



### บทที่ 3

#### บททวนเอกสาร

##### โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งหมด 68 ธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ได้หลายรูปที่เสถียรมากกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โลหะเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ ผัก และผลไม้ จากนั้นจะเข้าสู่มนุษย์ โลหะหนักหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้

โลหะหนักที่ทำการทดลอง ได้แก่ ปรอท โครเมียม และเหล็ก ซึ่งอยู่ในรูปของแข็ง เป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ ที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ค่า COD ด้วยโครเมียมไฮดรอกไซด์ คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารประกอบปรอท โครเมียม และเหล็ก แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 - 3.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปรอท และสารประกอบปรอท (Patty, 1962)

สารประกอบ ของปรอท	สูตรเคมี	นน.อะตอม /โมเลกุล	ความถ่วง จำเพาะ	จุดหลอม เหลว (°ซ.)	จุดเดือด (°ซ.)	คุณสมบัติการ ละลายน้ำ
ปรอท	Hg	200.61	13.55	-38.87	356.58	ไม่ละลายในน้ำ ร้อนและน้ำเย็น และกรดเจือจาง เช่น HCl, HBr, HI ละลายใน HNO <sub>3</sub> 52 มก./ล.(25°ซ.) 395 มก./ล.(100°ซ.) ละลายน้ำได้ใน กรด แต่ไม่ละลาย ในแอลกอฮอล์, อี เธอร์, ต่าง และ แอมโมเนีย
เมอร์คิวริก ออกไซด์	HgO	216.61	11.14	500		36 ก./ล. (0°ซ.) 69 ก./ล. (20°ซ.) 613 ก./ล. (100°ซ.) 330 ก./ล.(แอลกอฮอล์ 25°ซ.), 250 ก./ล. ในอีเธอร์
เมอร์คิวริก คลอไรด์	HgCl <sub>2</sub>	271.52	5.44	276	302	600 มก./ล.(25°ซ.) 900 มก./ล.(100°ซ.) ละลายใน H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HNO <sub>3</sub>
เมอร์คิวรัส ซัลเฟต	HgSO <sub>4</sub>	497.29	7.56			250 ก./ล. (10°ซ.) 1 กก./ล.(100°ซ.) ละลายในแอลกอฮอล์ กรดอะซิติก
เมอร์คิวริก อะซิเตท	Hg (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	318.7	3.27			

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของปรอท และสารประกอบปรอท (Patty, 1962)

สารประกอบ ของปรอท	สูตรเคมี	น้ำหนักอะตอม โมเลกุล	ความถ่วง จำเพาะ	จุดหลอม เหลว (°ซ.)	จุด เดือด (°ซ.)	คุณสมบัติการ ละลายน้ำ
เมอร์คิวริก ฟูลิไมด์	$\text{Hg}(\text{NCO})_2$	284.65	4.42			ละลายได้น้อยใน น้ำเย็น ละลายได้ดี ในน้ำร้อน, แอลกอฮอล์และ แอมโมเนีย
ไดเมทิล เมอร์คิวรี	$\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$	230.68	3.07		96	ละลายในแอลกอฮอล์ และอีเธอร์
เอทิลเมอร์ คิวรีคลอไรด์	$\text{C}_2\text{H}_5\text{HgCl}$	265.13	3.48	193		ไม่ละลายในน้ำเย็น ละลายได้ดีในน้ำ ร้อนและละลายได้ น้อยในอีเธอร์
ฟีนิล เมอร์ คิวรีอะซิ เตต	$\text{C}_2\text{H}_5\text{HgO}$ 2 $\text{C}_2\text{H}_3$	336.75		149		ละลายน้ำได้น้อย ทั้งน้ำร้อนและน้ำ เย็นละลายในกรด เกลือเย็น อะซิติก เบนซีนและแอลกอฮอล์

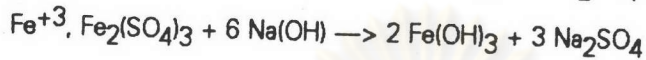
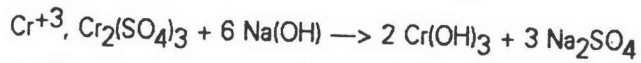
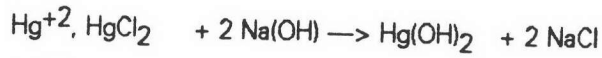
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโครเมียม และสารประกอบโครเมียม (Patty, 1962)

สารประกอบ ของโครเมียม	สูตรเคมี	นน.อะตอม /โมเลกุล	ความถ่วง จำเพาะ	จุดหลอม เหลว (°ซ.)	จุดเดือด (°ซ.)	คุณสมบัติการ ละลายน้ำ
โครเมียม	Cr	52.01	7.2 (28)	1890	2480	ไม่ละลายน้ำทั้งน้ำ ร้อนและน้ำเย็น ละลายในกรด HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> แต่ไม่ละลาย ในกรด HNO <sub>3</sub> ไม่ละลายในน้ำ ร้อน, น้ำเย็น, กรด, แอลกอฮอล์, และ ต่าง
โครมิก ออกไซด์	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	152.02	5.21	1990		1.6 กก. ต่อลิตร (ที่ 50 °ซ.) 2.067 กก. ต่อลิตร (100 °ซ.) ละลายในแอลกอฮอล์และกรด H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ละลายในน้ำร้อน, น้ำเย็นและแอล- กอฮอล์
โครเมียม ไตรออกไซด์	CrO <sub>3</sub>	100.01	2.70	196		873 กรัมต่อลิตร ละลายได้ในเมท ริล แอลกอฮอล์
โครมัส คลอไรด์	CrCl <sub>3</sub>	122.92	2.75	824		
โซเดียม โครเมต	NaCrO <sub>4</sub>	162	2.71			

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเหล็ก และสารประกอบของเหล็ก (Patty, 1962)

สารประกอบ ของเหล็ก	สูตรเคมี	น้ำหนักอะตอม /โมเลกุล	ความถ่วง จำเพาะ	จุดหลอม เหลว (°ซ.)	จุดเดือด (°ซ.)	คุณสมบัติการ ละลายน้ำ
เหล็ก	Fe	55.85	7.86	1535	3000	ไม่ละลายน้ำในน้ำ ร้อน, น้ำเย็น, ต่าง, แอลกอฮอล์อีเธอร์ ละลายได้ในกรด
เฟอร์ริส- ออกไซด์	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	159.70	5.24	1565		ไม่ละลายในน้ำ ละลายในกรด HCl
เฟอร์ริส- คาร์บอเนต	FeCO <sub>3</sub>	115.86	3.8			67 มก. ต่อลิตร (25°ซ.) ละลายใน สารละลาย CO <sub>2</sub>
ไอร์ออนได- ซัลไฟด์	FeS <sub>2</sub>	119.98	5.0	1171		4.9 มก. ต่อลิตร ละลายในกรด HNO <sub>3</sub> ไม่ละลายใน กรดเจือจาง
เฟอร์ริส- ซัลเฟต	FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	273.03	1.898	64 (-6H <sub>2</sub> O)100 (-7H <sub>2</sub> O)100		156.5 กรัมต่อลิตร 486 กรัมต่อลิตร (50°ซ.) ไม่ละลาย ในแอลกอฮอล์
เฟอร์ริค ซัลเฟต	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	562.04	2.1			4.4 กก. ต่อลิตร
เฟอร์ริค คลอไรด์	FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	270.32		37	280-285	191 กรัมต่อลิตร (50°ซ.) ละลายใน น้ำร้อน, แอลกอฮอล์ อีเธอร์

น้ำเสียจากการวิเคราะห์ค่า COD จะมีปริมาณปรอท โครเมียม และเหล็ก ละลายอยู่เป็นปริมาณมาก การบำบัดน้ำเสียโดยการตกผลึกโลหะหนักด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะได้ตะกอนไฮดรอกไซด์ ดังสมการต่อไปนี้



พวงรัตน์ แก้วล้อม (2537) ได้ศึกษาเรื่อง "แนวทางการจัดการน้ำเสียซีไอดีในกรุงเทพมหานคร" จากการศึกษาพบว่า สามารถบำบัดน้ำเสียดังกล่าวได้โดยใช้กระบวนการตกผลึกด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่กระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดตะกอนโลหะหนักที่มีปริมาณปรอท โครเมียม และเหล็กมีค่า 18.36, 2.18 และ 1.88 มก. ต่อกรัมตามลำดับ โดยประมาณว่าจะมีตะกอนโลหะหนักเกิดขึ้นปีละ 680 กิโลกรัม ตะกอนโลหะหนักดังกล่าวจัดเป็นของเสียอันตรายประเภทหนึ่งซึ่งอยู่ในข่ายสารพิษ ซึ่งจะต้องนำไปทำลายฤทธิ์ให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมเสียก่อน จึงจะสามารถนำไปกำจัดโดยการฝังกลบได้

### ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ ซีเมนต์นี้มีส่วนประกอบโดยน้ำหนัก ดังนี้

CaO	63.8 %
SiO <sub>2</sub>	20.2 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.4 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.9 %
MgO	1.5 %
SO <sub>3</sub>	2.6 %
Na <sub>2</sub> O	0.3 %
K <sub>2</sub> O	0.5 %

และซีเมนต์ยังปรากฏในรูปสารประกอบ ดังตาราง

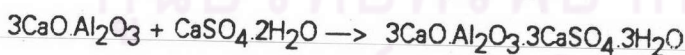
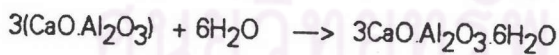
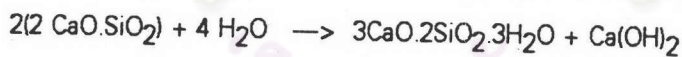
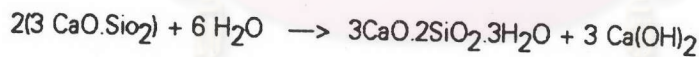
สารประกอบ	สูตรเคมี	สัญลักษณ์
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Shively (1986) ซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำเรียกว่าซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) มีความเป็นด่างสูง และมีพื้นผิวเป็นออกซีไฮดรอกไซด์ (Oxyhydroxide) ซึ่งโลหะหนักจะดูดติดบนพื้นผิวซิลิเกต และออกซีไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกตมีความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนักได้อย่างดี

#### ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ

เมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำ กลายเป็นซีเมนต์เพสต์ ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำก็จะเริ่มขึ้น เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ยังผลให้เกิดความเหนียว และเกาะแน่นกับวัสดุผสม

ออกไซด์ในซีเมนต์ จะเปลี่ยนรูปอยู่ในรูปไฮเดรตเมื่อถูกน้ำ Neville (1981) แสดงสมการปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนี้



ค่าความเป็นด่างที่เกิดโดยปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงความสามารถเป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าความเป็นด่างสูง และมีพื้นผิวออกซีไฮดรอกไซด์ ซึ่งเหมาะสมกับภาวะสำหรับการตกผลึก amphoteric metal และการดูดติดโลหะ

Lea (1956) น้ำจะทำลายซีเมนต์เพสต์โดยละลายปูนขาว (Lime) และอลูมินาบางส่วน ถ้าการชะล้างเกิดต่อไป มันจะเหลือตะกอนของไฮเดรตซิลิกา, ไฮดรอกไซด์, อลูมินา ปฏิกิริยานี้เกิดช้ามาก ในสภาพน้ำตามธรรมชาติ จนแทบจะละลายได้ แต่ถ้าในสภาพเป็นกรดมันจะเกิดเร็วกว่า

## เถ้าลอยลิกไนต์

### 1. คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยลิกไนต์

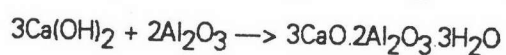
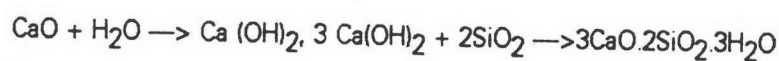
เถ้าลอยลิกไนต์เกิดจากการนำถ่านหินลิกไนต์มาบดให้ละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาที่มีอากาศพอเพียง โดยเถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกจากปล่องควัน และถูกจับไว้โดยเครื่อง Electrostatic Precipitator ในปี 2535 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ ที่ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ทำให้เกิดเถ้าลอยลิกไนต์ประมาณมากถึงปีละ 2.4 ล้านตัน

### 2. คุณสมบัติทางกายภาพ

เถ้าลอยลิกไนต์ที่ออกจากเตาเผาใหม่ๆ จะมีสีเทาอมแดง เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีเทาเข้มขึ้น จากการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 100 เท่า พบว่ารูปร่างของเถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะค่อนข้างกลมและกลม (Sub-round to round) และมีขนาดตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.42 มิลลิเมตร จากการหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยลิกไนต์ พบว่าความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.23 - 2.48

### 3. คุณสมบัติทางเคมี

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ของเถ้าลอยลิกไนต์ในปี 2534 โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยวิธี X-ray Fluorescence ได้ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.4 และจากการวิเคราะห์หาธาตุในรูปของออกไซด์ได้ผลตามตารางที่ 3.5 เถ้าลอยลิกไนต์ มีค่า pH อยู่ระหว่าง 8-12 จึงมีคุณสมบัติเป็นด่าง และพบว่ามีคุณสมบัติเป็นวัสดุ pozzolan โดยมีส่วนประกอบหลักคือ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  เถ้าลอยลิกไนต์ มีสภาพป่นเป็นผง เมื่อสัมผัสกับน้ำ  $\text{CaO}$  ส่วนที่เป็น free lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น  $\text{Ca(OH)}_2$  ซึ่งสารนี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปกับ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เกิดเป็นสารประกอบใหม่ คือ Calcium Silicate Hydrate และ Calcium Aluminate hydrate ซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมเกาะ (cementitious) เพิ่มขึ้นตามเวลา ดังสมการ





ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์ (X-ray Fluorescence Technique) โรงไฟฟ้าแม่-  
เมาะ (กฟผ., 2536)

Fly Ash	Fly Ash Composition (%)							Sampling date
	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	
LA 411	10.5	8.8	53.1	12.0	1.8	4.7	<1.0	9/12/35
LA 711	19.2	8.9	48.4	10.1	1.4	8.0	<1.0	
LA 811	8.6	8.4	56.1	17.7	1.9	2.2	<1.0	
LA 421	12.4	10.4	52.1	16.0	1.6	3.1	<1.5	16/12/35
LA 721	12.2	10.4	50.9	15.9	1.8	4.0	<1.5	
LA 821	13.5	9.7	51.0	16.6	2.0	3.2	<1.2	
LA 431	8.2	9.8	57.1	17.1	1.6	2.2	<1.0	23/12/35
LA 731	7.8	10.2	56.6	16.5	1.7	2.1	<1.5	
LA 831	8.3	9.8	56.6	16.9	1.9	2.1	<1.0	
LA 441	10.7	10.6	54.0	16.1	1.6	3.1	<1.0	30/12/35
LA 741	9.3	11.0	53.7	16.5	1.5	3.8	<1.0	
LA 841	7.6	10.1	57.5	17.3	1.3	2.0	<1.0	

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติทางเคมีของถ่านล้อยลิกไนต์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ (กฟผ., 2536)

MONTH	COMPOSITION (%)								Total		Slagging Index	Fouling Index
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Acid	Base		
JAN	46.96	26.40	12.04	7.79	2.08	1.83	0.64	2.25	73.36	24.38	1.05	0.212
FEB	50.70	24.54	12.11	0.87	1.01	1.97	0.34	2.26	75.24	22.30	0.99	0.106
MAR	44.40	22.61	14.27	9.91	1.49	2.01	0.52	3.80	67.01	28.20	1.49	0.220
APR	42.87	22.88	16.12	9.80	1.72	2.06	0.50	3.54	65.75	30.20	2.01	0.227
MAY	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
JUN	40.35	22.94	14.34	12.41	2.63	2.47	1.07	3.52	63.29	22.92	1.95	0.557
JUL	40.63	23.70	16.20	11.10	2.60	2.34	0.83	3.60	64.33	33.07	1.90	0.415
AUG	39.56	20.47	14.65	15.01	3.09	2.14	1.14	3.94	60.03	36.03	2.16	0.685
SEP	38.22	21.23	15.15	14.24	3.16	2.13	1.37	4.85	59.45	36.05	2.25	0.828
OCT	37.77	22.30	14.38	14.34	3.27	2.42	1.09	4.43	60.07	35.50	1.51	0.645
NOV	41.80	22.04	12.61	13.46	3.05	2.32	0.92	3.80	63.84	32.36	1.87	0.464
DEC	43.98	24.95	13.71	9.37	2.34	2.66	0.73	2.26	68.93	28.81	1.79	0.305
AVG	42.48	23.10	14.14	11.30	2.40	2.21	0.83	3.48	65.57	30.89	1.72	0.424

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5.1 และ 3.5.2 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยลิกไนต์ และในน้ำจากการทดลองแช่ถ้ำลอยลิกไนต์ในน้ำ

#### การกำจัดของเสียที่เป็นอันตรายและโลหะหนัก

ของเสียที่เป็นอันตราย (Hazardous Waste) หมายถึงสิ่งที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของมนุษย์ มีผู้ให้คำจำกัดความของ hazardous Waste ต่างๆ กันดังนี้ คือ

