leaching of heavy metals related to the ratio of heavy metal sludge to binder, percentage of cement kiln dust used, and curing time. When heavy metal sludge to binder ratio and percentage of cement kiln dust used increased, the leaching of heavy metal increased, and when curing time increased, the leaching of heavy metal decreased. This is because low strength is an indicator of a poor microstructure and may be expected to lead to increased leaching (Glasser, 1993 cited in Asavapisit, Naksrichum and Harnwajanawong, 2005). A metal ion may be immobilized into the cement matrix because it may either be bound in the alkaline cement matrix as an oxide or mixed oxide, be sorbed to surfaces, or be incorporated into cement minerals, all of these depend on the type of heavy metal (Karamalidis and Voudrias, 2007).

Formation of calcium chromium oxide hydrate ( $\text{CaCrO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) during the hydration of chromium and Portland cement indicates the substitution of chromium for silicon in hydration products. The chromium is thus stabilized and solidified through this mechanism (Lin, Chen and Lin, 1996). Zinc incorporates into the C-S-H particles. The following mechanism: (1) the incorporation of Zinc in the interlayer of C-S-H or (2) sorption to internal surfaces of crystalline appears to be the most probable (Ziegler, Giere and Johnson, 2001). Interaction with cement, Ni is present as  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  gel,

intermixed with the C-S-H phase (Atkins et al., 1993 cited in Gougar, Scheetz and Roy, 1996).

**Table 3** Leaching of Cr from solidified sludges at different ratios of heavy metal sludge to binder, ratios of binders, and curing times

Sludge : Binder ratio	Binders ratio (OPC : CKD)	Cr concentrations at indicated curing time (mg/l)			
		7 days	14 days	21 days	28 days
0.50 : 1	100 : 0	1.079	0.959	0.828	0.818
	95 : 5	1.163	1.047	0.974	0.894
	90 : 10	1.308	1.179	1.092	1.018
	85 : 15	1.425	1.345	1.282	1.233
	80 : 20	1.641	1.533	1.477	1.398
	75 : 25	1.858	1.739	1.697	1.633
	70 : 30	2.063	1.969	1.895	1.845
0.75 : 1	100 : 0	1.517	1.401	1.328	1.268
	95 : 5	1.630	1.528	1.469	1.419
	90 : 10	1.762	1.652	1.557	1.497
	85 : 15	1.908	1.819	1.729	1.715
	80 : 20	2.043	1.932	1.834	1.779
	75 : 25	2.132	2.008	1.947	1.914
	70 : 30	2.260	2.170	2.128	2.039
1 : 1	100 : 0	2.145	2.020	1.937	1.873
	95 : 5	2.296	2.158	2.089	2.032
	90 : 10	2.508	2.395	2.297	2.236
	85 : 15	2.833	2.721	2.673	2.608
	80 : 20	3.120	3.052	2.972	2.905
	75 : 25	3.475	3.367	3.307	3.269
	70 : 30	3.727	3.640	3.580	3.520

**Notes:** The standard limit of leached Cr is not more than 5 mg/l as specified in TCLP limits set by US.EPA

Cr detection limit was 0.004 mg/l

**Table 4** Leaching of Zn from solidified sludges at different ratios of heavy metal sludge to binder, ratios of binders, and curing times

Sludge : Binder ratio	Binders ratio (OPC : CKD)	Zn concentrations at indicated curing time (mg/l)			
		7 days	14 days	21 days	28 days
0.50 : 1	100 : 0	14.87	13.75	12.98	12.49
	95 : 5	16.10	15.38	14.61	13.90
	90 : 10	17.38	16.37	15.69	15.16
	85 : 15	18.04	16.90	16.23	15.51
	80 : 20	18.61	17.50	16.85	16.21
	75 : 25	19.28	18.51	17.77	17.33
	70 : 30	19.91	19.02	18.44	17.92
0.75 : 1	100 : 0	16.08	14.93	14.00	13.31
	95 : 5	19.17	17.87	16.84	16.10
	90 : 10	22.18	20.89	19.85	19.03
	85 : 15	25.16	23.98	22.77	21.85
	80 : 20	28.40	26.28	25.38	24.67
	75 : 25	28.57	27.50	26.47	25.68
	70 : 30	30.23	29.65	28.73	27.57
1 : 1	100 : 0	22.73	21.46	20.50	19.68
	95 : 5	23.38	22.10	21.30	20.76
	90 : 10	25.05	23.83	22.90	22.19
	85 : 15	29.07	27.79	26.87	26.10
	80 : 20	32.10	30.76	29.09	28.48
	75 : 25	35.10	33.95	33.03	32.48
	70 : 30	38.21	37.08	36.07	35.60

