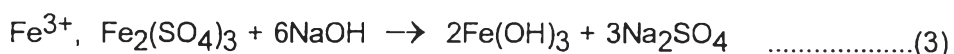
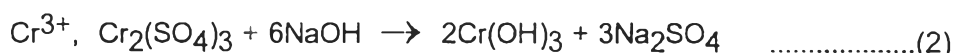
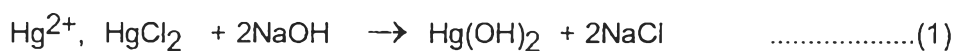


บทที่ 3
ทบทวนเอกสาร

โลหะหนัก

โลหะหนักหมายถึงโลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุมีจำนวนทั้งหมด 68 ธาตุโลหะหนักในน้ำเสียที่ต้องกำจัดเป็นอันดับแรกมี 13 ชนิดได้แก่ arsenic, antimony, beryllium, cadmium, chromium, copper, lead, mercury, nickel, silver, selenium, thallium และ zine (US.EPA, 1979)

การทดลองนี้ใช้ของเสียที่มีปรอทปนเปื้อน 2 ชนิดได้แก่กากหลอดฟลูออเรสเซนต์ และตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จากการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการวิเคราะห์ค่า COD ซึ่งมีโลหะปนเปื้อนในตะกอนตั้งสมการต่อไปนี้



ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรม เมื่อผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หิน กรวด ทรายและน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีตซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งแรงทนทานคล้ายหิน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆที่อุณหภูมิประมาณ 1400-1500 องศาเซลเซียส วัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ ได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน เหล็กและอลูมิเนียม โดยมีอัตราส่วนผสมที่พอเหมาะเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ สารออกไซด์ของธาตุซิลิเนียม ซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็กจะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่างได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต(Tricalcium Silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต(Dicalcium silicate) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต(Tricalcium Aluminate)และเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

จำนวนเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบเหล่านี้ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ชนิดหนึ่งๆ ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับประเภทของปูนซีเมนต์ คุณสมบัติของสารประกอบทั้ง 4 ชนิดมีดังนี้

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้เร็ว

ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้ช้า

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็วเกิดการก่อตัวทันทีที่ผสมกับน้ำ ให้ความร้อนสูง

เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite) จะก่อตัวอย่างรวดเร็วแต่ช้ากว่าและให้ความร้อนน้อยกว่าไตรแคลเซียมอลูมิเนตเล็กน้อย

ตารางที่ 3.1 แสดงสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

ในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตรวมกันประมาณ 70-80 % ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของซิลิกาและอลูมินาอยู่มากจะเป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูง แต่ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณซิลิกามากเพียงอย่างเดียวจะเป็นปูนซีเมนต์ที่มีระยะเวลาการก่อตัวช้า

1. ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย (มอก.15) และ ASTM แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็นประเภทใหญ่ๆ 5 ประเภทคือ

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement, OPC) สำหรับใช้ทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าปกติและสำหรับใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไปที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศรุนแรงหรือในที่ที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษที่ความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำจะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตราย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียวและตราเพชรเม็ดเดียว

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ดัดแปลง

สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อน ทนซัลเฟตได้ปานกลาง

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์แข็งเร็ว หรือที่เรียกว่าซูเปอร์ซีเมนต์

สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังสูงในระยะแรกมีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาผลิตได้โดยการเปลี่ยนสัดส่วนและโดยการเติมสารอื่นโดยการบดให้ละเอียดยิ่งขึ้นหรือโดยการเผาให้ดีขึ้น

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ

ปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำสุด ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ใช้มากในการก่อสร้างคอนกรีต
หลา

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง

เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง สำหรับใช้กับโครงสร้างที่อยู่ในที่ที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง

ถั่วลอยลิกไนต์

ถั่วลอยลิกไนต์เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตไฟฟ้า ได้ถั่วลอยประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของถ่านหิน สามารถแบ่งถั่วลอยได้เป็น 3 พวก คือ

- 1) ถั่วก้นเตา มีขนาดใหญ่และตกลงก้นเตา
- 2) ถั่วตะกรัน เป็นถั่วที่หลอมละลาย เกาะเป็นตะกรันที่ผนังของเตาเผาหรือหม้อน้ำ
- 3) ถั่วลอย เป็นถั่วที่มีเม็ดละเอียดโดยที่ถั่วนี้จะลอยไปพร้อมกับแก๊สร้อนจากปล่องแต่จะถูกจับโดยเครื่องจับตกตะกอนถั่วหลังจากนั้นจะถูกนำไปเก็บในถังเก็บ

ถั่วลอยลิกไนต์มีขนาดเล็กมากคือมีขนาดตั้งแต่ 0.03 มิลลิเมตรถึง 0.42 มิลลิเมตร รูปร่างมักมีลักษณะเป็นเม็ดค่อนข้างกลม มีความถ่วงจำเพาะ 2.23 ถึง 2.48 มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานโดยมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3

ตามมาตรฐาน ASTM C618-85 ได้แบ่งประเภทของถั่วลอยตามปริมาณของ $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ ดังนี้

- 1) ถั่วลอย class C มีส่วนประกอบของ $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ รวมกันไม่น้อยกว่า 50 %
- 2) ถั่วลอย class F มีส่วนประกอบของ $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ รวมกันไม่น้อยกว่า 70 %

นอกจากนี้ถั่วลอย 2 ชนิดยังมีความแตกต่างกันในเรื่องวัตถุดิบที่ใช้ในการเผา ดังนี้

- 1) ถั่วลอย class C ได้จากการเผาถ่านหินประเภทซับบิทูมินัสหรือถ่านหินลิกไนต์เป็นถ่านหินที่เกรดต่ำมีปริมาณคาร์บอนน้อย
- 2) ถั่วลอย class F ได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซด์หรือถ่านหินบิทูมินัสซึ่งถ่านหินทั้งสองชนิดนี้ใช้กันมากในยุโรป อเมริกาและญี่ปุ่น เป็นถ่านหินเกรดดีให้พลังงานความร้อนมากเพราะมีปริมาณคาร์บอนสูง มีความแข็ง

มาตรฐาน ASTM C618 - 85 สารวัสดุซีเมนต์ธรรมดาแสดงดังตาราง 3.2

องค์ประกอบทางเคมีของถั่วลอยลิกไนต์แม่เมาะแสดงดังตารางที่ 3.3

มาตรฐาน ASTM C618 - 85 สารวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติแสดงดังตาราง 3.2
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะแสดงดังตารางที่ 3.3 และผลการวิเคราะห์
ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยลิกไนต์และในน้ำจากการทดลองแช่เถ้าลอยลิกไนต์ในน้ำแสดง
ดังตารางที่ 3.4

ตาราง 3.2 แสดงมาตรฐาน ASTM C618 - 85 ซึ่งเกี่ยวกับสารวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ

	ชั้นของวัสดุผสม		
	N	F	C
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ % น้อยที่สุด	70	70	50
SO ₃ % มากที่สุด	4	5	5
Pozzolan Index % น้อยที่สุด	75	75	75
ปริมาณน้ำที่ต้องการ % มากที่สุด	115	105	105

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะและซิลิกาฟุ้ง

Chemical Composition	Average Quantity (%)	
	Fly Ash	Silica Fume
SiO ₂	54.2	87-98
Al ₂ O ₃	16.3	-
Fe ₂ O ₃	11.7	0.1-5.0
CaO	7.8	< 2.0
MgO	1.4	0.1-5.0
SO ₃	4.3	-
Na ₂ O	1.1	-

ตารางที่ 3.4 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก(มิลลิกรัมต่อลิตร)ในเถ้าลอย
ลิกไนต์และในน้ำจากการทดลองแช่เถ้าลอยลิกไนต์ในน้ำ(กฝพ , 2536)

โลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยลิกไนต์	ปริมาณโลหะหนักในน้ำที่แช่เถ้าลอยลิกไนต์
อาร์เซนิก	213	0.13
โครเมียม	66.5	0.25
ตะกั่ว	53.3	0.06
แคดเมียม	33.7	0.003

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume)

ซิลิกาฟุ้งเป็นวัสดุที่ใช้ในการผสมกับซีเมนต์เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ และเพิ่มคุณสมบัติในการเชื่อมประสานของซีเมนต์

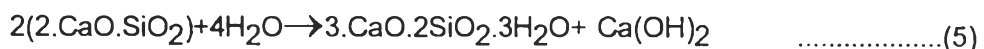
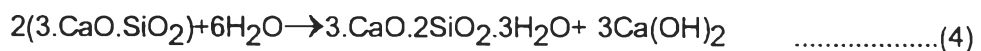
ซิลิกาฟุ้งมีลักษณะเป็นผงสีเทา ไม่ละลายน้ำ ความถ่วงจำเพาะ 2.2-2.5 มีความหนาแน่น 0.5-0.7 กิโลกรัมต่อลิตร

องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟุ้งแสดงดังตารางที่ 3.3

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งแรง ปฏิกิริยานี้จะเปลี่ยนสารประกอบในปูนซีเมนต์ให้เป็นสารเชื่อมประสาน ผลผลิตของไฮเดรชันมีชื่อเรียกรวมๆ ว่า ซีเมนต์เจล (cement gel) ประกอบด้วยคัลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต(C-S-H) ประมาณร้อยละ50-90โดยปริมาตรและคัลเซียมไฮดรอกไซด์(Ca(OH)₂) ประมาณร้อยละ 20-25

ขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือ เมื่อผงซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำแล้วจะเกิดเป็นไฮเดรตคอมพาวด์โดยไตรคัลเซียมซิลิเกต(C₃S)และไดคัลเซียมซิลิเกต(C₂S)จะแตกตัวเป็น 2 ส่วนซึ่งมีการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

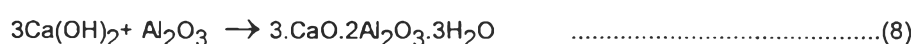
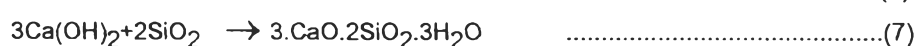


ปฏิกิริยานี้จะดำเนินไปเรื่อยๆ โดยที่คัลเซียมไดออกไซด์ (CaO) จะแยกตัวออกมาจากคัลเซียมซิลิเกต (CaO.SiO₂)ไปเป็นคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) จนสารละลายนั้นอิ่มตัวด้วยคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) หรือสารประกอบคัลเซียมซิลิเกต (CaO.SiO₂)ถูกทำปฏิกิริยาจนหมด สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้ง 2 ส่วน ได้แก่

1.1) คัลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (Calcium-Silicate-Hydrate, C-S-H) มีสูตรเคมีเป็น $3.CaO.2SiO_2.3H_2O$ ซึ่งเป็นตัวประสาน

1.2) คัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, $(Ca(OH)_2)$) เป็นสารที่สามารถจะทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีกถ้ามีสารประกอบที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา

2) ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) แก๊สลอยลิกไนต์เป็นสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C595 สารปอซโซลานเป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) ก่อตัวเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติซีเมนต์ซึ่งมีสารประกอบหลักคือ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ถ้าใส่แก๊สลอยลิกไนต์ในสภาพป่นเป็นฝุ่นผสมกับน้ำ CaO ส่วนที่เป็น free lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นคัลเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของซีเมนต์พิเศษจะทำปฏิกิริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาของไฮเดรชันได้สาร C-S-H เหมือนกับปฏิกิริยาของไตรคัลเซียมซิลิเกตและไตรคัลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนถึงขีดจำกัดขีดหนึ่ง โดยอาจเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



สารประกอบคัลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (Calcium-Silicate-Hydrate, C-S-H) และสารประกอบคัลเซียม-อลูมิเนียม-ไฮเดรต ($3.CaO.2Al_2O_3.3H_2O$) เป็นสารประกอบที่ทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นซึ่งจากการศึกษาพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ การผสมแก๊สลอยเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะทำให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งเป็นการลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันลงด้วย

ของเสียเสี่ยงอันตราย (Hazardous Waste)

มีผู้ให้ความหมายของของเสียเสี่ยงอันตรายไว้มากมาย ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ให้นิยามโดย Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) กล่าวไว้ว่าของเสียเสี่ยงอันตรายคือของเสียที่เป็นของแข็งหรือเป็นส่วนผสมของของเสียที่เป็นของแข็งหลายชนิด ปริมาณ ความเข้มข้นหรือลักษณะทางกายภาพ ทางเคมีหรือทางการติดเชื้อของของเสียเสี่ยงอันตรายนั้น อาจจะทำให้เกิดความเสียหายดังนี้

1. การแพร่ขยายการตายหรือการติดเชื้อที่ร้ายแรงที่ไม่สามารถรักษาได้หรือสามารถรักษาได้เพิ่มขึ้น

2. เป็นอันตรายอย่างปัจจุบันทันด่วนหรือมีแนวโน้มที่จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์หรือต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อทำการบำบัด การเก็บ การขนส่ง การทิ้งหรือการจัดการที่ไม่เหมาะสม

ทั้งนี้ความหมายของของแข็งนั้นรวมถึงของกิ่งของแข็ง ของเหลวและก๊าซที่ถูกบรรจุในบรรจุผลิตภัณฑ์ใด ๆ ด้วย