- (1) ของเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม (ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของแข็ง กึ่งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ) และปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม (ทางน้ำ อากาศ และดิน)
- (2) สิ่งต่างๆ ที่ไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจและเมื่อถูกนำไปทิ้งโดยไม่ได้กำจัดไม่ว่าจะทิ้งในน้ำ ดิน หรืออากาศ จะก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ พืช สัตว์ และสิ่งแวดล้อม
- (3) ของเสียใดๆ ซึ่งถูกติดไฟได้, ทำให้เกิดโรคติดต่อ, สะสมในสิ่งมีชีวิตแล้วก่อให้เกิดมะเร็ง หรือเกิดการฆ่าเหล่าได้

ของเสียที่เป็นอันตราย (Hazardous Waste) ตามคำจำกัดความของกรมควบคุมมลพิษหมายถึง ของเสียหรือสิ่งที่เจือปนด้วยของเสียที่มีความเข้มข้นหรือคุณสมบัติทางด้านกายภาพเคมี หรืออื่น ๆ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการตายหรือการเจ็บป่วย ทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ตลอดจนทำให้เกิดหรือมีแนวโน้ม จะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้มีการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด เก็บกัก ขนส่ง และกำจัด (เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, 2536)

กรมควบคุมมลพิษได้แบ่งประเภทของของเสียที่เป็นอันตราย เป็น 14 ประเภท โดยจัดตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียเป็นสารที่เป็นอันตราย ประเภท Heavy Metal Sludges and Solids และแบ่งออกเป็น 2 ประเภทย่อย คือ (1) Wet Sludge (2) Solids

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในถ้ำลอยลิกไนต์ (กฟผ., 2536)

โลหะหนัก	ปริมาณ (ppm)
As	213
Cr	66.5
Ni	53.3
Co	33.7

ตารางที่ 3.5.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำที่ใช้ทดลองแช่ตัวอย่างถ้ำลอยลิกไนต์ (กฟผ., 2536)

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (ppm)
As	0.13
Cr	0.25
Pb	0.06
Cd	0.003

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

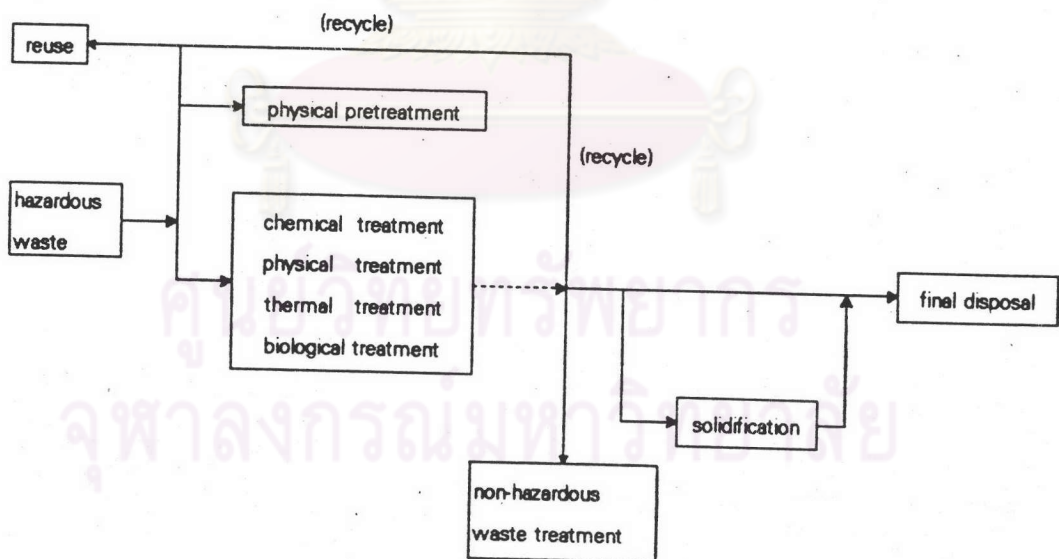
TSAI และ HSU (1985) ได้อธิบายถึงขั้นตอนและกระบวนการ กำจัดของเสียที่เป็นอันตราย ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment) เคมี (Chemical treatment) ความร้อน (Thermal treatment) และชีวภาพ (Biological treatment) รวมถึงการทำให้เป็นก้อน (Solidification) และการกำจัดขั้นสุดท้าย (Final disposal) ดังแสดงรายละเอียดในแผนผังรูปที่ 3.1

### การกำจัดของเสียอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน (Solidification of Hazardous Wastes)

#### 1. นิยามของ Solidification

กระบวนการทำให้เป็นก้อน (Solidification) และ การทำลายฤทธิ์ (Stabilization) จะใช้อธิบายร่วมกันในการอธิบายถึงระบบที่ทำให้สารต่างๆ ถูกยึดไว้และไม่สามารถแสดงคุณสมบัติทางเคมีออกมาได้

Anderson และคณะ (1979) อ้างถึงใน Rijal (1990) ได้ให้ความหมายของ Solidification ว่าเป็นกิจกรรม ซึ่งสารที่กระจัดกระจายอยู่หรือตะกอน หรือองค์ประกอบของสารเหล่านี้จะถูกนำมารวมกันเพื่อทำให้เกิดเป็นมวลแข็งตัวขึ้น



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงกระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตราย (TSAI และ HSU, 1985)

- สารพิษทั้งหมดในของเสียควรมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ, ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและสามารถถูกยึดจับไว้ในของเสียได้ดี
- ของเสียควรจะเป็นมวลแข็งที่น้ำ และแสงไม่สามารถผ่านได้และมีพื้นที่ผิวสำหรับสัมผัสกับน้ำน้อยที่สุด
- มวลของแข็งควรจะมีคุณสมบัติดังนี้
  - มีความคงตัวตามลักษณะขนาด
  - มีคุณสมบัติของการเปียก/แห้ง (wet/dry) และการแข็งตัว/การหลอมเหลว (freeze/thaw) ที่ดี
  - มีความทนทานต่อน้ำหนักและแรงกดได้ดี
  - การซึมของน้ำน้อย
  - Leachate และ runoff ควรอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน
- สถานที่สำหรับกำจัดสามารถใช้งานได้ภายหลังการทิ้งของเสียแล้ว

## 2. กระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำลายฤทธิ์ (Solidification and Stabilization Process)

กระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำลายฤทธิ์ เป็นวิธีการที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการละลายของสารเคมีที่เป็นของเสียอันตรายและการปนเปื้อนของสารพิษลงสู่สิ่งแวดล้อม วัตถุประสงค์ของกระบวนการดังกล่าว เพื่อสร้างมวลของแข็งเนื้อเดียวที่มีความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้น้อยและมีโครงสร้างที่มั่นคงแข็งแรง โดยกำหนดหลักสำคัญ 4 ข้อ ในการบำบัดของเสียอันตรายดังนี้

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

ตารางที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของกระบวนการทำให้เป็นก้อนประเภทต่างๆ 7 วิธี ได้แก่ Cement Based, Pozzolan, Thermoplastic, Organic polymer, Surface Encapsulation, Self Cementing และ Glassification and Production of Synthetic Minerals or Cements การเลือกวิธีการบำบัดของเสียดังกล่าวควรเลือกให้เหมาะสมกับของเสียประเภทต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของของเสียและคุณสมบัติเฉพาะของของเสียสำหรับตะกอนโลหะหนักนั้นสามารถจะกำจัดได้หลายวิธีเช่น Cement Based, Lime Based, Thermoplastic, Surface Encapsulation และ Glassification

Shukrow และคณะ (1982) อ้างถึงใน Rijal (1990) ได้สรุปข้อดีและข้อเสีย สำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อน 7 วิธี ดังสรุปไว้ในตารางที่ 3.7

การทำให้เป็นก้อนเป็นกระบวนการบำบัดของเสียอันตรายเพื่อจำกัดความเป็นพิษของของเสีย โดยทั่วไปของเสียอันตรายจะถูกยึดติดด้วยกระบวนการทางเคมี เพื่อทำให้ดูดติดทางกายภาพ โดยการผสมสารเคมีบางชนิดลงไป Sheffield และคณะ (1986) ได้รายงาน่ววิธีการทำลายฤทธิ์ดังกล่าวนี้ถูกออกแบบมาเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของของเสียเกี่ยวกับการขนส่งและเคลื่อนย้าย การลดพื้นที่ผิวของของเสีย และจำกัดการปนเปื้อนของสารมลพิษที่ปล่อยออกมาจากของเสีย

Thomson (1979) อ้างถึงใน Rijal, (1990) กล่าวว่า ในระยะแรกนั้นกระบวนการทำให้เป็นก้อนได้ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับของเสียที่เป็นสารกัมมันตภาพรังสีที่ไม่แอกทีฟโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของของเสียให้สามารถขนย้ายไปยังสถานที่กำจัดได้ และได้มีการเลือกกระบวนการในการบรรจุเก็บของเสียกัมมันตภาพรังสีในระยะยาว วัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้ที่ถูกเลือกจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ 1. ลดศักยภาพสำหรับการแผ่รังสี 2. ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้และเก็บบรรจุของเสียในรูปที่ไม่สามารถถูกละลายได้ วัสดุที่มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการดังกล่าวคือ ปูนซีเมนต์ผสม, bituminous material, urea formaldehyde, resins และ glass