**Notes:** The standard limit of leached Zn is not more than 250 mg/l as specified in the Notification of the Ministry of Industry (B.E. 2548)

Zn detection limit was 0.0009 mg/l

**Table 5** Leaching of Ni from solidified sludges at different ratios of heavy metal sludge to binder, ratios of binders, and curing times

Sludge : Binder ratio	Binders ratio (OPC : CKD)	Ni concentrations at indicated curing time (mg/l)			
		7 days	14 days	21 days	28 days
0.50 : 1	100 : 0	0.375	0.282	0.227	0.170
	95 : 5	0.512	0.411	0.352	0.303
	90 : 10	0.636	0.549	0.494	0.449
	85 : 15	0.715	0.642	0.604	0.570
	80 : 20	0.839	0.755	0.682	0.619
	75 : 25	0.942	0.865	0.794	0.747
	70 : 30	1.154	1.075	0.992	0.940
0.75 : 1	100 : 0	1.108	1.007	0.938	0.866
	95 : 5	1.229	1.145	1.088	1.030
	90 : 10	1.429	1.321	1.238	1.175
	85 : 15	1.488	1.403	1.320	1.246
	80 : 20	1.639	1.543	1.477	1.433
	75 : 25	1.712	1.617	1.567	1.515
	70 : 30	1.836	1.747	1.688	1.635
1 : 1	100 : 0	1.693	1.587	1.539	1.475
	95 : 5	1.737	1.664	1.592	1.539
	90 : 10	1.883	1.783	1.722	1.653
	85 : 15	1.984	1.914	1.863	1.814
	80 : 20	2.037	1.980	1.927	1.876
	75 : 25	2.109	2.035	1.962	1.900
	70 : 30	2.205	2.119	2.062	2.019

**Notes:** The standard limit of leached Ni is not more than 20 mg/l as specified in the Notification of the Ministry of Industry (B.E. 2548)

Ni detection limit was 0.006 mg/l

### 3.4 The efficiency of heavy metal fixation

In solidification process, when 0-30% of cement kiln dust was used at curing time of 28 days, Ni fixation efficiency was higher than Zn and Cr, respectively. At heavy metal sludge to binder ratio of 0.5 : 1, fixation efficiency of Cr, Zn, and Ni were in the range of 85.47 - 93.56%, 94.51 - 96.17%, and 98.25 - 99.68%, respectively. At heavy metal sludge to binder ratio of 0.75 : 1, fixation efficiency of Cr, Zn, and Ni were in the range of 83.94 - 90.02%, 91.55 - 95.92%, and 96.95 - 98.38%, respectively, and at heavy metal sludge to binder ratio of 1 : 1, fixation efficiency of Cr, Zn, and Ni were in the range of 72.28 - 85.25%, 89.09 - 93.97%, and 96.23 - 97.25%, respectively, as shown in Table 6.

### 3.5 Solidification cost

Solidification cost was calculated from market prices of used materials, namely Portland cement type I, sand and water as cement kiln dust cost was ignored. It was found that solidified sludge at heavy metal sludge to binder ratio of 1 : 1 (by weight), and 30% of cement kiln dust used has lowest cost at 4,778 baht per 1,000 kilogram of heavy metal sludge. However, if the ratio of heavy metal sludge to binder can be increased, cost of materials used in solidification will be reduced.

**Table 6** Efficiency of heavy metal fixation at curing time of 28 days

Sludge : Binder ratio	Binders ratio (OPC : CKD)	Efficiency of heavy metals fixation (%)		
		Cr	Zn	Ni
0.50 : 1	100 : 0	93.56	96.17	99.68
	95 : 5	92.96	95.74	99.43
	90 : 10	91.98	95.35	99.16
	85 : 15	90.29	95.25	98.94
	80 : 20	88.99	95.03	98.85
	75 : 25	87.14	94.69	98.61
	70 : 30	85.47	94.51	98.25
0.75 : 1	100 : 0	90.02	95.92	98.38
	95 : 5	88.83	95.07	98.08
	90 : 10	88.21	94.17	97.81
	85 : 15	86.50	93.30	97.68
	80 : 20	85.99	92.44	97.33
	75 : 25	84.93	92.13	97.17
	70 : 30	83.94	91.55	96.95
1 : 1	100 : 0	85.25	93.97	97.25
	95 : 5	84.00	93.64	97.13
	90 : 10	82.39	93.20	96.92
	85 : 15	79.46	92.00	96.62
	80 : 20	77.13	91.27	96.50
	75 : 25	74.26	90.04	96.46
	70 : 30	72.28	89.09	96.23