นอกจากนี้ The U.S. Environmental Protection Agency(U.S.EPA.)ได้ให้นิยามเพิ่มเติมว่าของเสียเสี่ยงอันตรายคือ ของเสียที่มีลักษณะเป็นอันตรายและจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุมของกฎหมายต้องมีลักษณะตรงกับข้อใดข้อหนึ่งหรือหลายข้อรวมกันดังนี้

-แสดงถึงลักษณะที่สามารถจุดติดไฟได้ง่าย มีฤทธิ์กัดกร่อน เกิดปฏิกิริยากับวัสดุอื่นได้ง่ายหรือมีความเป็นพิษ

-เป็นของเสียที่ไม่สามารถระบุมารได้ (มักเกิดจากกระบวนการในอุตสาหกรรมต่าง ๆ)

-เป็นของเสียเฉพาะจากอุตสาหกรรมบางประเภท

-เป็นผลิตภัณฑ์หรือวัสดุที่ได้จากสารเคมีที่ใช้ในการพาณิชย์กรรมบางประเภท

-เป็นส่วนผสมของสารที่ถูกกำหนดว่าเป็นของเสียเสี่ยงอันตราย

-เป็นวัสดุที่ไม่ถูกกำหนดไว้ในบทบัญญัติของThe Resource Conservation and Recovery Act, Subtitle C

ในขณะที่ของเสียเสี่ยงอันตรายตามคำจำกัดความสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติกล่าวไว้ว่าเป็นของเสียหรือสิ่งที่เจือปนด้วยของเสียที่มีความเข้มข้นหรือมีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและอื่น ๆ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการตาย หรือการเจ็บป่วยทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ตลอดจนทำให้เกิดหรือมีแนวโน้มจะทำให้เกิดอันตรายต่อ

สุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมเมื่อไม่ได้มีการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด การเก็บกัก การขนส่งและการกำจัด (เพ็ชรพร ชาวกิจเจริญ,2536)

ของเสียเสี่ยงอันตรายจะต้องประกอบด้วยสารที่มีลักษณะดังต่อไปนี้

-ไวไฟหรือติดไฟง่าย(ignitibility)ได้แก่ของเสียที่เกิดการติดไฟได้อาจจะทำให้เกิดอุบัติเหตุ ไฟไหม้

-เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (reactivity)หรือเกิดการระเบิดได้(explosiveness) ได้แก่ของเสียที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น เช่น ทำปฏิกิริยากับน้ำในสภาวะที่เหมาะสมอาจทำให้เกิดแก๊สพิษต่างๆ หรืออาจเกิดการระเบิดขึ้นได้

-การกัดกร่อน (corrosivity)ได้แก่ของเสียที่สามารถทำปฏิกิริยาเกิดการกัดกร่อนของโลหะได้ เช่น ของเสียที่เป็นกรดหรือด่าง

-เป็นพิษ (toxicity) ได้แก่ ของเสียที่มีความเป็นพิษในตัวเองสามารถทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้เช่น ของเสียที่ประกอบด้วยสารโลหะหนัก

-ถูกชะละลายได้ (leachability) ได้แก่ ของเสียที่ถูกชะละลายโดยน้ำและปลดปล่อยสารที่เป็นอันตรายออกมาซึ่งสามารถไหลปนในแหล่งน้ำต่างๆ

-ทำให้เกิดโรค (pathogenicity) ได้แก่ ของเสียที่มีพวกจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา ไวรัส ปะปนอยู่ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้ อาจทำให้เกิดโรคได้ถ้าสัมผัสหรือเข้าสู่ร่างกาย

สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ได้แบ่งประเภทของเสียเสี่ยงอันตรายไว้เป็น 14 ประเภท ได้แก่

1. น้ำมันต่างๆ
2. เศษเหลือของสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของเหลว
3. กากตะกอนของสารอินทรีย์
4. กากตะกอนของสารอนินทรีย์
5. กากตะกอนโลหะหนัก
6. สารทำลายต่างๆ
7. ของเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด
8. ของเสียที่มีฤทธิ์เป็นด่าง
9. ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาผิดแบบ(รวมถึงวัตถุอันตรายที่ไม่ได้มาตรฐาน)
10. polychlorinated biphenyls (PCBs)
11. เศษเหลือของสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารละลาย
12. ของเสียจากการล้างรูปภาพ
13. ของเสียติดเชื้อ

14. ของเสียชุมชน

การกำจัดของเสียเสี่ยงอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน (stabilization/solidification of hazardous waste)

การทำให้คงตัว (stabilization) หมายถึงกระบวนการที่ของเสียถูกเปลี่ยนแปลงทางเคมีให้มีความคงตัวมากขึ้น ทั้งนี้รวมทั้งการทำให้อยู่ในรูปที่ไม่สามารถละลายได้ซึ่งจะกักธาตุหรือสารประกอบที่เป็นพิษไว้ในโครงสร้างทางผลึกของสารที่ทำให้เกิดความคงตัว

การทำให้เป็นก้อน (solidification) หมายถึง กระบวนการที่มีการเติมสารบางชนิดลงในของเสียเพื่อให้ได้ของแข็งที่เป็นเนื้อเดียวกันทำให้มีลักษณะทางกายภาพดีขึ้นและมีความคงตัวมากขึ้นทำให้มวลสารนั้นพร้อมที่จะถูกจัดการหรือขนส่งต่อไป

การทำให้เป็นก้อนและการทำให้คงตัวเป็นกระบวนการที่ออกแบบมาเพื่อใช้ป้องกันการชะละลายของสารเคมีที่เป็นของเสียเสี่ยงอันตรายและการปนเปื้อนของสารพิษสู่สิ่งแวดล้อม วัตถุประสงค์ของกระบวนการดังกล่าวเพื่อสร้างมวลของแข็งเนื้อเดียวที่มีความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้น้อยและมีโครงสร้างที่มั่นคงแข็งแรง โดยกำหนดหลักสำคัญ 4 ข้อในการบำบัดของเสียอันตรายดังนี้

1. ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของของเสียให้เหมาะสมในการเคลื่อนย้ายของเสีย
2. การลดพื้นที่ผิวของเสียเพื่อป้องกันหรือลดการสูญเสียสารมลพิษ
3. การจำกัดการละลายของสารมลพิษที่อยู่ในของเสีย
4. การกำจัดสารมลพิษออกจากของเสีย

ตารางที่ 3.5 แสดงกระบวนการกำจัดของเสียเสี่ยงอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อนประเภทต่าง ๆ 7 วิธี ได้แก่ Cement Base, Pozzolanic(Lime Based), Thermoplastic, Organic Polymer, Surface Encapsulation, Self-cementing, Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics

การเลือกวิธีการบำบัดของเสียดังกล่าวควรเลือกให้เหมาะสมกับของเสียประเภทต่าง ๆ โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติเฉพาะของของเสียสำหรับตะกอนโลหะหนักสามารถ

กำจัดได้หลายวิธี เช่น Cement Based, Pozzolanic(Lime Based), Thermoplastic, Surface Encapsulation, Glassification

ตารางที่ 3.5 แสดงกระบวนการกำจัดของเสียเสี่ยงอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน

กระบวนการทำให้เป็นก้อน (solidification)	รายละเอียด
1.Cement Based	ของเสียจะถูกผสมลงไปโนซีเมนต์ น้ำและส่วนผสมอย่างอื่น ปล่อยให้แห้งจนแข็งตัวเป็นก้อนซีเมนต์
2.Pozzolanic (Lime Based)	ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาวและวัสดุ ที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานเช่น ถ้ำลอย ผงซีเมนต์ที่เตาเผา เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งตัวได้เมื่อผสมน้ำและปล่อยให้แห้งตัว
3.Thermoplastic	นำของเสียมาทำให้แห้งให้ความร้อนแล้วผสมให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น bitumen, paraffin หรือ polyethylene ปล่อยให้ส่วนผสมเย็นตัวลงและแข็งตัว
4.Organic Polymer	ของเสียในขั้นแรกจะถูกผสมกับสารโพลิเมอร์ (gelling agents หรือ formadehyde) และเติมสารคะตะลิสต์ผสมให้เข้ากันก่อนที่สารโพลิเมอร์แข็งตัว
5.Surface Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันแน่นแล้วเคลือบผิวนอกของของเสียที่ถูกบดอัดด้วยสารเจือย เช่น polyethylene หรือ organic resins
6.Self-cementing	สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ เช่น คัลเซียมซัลเฟตและคัลเซียมซัลไฟด์ที่เกิดจากการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สามารถนำมาใช้ผสมกับตะกอนของเสียเพื่อหล่อให้แข็งตัวได้โดยวัสดุที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและมีความสามารถให้น้ำซึมได้น้อย

ตารางที่ 3.5 แสดงกระบวนการกำจัดของเสียเสียงอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน(ต่อ)

7. Classification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics	สารที่เป็นอันตรายมาก เช่น กากสารกัมมันตรังสี สามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็นส่วนผสมของแก้ว หรือ synthetic silicate mineral เพื่อป้องกันไม่ให้สารเสียงอันตรายนี้ถูกชะละลายด้วยน้ำ สามารถนำไปกำจัดต่อไปโดยไม่ต้องมีกระบวนการหุ้มหรือบรรจุครั้งที่ 2
--	---

ที่มา Engineering and Science, 1989

Rijal (ก.ศ.1990) ได้สรุปข้อดีและข้อเสียสำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธีไว้ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Cement Based	Chemical fixation solidification	แห้งหรือเปียก(โดยทั่วไปเหมาะกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> -วัสดุที่ใช้มีราคาถูก -มีความทนทานต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี -กำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดี -เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาแล้ว 	<ul style="list-style-type: none"> -ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ -ซีเมนต์และของเสียที่แข็งตัวแล้วถูกชะละลายได้ในสภาพที่มีค่าพีเอชต่ำ
2. Lime Based	Chemical fixation solidification	แห้งหรือเปียก(โดยทั่วไปเหมาะกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> -วัสดุที่ใช้มีราคาถูก -เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาแล้ว -การใช้เต้าลอยมาเป็นส่วนผสมเป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิดโดยใช้กระบวนการเดียวกัน 	เหมือนกับ cement Based

ตารางที่ 3.6 แสดงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี (ต่อ)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
3. Thermoplastic Based	physical fixation	แห้ง(เหมาะกับสารอินทรีย์)	-สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีได้เป็นอย่างดี -สารละลายที่ชะละลายมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก	-ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพงและต้องใช้แรงงานที่มีความชำนาญ -ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ -ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวก strong oxidants, dehydrated salts
4. Organic Polymer Process	physical fixation	แห้งหรือเปียก (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	-ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิด Polymer's matrix -ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง	-ของเสียจะถูกยึดในโพลีเมอร์อย่างหลวมๆ -สารที่มีพีเอชต่ำจะทำให้โลหะละลายออกมาได้มากขึ้น -การย่อยสลายทางชีวภาพของสารโพลีเมอร์บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ
5. Encapsulation	chemical containment	แห้งหรือเปียก	-ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี -ไม่มีการชะละลายของของเสียออกมาเมื่อสารที่ห่อหุ้มอยู่ไม่ถูกทำลาย -ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีอื่น	-การชะละลายของเสียจะเกิดขึ้นหากสารที่ห่อหุ้มถูกทำลาย -ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่ต้องกำจัดของเสียจำนวนมากๆ
6. Self Cementing	chemical fixation	แห้งหรือเปียก	-กระบวนการนี้ต้องการสารเติมในส่วนผสมซึ่งจะช่วยให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก	-สารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ -ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการห่อหุ้มสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะละลายได้ภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำ
7. Glassification	physical fixation	แห้ง	-ของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก้วจะถูกชะละลายได้น้อยมาก -การบรรจุห่อหุ้มอยู่ในแกนที่ดี -ใช้วัสดุที่มีราคาถูก	-อุณหภูมิสูงอาจทำให้มีของเสียอื่นระเหยออกมา -ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับการให้ความร้อนแก่อุปกรณ์และต้องการผู้ชำนาญงานเฉพาะ -ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการกำจัดของเสียทุกชนิดยกเว้นสารกัมมันตภาพรังสีและสารที่มีพิษมาก ๆ

ดังนั้นจะเห็นว่ากระบวนการบำบัดโดยทำให้เป็นก้อนมีหลายวิธีในแต่ละวิธีสามารถใช้ได้กับของเสียที่แตกต่างกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.7 ซึ่งเป็นการแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากกระบวนการต่างๆที่ใช้กับของเสียที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้ของกระบวนการต่างๆที่ใช้กับของเสียที่แตกต่างกัน