Bahadir และคณะ (1987) อ้างถึงใน Rijal (1990) รายงานว่า การทำให้แข็งตัวของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม จะแตกต่างจากของเสียที่มีกัมมันตภาพรังสี ทั้งนี้เพราะของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม จะมีปริมาณมาก มีความเป็นพิษปานกลาง และมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ

Shively และ คณะ(1986) กล่าวว่า กระบวนการทำให้เป็นก้อนที่ใช้สำหรับการกำจัดของเสียประกอบด้วย Cement based techniques; lime based technique; thermoplastic techniques (bitumen, paraffin, and polyethylene) ; organic polymers; encapsulation; self-cementing (pozzolan) techniques; and glassification

เทคนิคการทำให้แข็งตัวแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ porus systems และระบบ monolithic systems ซึ่งแตกต่างกันที่ความสามารถทนทานต่อน้ำ สำหรับวิธีการใน 2 วิธีแรกคือ Cement based technique และ lime based technique จัดเป็นระบบ porus systems ซึ่งอาจมีการถูกละลายสารต่างๆออกมาได้ โดยวัสดุแข็งตัวที่ใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์, ผุ่นซีเมนต์จากเตา, ซิลิกาที่สามารละลายน้ำ, แก้วลอย, ซีโหละจากเตาหลอม, ปูนขาว bituminous asphalt และสารโพลิเมอร์ ส่วนระบบแบบ monolithic systems นั้นจะสามารถป้องกันการซึมแพร่ของน้ำได้

Barns และคณะ (1979) อ้างถึงใน Rijal (1990) ได้กำหนดความต้องการ สำหรับขบวนการทำให้เป็นก้อนของสารพิษ, สารอันตราย และของเสียกำจัดยากไว้ดังนี้

- สารพิษทั้งหมดในของเสียควรมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ, ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและสามารถถูกยึดจับไว้ในของเสียได้ดี
- ของเสียควรจะเป็นมวลแข็งที่น้ำ และแสงไม่สามารถผ่านได้และมีพื้นที่ผิวสำหรับสัมผัสกับน้ำน้อยที่สุด
- มวลของแข็งควรจะมีคุณสมบัติดังนี้
  - มีความคงตัวตามลักษณะขนาด
  - มีคุณสมบัติของการเปียก/แห้ง (wet/dry) และการแข็งตัว/การหลอมเหลว (freeze/thaw) ที่ดี
  - มีความทนทานต่อน้ำหนักและแรงกดได้ดี
  - การซึมของน้ำน้อย
  - Leachate และ runoff ควรอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน
- สถานที่สำหรับกำจัดสามารถใช้งานได้ภายหลังการทิ้งของเสียแล้ว

## 2. กระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำลายฤทธิ์ (Solidification and Stabilization Process)

กระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำลายฤทธิ์ เป็นวิธีการที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการละลายของสารเคมีที่เป็นของเสียอันตรายและการปนเปื้อนของสารพิษลงสู่สิ่งแวดล้อม วัตถุประสงค์ของกระบวนการดังกล่าว เพื่อสร้างมวลของแข็งเนื้อเดียวที่มีความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้น้อยและมีโครงสร้างที่มั่นคงแข็งแรง โดยกำหนดหลักสำคัญ 4 ข้อ ในการบำบัดของเสียอันตรายดังนี้

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

ตารางที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของกระบวนการทำให้เป็นก้อนประเภทต่างๆ 7 วิธี ได้แก่ Cement Based, Pozzolan, Thermoplastic, Organic polymer, Surface Encapsulation, Self Cementing และ Glassification and Production of Synthetic Minerals or Cements การเลือกวิธีการบำบัดของเสียดังกล่าวควรเลือกให้เหมาะสมกับของเสียประเภทต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของของเสียและคุณสมบัติเฉพาะของของเสียสำหรับตะกอนโลหะหนักนั้นสามารถจะกำจัดได้หลายวิธีเช่น Cement Based, Lime Based, Thermoplastic, Surface Encapsulation และ Glassification

Shukrow และคณะ (1982) อ้างถึงใน Rijal (1990) ได้สรุปข้อดีและข้อเสีย สำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อน 7 วิธี ดังสรุปไว้ในตารางที่ 3.7



ตารางที่ 3.6 กระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน

(Engineering and Science, 1989)

กระบวนการทำให้เป็นก้อน (Solidification)	รายละเอียด
1. Cement Based	ของเสียจะถูกผสมลงในซีเมนต์น้ำและส่วนผสมอื่น ๆ และปล่อยให้แห้งจนแข็งตัว เป็นก้อนซีเมนต์
2. Pozzolanic (Lime Based)	ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาว และวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นพอสโซลาน เช่น ถ้ำลอย, ผงซีเมนต์ที่เตาเผา เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งตัวได้เมื่อผสมน้ำ ผสมน้ำแล้วปล่อยให้แห้งตัว
3. Thermoplastic	นำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น Bitumen, paraffin หรือ polyethylene ปล่อยให้ส่วนผสมเย็นตัวลงและแข็งตัว
4. Organic Polymer	ของเสียในขั้นแรกจะถูกผสมกับสารโพลีเมอร์ (gelling agents หรือ urea formaldehyde) และเติมสารเติมเต็ลิสต์ผสมให้เข้ากันก่อนที่สารโพลีเมอร์จะแข็งตัว
5. Surface Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันให้แน่นแล้วเคลือบผิวนอกของของเสียที่ถูกบดอัดด้วยสารเชื่อม เช่น polyethylene หรือ organic resins
6. Self-Cementing	สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซิลิเฟต และแคลเซียมซิลิไฟท์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมได้แก่ การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถนำมาใช้ผสมกับตะกอนของเสียเพื่อหล่อให้แข็งตัวได้ โดยวัสดุที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและมีความสามารถให้น้ำซึมได้น้อย
7. Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics	สารที่เป็นอันตรายมาก เช่น กากสาร แกมมันภาพตริงส์ สามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็นส่วนผสมของแก้ว หรือ Synthetic Silicate mineral เพื่อป้องกันการไม่ให้สารอันตรายนี้ ถูกชะละลายด้วยน้ำสามารถนำไปกำจัดต่อไปโดยไม่ต้องมีกระบวนการหุ้มหรือบรรจุเป็นครั้งที่ 2

ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบกระบวนการและข้อดีข้อเสียของการกำจัดของเสียโดยวิธีทำให้เป็นก้อน (Shukrow และคณะ 1982)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Cement Based	Chemical Fixation Solidification	แห้งหรือเปียก (โดยทั่วไปเหมาะกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วัสดุที่ใช้มีราคาถูก</li> <li>- มีความทนทานต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี</li> <li>- กำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดี</li> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาอย่างดีแล้ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์</li> <li>- ซีเมนต์และของเสียที่แข็งตัวแล้วถูกชะล้างได้ในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ</li> <li>- เพิ่มน้ำหนักและขนาดของของเสีย และเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการฝังกลบ</li> <li>- เหมือนกับกระบวนการประเภท Cement Based</li> </ul>
2. Lime Based	Chemical Fixation/ Solaidification	แห้งหรือเปียก (เหมาะสำหรับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วัสดุที่ใช้ผสมมีราคาถูก</li> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างดีแล้ว</li> <li>- การใช้ได้ลดยมาเป็นส่วนผสมเป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิด โดยขบวนการเดียวกัน</li> <li>- สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีได้เป็นอย่างดี</li> <li>- สารละลายที่ชะล้างมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความชำนาญ</li> <li>- ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ</li> <li>- ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวก Strong Oxidants, dehydrated salts</li> <li>- ของเสียจะถูกยึดไว้ในโพลลิเมอร์อย่างหลวม ๆ</li> <li>- สารที่มี pH ต่ำ จะทำให้โลหะละลายออกมาได้มากขึ้น</li> <li>- การย่อยสลายทางชีวภาพของสารโพลลิเมอร์บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ</li> </ul>
3. Thermoplastic Based	Physical Fixation	แบบแห้ง (เหมาะกับสารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิด Polymer's matrix</li> <li>- ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความชำนาญ</li> <li>- ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ</li> <li>- ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวก Strong Oxidants, dehydrated salts</li> <li>- ของเสียจะถูกยึดไว้ในโพลลิเมอร์อย่างหลวม ๆ</li> <li>- สารที่มี pH ต่ำ จะทำให้โลหะละลายออกมาได้มากขึ้น</li> <li>- การย่อยสลายทางชีวภาพของสารโพลลิเมอร์บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ</li> </ul>
4. Organic Polymer Process	Physical Fixation	แบบแห้งหรือเปียก (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิด Polymer's matrix</li> <li>- ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความชำนาญ</li> <li>- ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ</li> <li>- ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวก Strong Oxidants, dehydrated salts</li> <li>- ของเสียจะถูกยึดไว้ในโพลลิเมอร์อย่างหลวม ๆ</li> <li>- สารที่มี pH ต่ำ จะทำให้โลหะละลายออกมาได้มากขึ้น</li> <li>- การย่อยสลายทางชีวภาพของสารโพลลิเมอร์บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ</li> </ul>