## 4. Conclusions and recommendations

### 4.1 Conclusions

1. Results of compressive strength indicated that the compressive strength values related to the ratio of heavy metal sludge to binder, percentage of cement kiln dust used, and curing time. For mixtures with high heavy metal sludge to binder ratio and high percentage of cement kiln dust used, a decrease in compressive strength was observed. An increase in compressive strength was observed in solidified sludge with more curing time.

2. Results of the leaching test indicated that the leaching of heavy metal related to the ratio of heavy metal sludge to binder, percentage of cement kiln dust used, and curing time. For mixtures with high heavy metal sludge to binder ratio and high percentage of cement kiln dust used, an increase in the leaching of heavy metal was observed. A decrease in the leaching of heavy metal was observed in solidified sludge with more curing time.

3. Among the tested mixtures, the mixture at heavy metal sludge to binder ratio of 1 : 1 (by weight), and Portland cement to cement kiln dust ratio of 70 : 30 (by weight) was most suitable. At this mixing ratio and curing time, the leaching of Cr, Zn and Ni and compressive strength values met the standard limits. Cost of materials used in solidification of heavy metal sludge at this mixing ratio is also lowest at 4,778 baht per 1,000 kilogram of heavy metal sludge.

### 4.2 Recommendations for further study

1. The study on increasing ratio of heavy metal sludge to binder should be conducted while the leaching and compressive strength results are still within the standard limits.
2. The study on replacement of Portland cement by more than 30% cement kiln dust should be conducted to compare the heavy metal leaching and compressive strength results.

3. The study on variation of water to binder ratio should be conducted to determine the appropriate water to binder ratio in solidification of heavy metal sludge.
4. A comparative study of leaching test by using TCLP and WET methods should be conducted to compare leaching results.



## รายการอ้างอิง

- กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. (ม.ป.ป.). *การจัดการของเสียอันตราย*. สืบค้นเมื่อ 27 มกราคม 2551, จาก <http://www.environment.in.th/evdb/info/waste/waste10.html>
- กุลเชษฐ เหลี่ยมสมบัติ. (2548). *การปรับเสถียร/การทำก้อนแข็งของเมงกานีสจากถ่านไฟฉาย*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.
- จิตรรัตน์ ศรีสุโข. (2540). *การกำจัดตะกอนโลหะหนักโดยทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และทราย*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ชนินทร์ เลิศคณาวินชกุล. (2545). *การหล่อแข็งกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่โดยใช้ฝุ่นทรายดำและซีเมนต์*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.
- นฤมล ศรภักษ์วานิช. (2544). *การหล่อแข็งกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย โรงงานผลิตแบตเตอรี่ด้วยวัสดุประสาน*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540. (13 พฤศจิกายน 2540). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่มที่ 114, ตอนพิเศษ 106 ง.
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548. (25 มกราคม 2549). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่มที่ 123, ตอนพิเศษ 11 ง.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). *ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต*. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.).
- พรสุดา ศิริเสวตวาริน. (2548). *การชะละลายของตะกั่วและกำมะถันรับแรงอัดจากการหล่อแข็งกากตะกอนของโรงงานแบตเตอรี่โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และซีเมนต์*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาสาขาภิบาลสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