ประเภทของของเสีย	Cement Based	Lime Based	Thermoplastic Encapsulation	Thermosetting Micro Encapsulation	Macro Encapsulation
<u>สารอินทรีย์</u> -สารละลายที่เป็นสารอินทรีย์และน้ำมัน	จะมีการซัดขวางการก่อตัวซึ่งจะออกจากก้อนคอนกรีตในรูปสารระเหย	จะมีการซัดขวางการก่อตัวซึ่งจะออกจากก้อนคอนกรีตในรูปสารระเหย	สารอินทรีย์อาจจะระเหยออกมาขณะที่ให้ความร้อน	อาจจะหน่วงเหนี่ยวการก่อตัวของโพลีเมอร์	จะถูกดูดเข้าไปในโครงสร้างของของแข็ง
สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของแข็ง	มักจะเป็นผลดีต่อการเพิ่มความทนทาน	มักจะเป็นผลดีต่อการเพิ่มความทนทาน	มักใช้เป็นวัสดุที่ใช้ในการผสม (binding agent)	อาจจะหน่วงเหนี่ยวการก่อตัวของโพลีเมอร์	สามารถเข้าได้ดีกับวัสดุที่ใช้เป็นตัวฉนวนที่เป็นพลาสติก
<u>สารอนินทรีย์</u> ของเสียที่เป็นกรด	ซีเมนต์จะทำการสะเทินให้เป็นกลาง	สามารถเข้ากันได้ดี	ต้องมีการทำการสะเทินก่อนการทำผลึก	สามารถเข้ากันได้ดี	ต้องมีการทำการสะเทินก่อนการทำผลึก
Oxidizers	สามารถเข้ากันได้ดี	สามารถเข้ากันได้ดี	อาจจะทำให้โครงสร้างของแข็งที่ก่อตัวแล้วพังทลายได้	อาจจะทำให้โครงสร้างของแข็งที่ก่อตัวแล้วพังทลายได้	อาจจะทำให้วัสดุที่ทำการผลึกตัวเสียหายได้
Sulphates	อาจเป็นการหน่วงเหนี่ยวการก่อตัวถ้าไม่ได้ใช้ซีเมนต์ที่มีลักษณะพิเศษ	สามารถเข้ากันได้ดี	อาจเกิดการสูญเสียน้ำมากเกินไปจนทำให้เกิดการแยกตัวของมวลผลึกและซีเมนต์	สามารถเข้ากันได้ดี	สามารถเข้ากันได้ดี
Halides	สามารถถูกชะละลายออกจากซีเมนต์ได้ง่ายและอาจจะหน่วงการก่อตัว	สามารถถูกชะละลายออกจากซีเมนต์ได้ง่ายและอาจจะหน่วงการก่อตัว	อาจเกิดการสูญเสียน้ำมากเกินไป	สามารถเข้ากันได้ดี	สามารถเข้ากันได้ดี

ตารางที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้ของกระบวนการต่างๆที่ใช้กับของเสียที่แตกต่างกัน (ต่อ)

ประเภทของของเสีย	Cemmt Based	Lime Based	Thermoplastic Encapsulation	Thermosetting Micro Encapsulation	Macro Encapsulation
โลหะหนัก	สามารถเข้ากันได้ดี	สามารถเข้ากันได้ดี	สามารถเข้ากันได้ดี	พีเอชที่เป็นกรดจะทำให้เกิดการละลายกลับมาใหม่ของโลหะไฮดรอกไซด์	สามารถเข้ากันได้ดี
สารกัมมันตภาพรังสี	สามารถเข้ากันได้ดี				

ที่มา Khomgrit Leangon , 1993

การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ (Cement-based Technique)

กระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ประกอบด้วย การผสมของเสียกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และสารผสมเพิ่มอื่นได้แก่ เถ้าลอย ซิลิกาเกต ซัลไฟด์ เป็นต้น โลหะหนักหลายชนิดในของเสียจะถูกเปลี่ยนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซิลิกาเกตที่ไม่ละลายน้ำในสภาพแวดล้อมซึ่งมีความเป็นด่างสูงมากในซีเมนต์และถูกจับไว้ภายในช่องว่างของโครงสร้างของส่วนผสมซีเมนต์ (Bishop ,1988) สรุปข้อดีข้อเสียได้ดังนี้

ข้อดี

1. สารที่เติมในส่วนผสมสามารถหาได้ง่าย
2. เทคนิคการผสมซีเมนต์ไม่ยุ่งยาก
3. วิธีการนี้สามารถทนต่อสารเคมีหลายชนิดในตะกอนของแข็งได้เป็นอย่างดี
4. เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการมีอยู่ทั่วไปและหาได้ง่าย
5. ความแข็งแรงและความสามารถให้น้ำซึมผ่านของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแข็งตัว
6. สามารถปรับได้โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมลงในของเสีย
7. วัสดุที่ใช้มีราคาถูก

ข้อเสีย

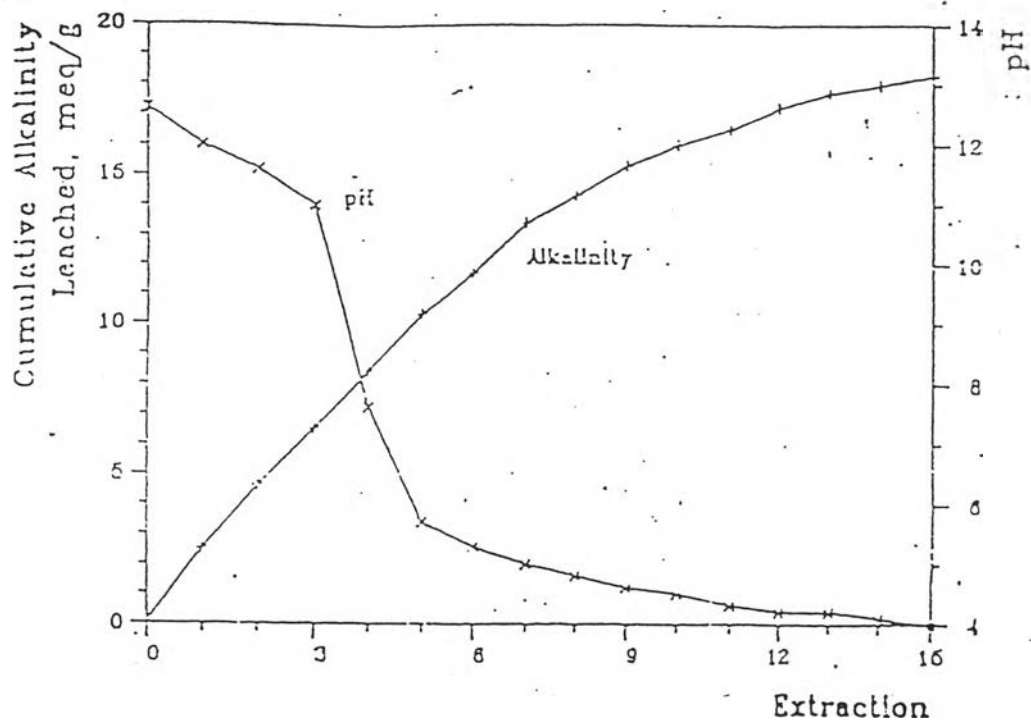
1. ไม่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์บางชนิดซึ่งจะทำลายกลไกการแข็งตัวของซีเมนต์
2. ผลึกภัณฑ์ที่ได้สามารถถูกชะละลายได้ในสภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำ
3. การเพิ่มน้ำหนักของของเสียโดยการหล่อด้วยซีเมนต์ทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งของเสียไปกำจัดเพิ่มขึ้น

กลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์

Bishop(1988) ได้ทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการชะละลายโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ ของเสียที่ใช้เป็นของเสียสังเคราะห์เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม โครเมียมและตะกั่ว โดยได้ศึกษาถึง Buffering Capacity ของวัสดุที่แข็งตัวจากการกำจัดโลหะหนักและกลไกการยึดจับโลหะหนักชนิดต่างๆในของเสียที่ถูกทำให้แข็งตัว สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity)

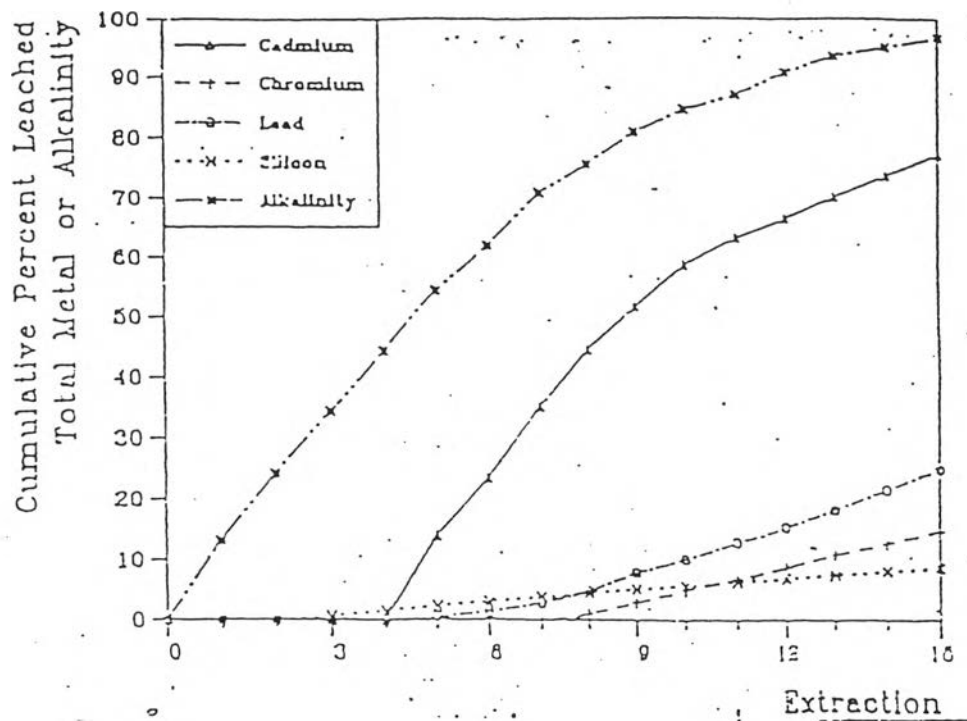
จากการทดสอบการชะละลาย (leaching Test) กับของเสียที่แข็งตัวในซีเมนต์ โดยทำการชะละลายของเสียแข็งตัวด้วยกรดอะซิติกแล้วทำการชะละลายติดต่อกันอีก 15 ครั้ง ตรวจวัดค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างนำไปเขียนกราฟดังรูปที่ 3.1 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อทำการชะละลายของเสียแข็งตัวหลายๆครั้งพบว่าค่าพีเอชของกรดที่ผ่านการชะละลายแล้วมีค่าลดลงเรื่อยๆจนเกือบคงที่ในครั้งที่ 15 ส่วนค่าความเป็นด่างสะสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะละลายได้จะเหลือน้อยมากประมาณ 1.7% ของค่าความเป็นด่างสะสมทั้งหมดโดยความเป็นด่างจะถูกชะละลายออกมามากในช่วงต้นและลดลงตามลำดับจนถึงครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างสะสมถึงการชะละลายในครั้งที่ 15 มีค่าเท่ากับ 18.3 meq/g ซึ่งถือว่าเป็นค่า Buffering Capacity ของของเสียแข็งตัว ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะละลายออกมาแต่ละครั้งนี่จะเป็นตัวควบคุมพีเอชของการชะละลายโดยการสะเทินกรดอะซิติกที่ใช้ในการทดลองให้เป็นกลาง



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างจากการทดสอบการชะละลาย

2. กลไกการยึดจับโลหะหนัก

จากกราฟรูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลาย (แคลเซียม โครเมียมและตะกั่ว) กับค่าความเป็นด่างและซิลิกอนซึ่งจะถูกชะละลายมากขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลงต่ำกว่า 6 จากการทดลองที่ผ่านมาหลาย ๆ ครั้งทำให้ทราบว่าโลหะหนักอาจจะอยู่ในโครงสร้างของของเสี้ยวแข็งตัวในรูปแบบต่างๆ เช่นอยู่ในรูพรุนของโครงสร้างภายในของเสี้ยวแข็งตัวถูกเกาะติดบนผนังรูพรุนและทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมจะถูกชะละลายออกมาได้มากกว่าโครเมียมและตะกั่วซึ่งถูกชะละลายออกมาได้น้อย

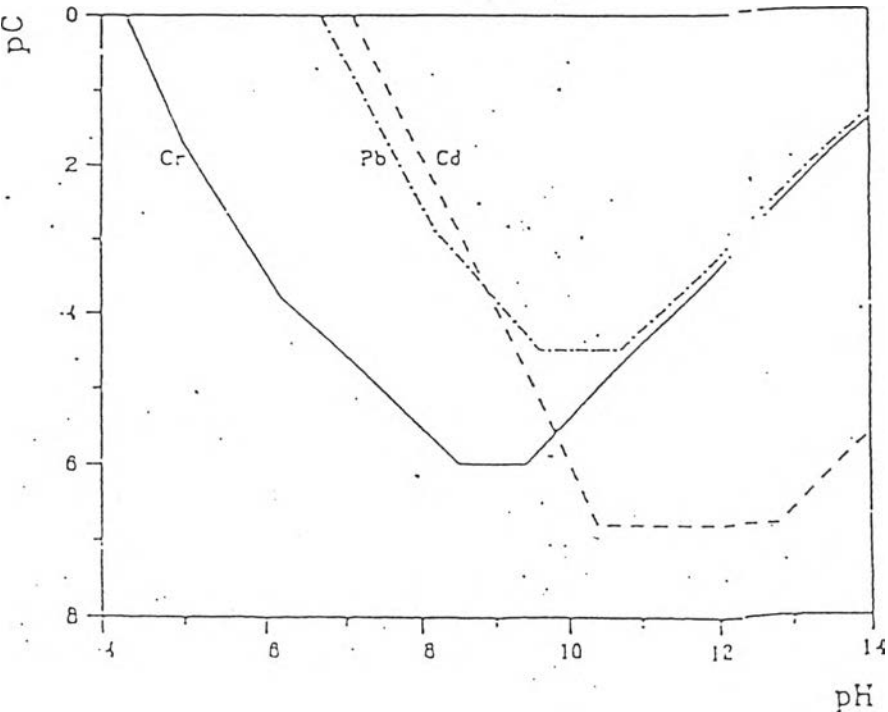


รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายกับค่าความเป็นด่างและซิลิกอนจากการทดสอบการชะละลาย