ตารางที่ 3.7 (ต่อ) เปรียบเทียบกระบวนการและข้อดีข้อเสียของการกำจัดของเสียโดยวิธีทำให้เป็นก้อน (Shukrow และ คณะ 1982)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
5. Encapsulation	Chemical Containment	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี</li> <li>- ไม่มีการระเหยของของเสียออกมา เมื่อสารที่หุ้มห่ออยู่ไม่ถูกทำลาย</li> <li>- ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การระเหยของเสียจะเกิดขึ้นหากสารที่หุ้มถูกทำลาย</li> <li>- ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่ต้องกำจัดของเสียจำนวนมาก ๆ</li> </ul>
6. Self Cementing	Chemical Fixation	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กระบวนการนี้ต้องการสารเติมในส่วนผสมซีเมนต์ ซึ่งจะช่วยให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์</li> <li>- ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการหุ้มห่อสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะล้างได้ภายใต้สภาวะที่มี pH ต่ำ</li> </ul>
7. Glassification (Vitrification)	Physical Fixation	แบบแห้ง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก้วจะถูกชะล้างได้น้อยมาก</li> <li>- การบรรจุหรือหุ้มห่ออยู่ในเกณฑ์ดี</li> <li>- ใช้วัสดุที่มีราคาสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อุณหภูมิสูงอาจทำให้ของเสียอื่นระเหยออกมา</li> <li>- ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับการให้ความร้อนอุปกรณ์ และต้องการผู้ชำนาญงานเฉพาะ</li> <li>- ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการกำจัดของเสียทุกชนิด ยกเว้นสารกัมมันตภาพรังสี และสารมีพิษมาก ๆ</li> </ul>

### 3. การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ (Cement Based Technique)

กระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ ประกอบด้วย การผสมของเสียกับปูนซีเมนต์ และสารอื่นที่เติมลงไป ได้แก่ เถ้าลอย, ซิลิกา, ชัลไฟด์ ฯลฯ โลหะหนักหลายชนิดในของเสียจะถูกเปลี่ยนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ และโลหะซิลิเกตซึ่งไม่ละลายน้ำ ในสภาพแวดล้อมซึ่งมีความเป็นด่างสูงมากในปูนซีเมนต์และจะถูกจับไว้ให้อยู่ภายในช่องว่างของส่วนผสมปูนซีเมนต์ (Bishop, 1988) สรุปข้อดีและข้อเสียได้ดังนี้

#### ก. ข้อดี

1. สารที่เติมในส่วนผสมมีเพียงพอสำหรับอัตราส่วนที่ใช้
2. เทคนิคการผสมซีเมนต์ และการกำจัดได้มีการพัฒนามาอย่างดีแล้ว
3. วิธีการนี้จะสามารถทนต่อสารเคมีหลายชนิดในตะกอนของแข็งได้เป็นอย่างดี
4. เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการมีอยู่แล้ว
5. ความแข็งแรงและความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแข็งตัวสามารถปรับได้โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมลงในของเสีย
6. วัสดุที่ใช้มีราคาถูก

#### ข. ข้อเสีย

1. ไม่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์บางชนิดซึ่งจะทำลายกลไกการแข็งตัวของซีเมนต์
2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถถูกชะละลายได้ในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ
3. การเพิ่มน้ำหนักของของเสีย โดยการหล่อด้วยซีเมนต์จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งของเสียไปกำจัดเพิ่มขึ้น

### 4. กลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์

BISHOP (1988) ได้ทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการชะละลายโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (Cement based Solidification) โดยใช้ของเสียสังเคราะห์เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ของแคลเซียม ไครเมียม และตะกั่ว โดยได้ศึกษาถึง Buffering Capacity ของวัสดุที่แข็งตัวจากการกำจัดโลหะหนัก และกลไกการยึดจับโลหะหนักของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในของเสียที่ถูกทำให้แข็งตัว (Solidified Waste) สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

### 1. ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity)

จากการทดสอบการชะละลาย (leaching Test) กับขี้เถ้าที่แข็งตัวในซีเมนต์โดยทำการชะละลายของเสียแข็งตัวด้วยกรดอะซิติกแล้วทำการชะละลายติดต่อกันอีกเป็นจำนวนรวมทั้งหมด 15 ครั้ง ตรวจวัดค่า pH และความเป็นด่าง (Alkalinity) แล้วนำไปเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.2 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อทำการชะละลายของเสียแข็งตัวหลาย ๆ ครั้งพบว่า ค่า pH ของกรดที่ผ่านการชะละลายแล้วมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนเกือบคงที่ในครั้งที่ 15 ส่วนค่าความเป็นด่างสะสม (Cumulative Alkalinity) จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยในครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะละลายได้จะเหลือน้อยมากประมาณ 1.7% ของค่าความเป็นด่างสะสมทั้งหมด โดยความเป็นด่างจะถูกชะล้างออกมามากในช่วงต้นและลดลงตามลำดับจนถึงครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างสะสมถึงการชะล้างในครั้งที่ 15 มีค่าเท่ากับ 18.3 meq/g ซึ่งถือเป็นค่า Buffering Capacity ของของเสียแข็งตัว ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะล้างออกมาแต่ละครั้งนี้จะเป็นตัวควบคุม pH ของการชะล้าง โดยการสะเทินกรดอะซิติกที่ใช้ในการทดลองให้เป็นกลาง

### 2. กลไกการยึดจับโลหะหนัก

จากกราฟรูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลาย (แคดเมียม, โครเมียม และตะกั่ว) กับค่าความเป็นด่าง และซิลิคอน ซึ่งจะถูกระบายมากขึ้นเมื่อค่า pH ลดลงต่ำกว่า 6.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการทดลองที่ผ่านมาหลาย ๆ ครั้งทำให้ทราบว่าโลหะหนักอาจจะอยู่ในโครงสร้างของของเสียแข็งตัว ในรูปแบบต่าง ๆ เช่นอยู่ในรูปพูนของโครงสร้างภายในของของเสียแข็งตัว, ถูกเกาะติดบนผนังของรูปพูน และทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์—ผลการทดลองแสดงให้เห็นแคดเมียม (Cd) จะถูกชะละลายออกมาได้มากกว่า โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) ซึ่งถูกชะล้างออกมาได้น้อย

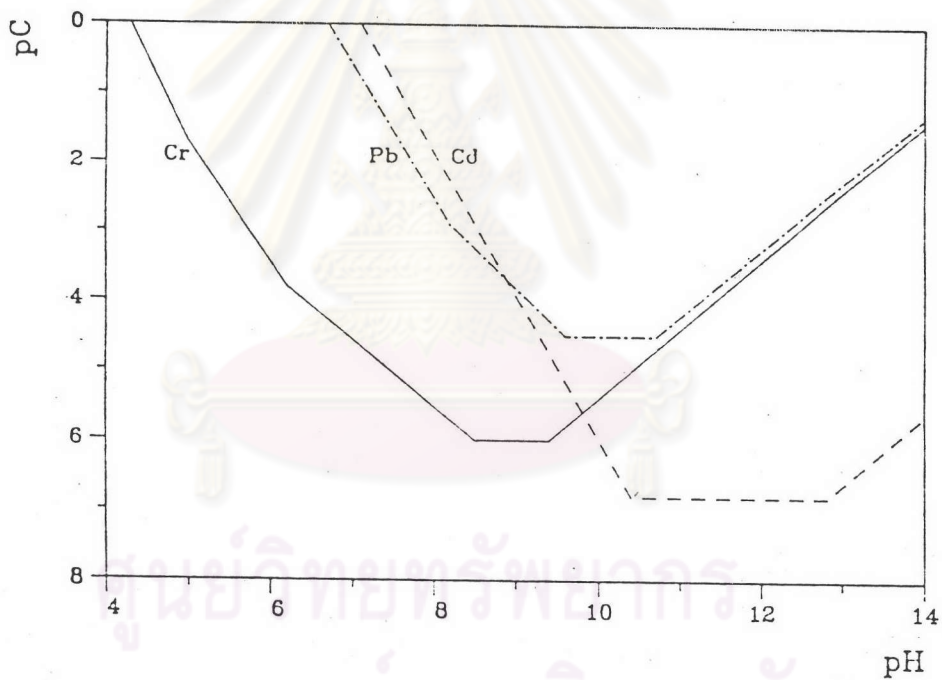
กรณีที่โลหะหนักถูกล้อมอยู่ในของแข็งหรืออยู่ในรูปพูน หรือเกาะติดผิวรูปพูนแล้วโลหะหนัก เหล่าควรจะถูกชะละลายออกมามากคล้ายกับการชะละลายค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) จากรูปที่ 3.3 เส้น กราฟของแคดเมียมสะสมที่ถูกชะล้างออกมาจะคล้ายคลึงกับเส้นกราฟของค่าความเป็นด่างสะสมที่ถูก ชะล้างออกมา ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่า แคดเมียมจะอยู่ในของเสียที่แข็งตัวในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ โดยอยู่ตามรูปพูนและเกาะติดอยู่ตามผนังของรูปพูน