- มัลลิกา ปัญญาอะโป. (2551). *การจัดการของเสียอันตราย* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: รัฐสภาการพิมพ์.
- ม.ล. วิจิตต์จรรยา สรรพกิจจานง, สมหวัง โสมนรินทร์, เลิศ พัดฉวี และณรงค์ชัย จันดาวงษ์. (2545). *คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์สำหรับงานคอนกรีตบดอัด*. กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง.
- วัลย์รัตน์ จันทรวงศ์. (2549). *การบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ*. สืบค้นเมื่อ 2 เมษายน 2551, จาก <http://www.library.kmitnb.ac.th/article/atc42/atc00244.html>
- วินิต ช่อวิเชียร. (2529). *คอนกรีตเทคโนโลยี* (พิมพ์ครั้งที่ 7). กรุงเทพฯ: ป.สัมพันธ์พาณิชย์.
- ศิริวัฒน์ ไชยชนะ. (2542). *ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี*. กรุงเทพฯ: เอส เอส บุ๊คเฮาส์.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2549). *ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยลิกไนต์*. สืบค้นเมื่อ 18 มกราคม 2551, จาก <http://www.learn.in.th/sample/flyash/content01.html>
- อรรวรรณ มานูญวงศ์. (2542). *กำลังรับแรงอัดและการชะละลายของตะกั่วและนิกเกิลเกิดจากกากตะกอนโลหะหนักที่ทำให้เป็นก้อนหล่อแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าเคลบ*. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.
- Al-Harthy, A.S., Taha, R., & Al-Maamary, F. (2003). Effect of cement kiln dust (CKD) on mortar and concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 17 (5), 353-360.
- Asavapisit, S., Naksrichum, S., & Harnwajanawong, N. (2005). Strength, leachability and microstructure characteristics of cement-based solidified plating sludge. *Cem. Concr. Res*, 35 (6), 1042-1049.
- Atkins, M., Glasser, F.P., Moroni, L.P., & Jack, J.J. (1993). *Thermodynamic modeling of blended cements at elevated temperatures (50-90 °C)*. Report prepared by Aberdeen University. DOE Report No. DOE/HMIP/RR/94.011
- Bishop, P.L. (1988). Leaching of inorganic hazardous constituents from stabilized/solidified hazardous wastes. *Hazardous Wastes & Hazardous Materials*, 5 (2), 129-143.
- California Integrated Waste Management Board. (1998). *Attachment 1- Characterizing Burn Dumps in California* (LEA Advisory #56). Retrieved January 14, 2008, from <http://www.ciwmb.ca.gov/LEAAdvisory/56/attach1.htm>

- Cockburn cement Limited. (2005). *Material Safety Data Sheet: Cement kiln dust*. Retrieved April 29, 2008, from <http://cockburncement.com.au/productinfo/range/msds/MSDS%20Cement%20Kiln%20Dust%20261104.pdf>
- Conner, J.R. (1990). *Chemical fixation and solidification of hazardous waste*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Department of Toxic Substances Control - California Environmental Protection Agency. (n.d.). *Waste Classification: TCLP and WET Test Methods*. Retrieved April 1, 2008, from [http://ccelearn.csus.edu/wasteclass/mod6/mod6\\_05.html](http://ccelearn.csus.edu/wasteclass/mod6/mod6_05.html)
- El-Aleem, S.A., Abd-El-Aziz, M.A., Heikal, M., & Didamony, H.E. (2005). Effect of cement kiln dust substitution on chemical and physical properties and compressive strength of Portland and slag cements. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 30 (2), 263-273.
- Environment, Health and Safety Online. (n.d.). *The EPA TCLP: Toxicity Characteristic Leaching Procedure and Characteristic Wastes (D-codes)*. Retrieved March 12, 2008, from <http://www.ehso.com/cssepa/TCLP.htm>
- Federation of Electro Plating Industry Association, Japan. (2002). *Electroplating Industry*. Retrieved April 25, 2008, from <http://www.prtr.nite.go.jp/english/pdf/manual2005/calco6-2e.pdf>
- Glasser, F.P. (1993). Chemistry of cement- solidified waste forms. In Spence, R.D. (Ed.). *Chemistry and Microstructure of solidified waste forms*. USA.: Lewis Publishers.
- Gougar, M.L.D., Scheetz, B.E., & Roy, D.M. (1996). Ettringite and C-S-H Portland cement phases for waste ion immobilization: A review. *Journal of Waste Management*, 16 (4), 295-303.
- Karamalidis, A.K., & Voudrias, E.A. (2007). Release of Zn, Ni, Cu,  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{CrO}_4^{2-}$  as a function of pH from cement-based stabilized/solidified refinery oily sludge and ash from incineration of oily sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 141 (3), 591-606.
- Komarneni, S. & Roy, D.M. (1987). Naturally occurring 1.4nm tobermorite and synthetic jennite: Characterization by  $^{27}\text{Al}$  and  $^{29}\text{Si}$  MASNMR spectroscopy and cation exchange properties. *Cem. Concr. Res*, 17 (6), 891-895.