กรณีที่โลหะหนักถูกปล่อยอยู่ในของแข็งหรืออยู่ในรูปพรุน หรือเกาะติดผิวรูปพรุนแล้ว โลหะหนักเหล่านี้ควรจะถูกระบายออกมาคล้ายกับการชะละลายค่าความเป็นด่าง จากรูปที่ 3.2 เส้นกราฟของแคดเมียมสะสมที่ถูกชะละลายออกมาจะคล้ายคลึงกับเส้นกราฟของค่าความเป็นด่างสะสมที่ถูกชะละลายออกจึงสันนิษฐานได้ว่า แคดเมียมจะอยู่ในของแข็งที่แข็งตัวในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์โดยอยู่ตามรูปพรุนและเกาะติดอยู่ตามผนังของรูปพรุน

สำหรับโครเมียมและตะกั่วนั้นเมื่อพิจารณาดูเส้นกราฟแล้วจะมีรูปแบบของการถูกระบายคล้ายคลึงกับซิลิกอนซึ่งเป็นสารที่อยู่ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์และทราย ดังนั้นเชื่อว่าโครเมียมและตะกั่วจะถูกยึดติดอยู่ในโครงสร้างของซิลิกอนมากกว่าเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูปพรุน การชะละลายของโครเมียมและตะกั่วค่อนข้างยากจะเกิดขึ้นเฉพาะที่พีเอชต่ำๆและต่ำกว่าพีเอชในการชะละลายแคดเมียม อัตราการชะละลายของโลหะทั้งสองนี้มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับอัตราการชะละลายที่คาดคะเนจากการชะละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งแสดงว่าโลหะทั้งสองชนิดนี้จะเกาะติดอย่างแข็งแรงภายในโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกาและจะถูกชะละลายออกเมื่อโครงสร้างของซิลิกาถูกทำลาย

รูปที่ 3.3 แสดง pC-pH diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม โครเมียม และตะกั่วในสารละลายที่มีค่า ionic strength 0.75 M พบว่าในขณะที่เริ่มผสมปูนซีเมนต์ และส่วนผสมอื่นๆ ค่าพีเอชจะมีค่าสูงประมาณ 12-13 ซึ่งทำให้แคลเซียมส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำและอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นของแข็งอยู่ในรูพรุนของซีเมนต์ ส่วนโครเมียม และตะกั่วจะละลายน้ำได้และมีส่วนในปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์และเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาเกิดจากสาเหตุดังกล่าวสรุปได้ว่าแคลเซียมจะถูกชะละลายออกมาเช่นเดียวกับค่าความเป็นด่าง ส่วนโครเมียมและตะกั่วจะถูกชะละลายออกมาโดยขึ้นอยู่กับค่าการละลายของซิลิกาเกิดภายหลังการทดลอง Leaching Test ได้วิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งของสารทั้งหมดพบว่าหลังจากการชะละลาย 15 ครั้ง ปริมาณสารที่ถูกชะละลายออกไปประมาณ 50-70 % ของปริมาณทั้งหมดก่อนการทดลองแต่แล้วยังมีโลหะหนักเหลืออยู่ โดยมีแคลเซียม โครเมียมและตะกั่วเหลืออยู่ 50, 85 และ 75 % ตามลำดับและมีโลหะที่เป็นสารประกอบโดยปกติในซีเมนต์ ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็กและซิลิกอนเหลืออยู่ 90, 98, 80% ตามลำดับและ คัลเซียมเหลืออยู่ 8 % ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์ที่แข็งตัวสามารถยึดจับโลหะหนักออกจากซีเมนต์ที่แข็งตัวดังกล่าว



รูปที่ 3.3 กราฟแสดง pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม โครเมียมและ ตะกั่ว

Poon (1985) ได้ทำการวิจัยเรื่องกลไกการยึดจับของสังกะสีและปรอททำการทดลองโดยการทดสอบการชะละลาย, การส่องด้วย Scanning Electron Microscopy(SEM), การวิเคราะห์ด้วย X-ray Diffraction (XRD) และการทดสอบหาความพรุน สารผสมเพิ่มที่ใช้คือโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 40%หลังจากนั้นจะบ่มเป็นเวลา 28 วันที่ความชื้นสูง ต่อมานำไปบดให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วเติมกรดอะซิติกผสม โดยใช้เครื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเพื่อทดสอบการชะละลายของโลหะทั้งสองชนิด นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

กลไกการยึดจับของสังกะสีในโครงสร้างซีเมนต์เป็นแบบ Chemical Stabilization การทดสอบการชะละลาย พบว่าความเข้มข้นของสังกะสีที่ออกมาในน้ำชะละลายมีอยู่น้อยตลอดการทดลอง จากการวิเคราะห์ด้วย SEM และ XRD พบว่าไม่มีผลึกของ Zine Silicate (เกิดปฏิกิริยาระหว่าง Zn^{2+} และ SiO_3^{2-}) และ Calcium Zincate (เกิดปฏิกิริยาระหว่าง Zn^{2+} และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$) การที่ผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์หายไปก่อนนำไปทดสอบการชะละลายแสดงว่า $\text{Ca}(\text{OH})_2$ อาจมีบทบาทสำคัญในการยึดจับสังกะสีในโครงสร้างซีเมนต์ ในการทดสอบความพรุนพบว่าความพรุนและการซึมน้ำไม่มีผลต่อการยึดจับของสังกะสี

กลไกการยึดจับของปรอทในโครงสร้างซีเมนต์เป็นแบบ Physical entrapment การทดสอบการชะละลายของปรอทพบว่าปรอทจะมีมากในน้ำชะละลายตลอดการทดลอง และจากการทดสอบความพรุนพบว่ามีความพรุนใกล้เคียงกับซีเมนต์ที่มีโซเดียมซิลิเกตซึ่งแสดงว่าความพรุนและความซึมน้ำมีผลต่อการยึดจับปรอท นอกจากนี้ผลการทดสอบ SEM และ XRD พบว่าปรอทไม่ได้ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์หรือโซเดียมซิลิเกตเลยแสดงว่าผลึกของปรอทติดอยู่หลวมๆ ในโครงสร้างซีเมนต์เมื่อทำการชะละลายปรอทจึงออกมาได้มาก การลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะทำให้ลดความพรุนและการซึมน้ำ การลดการชะละลายทำได้โดยการเติมสารผสมเพิ่มบางชนิด เช่น เถ้าลอยหรือซิลิกาฟูมไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิด Amorphous Calcium-Silicate-Hydrate เพื่อไปเติมช่องว่างที่เกิดขึ้นซึ่งอาจทำให้สามารถลดปริมาณไอออนโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาได้

ตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

ShinและSujiwatthana (1988) ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการชะละลายและกำลังรับแรงอัดของการทำให้ของเสียให้เป็นก้อน ของเสียเสีียงอันตรายประกอบไปด้วย แคลเซียมและตะกั่ว สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

ตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการถูกชะละลายและความสามารถในการรับแรงอัด ได้แก่

1. ปริมาณเริ่มต้นของของเสียเสีียงอันตราย
2. อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์
3. พีเอชของสารละลายที่ใช้ในการสกัด
4. อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร
5. ระยะเวลาในการบ่มซีเมนต์

1. ปริมาณเริ่มต้นของของเสียเสีียงอันตราย

เมื่อลดปริมาณเริ่มต้นของของเสียเสีียงอันตรายทำให้ความสามารถในการถูกชะละลายลดลงและความสามารถในการรับแรงอัดของซีเมนต์เพิ่มขึ้น

2. อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์

จากการทดสอบการชะละลายพบว่าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 จะมีค่าการชะละลายต่ำที่สุด ถ้าหากมีการเติมน้ำมากขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดผลึกได้ดีขึ้นแต่ถ้าเติมน้ำมากเกินไปจะทำให้เกิด capillary pores ซึ่งจะทำให้เพิ่มโอกาสการรั่วไหลของของเสียได้มากขึ้น จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดการที่มีปริมาณน้ำที่ไม่เหมาะสม จะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและมีความพรุนที่ไม่เหมาะสมทำให้ลดความสามารถในการรับแรงอัดได้ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมคือ 0.5 ซึ่งจะทำให้มีค่าความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด

3. พีเอชของสารละลายที่ใช้ในการสกัด

ถ้าใช้สารสกัดที่มีค่าพีเอชต่ำมากขึ้นเท่าไรจะทำให้มีค่าความสามารถในการถูกชะละลายสูงมากขึ้นด้วย

4. อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร

จากการทดสอบการชะละลายพบว่า ถ้ามีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก จะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีโอกาสถูกชะละลายมากขึ้นซึ่งจะทำให้ความสามารถในการถูกชะละลายสูงมากขึ้นด้วย

5. ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มซีเมนต์

จากการทดสอบการชะละลายพบว่าความสามารถในการถูกชะละลายนั้นไม่ขึ้นอยู่กับเกิดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ระยะเวลาบ่มซีเมนต์จึงไม่มีผลต่อการถูกชะละลายของของเสีย แต่จะเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดให้เพิ่มขึ้นได้

ความสามารถในการถูกชะละลาย (Leachability)

ความสามารถในการถูกชะละลาย หมายถึง อัตราส่วนของความเข้มข้นของสารที่ถูกชะละลายออกไปหลังจากผ่านการสกัดต่อความเข้มข้นของสารที่มีอยู่ตอนเริ่มต้นตั้งสมการ

$$L = W_i/W_o$$

เมื่อ L = ความสามารถในการถูกชะละลาย

W_i = ความเข้มข้นของสารที่ถูกชะละลายออกไป

W_o = ความเข้มข้นของสารที่มีอยู่ในตอนเริ่มต้น

การตกตะกอนด้วยสารประกอบซิลไฟด์

การตกตะกอนด้วยสารประกอบซิลไฟด์เป็นกระบวนการในการบำบัดน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะหนักที่เป็นพิษในปริมาณมากอย่างได้ผลควรมีการเติมสารละลายต่างตัวอื่นลงไปด้วยเพื่อปรับพีเอชของน้ำเสียให้ถึงจุดที่โลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียมีความสามารถในการละลายน้อยที่สุด ข้อดีของการตกตะกอนซิลไฟด์

- สามารถกำจัดโลหะหนักได้มากในช่วงพีเอชที่กว้างดังแสดงในรูปที่ 3.4
- การตกตะกอนโลหะหนักบางชนิด เช่น พรอทัมปีประสิทธิภาพดีแม้อยู่ในช่วงพีเอชที่เป็นกรด
- ใช้เวลาในการสัมผัสน้อยเพราะซัลไฟด์เป็นสารที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูง

นอกจากนี้การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์ได้ผลดีมากกว่าการตกตะกอนด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์เนื่องจากความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของซัลไฟด์กับไอออนของโลหะหนักเกิดขึ้นได้ดีกว่าของไฮดรอกไซด์, ความสามารถในการละลายน้ำต่ำของตะกอนซัลไฟด์ต่ำกว่าตะกอนไฮดรอกไซด์, การที่ตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักมักจะมีลักษณะเป็น amphoteric โดยธรรมชาติ การที่ความสามารถในการละลายต่ำที่สุดของโลหะหนักไฮดรอกไซด์ต่างๆ กันจะเกิดขึ้นที่พีเอชแตกต่างกันทำให้ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักที่ผสมกับหลายชนิดให้ได้มากที่สุดที่ค่าพีเอชค่าใดค่าหนึ่ง

การทดสอบการชะละลาย (Leaching Test)

U.S.EPA. (1980) ได้กำหนดวิธี Toxicant Extraction Procedure (TEP) เป็นวิธีที่ใช้บังคับต่อมาได้มีการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการเป็นวิธี Extraction Procedure (EP) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ดังมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.8