สำหรับโครเมียมและตะกั่ว นั้น เมื่อพิจารณาเส้นกราฟแล้วจะมีรูปแบบของการถูกชะละลาย คล้ายคลึงกับซิลิกอน ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์และทราย ดังนั้นจึงเชื่อว่าโครเมียม และตะกั่วจะถูกยึดติดอยู่ในโครงสร้างของซิลิกอน มากกว่าเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูปพูนการชะ ละลายของโครเมียม และตะกั่วค่อนข้างยากจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ pH ต่ำ ๆ และต่ำกว่า pH ในการชะ ละลายแคดเมียมอัตราการชะละลายของโลหะทั้งสองนี้มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการชะ ละลายที่คาดคะเนจากการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงว่าโลหะทั้งสองนี้จะเกาะติดอย่างแข็ง แรงภายในโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกาและจะถูกชะละลายออกต่อเมื่อโครงสร้างของซิลิกานี้ถูกทำลาย

รูปที่ 3.4 แสดง pC-pH diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียมโครเมียมและตะกั่วในสาร ละลายที่มีค่า ionic strength 0.75 M พบว่าในขณะเริ่มผสมปูนซีเมนต์และส่วนผสมอื่นๆ ค่า pH จะมีค่า สูงประมาณ 12-13 ซึ่งทำให้แคดเมียมส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ และอยู่ในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็น ของแข็งอยู่ในรูปพูนของซีเมนต์ ส่วนโครเมียมและตะกั่วจะละลายน้ำได้ และมีส่วนในปฏิกิริยาการแข็ง ตัวของซีเมนต์และเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิเกต จากสาเหตุดังกล่าวนี้จึงอธิบายได้ว่าแคดเมียม จะถูกชะละลายออกมาเช่นเดียวกับค่าความเป็นด่าง ส่วนโครเมียมและตะกั่วจะถูกชะล้างออกมาโดย ขึ้นกับการละลายของซิลิเกต

ภายหลังการทดลอง Leaching Test ได้วิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งของสารทั้งหมดพบว่าหลังจาก การทดลองชะล้าง 15 ครั้ง ปริมาณสารที่ถูกชะล้างออกไปประมาณ 50-70% ของปริมาณทั้งหมดก่อน การทดลอง แต่ว่ายังมีโลหะหนักเหลืออยู่ โดยมีแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว เหลืออยู่ 50, 85 และ 75% ตามลำดับ และมีโลหะที่เป็นสารประกอบโดยปกติในซีเมนต์ ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็ก และ Silicon

เหลืออยู่ 90, 98 และ 80% ตามลำดับ และแคลเซียมเหลืออยู่ 8% ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์ที่แรงตัวสามารถยึดจับโลหะหนักได้ดี และยากที่จะทำการชะละลายโลหะหนักออกจากซีเมนต์ที่แรงตัวดังกล่าว



รูปที่ 3.4 กราฟ pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม โครเมียมและตะกั่ว (Bishop, 1988)

### การทดสอบการชะละลาย (Leaching Tests)

การทดสอบการชะละลายแบ่งออกได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์คุณภาพของสารที่ต้องการทดสอบ โดยใช้ปริมาณตัวอย่างสาร วิธีการเตรียมตัวอย่าง และเครื่องมือที่แตกต่างกัน ตารางที่ 3.8 สรุปและเปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะละลาย แบบต่าง ๆ

Conway และ Mally (1981) อ้างถึงใน Youn (1990) ได้แบ่งวิธีการทดสอบออกเป็น 2 วิธี คือ Batch tests และ Column tests Batch tests เป็นการทดสอบการชะละลายโดยให้ตัวอย่างสารสัมผัสกับของเหลวที่ใช้ในการชะละลาย (Extract Solution) ในภาชนะอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาที่ทำกรทดสอบ ส่วน Column tests นั้นจะทำการทดสอบในคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวอย่างสารที่จะทดสอบจนแน่น และป้อนสารที่ใช้ทดสอบผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

ในอดีตการทดสอบการชะละลายของสารนิยมใช้ทั้งวิธี batch tests และ Column tests ปัจจุบันการออกแบบเครื่องมือสำหรับ batch tests จะใช้กับการทดสอบการชะละลายของของเสียก่อนที่จะนำไปกำจัดโดยการฝังกลบ

U.S.EPA (1980) ได้กำหนดวิธี Toxicant Extraction Procedure (TEP) เป็นวิธีที่ใช้บังคับ ต่อมาได้มีการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการเป็นวิธี Extraction Procedure (EP) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ดังมีรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.8

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2531) ได้กำหนดวิธีการทดสอบการชะละลายของของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยใช้วิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure)

ดังมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. บดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดของสิ่งปฏิกูลระหว่าง 0.5-5 มิลลิเมตร
2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1.หนัก 50 กรัม ใส่ในตัวทำละลาย ซึ่งประกอบด้วย น้ำกลั่นผสมกับกรดไฮโดรคลอริก จนมีความเป็นกรดต่างระหว่าง 5.8-6.3 ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายเป็น 10 เท่า (มิลลิเมตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่างสิ่งปฏิกูล
3. เขย่าบนเครื่องเขย่า (Agitator) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบ/นาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 5 เซนติเมตร
4. กรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรู 1 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้ ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่างๆ ตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

น้ำทิ้ง



ตารางที่ 3.8 เปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะละลาย (Extraction Test Procedures) (Perket และ Webster, 1981)

การทดสอบการชะละลาย	Standard Leach Test	(US EPA) Toxicant Extraction Procedure	ASTM Method A	Extraction Procedure
1. ปริมาณตัวอย่างสาร	28.6 กรัมตัวอย่างสาร (ส่วนที่เป็นของแข็ง)	ไม่ระบุน้ำหนักต่ำสุด	350 กรัม	น้ำหนักอย่างน้อย 100 กรัม (0.5 %) ของแข็ง
2. การเตรียมตัวอย่างสาร	แยกของเหลว โดยใช้ 0.45 $\mu\text{m}$ pressure filtration	แยกของเหลวโดยวิธี centrifugation หรือ filtration		บดจนมีขนาด 9.5 มม.
3. อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง	10 : 1 ถึง 7 : 1	10 : 1 ถึง (เริ่มต้น 8 : 1)	4 : 1	20 : 1 (เริ่มต้น 16 : 1)
4. สารที่ใช้ทดสอบการชะละลาย (Extraction Solution)	buffered acetic acid หรือ น้ำกลั่น	acetic acid หรือ Sodium hydroxide	ASTM Type IV water	0.5 N acetic acid; 4 มล./ก ของตัวอย่างสาร
5. การควบคุม pH		4.9 - 5.2	ไม่กำหนด	4.8 - 5.2
6. ภาชนะที่ใช้ทดสอบ	ภาชนะปิด	ไม่กำหนด	ขวดปากกว้าง (ปิดฝา)	เครื่องกวนหรือเครื่องมือที่เทียบเท่า
7. วิธีการผสมและระยะเวลาการทดสอบ	rotating shaker 24 ชม.	mechanical stirring 24 ชม.	reciprocating shaker 48 ชม.	เครื่องกวนต่อเนื่อง 24 ชม.
8. การแยกของเหลวและของแข็ง	กรองผ่านกรองใยแก้ว ขนาด 0.45 $\mu\text{m}$	centrifugation หรือ กรองผ่านกรองขนาด 0.45 $\mu\text{m}$	กรองผ่านกรอง 0.45 $\mu\text{m}$ โดยใช้เครื่องกรองแบบ ความดันหรือแบบสุญญากาศ	กรองผ่านกรอง 0.45 $\mu\text{m}$

เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

Sollars และ Perry (1989) ได้กล่าวถึงการประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดโดยการทำให้แข็งตัวซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ของการบำบัด ได้แก่ บังคับต่างๆ เช่น การปรับปรุงให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมั่นคงการลดพื้นที่ผิว และการจำกัดและการละลายของสารที่เป็นอันตราย เมื่อสัมผัสกับสารชะล้าง ในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นประเทศสหราชอาณาจักร (ประเทศอังกฤษ) ยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานเป็นทางการสำหรับคุณภาพของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยวิธีการข้างต้น แต่ได้มีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอาทิ หน่วยงานที่เกี่ยวกับการกำจัดของเสีย (Waste Disposal Authority) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการปฏิบัติงานในการบำบัดของเสีย โดยการทดสอบค่า Compressive Strength, Permeability และ leachability ตารางที่ 3.9 แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการ Sealosafe จากโรงบำบัดของเสียที่เมือง West Thurrock