- LaGrega, M.D., Buckingham, P.L., & Evans, J.C. (1994). *Hazardous Wastes Management*. New York: McGraw-Hill.
- Lin, C.K., Chen, J.N., & Lin, C.C. (1996). An NMR and XRD study of solidification/stabilization of chromium with Portland cement and  $\beta$ -C<sub>2</sub>S. *Journal of Hazardous Materials*, 48 (1-3), 137-147.
- Malviya, R. & Chaudhary, R. (2006). Evaluation of leaching characteristics and environmental compatibility of solidified/stabilized industrial waste. *Journal of Hazardous Materials*, 8, 78-87.
- Means, J.L., Smith, L.A., Nehring, K.W., Brauning, S.E., Gavaskar, A.R., Sass, B.M., et al. (1995). *The Application of Solidification/Stabilization to Waste Materials*. Ohio: Lewis Publishers.
- Park, C.K. (2000). Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementitious materials. *Cement and concrete research*, 30 (3), 429-435.
- Qian, 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 (8), 1257-1262.
- Roy, A., Eaton, H.C., Cartledge, F.K., & Tittlebaum, M.E. (1992). Solidification/stabilization of Hazardous Waste: Evidence of Physical Encapsulation. *Environment Science Technology*, 26 (7), 1349-1353.
- Shively, W., Bishop, P., & Brown, T. (1986). Leaching tests of heavy metal stabilized with Portland cement. *Journal WPC*, 58, 234-241.
- Shoaib, M.M., Balaha, M.M., & Abdel-Rahman, A.G. (2000). Influence of cement kiln dust substitution on the mechanical properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 30 (3), 371-377.
- Siddique, R. (2006). Review Utilization of cement kiln dust (CKD) in cement mortar and concrete: an overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 48 (4), 315-338.
- Simmons, B. (1999). *Overview of California EPA Approach*. Proceedings of the Environmental Protection Agency Public Meeting on Waste Leaching: Session III - Leaching Science. Retrieved January 30, 2008, from <http://www.epa.gov/sw.846/pdfs/overvwcal.pdf>

- Singh, T.S., & Pant, K.K. (2006). Solidification/Stabilization of arsenic containing solid wastes using Portland cement, fly ash and polymeric materials. *Journal of Hazardous Materials*, 131 (1-3), 29-36.
- Townsend, T., Jang, Y.C., & Tolaymat, T. (2003). *A guide to the use of leaching tests in solid waste management decision making*. Department of Environmental Engineering Sciences. Florida: University of Florida. Retrieved April 25, 2008, from [http://www.hinkleycenter.com/publications/0301\(A\)\\_A%20Guide%20to%20Leaching%20Tests-Final.pdf](http://www.hinkleycenter.com/publications/0301(A)_A%20Guide%20to%20Leaching%20Tests-Final.pdf)
- US.EPA. (1992). *Method 1311 Toxicity Characteristic Leaching Procedure*. Retrieved February 18, 2008, from <http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/1xxx.htm>
- US.EPA. (1993). *Alternative CKD Management Practices and Potential Utilization*. Report to Congress - Cement Kiln Dust Waste. Retrieved February 6, 2008, from <http://www.epa.gov/epaoswer/other/ckd/cement2.htm>
- Wang, K., Shah, S.P., & Mishulovich, A. (2004). Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD - fly ash binders. *Cement and Concrete Research*, 34 (2), 299-309.
- Ziegler, F., Giere, R., & Johnson, C.A. (2001). Sorption mechanisms of Zinc to calcium silicate hydrate: Sorption and microscopic investigations. *Environment Science and Technology*, 35, 4556-4561.



ภาคผนวก ก

รูปเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ ก-1 เครื่องผสมปูนซีเมนต์ (Mixer)



รูปที่ ก-2 แบบหล่อขนาด  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  (Specimen molds)



รูปที่ ก-3 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

(Compressive strength testing machine)



รูปที่ ก-4 เครื่องเขย่าแบบไปมา (Horizontal shaker)



รูปที่ ก-5 เครื่องตรวจวัดโลหะหนัก ICP Emission Spectrometer  
(Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer)

## ภาคผนวก ข

วิธีการย่อยผงฝุ่นซีเมนต์เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ โครเมียม สังกะสี นิกเกิล และทองแดง

วิธีการย่อยผงฝุ่นซีเมนต์ (Digestion application note by Milestone)