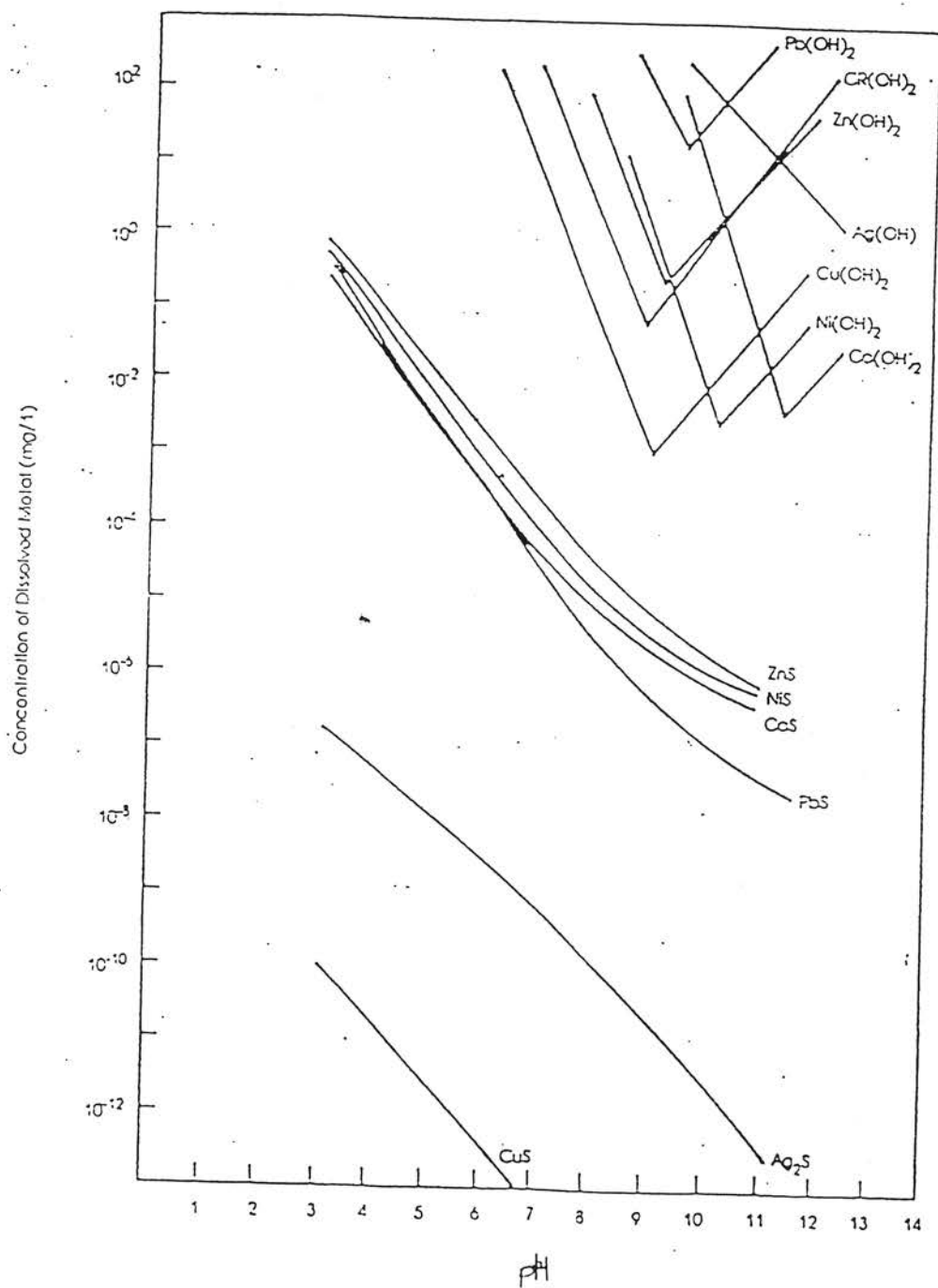
กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2531) ได้กำหนดวิธีการทดสอบการชะละลายของของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดมาแล้วโดยใช้วิธีการสกัดสารดังมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. บดตัวอย่างของเสียให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดของของเสียอยู่ระหว่าง 0.5 -5.0 มิลลิเมตร

2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1 หนัก 50 กรัม ใส่ในตัวทำละลายซึ่งประกอบไปด้วยน้ำกลั่นผสมกับกรดไฮโดรคลอริกจนมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 5.8-6.3 ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายเป็น 10 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่างของเสีย

3. เขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 6 ชั่วโมงโดยใช้เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบ/นาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 5 เซนติเมตร

4. กรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรองใยแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 1 ไมครอน



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสามารถในการละลายของโลหะหนักไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์
ที่มา US.EPA.,1981

5. นำของเหลวที่ได้ ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่างๆ ตามวิธีมาตรฐานที่ใช้
ในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง

ตารางที่ 3.8 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะละลาย(Extraction Test Procedures)

การทดสอบการชะละลาย	Standard Leach Test	Toxicant Extraction Procedure (US EPA)	ASTM Method A	Extraction Procedure
1. ปริมาณตัวอย่างสาร	28.6g ของตัวอย่างสาร(ส่วนที่เป็นของแข็ง)	ไม่ระบุน้ำหนักต่ำสุด	350 g	น้ำหนักอย่างน้อย 100 กรัม (0.5%ของแข็ง)
2. การเตรียมตัวอย่างสาร	แยกของเหลวใช้ 0.45µm pressure filtration	แยกของเหลวโดยวิธี centrifugation หรือ filtration		บดจนมีขนาด 9.5 มม
3. อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง	10:1 ถึง 7:1	10:1 (เริ่มต้น 8:1)	4:1	20:1 (เริ่มต้น 16:1)
4. สารที่ใช้ทดสอบการชะละลาย	buffered acetic acid หรือน้ำกลั่น	acetic acid หรือ sodium hydroxide	ASTM Type IV water	0.5 N acetic acid 4 ml/gของตัวอย่างสาร
5. การควบคุมพีเอช		4.9-5.2	ไม่กำหนด	4.8-5.2
6. ภาชนะที่ใช้ในการทดสอบ	ภาชนะปิด	ไม่กำหนด	ขวดปากกว้าง (เปิดฝา)	เครื่องมือหรือเครื่องมือที่เทียบเท่า
7. วิธีการผสมและระยะเวลาในการทดสอบ	rotation shaker 24 ชั่วโมง	mechanical stirring 24 ชั่วโมง	reciprocation shaker 48 ชม.	เครื่องกวนต่อเนื่อง 24 ชม.
8. การแยกของเหลวและของแข็ง	กรองผ่านกรองใยแก้วขนาด 0.45 ไมโครเมตร	centrifugationหรือกรองผ่านกรองใยแก้วขนาด 0.45 ไมโครเมตร	กรองผ่านกรอง 0.45 ไมโครเมตร โดยใช้เครื่องกรองแบบความดันหรือสุญญากาศ	กรองผ่านกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร

ที่มา Perket และ Webster , 1981

เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

Sollars และ Perry(1989) ได้กล่าวถึงการประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อนซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ของการบำบัดได้แก่ ปัจจัยต่างๆเช่นการปรับปรุงให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมั่นคง การลดพื้นที่ผิวและการจำกัดการละลายของสารที่เป็นอันตรายเมื่อสัมผัสกับการชะละลาย ในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นในประเทศอังกฤษยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานอย่างเป็นทางการสำหรับคุณภาพของของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยวิธีข้างต้นแต่ได้มีหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดของเสียโดยการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด ความชื้นได้ของน้ำและความสามารถในการถูกชะละลายของโลหะหนัก บริษัทEngineering Science บริษัท Thai DCI และบริษัท Systems Engineering (1989)ได้ดำเนินการศึกษาและจัดทำแผนการจัดการของเสียอันตรายของประเทศไทยได้กล่าวถึงการทดสอบการชะละลายและเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน โดยแบ่งการทดสอบได้ 2 วิธี

1.การทดสอบโดยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเช่น โลหะหนักและสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ เป็นต้นโดยกำหนดค่า Threshold Value สำหรับสารเคมีต่างๆที่ถูกชะละลายออกมาจากของเสียนั้น ถ้าค่าที่ทดสอบดังกล่าวสูงกว่าค่าThreshold Valueแสดงว่าของเสียนั้นเป็นสารที่มีอันตรายเกณฑ์ในการกำหนดค่า Threshold Value โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 100 เท่าของมาตรฐานน้ำดื่ม ถ้าสารเคมีดังกล่าวถูกชะละลายและเจือจางในธรรมชาติได้มากกว่า 100 เท่า จะก่อให้เกิดอันตรายต่อแหล่งน้ำใช้ของมนุษย์ การทดสอบการชะละลายของสารเคมีจากของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อนจะเป็นการประเมินความสามารถและประสิทธิภาพของระบบบำบัดของเสียค่าThreshold Valueสำหรับสารเคมีต่างๆ ได้กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.9

2.เป็นวิธีการทดสอบความเป็นพิษของสารที่ถูกชะละลายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ (Bioassay)โดยนำผลจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่เกิดจากการทดลองใช้ค่า Threshold Value(การทดลองนี้ใช้น้ำกลั่นเป็นสารชะละลาย) ถ้าค่าความเป็นพิษของสารชะละลายเกินค่าที่กำหนดซึ่งได้เลือกไว้สำหรับการเจือจางในสิ่งแวดล้อมแล้วของเสียนั้นจะเป็นของเสียอันตรายโดยกำหนดค่า 24-hour LC 50 เมื่อน้ำสกัดมีการเจือจางน้อยกว่า 20 %

ตารางที่ 3.9 ค่า Threshold Value สำหรับสารเคมีต่างๆ

สารมีพิษ	Threshold Value (mg/l)	สารมีพิษ	Threshold Value (mg/l)
Arsenic	5.0	Aldrin	0.02
Barium	100.0	Lindane	0.40
Cadmium	1.0	Methoxychlor	10.00
Chromium	5.0	Toxaphene	0.50
Mercury	0.2	2,4-D	10.00
Selenium	1.0	2,4,5-TP Silvex	1.00
Silver	5.0		

U.S.EPA.(1992) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับของเสียที่สามารถนำไปทิ้งโดยการฝังกลบหรือของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วโดยการทดสอบของเสียดังกล่าวด้วยวิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด(extract solution) มาตรฐานของU.S.EPAได้กำหนดความเข้มข้นของโลหะหนักซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของสารที่เป็นพิษตามประเภทของของเสีย มีรายละเอียดดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 มาตรฐานความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดสำหรับของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดแล้ว

Waste Code	Regulated Hazardous Constituent	Concentration (mg/l)
DO04	Arsenic	5.0
DO05	Barium	100
DO06	Cadmium	1.0
DO07	Chromium	5.0
DO08	Lead	5.0
DO09(Low Mercury Subcategory less than 260 mg/kg Mercury)	Mercury	0.2
DO10	Selenium	5.7
DO11	Silver	5.0

ที่มา US.EPA.,1992

กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2531) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับลักษณะและสมบัติของของเสียหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วท้ายประกาศกระทรวงฯ ฉบับที่ 25 โดยกำหนดสมบัติของสารมีพิษซึ่งเมื่อนำมาทำการสกัดด้วยวิธีสกัดสารและวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าหนึ่งค่าต่อไปนี้

สารมีพิษ	ความเข้มข้น (mg/l)
Arsenic	>5
Cadmium	>1
Chromium	>5
Lead	>5
Mercury	>0.2

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม(พ.ศ. 2531)ได้ออกประกาศกรมโรงงานฯ ฉบับที่ 1 เรื่องกำหนดวิธีการเก็บ การทำลายฤทธิ์ การกำจัด การฝัง การทิ้ง การเคลื่อนย้ายและการขนส่งของเสียหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วสรุปมาตรฐานที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

- 1.วิธีการทำลายของเสียหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วก่อนนำไปทิ้งหรือนำไปฝัง (ตารางที่ 3.11)
- 2.ของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้
 - น้ำซึมผ่านได้ในอัตราที่ต่ำกว่า 1×10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที
 - สามารถรับแรงอัดได้ไม่น้อยกว่า 14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
 - มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
 - มีลักษณะแข็งคล้ายหิน ไม่ไหม้ไฟ ไม่มีกลิ่น

ตารางที่ 3.11 วิธีการทำลายฤทธิ์ของสิ่งปฏิภูลประเภทต่าง ๆ

ประเภทของสิ่งปฏิภูล	วิธีการทำลายฤทธิ์
1.กากตะกอนที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากตะกอนมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นเมอร์คิวริกซัลไฟด์ (HgS) แล้วจึงทำให้เป็นก้อนโดยผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเดิมผสมเพิ่มผสมลงไปด้วย
2.กากจากการผลิตหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากที่ต้องผ่านการบดให้มีขนาดเล็กลงก่อนเพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้อย่างทั่วถึงแล้วนำมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเมอร์คิวริกซัลไฟด์ (HgS) แล้วจึงทำให้เป็นก้อนโดยผสมกับปูนซีเมนต์ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเดิมผสมเพิ่มผสมลงไปด้วย
3.กากตะกอนหรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว แมงกานีส เป็นต้น	ใช้สารละลายต่าง เช่น ปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมกับกากตะกอนให้ทั่วกันจนโลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบของเกลือไฮดรอกไซด์ที่มีค่าพีเอชของของผสมประมาณ 11 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ในกรณีที่เป็นกากตะกอน หรือฝุ่นที่เปื้อนด้วยแคดเมียมจะต้องทำให้เป็นก้อนต่อด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์
4.กากตะกอนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มียาฆ่าแมลง ยากำจัดศัตรูพืชหรือยากำจัดเชื้อราปนเปื้อน	เติมสารละลายต่างเช่น ปูนขาว โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณที่สามารถจะทำลายพิษของตัวยาแต่ละชนิดได้หมด

ที่มา กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม , 2531

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

จากการรวบรวมผลงานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดของเสียโดยการทำเป็นก้อน/การทำให้คงตัวด้วยซีเมนต์และวัสดุอื่นๆ สรุปผลงานวิจัยในช่วงปี 1985-1996 ได้ดังนี้

Poon et.al.(1985)ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับกลไกการยึดจับโลหะ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วยโลหะสองชนิดคือสังกะสีและปรอท ทำการทดลองโดยการทดสอบการชะละลาย Scanning Electron Microscopy(SEM) , Energy Dispersive Analysis of X-ray EDAX) เพื่อศึกษาโครงสร้างภายในของซีเมนต์และความเข้มข้นของแคลเซียมและซิลิกาในแต่ละช่วงเวลาทำการชะละลาย สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ความเข้มข้นของปรอทและสังกะสีที่ถูกชะละลายออกมาในตอนเริ่มต้นแตกต่างกันมากกรดอะซิติกที่มีความเข้มข้นเท่ากันจะมีจุด breakthrough เดียวกันที่ทำให้สังกะสีและปรอทถูกชะละลายออกมามากในทันทีซึ่งจุดนี้จะเกิดขึ้นที่จำนวนครั้งที่ใช้ชะละลายเดียวกัน และเกิดขึ้นที่ค่าพีเอชประมาณ 7 ในรูป 3.5-3.7ความเข้มข้นของแคลเซียมสะสมที่ถูกชะละลายออกมาจนถึงจุด breakthrough ประมาณ 55 % ของความเข้มข้นก่อนการชะละลาย ดังตาราง

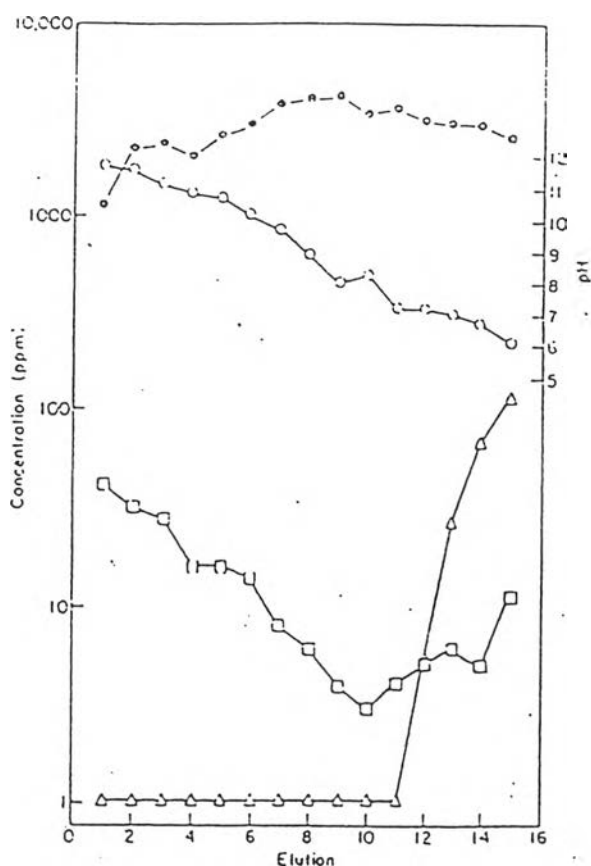
Calcium monitoring data

Cumulative weight of Ca released before breakthrough(g)

0.15 M buffered HAC (g)	3.67
0.30 M "-----"	3.68
0.50 m "-----"	3.17
Average (g)	3.51
Calcium (g) in 40 g raw sample	6.40
Percentage of total	55

2. จากการทดสอบการชะละลายเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบภายในโครงสร้างซีเมนต์ตามลำดับเวลาได้ผลดังนี้

-ก่อนการชะละลายจะพบโครงสร้างของ แคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮดรต (C-S-H), คัลเซียมอลูมิเนตไฮดรตในรูป Ettringite(Aft)และmonosulphate(Afm), unhydrated cement grain คัลเซียมไฮดรอกไซด์ (C-H)และแคลเซียมซิลิเกตเจล(จากปฏิกิริยาระหว่าง Ca^{2+} จากซีเมนต์และ SiO_3^{2-} จากโซเดียมซิลิเกต) เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย EDAX พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมมากกว่าความเข้มข้นของซิลิกอน

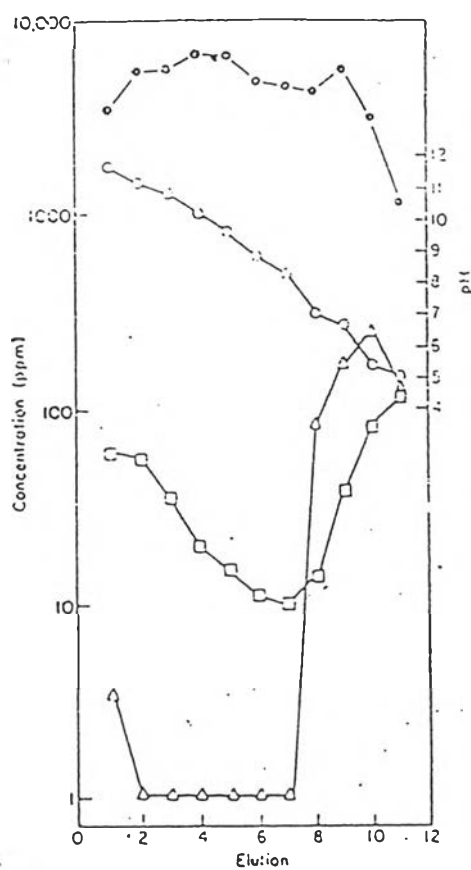


รูปที่ 3.5 แสดงผลของการทดสอบการชะละลายของ 0.15M ของ buffered HAC leachate

○ = pH; ● = Calcium ; □ = Mercury ; △ = Zinc

- เมื่อการชะละลายผ่านไป 3 วันมี Aft และ Afm เห็นได้อย่างชัดเจนแต่โครงสร้างของ C-S-H จะมีรูปร่างเปลี่ยนไปจากผลการวิเคราะห์ EDAX พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมมากกว่าความเข้มข้นของซิลิกอน

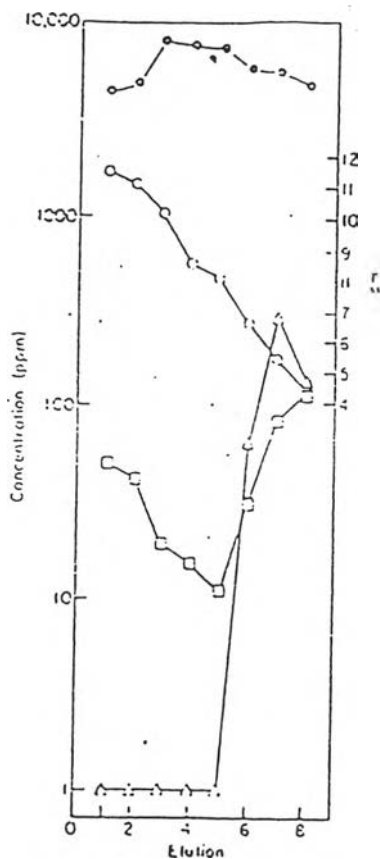
- เมื่อการชะละลายผ่านไป 4 วัน พบว่าไม่มีผลึก Aft และผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ถูก hydrolysed ออกไปหมดเหลือเพียงผลึกที่มีผิวราบเรียบและมีลักษณะเป็น semi gel ของโครงสร้างของก้อนของแข็งที่มีความเข้มข้นของซิลิกอนอยู่มาก



รูปที่ 3.6 แสดงผลของการทดสอบการชะละลายของ 0.3 M ของ buffered HAC leachate

○ = pH ; ● = Calcium ; ◻ = Mercury ; △ = Zinc

-เมื่อการชะละลายผ่านไป 5 วัน พบว่า Cement grainหลุดออกจากมวลของ gel และโครงสร้าง amorphous จากการวิเคราะห์ EDAX พบว่าความเข้มข้นของซิลิกอนมากกว่าความเข้มข้นของแคลเซียม



รูปที่ 3.7 แสดงผลของการทดสอบการชะละลายของ 0.5M ของ buffered HAC leachate

O = pH ; ● = Calcium ; □ = Mercury ; Δ = Zinc

จากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีส่วนสำคัญในกลไกการยึดจับโลหะหนัก ในขณะที่ C-S-H ไม่มีผลต่อกระบวนการเพราะ C-S-H ถูกชะละลายออกมาหมดเมื่อการชะละลายผ่านไป 2 วันแต่ความเข้มข้นของการชะละลายของสังกะสีและปรอทที่ถูกชะละลายออกมาจะไม่เปลี่ยนแปลงแต่เมื่อการชะละลายผ่านไป 5 วัน พบว่าผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์หายไป ในขณะที่ความเข้มข้นของการชะละลายของสังกะสีและปรอทเพิ่มสูงขึ้นอย่างกะทันหันแต่ยังไม่มีหลักฐานที่แสดงให้เห็นโดยตรงว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อการยึดจับของโลหะหนัก

Shively et.al.(1986)ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักโดยการทำให้เป็นก้อนและทดสอบการชะละลายของโลหะหนักและกำลังรับแรงอัดโดยการทดสอบโลหะหนัก 4 ชนิด คือ อาร์เซนิก แคลเซียม โครเมียมและตะกั่ว ทดสอบการชะละลาย 15 ครั้งในโลหะหนักแต่ละชนิดและโลหะหนักหนักทั้ง 4 ชนิดผสมกัน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1.จากการทดสอบความเข้มข้นของน้ำสกัดจากของเสียทั้ง 4 ชนิดและของเสียผสมซึ่งผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ U.S. EPA ทั้งกรณีที่ใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 1.0 โดยความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าสูงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของน้ำจาก 0.5 เป็น 1.0 การละลายโลหะหนักออกจากของเสียแบ่งได้เป็น 3 ช่วงคือช่วงแรกเมื่อเริ่มการสกัดโลหะหนักแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์จะทำหน้าที่ทำลายฤทธิ์ของกรดที่ใช้สกัดให้เป็นกลาง ทำให้ค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 10 และการละลายของสารในซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ในช่วงที่สองจะมีการละลายของโลหะหนักสูงสุด ค่าพีเอชมีค่าน้อยกว่า 6 ในช่วงที่สามเมื่อทำการสกัดต่อไปการละลายของโลหะหนักจะเริ่มลดน้อยลงและการละลายจากการสกัดแต่ละครั้งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในของเสีย

2.จากการทดสอบกำลังของแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 14 วันพบว่าเมื่อใช้อาร์เซนิกและแคลเซียมมากำจัดโดยการทำให้เป็นก้อนจะทำให้กำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์ลดลง ทั้งกรณีที่ใช้ค่าอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ของเสียผสมจะลดกำลังรับแรงอัดเฉพาะค่าอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ส่วนโครเมียมและตะกั่ว นั้นจะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

Bishop (1988) ได้ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ ทดสอบการชะละลายค่าความเป็นด่างจากก้อนของเสีย 15 ครั้ง สามารถหาค่าความสามารถในการรักษาความเป็นกลาง (buffering capacity) ของของเสียดังกล่าวได้ 18.3 meq/g และจากการศึกษาการชะละลายโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด คือ แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว สรุปได้ว่าแคดเมียมจะอยู่ในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์และแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนหรือเกาะติดอยู่กับผนังของรูพรุนในซีเมนต์แข็งตัว ส่วนโครเมียมและตะกั่วมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์และเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกา

Jaggi (1988) ได้ทำการวิจัยเรื่องการทำให้คงตัวของของเสียอันตรายที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบและสารอินทรีย์เป็นพิษโดยใช้ซีเมนต์ ของเสียอันตรายที่นำมาจากโรงชุบโลหะ อุตสาหกรรมแบตเตอรี่และอุตสาหกรรมกำจัดศัตรูพืชซึ่งมีแคดเมียม ตะกั่ว และอัลตรีนปนเปื้อนอยู่ในของเสีย วัสดุประสานที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์จากแกลบ ผงซีเมนต์จากเตาที่โรงงานปูนซีเมนต์ ทดสอบคุณสมบัติของแท่งซีเมนต์แข็งตัว ได้แก่ กำลังรับแรงอัดและการชะละลายด้วยวิธี USEPA Extraction Procedure ผลการทดลองพบว่า

การชะละลายของโลหะหนักและอัลตรีนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเสียและอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น

การชะละลายจะมีค่าน้อยลงเมื่อเพิ่มพีเอชของสารสกัด

กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของของเสียลดลงและเมื่อระยะเวลาบ่มตัวของซีเมนต์นานขึ้น

สำหรับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับของเสียอินทรีย์ และของเสียอินทรีย์เท่ากับ 0.5 และ 0.35 ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อนทั้ง 3 ชนิด พบว่าปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์จากแกลบเหมาะสมสำหรับการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะและอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับของเสียที่มีแคดเมียมและผงซีเมนต์จากเตาที่โรงงานปูนซีเมนต์จะเหมาะสมสำหรับของเสียที่ได้จากยาฆ่าแมลง