## ปริมาณตัวอย่าง

1. ผงฝุ่นซีเมนต์ 0.1 กรัม

## สารเคมี

1. สารละลาย  $\text{HNO}_3$  65% 3 มิลลิลิตร
2. สารละลาย  $\text{H}_3\text{PO}_4$  85% 3 มิลลิลิตร
3. สารละลาย  $\text{HBF}_4$  50% 2 มิลลิลิตร

## วิธีการ

1. ชั่งผงฝุ่นซีเมนต์ 0.1 กรัม ใส่ใน TFM vessel
2. เติมสารละลาย  $\text{HNO}_3$  65% 3 มิลลิลิตร สารละลาย  $\text{H}_3\text{PO}_4$  85% 3 มิลลิลิตร และสารละลาย  $\text{HBF}_4$  50% 2 มิลลิลิตร
3. ใส่ TFM vessel ในเครื่องไมโครเวฟ โดยใช้โปรแกรม ดังนี้

Step	Time	Temperature	Microwave power
1	10 minutes	220°C	Up to 1000 Watt
2	20 minutes	220°C	Up to 1000 Watt

4. นำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการย่อย (digest) มาทำการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วย 1%  $\text{HNO}_3$  ใน volumetric flask แล้วเก็บสารละลายไว้เพื่อรอการวิเคราะห์ค่าโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ต่อไป

## ภาคผนวก ก

วิธีการย่อยกากตะกอนเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ  
โครเมียม สังกะสี นิกเกิล ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม

## วิธีการย่อยกากตะกอน (Digestion application note by Milestone)

## ปริมาณตัวอย่าง

1. กากตะกอน 1 กรัม

## สารเคมี

1. สารละลาย  $\text{HNO}_3$  65% 8 มิลลิลิตร
2. สารละลาย  $\text{HCl}$  37% 2 มิลลิลิตร

## วิธีการ

1. ชั่งกากตะกอน 1 กรัม ใส่นใน TFM vessel
2. เติมสารละลาย  $\text{HNO}_3$  65% 8 มิลลิลิตร และสารละลาย  $\text{HCl}$  37% 2 มิลลิลิตร
3. ใส่น TFM vessel ในเครื่องไมโครเวฟ โดยใช้โปรแกรม ดังนี้

Step	Time	Temperature	Microwave power
1	4 minutes	90°C	Up to 1000 Watt
2	5 minutes	130°C	Up to 1000 Watt
3	4 minutes	190°C	Up to 1000 Watt
4	10 minutes	190°C	Up to 1000 Watt

4. นำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการย่อย (digest) มาทำการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วย 1%  $\text{HNO}_3$  ใน volumetric flask แล้วเก็บสารละลายไว้เพื่อรอการวิเคราะห์ค่าโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ต่อไป

## ภาคผนวก ง

วิธีการย่อยน้ำชะละลายเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ  
โครเมียม สังกะสี นิกเกิล ทองแดง ตะกั่วและแคดเมียม

## วิธีการย่อยน้ำชะละลาย (Digestion application note by Milestone)

## ปริมาณตัวอย่าง

1. น้ำชะละลาย 5 มิลลิลิตร

## สารเคมี

1. สารละลาย  $\text{HNO}_3$  65% 7 มิลลิลิตร
2. สารละลายเข้มข้น  $\text{H}_2\text{O}_2$  1 มิลลิลิตร

## วิธีการ

1. นำน้ำชะละลายจำนวน 5 มิลลิลิตร ใส่ใน TFM vessel
2. เติมสารละลาย  $\text{HNO}_3$  65% 7 มิลลิลิตร และสารละลายเข้มข้น  $\text{H}_2\text{O}_2$  1 มิลลิลิตร
3. ใส่ TFM vessel ในเครื่องไมโครเวฟ โดยใช้โปรแกรม ดังนี้

Step	Time	Temperature	Microwave power
1	10 minutes	200°C	Up to 1000 Watt
2	20 minutes	200°C	Up to 1000 Watt

4. นำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการย่อย (digest) มาทำการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วย 1%  $\text{HNO}_3$  ใน volumetric flask แล้วเก็บสารละลายไว้เพื่อรอการวิเคราะห์ค่าโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ต่อไป

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวประภัสสร มณีรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	11 มิถุนายน 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา พ.ศ. 2543 - 2547 วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยมหิดล พ.ศ. 2548 - 2551 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีที่ เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและ สิ่งแวดล้อม)
ที่อยู่ปัจจุบัน	5 หมู่ 10 ต. คลองจินดา อ.สามพราน จ. นครปฐม 73110