ShinและSujiwatthana(1988) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียอันตรายโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์โดยใช้ของเสีย 4 ชนิดคือ แคลเซียม, ตะกั่ว, อัลตรีน คลอเดนและนำก้อนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วไปทดสอบการชะละลายและกำลังรับแรงอัดสามารถสรุปผลของการทดลองได้ดังนี้

1.ปริมาณของแคลเซียม ตะกั่ว อัลตรีนและคลอเดนที่รั่วไหลออกมาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของของเสียที่ผสมลงไปในส่วนผสมของซีเมนต์กับทราย

2.กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมาแล้วลดลงในขณะที่เพิ่มปริมาณโลหะหนักที่ผสมลงไปในส่วนผสมของซีเมนต์กับทราย

3.อัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมจะลดความสามารถในการถูกชะละลายของแคลเซียม ตะกั่ว อัลตรีนและคลอเดนเท่ากับ 0.5

4.ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 ทำให้ได้กำลังรับแรงอัดมากกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ที่ 1.0 และ 0.25

5.ถ้าในสารที่ใช้ชะละลายยังมีค่าพีเอชในตอนเริ่มต้นต่ำก็ยิ่งทำให้ความสามารถในการถูกชะละลายของของเสียนั้นเพิ่มขึ้น

6.อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีผลต่อความสามารถในการถูกชะละลายของแคลเซียม ตะกั่ว อัลตรีนและคลอเดน ถ้ายังมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวปริมาตรมากขึ้นก็ยิ่งทำให้ความสามารถในการถูกชะละลายของของเสียนั้นเพิ่มขึ้น

7.ระยะเวลาในการบ่มของเสียไม่ค่อยมีผลต่อความสามารถในการถูกชะละลายของของเสียแต่ถ้าเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจะทำให้กำลังรับแรงอัดของของเสียเพิ่มขึ้นได้

8.เทคนิคการทำของเสียให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และซิลิกาพบว่าเหมาะสมสำหรับของเสียพวกโลหะหนักมากกว่าของเสียพวกสารอินทรีย์

Cheng(1989) ได้ศึกษาและทำการวิจัยกำจัดสารอันตรายด้วยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และซีเถ้าจากแกลบ เปรียบเทียบการจัดโลหะหนักระหว่างการใช้ซีเมนต์อย่างเดียวกับซีเมนต์ผสมซีเถ้าจากแกลบ 1:1 โดยใช้โลหะหนักจากการสังเคราะห์ ได้แก่ โครเมียม ทองแดงและปรอท จากผลการวิจัยพบว่ากลไกการยึดจับโลหะหนักในซีเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญในการใช้อธิบายพฤติกรรมของการชะละลาย พันธะการยึดจับระหว่างโลหะหนักกับซีเมนต์ที่แตกต่างกันจะมีผลทำให้การชะละลายแตกต่างกัน การชะละลายของโครเมียมในซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบจะสูงกว่าในซีเมนต์อย่างเดียว ในขณะที่การชะละลายของทองแดงและปรอทในซีเมนต์อย่างเดียวสูงกว่าซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ

ทองแดงและปรอทจะถูกยึดติดในซีเมนต์ในรูปพูนหรือดูดติดกับผนังของรูพูน การชะละลายทองแดงและปรอทจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่าง จากผลการวิเคราะห์น้ำสกัด พบว่าค่าความเป็นด่างจะมีค่าสูงขึ้นตามการชะละลายของทองแดงและปรอทจากการเปรียบเทียบสารที่ใช้กำจัดโลหะหนักทั้งสองวิธีพบว่าวิธีการกำจัดโดยใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวจะเหมาะสำหรับการกำจัดโครเมียม ส่วนวิธีกำจัดโดยใช้ซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบเหมาะสำหรับกำจัดทองแดงและปรอท

McWhinney et.al.(1990) ได้ทำการศึกษาลักษณะของปรอทในโครงสร้างซีเมนต์ โดยทำการผสมสารละลายเมอร์คิวริกในเตรตลงในซีเมนต์ จากนั้นนำไปบ่มในห้องที่มีความชื้นสูงเป็นเวลา 28 วัน ทั้งนี้ตัวอย่างทุกชิ้นจะอยู่ภายใต้บรรยากาศที่มีแต่ในโตรเจนตลอดเวลาก่อนนำไปทำการวิเคราะห์ การทดสอบจะทดสอบด้วยวิธี X-ray Photoelectron Spectroscopy (XRS) Scanning Electron Microscopy(SEM)และ Energy Dispersive Spectroscopy(EDS) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สารละลายเมอร์คิวริกในเตรตที่เติมลงไปนซีเมนต์จะทำให้ได้ผลึกสีเหลืองของเมอร์คิวริกออกไซด์ จากการวิเคราะห์ด้วย SEMและEDS ในบริเวณพื้นผิวทั่วไปพบว่าผลึกของปรอทจะจับอยู่เป็นกลุ่มก้อนคล้ายเกาะซึ่งประกอบไปด้วยสารที่คล้ายปุ๋ย เมื่อทำการตรวจสอบมากขึ้นจะพบว่าในบริเวณนั้นเต็มไปด้วยแคลเซียมและยังพบว่าในบริเวณที่มีการสะสมของปรอทมากจะมีความเข้มข้นของซิลิกอนลดลง

2. การที่ปรอทอยู่ในโครงสร้างซีเมนต์ในรูปของเมอร์คิวริกออกไซด์และไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นว่าการยึดจับทางกายภาพเป็นกลไกสำคัญที่ใช้ปรอทให้อยู่ในโครงสร้างซีเมนต์

Rijal (1990) ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดกากตะกอนน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยสารซีเมนต์เพื่อกำจัดโลหะหนักในกากตะกอนน้ำเสีย ได้แก่ โครเมียมและสังกะสี สารซีเมนต์ที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบในอัตราส่วน 1:1 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 และ 0.65 ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม การชะละลายของโลหะหนักเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกากตะกอน กำลังรับแรงอัดจากการทดสอบตัวอย่างที่หล่อจากปูนซีเมนต์จะสูงกว่าตัวอย่างที่หล่อจากปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ

การชะละลายใช้วิธี US.EPA Extraction Procedure การชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างที่หลอมจากปูนซีเมนต์จะต่ำกว่าในตัวอย่างที่หลอมด้วยปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แก้วเคลบที่อัตราส่วนกากตะกอนต่อซีเมนต์น้อยกว่า 0.2 แต่เมื่ออัตราส่วนผสมมากกว่า 0.5 การชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างที่หลอมด้วยปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แก้วเคลบจะต่ำกว่าตัวอย่างที่หลอมด้วยซีเมนต์ สังกะสีจะถูกทำให้ตายตัวในปูนซีเมนต์ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แก้วเคลบ อัตราส่วนระหว่างกากตะกอนต่อตัวเชื่อมประสานที่เหมาะสมกับสารซีเมนต์ทั้งสองชนิด คือ 0.5

Roy et.al.(1991) ได้ทำการศึกษาการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ที่มีการผสมเถ้าลอย class F กากของเสียจะประกอบไปด้วยโครเมียม นิเกิล แคดเมียมและปรอทโดยมีอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนผสมกากของเสียต่อสารเชื่อมประสานเท่ากับ 1.43 ตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแล้วนำไปบ่มในห้องที่มีความชื้นสูงเป็นเวลา 28 วันเป็นอย่างต่ำแล้วนำไปทดสอบด้วยวิธี Scanning Electron Microscopy และ X-ray Diffractometry(XRD) สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1.จากการวิเคราะห์ด้วยXRDพบว่าในซีเมนต์ที่มีการผสมเถ้าลอยนั้นมีส่วนผสมที่สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

-ส่วนที่ได้จากสารเจือยในเถ้าลอย ได้แก่ Quartz' Mullite และ Magnetite

-ส่วนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ettringite และ Gypsum นอกจากนี้ยังพบ Straetlingite และแคลเซียมคาร์บอเนตอีกด้วย

2.จากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าในซีเมนต์ที่มีการผสมเถ้าลอยซึ่งมีกากตะกอนโลหะหนักด้วยมีส่วนผสมที่สามารถแยกออกได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

-ส่วนที่เป็นกากตะกอน

-ส่วนที่ได้จากสารเจือยในเถ้าลอย ได้แก่ Quartz ' Mullite และ Magnetite

-ส่วนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ซึ่งไม่เหมือนกับในซีเมนต์ที่มีเถ้าลอย ได้แก่ Ettringite, Monosulphate, Gypsum และCaicium Aluminate Hydrate แต่ไม่พบแคลเซียมไฮดรอกไซด์

นอกจากนี้จากการส่องด้วย SEM ยังพบว่า Ettringite มีมากกว่าในซีเมนต์ที่มี แก้วลอยผสมอยู่เท่านั้นซึ่งในการวิจัยนี้ได้สันนิษฐานว่าการที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์หายไป อาจเกิดจากระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของโซเดียมซิลิเกตลดลง ขณะเดียวกัน แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นได้นำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับแก้วลอย

2.2 Hydroxyl ion จากสารประกอบไฮดรอกไซด์ไปรวมตัวกับโลหะหนักเกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นมาดังนั้นค่าพีเอชจึงมีอิทธิพลมากต่อความคงตัวของก้อนของเสีย พบว่า ค่าพีเอชของตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์ผสมแก้วลอยต่ำกว่าในตัวอย่างที่ใช้ซีเมนต์อย่างเดียวซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อความสามารถในการละลายของโลหะหนักได้

Roy et.al. (1992) ทำการวิจัยเรื่องผลกระทบของโซเดียมซัลเฟตในการทำให้ สลัดจ์จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าคงตัว/ทำให้เป็นก้อนโดยใช้ซีเมนต์ ตะกอนของเสีย ประกอบด้วยนิเกิล โครเมียม แคดเมียมและปรอทเท่ากับ 86.2, 84.1, 18.8 และ 0.137 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ของเสียจะถูกทำให้เป็นก้อนโดยเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแก้วลอย class F , แก้วลอย class C และปูนขาว โดยใช้อัตราส่วนดังนี้ปูนซีเมนต์ต่อตะกอนของเสียเท่ากับ 0.3 ต่อ 1, อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อแก้วลอย class F ต่อตะกอนของเสียเท่ากับ 0.2:0.5:1, อัตราส่วนของปูนขาวต่อ แก้วลอยต่อตะกอนของเสียเท่ากับ 0.3:0.5:1 เติมปริมาณโซเดียมซัลเฟตเท่ากับ 0, 2, 5 และ 8% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน นำตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นก้อนไปวิเคราะห์ scanning electron microscopy (SEM) , energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) และ X-ray diffractometry (XRD) จากการศึกษาพบว่าจำนวน ettringite และ crystalline จะเพิ่มขึ้นเมื่อ โซเดียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น สำหรับการเติมโซเดียมซัลเฟตจำนวนเท่ากันพบว่า การเติมสลัดจ์ จะทำให้ crystalline เกิดขึ้นมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ crystalline และการเพิ่มขึ้นของโซเดียมซัลเฟต

Fuessle และ Taylor (1992) ทำการวิจัยและศึกษาการเปรียบเทียบการทำให้คงตัวของ แก้วลอยลิกไนต์และซิลิกาฟูมในระยะสั้น การทำให้คงตัวโดยการทำให้เป็นก้อนของของเสียโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับแก้วลอยลิกไนต์หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับซิลิกาฟูม อัตราส่วนของแก้วลอยลิกไนต์ต่อวัสดุประสานอยู่ในช่วง 0.2-0.4 อัตราส่วนของซิลิกาฟูมต่อตัวเชื่อมประสานอยู่ในช่วง 0-0.3 อัตราส่วนของกากของเสียต่อวัสดุซีเมนต์ 0.12 หรือ 0.2 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 1.0 ใช้เวลาบ่ม 1 และ 21 วัน ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้การชะละลายโดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching

Procedure(TCLP) การผสมปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการผสมปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยลิกไนต์

Cheeseman et al. (1993) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์โดยการทำให้เป็นก้อนซึ่งตะกอนที่นำมาทดลองได้มาจากการตกตะกอนโลหะสามแบบคือ การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 M การตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์และการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ของเสียที่นำมาทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ประกอบไปด้วย ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี ทองแดง นิกเกิล เหล็ก โครเมียมและปรอท นำตะกอนโลหะหนักที่ได้มาตกตะกอนโลหะหลังจากนั้นไปทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

อัตราการถูกชะละลายของโลหะหนักแปรผันไปตามชนิดของโลหะหนักและวิธีการทดลองการชะละลายจึงยากที่จะเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ของการบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อน นอกจากนี้ยังสามารถกล่าวได้ว่าการถูกชะละลายของโลหะหนักชนิดหนึ่ง ๆ ไม่ขึ้นอยู่กับเครื่องมือของโลหะชนิดอื่น การทำตะกอนซัลไฟด์ให้เป็นก้อนเป็นวิธีที่ทำให้อัตราการถูกชะละลายของโลหะหนัก(ยกเว้นปรอท)ออกมาต่ำที่สุดซึ่งแสดงให้เห็นว่าซัลไฟด์นี้ทำให้ของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนสามารถทนต่อกรดได้มาก ส่วนตะกอนที่มีปรอทปนอยู่จากการทดลองพบว่าการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์จะทำให้อัตราการถูกชะละลายปรอทออกมาได้ต่ำที่สุด

Leangon(1993) ได้ทำการวิจัยเพื่อหาวัสดุประสานที่ดีที่สุดสำหรับของเสียจากโรงฟอกหนังและโรงงาน semi-conductor ของเสียจากโรงงานฟอกหนังประกอบด้วยโครเมียมและสารประกอบอินทรีย์ ในขณะที่โรงงานsemi-conductor ของเสียจะประกอบไปด้วยทองแดง ตะกั่วและtin วัสดุประสานที่ใช้คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ปูนขาว, ซีเมนต์แกลบ, เถ้าลอยลิกไนต์และซิลิกาฟูม การเปรียบเทียบผลของการใช้วัสดุประสานจะใช้กำลังรับแรงอัด, การชะละลาย (วิธี Extraction Procedure Toxicity) และราคาเป็นตัวเปรียบเทียบ การทดลองแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามประเภทของของเสีย แต่ละกลุ่มมีขั้นตอนดังนี้

1.หาสัดส่วนวัสดุประสานที่เหมาะสมโดยใช้เวลาบ่ม 7 วัน อัตราส่วนของของเสียต่อวัสดุซีเมนต์คือ 0.3 สัดส่วนของวัสดุประสานแสดงในตารางที่ 3.12

2.ศึกษาหาอัตราส่วนของของเสียต่อวัสดุซีเมนต์ที่เหมาะสมโดยใช้สัดส่วนวัสดุประสานที่ได้จากข้อ 1 โดยพิจารณาจากกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันและการชะละลาย

ตารางที่ 3.12 แสดงอัตราส่วนผสมของวัสดุประสานที่ใช้ในการหาวัสดุประสานที่ดีที่สุด

No.	สัดส่วนของวัสดุประสาน						
	OPC	LM	RHA	FA	SF	SL1	SAND
1	0.9		0.1			0.3	2.0
2	0.8		0.2				
3	0.7		0.3				
4	0.6		0.4				
5	0.9			0.1			
6	0.8			0.2			
7	0.7			0.3			
8	0.7		0.2	0.1			
9	0.7		0.1	0.2			
10	0.8		0.1	0.1			
11	0.9				0.1		
12	0.85				0.15		
13	0.7	0.1	0.2				
14	0.3	0.4	0.3				
15	0.2	0.5	0.3				
16	0.1	0.7	0.2				
17	0.1	0.8	0.1				

OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

RHA = ซีเมนต์แกลบ

FA = เถ้าลอยลิกไนต์

SF = ซิลิกาฟูม

SL = ตะกอนของเสีย

LM = ปูนขาว

ที่มา Leangon , 1993

3. คำนวณค่าใช้จ่ายที่ใช้และเปรียบเทียบการใช้วัสดุประสานต่างๆ เลือกตัวประสานที่ดีที่สุดของของเสียสำหรับของเสียทั้ง 2 ชนิด

จากผลการทดลองพบว่าสัดส่วนวัสดุประสานและสัดส่วนของของเสียต่อวัสดุซีเมนต์ที่ดีที่สุดดังนี้

1. สำหรับของเสียจากโรงฟอกหนัง ซีเมนต์:ซีเถ้าแกลบ:เถ้าลอย:ลิกันต์เท่ากับ 0.7:0.2:0.1 และสัดส่วนของของเสียต่อวัสดุซีเมนต์เท่ากับ 0.64

2. สำหรับของเสียจากโรงงาน semi-conductor ซีเมนต์:ซีเถ้าแกลบ:เถ้าลอย:ลิกันต์เท่ากับ 0.7:0.1:0.2 และสัดส่วนของของเสียต่อวัสดุซีเมนต์เท่ากับ 1.37

Yang et.al.(1993) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการทำภาคตะกอนปรอทให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ ปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัดโดยการเติมสารโพลีเมอร์ลาเทกซ์ลงในส่วนผสม ทำการทดสอบโดยใช้ scanning electron microscopy(SEM), Freezing Test, Wetting และ Drying Test, กำลังรับแรงอัด, การชะละลายโดย TCLP จากผลการทดลองพบว่าสารโพลีเมอร์ลาเทกซ์มากกว่า 3% จะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของก้อนของเสีย การเติมโพลีเมอร์ลาเทกซ์ลงไปจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากเหตุผลสองข้อคือ

1.ทางเคมี

เกิดพันธะไฮดรอกซิล ระหว่างกลุ่มคาร์บอกซิลิกของโพลีเมอร์ลาเทกซ์และเกลืออินทรีย์ของวัสดุประสาน

2.ทางกายภาพ

โพลีเมอร์ลาเทกซ์จะทำให้เกิดเส้นใยในโครงสร้างรูพรุนของตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นก้อน จากการทดสอบ Freezing และ Thawing Test ก้อนของเสียที่ไม่เติมสารโพลีเมอร์ลาเทกซ์จะเกิดการแตกร้าวส่วนก้อนที่เติมสารโพลีเมอร์ลาเทกซ์จะไม่เกิดการแตกร้าวผลดีจากการเติมสารข้างต้นดังกล่าวยังช่วยลดความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด จากการทดสอบด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure พบว่าปริมาณโลหะหนักลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติมและไม่เติมโพลีเมอร์ลาเทกซ์ทั้งนี้จากการทดสอบด้วยวิธี Scanning Electron Microscopy(SEM) พบว่าผลของการเติมโพลีเมอร์ลาเทกซ์จะทำให้เกิดโครงสร้างเชื่อมโยงกันเป็นตาข่ายในเนื้อของของเสียแข็งตัวซึ่งจะช่วยยึดจับโลหะหนักไม่ให้ถูกชะละลายออกมา

Fuessle และ Taylor (1994) ได้ทำการศึกษาการทำลายฤทธิ์ของฝุ่นจากเตาหลอมที่ใช้ไฟฟ้าอาร์ตโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และส่วนผสมอื่น ได้แก่ แก้วลอย และซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนผสมกากของเสียต่อวัสดุซีเมนต์ 0.12 และ 0.20 โดยใช้ระยะเวลาบ่ม 60 วัน และ 335 วันจากผลการทดสอบการชะละลายโดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure พบว่าที่เวลาบ่ม 60 วัน การใช้แก้วลอยเป็นส่วนผสมของวัสดุประสาน จะช่วยให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มเป็นส่วนผสม ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายได้แก่ แคดเมียม โครเมียม ตะกั่วและนิกเกิลอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับที่ระยะเวลาบ่ม 335 วัน ซิลิกาฟุ่มทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการใช้แก้วลอย โดยเฉพาะ แคดเมียม ตะกั่วและนิกเกิล

Chawakitchareon and Kiniman (1996) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักที่ได้จากน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอไซด์ด้วยการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมแก้วลอยลิกไนต์ ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของแก้วลอยลิกไนต์ อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสาน ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่ใช้ในการสกัดโลหะหนักและระยะเวลาบ่มตัวของก้อนซีเมนต์ ตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการวิจัยเตรียมจากน้ำเสียซีโอไซด์โดยการตกตะกอนผลึกด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตะกอนโลหะหนักประกอบด้วยปรอท โครเมียมและเหล็กมีค่า 4.31, 4.15, และ 5 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การเพิ่มอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักลงในวัสดุประสานจะมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยการชะละลายของปรอท, โครเมียมและเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณตะกอนโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมเท่ากับ 0.25

2. การเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแก้วลอยลิกไนต์ระหว่าง 0-75 ลงในวัสดุประสานจะมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของตัวอย่างลดลง การชะละลายของปรอทสูงขึ้น ในขณะที่การชะละลายของโครเมียมลดลงและพบว่าที่อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 และในวัสดุประสานไม่มีแก้วลอยลิกไนต์เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท แต่สัดส่วนการผสมที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมนั้นใช้อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานค่าเดียวกับของปรอทแต่มีแก้วลอยผสมอยู่ด้วย 50 %

3. อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทำลายฤทธิ์

4. ระยะเวลาการบ่มมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าความชื้นได้ของน้ำมีค่าลดลง การชะละลายของปรอทและโครเมียมมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการบ่มและมีค่าค่อนข้างคงที่ภายในระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

5. ตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานที่มีแก้วลอยลิกไนต์ผสมอยู่ 0 และ 50 % ในระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีคุณสมบัติทางกายภาพเป็นไปตามมาตรฐานของสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน สำหรับคุณสมบัติด้านการชะละลายของโลหะหนักพบว่าปรอทมีค่าสูงซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสารพิษ แต่โครเมียมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน

6. ประสิทธิภาพการทำลายฤทธิ์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันของวัสดุประสานที่มีแก้วลอยอยู่ 0 % มีค่าเท่ากับ 26.4% สำหรับปรอทมีประสิทธิภาพต่ำมากสำหรับโครเมียมและมีค่าเท่ากับ 80% สำหรับเหล็กส่วนวัสดุประสานที่มีแก้วลอยอยู่ 50% มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ปรอทเท่ากับ 30.70% ของโครเมียมเท่ากับ 50% และของเหล็กเท่ากับ 90 %

7. ค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อนสำหรับวัสดุประสานที่มีแก้วลอยอยู่ 0 % มีค่าเท่ากับ 6800บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนักและสำหรับวัสดุประสานที่มีแก้วลอยอยู่ 50 % มีค่าเท่ากับ 3800บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนัก ดังนั้นวัสดุประสานที่มีแก้วลอยอยู่ 50% จึงมีความเหมาะสมในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักมากกว่าวัสดุประสานที่มีแก้วลอย 0 %

อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย(1996) ได้ทำการศึกษาการทำตะกอนโลหะซัลไฟด์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และแก้วลอยลิกไนต์เป็นตัวประสานซึ่งมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อัตราส่วนผสมของโซเดียมซัลไฟด์เพื่อให้ได้ตะกอนที่เหมาะสม อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานและการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาบ่มโดยจะทดสอบโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ โครเมียม ปรอทและเหล็ก การวิจัยนี้จะนำตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอติ(ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์) มาหาสัดส่วนการผสมโซเดียมซัลไฟด์เพื่อให้ได้ตะกอนโลหะซัลไฟด์ที่เหมาะสม จากนั้นนำไปทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแก้วลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตะกอนโลหะซัลไฟด์ประกอบด้วยโครเมียม

ปรอทและเหล็กมีค่าเท่ากับ 3.91, 9.93 และ 4.59 มิลลิกรัมต่อกรัมของตะกอนตามลำดับ การวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลองได้แก่

การทดลองที่ 1 เป็นการหาปริมาณการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์ซึ่งมีการแปรค่าการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์ตั้งแต่ 0 ถึง 4.5 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีของความเข้มข้นของโครเมียม ปรอทและเหล็กที่มีอยู่ในตะกอน

การทดลองที่ 2 เป็นการหาอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานซึ่งมีการแปรค่าตั้งแต่ 0, 0.25, 0.35, 0.5, 0.6, 0.7

การทดลองที่ 3 เป็นการแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน

การทดลองที่ 4 เป็นการนำสัดส่วนที่เหมาะสมในการทดลองที่หนึ่งและสองมาใช้กับตะกอนโลหะหนักที่ได้จากศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ

ผลการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การเพิ่มสัดส่วนการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์ลงไปในตะกอนโลหะหนักก่อนการทำให้เป็นก้อนทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงและการถูกชะละลายของโครเมียม ปรอทและเหล็กมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน สัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีซึ่งทำให้ค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้สัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 3.00 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีจะทำให้ค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดต่ำมาก

2. อัตราส่วนของกากของเสียต่อวัสดุซีเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.25

3. ระยะเวลาบ่มในการบ่มตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างกล่าวคือทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นและค่าความสามารถในการซึมได้ของน้ำลดลง รวมทั้งความเข้มข้นของโครเมียมและปรอทในน้ำสกัดลดลงเช่นเดียวกัน

4. สัดส่วนการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์และอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานที่ใช้กับตะกอนน้ำเสียซีโอติสามารถนำไปใช้กับตะกอนที่ได้จากโรงงานเคลือบแก้วและตะกอนโลหะหนักจากโรงงานกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำได้โดยตะกอนโลหะ

หนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแล้วผ่านเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิภูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน และมาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

5. ประสิทธิภาพในการทำให้เป็นก้อนของตะกอนโลหะหนักที่อัตราส่วนผสมของ ตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานเท่ากับ 0.25 ซึ่งสำหรับสัดส่วนการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์ เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีเท่ากับ 60.01 และ 91.40 % สำหรับโครเมียมและปรอทตามลำดับ และสำหรับสัดส่วนการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 3.00 เท่าของ ปริมาณทางทฤษฎีเท่ากับ 94.00 และ 99.49 % สำหรับโครเมียมและปรอทตามลำดับ ทั้งนี้ ค่าความเข้มข้นของโครเมียมและปรอทในน้ำสกัดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษ ของกรมโรงงานอุตสาหกรรมในทั้งสองสัดส่วนการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์