บริษัท Engineering-Science บริษัท Thai DCI และบริษัท Systems Engineering (1989) ได้ดำเนินการศึกษาและจัดทำแผนการจัดการของเสียอันตรายของประเทศไทย (National Hazardous Waste Management Plan) ได้กล่าวถึงการทดสอบการชะละลายและเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้แข็งตัวโดยแบ่งการทดสอบได้ 2 วิธี คือ

ตารางที่ 3.9 คุณสมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยวิธี Sealosafe (Sollars และ Perry, 1989)

TABLE IV. SPECIMEN SOLIDIFIED WASTE PERFORMANCE CHARACTERISTICS REQUIRED BY A WASTE DISPOSAL AUTHORITY<sup>a</sup>

Characteristic	Requirement	Comparative values
Permeability (28 day)	$\leq 1 \times 10^{-7}$ m/s	Sand: $1 \times 10^{-4}$ – $5 \times 10^{-5}$ m/s Silt: $1 \times 10^{-6}$ – $1 \times 10^{-7}$ m/s
Compressive strength (28 day)	$\geq 0.34$ MN/m <sup>2</sup>	Concrete: $1 \times 10^{-8}$ m/s Concrete: 30 MN/m <sup>2</sup> Mortar: 20 MN/m <sup>2</sup> Grouts: 0.5–4 MN/m <sup>2</sup>
Leachate Quality <sup>**</sup> :	pH 8–11 COD < 280 g/m <sup>3</sup> Total CN < 1 g/m <sup>3</sup> Total Sulphide < 5 g/m <sup>3</sup> Total Phenol < 5 g/m <sup>3</sup> NH <sub>3</sub> < 40 g/m <sup>3</sup> Toxic heavy metals: Zn < 10 g/m <sup>3</sup> , Hg < 0.5 g/m <sup>3</sup> ; Others (inc. Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Ba, Co, Mb, Sn, As, Se, Sb): < 5 g/m <sup>3</sup> total Pesticides < 0.1 g/m <sup>3</sup> Supernatants: none after 24 h	n.a. " " " " " " " " "

n.a. = not applicable

<sup>\*\*</sup>: Conditions: 50 g solidified waste (28 day cure), ground to fine powder, stirred 1 h with 500 ml distilled water (20°C), filtered through Whatman No. 2 filter paper

วิธีที่ 1 การทดสอบโดยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี อาทิ โลหะหนัก และสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ เป็นต้น โดยกำหนดค่า Threshold Value สำหรับสารเคมีต่างๆ ที่ถูกชะละลายออกมาจากของเสียขึ้น ถ้าค่าที่ทดสอบดังกล่าวสูงกว่าค่า Threshold Value แสดงค่าของเสียนั้นเป็นสารที่มีอันตรายเกินขีดในการกำหนดค่า Threshold Value โดยทั่วๆ ไปจะมีค่าประมาณ 100 เท่าของมาตรฐานน้ำดื่มดั่งนั้นสารเคมีดังกล่าวถูกชะละลายและเจือจางในธรรมชาติได้มากกว่า 100 เท่าก็จะไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อแหล่งน้ำใช้ของมนุษย์ การทดสอบการชะละลายของสารเคมีจากของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อน จะเป็นการประเมินความสามารถและประสิทธิภาพของระบบบำบัดของเสียค่า Threshold Value สำหรับสารเคมีต่างๆ กำหนดไว้ดังนี้

Arsenic	5.0	มก./ล.
Barium	100.0	มก./ล.
Cadmium	1.0	มก./ล.
Chromium	5.0	มก./ล.
Mercury	0.2	มก./ล.
Selenium	1.0	มก./ล.
Silver	5.0	มก./ล.
Endrin	0.02	มก./ล.
Lindane	0.4	มก./ล.
Methoxychlor	10.0	มก./ล.
Toxaphene	0.5	มก./ล.
2,4-D	10.0	มก./ล.
2,4,5-TP Silvex	1.0	มก./ล.

วิธีที่ 2 เป็นวิธีการทดสอบความเป็นพิษของสารที่ถูกชะละลาย ต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ Bioassay โดยทำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่เกิดจากการทดลองใช้ค่า Threshold Value (การทดลองนี้ใช้น้ำกลั่นเป็นสารชะละลาย) ถ้าความเป็นพิษของสารชะละลายเกินค่ากำหนด ซึ่งได้เลือกไว้สำหรับการเจือจางในสิ่งแวดล้อมแล้ว ของเสียนั้นจะถูกจัดว่าเป็นของเสียอันตรายโดยกำหนดค่า 24-hour LC 50 เมื่อน้ำสกัดมีการเจือจางน้อยกว่า 20%

US.EPA (1992) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับของเสียที่สามารถนำไปทิ้งโดยการฝังกลบหรือของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยการทดสอบของเสียดังกล่าวด้วย วิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Extract Solution) มาตรฐานของ EPA ได้กำหนด

ความเข้มข้นของโลหะหนักซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของสารที่เป็นพิษ ตามประเภทของของเสีย ดังมีรายละเอียดในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 มาตรฐานความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด (Extract Solution) สำหรับของเสียอันตรายที่ผ่านกากบำบัดแล้ว (U.S. EPA 1992)

Waste Code	Regulated Hazardous Constituent	Constitution (mg/l)
D004	Arsenic	5.0
D005	Barium	100
D006	Cadmium	1.0
D007	Chromium	5.0
D008	Lead	5.0
D009 (Low Mercury Subcategory less than 260 mg/kg Mercury)	Mercury	0.2
D010	Selenium	5.7
D011	Silver	5.0

กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2531) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วทำยประกาศกระทรวงฯ ฉบับที่ 25 โดยกำหนดคุณสมบัติของสารมีพิษ ซึ่งเมื่อนำมาทำการสกัดสารด้วยวิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดแล้ว ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าใดค่าหนึ่งต่อไปนี้

Arsenic	> 5	มก./ล.
Cadimium	> 1	มก./ล.
Chromium	> 5	มก./ล.
Lead	> 5	มก./ล.
Mercury	> 0.2	มก./ล.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2531) ได้ออกประกาศกรมโรงงาน ฯ ฉบับที่ 1 เรื่อง กำหนดวิธีการเก็บ ทำลายฤทธิ์ กำจัด ฝัง ทิ้ง เคลื่อนย้ายและขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วสุภาพมาตรฐานที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

1. วิธีการทำลายสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วก่อนนำไปทิ้งหรือฝัง (ตารางที่ 3.11)
2. สิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (Solidification) จะต้องมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้
  - นำซึมผ่านได้ในอัตราต่ำกว่า  $1 \times 10^{-6}$  ซม./วินาที
  - รับแรงอัด (compressive strength) ได้ไม่น้อยกว่า 14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
  - มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
  - มีลักษณะแข็งคล้ายหิน ไม่ไหม้ไฟ ไม่มีกลิ่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.11 วิธีการทำลายฤทธิ์ของสิ่งปฏิภูลประเภทต่าง ๆ

(กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2531)

ประเภทสิ่งปฏิภูล	วิธีการทำลายฤทธิ์
1. กากตะกอนที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากตะกอนมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ ( $\text{HgS}$ ) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (Sodidification) ผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม (Additives) ผสมลงไปด้วย
2. กากจากการผลิตหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากที่อาจต้องผ่านการบดให้มีขนาดเล็กลงก่อน เพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ทั่วถึงมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ ( $\text{HgS}$ ) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (Sodidification) ด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม (Additives) ผสมลงไปด้วย
3. กากตะกอนหรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม, โครเมียม, ตะกั่ว, แมงกานีส เป็นต้น	ใช้สารละลายต่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ผสมกับกากตะกอนให้ทั่วกันจนสารโลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบของเกลือไฮดรอกไซด์ที่มีค่าพีเอช (pH) ของของผสมประมาณ 11 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ในกรณีที่เป็นกากตะกอนหรือฝุ่นที่เปื้อนด้วยแคดเมียม (Cd) จะต้องทำให้เป็นก้อนต่อด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์
4. กากตะกอนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ยามีขี้เถ้าแมลงยากำจัดศัตรูพืชหรือยากำจัดเชื้อราปนเปื้อน	เติมสารละลายต่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ในปริมาณที่สามารถจะทำลายพิษของตัวยาแต่ละชนิดได้หมด

## การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

จากการรวบรวมผลงานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดของเสีย โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ และวัสดุอื่นๆ สรุปผลงานวิจัยในช่วงปี 1986-1994 ได้ดังนี้

Shively และคณะ (1986) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักโดยการทำให้เป็นก้อน และทดสอบการชะละลายโลหะหนัก (Leaching Tests) และกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) โดยทดสอบโลหะหนัก 4 ชนิด คือ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว และทดสอบการชะละลายน้ำ 15 ครั้งในโลหะหนักแต่ละชนิด และโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสมกัน สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การทดสอบความเข้มข้นของน้ำสกัดจากของเสียทั้ง 4 ชนิด และของเสียผสมซึ่งผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์แล้วนั้น พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ U.S.EPA (สำหรับการสกัดโลหะหนักในครั้งแรก) ทั้งกรณีที่ใช้อัตราส่วนผสมน้ำ : ซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.5 และ 1.0 โดยค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของน้ำ จาก 0.5 เป็น 1.0 การละลายโลหะหนักออกจากของเสียแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเมื่อเริ่มการสกัดโลหะหนัก แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ในซีเมนต์จะทำหน้าที่ทำลายฤทธิ์ของกรดที่ใช้สกัดให้เป็นกลาง ทำให้ค่า pH มีค่ามากกว่า 10.0 และมีการละลายของสารในซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ในช่วงที่สองจะมีการละลายของโลหะหนักสูงสุด ค่า pH มีค่า  $< 6.0$  ในช่วงที่สามเมื่อทำการสกัดต่อไปการละลายของโลหะหนักจะเริ่มลดน้อยลง และการละลายจากการสกัดแต่ละครั้งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในของเสีย

2. จากการทดสอบกำลังแรงอัด (Compressive Strength) ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน พบว่าเมื่อใช้อาร์เซนิก และแคดเมียม มากำจัดโดยการทำให้เป็นก้อน จะทำให้กำลังแรงอัดของแท่งซีเมนต์ลดลงทั้งกรณีที่ใช้ค่า W/C 0.5 และ 1.0 ของเสียผสมจะลดกำลังรับแรงอัดเฉพาะค่า W/C 0.5 ส่วน โครเมียม และ ตะกั่ว นั้นจะไม่มีผลต่อกำลังแรงอัด

Baldwin และ คณะ (1987) ได้ทำการวิจัยกำจัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ ผสมกับของเสียหลายชนิด จำแนกเป็น 2 จำพวก คือ พวกที่เป็นของเหลว (Liquid Waste) ได้แก่ Oxidized solid Cyanide waste (in liquid form), Oxidised liquid cyanide waste และ Neutralized acid/alkali และพวกที่เป็นของแข็ง (Solid Waste) ได้แก่ เถ้าลอย (Pulverised Fly Ash) และซีโลหะจากเตาหลอม (Metal Slags) ทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของแท่งซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว อาทิ การทดสอบการชะละลาย (Leaching Test) กำลังแรงรับแรงอัด (Compressive Strength) Setting Rate ฯลฯ โดยใช้มาตรฐาน -

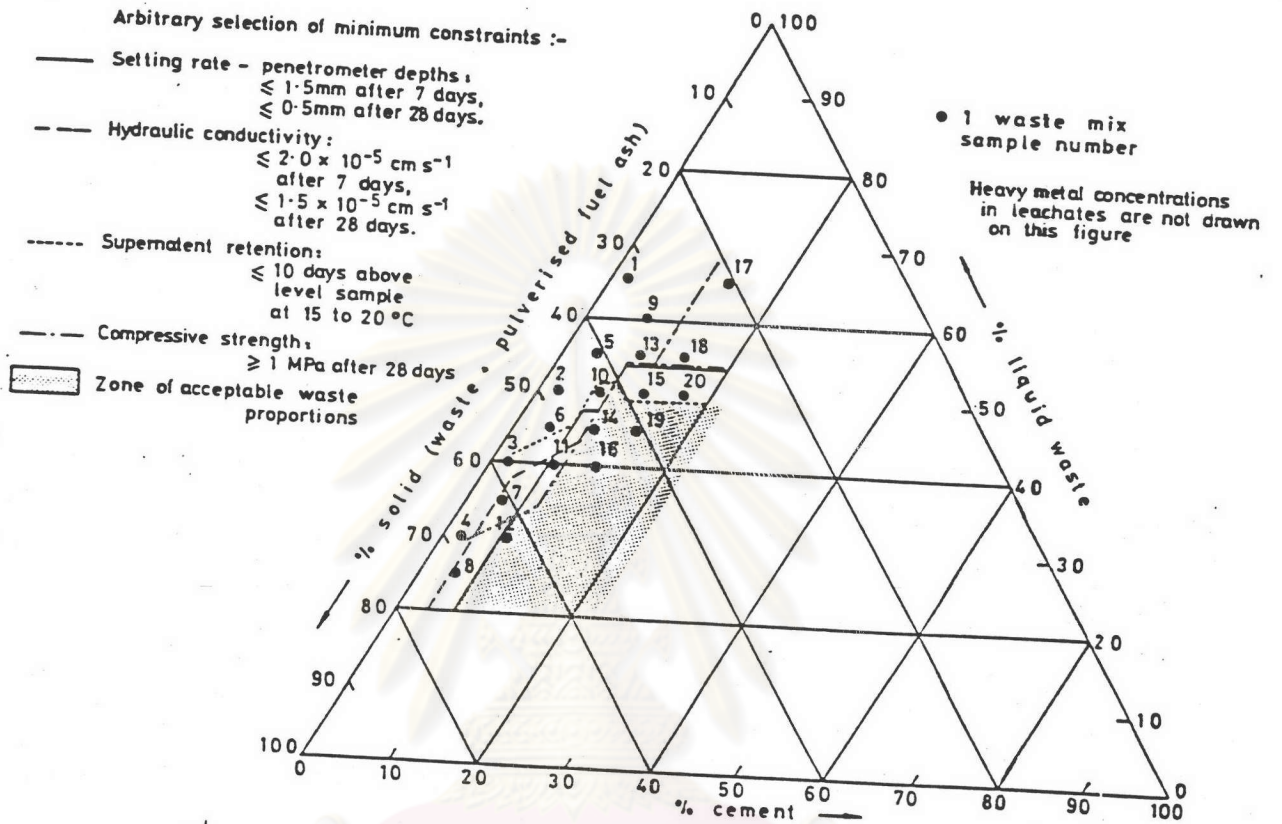
การทดสอบจาก Standard Waste Research Unit Method จากผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ของเสียในรูปของเหลว และของเสียในรูปของแข็ง มาเขียนกราฟ ทำให้สามารถทราบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.5

Shin และ Sujiwatthana (1988) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียอันตรายโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ โดยใช้ของเสีย 4 ชนิดคือ แคดเมียม ตะกั่ว อัลดริน (aldrin) และคลอเดน (Chlordane) และนำก้อนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วไปทดสอบการชะละลาย (Leaching Tests) และทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) สรุปผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ปริมาณของเสียที่ใช้ในการกำจัด ปริมาณ แคดเมียม ตะกั่ว อัลดริน และคลอเดน ในน้ำสกัดจากการชะละลายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของเสียที่เติมลงไป สำหรับกำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเสียลงในส่วนผสม
2. อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) อัตราส่วนผสม W/C ที่เหมาะสมที่ทำให้ความสามารถในการชะละลายของแคดเมียม ตะกั่ว อัลดริน และคลอเดนมีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 0.5 และที่อัตราส่วนผสม W/C 0.5 นี้ ทำให้ได้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการทดสอบที่ W/C 1.0 และ 0.25
3. ค่า pH ของสารที่ใช้สกัด (Extract Solution) สารสกัดที่มี pH ต่ำจะทำให้การชะละลายเพิ่มมากขึ้น
4. อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (AN ratio) ขนาดก้อนของแข็งที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากขึ้นจะทำให้ค่าการชะละลายเพิ่มมากขึ้น
5. ระยะเวลาการบ่ม ไม่มีผลมากนักต่อการชะละลาย แต่มันจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้น
6. วิธีการทำให้เป็นก้อนด้วย ซีเมนต์และซิลิกา จะเหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าสารอินทรีย์ที่ใช้มาแมลง

Bishop (1988) ได้ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (ดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3.4) ทดสอบการชะละลายค่าความเป็นต่างจากก้อนของเสีย 15 ครั้ง สามารถหาค่า Buffering Capacity ของของเสียดังกล่าวได้ 18.3 meq/g และจากการศึกษาการชะละลายโลหะหนัก 3 ชนิด คือ แคดเมียม โครเมียม และตะกั่วเพื่อศึกษาถึงกลไกของการยึดจับโลหะหนักในซีเมนต์แข็งตัว สรุปได้ว่า แคดเมียมจะอยู่ในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ และแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนหรือเกาะติดกับผนังของรูพรุนในซีเมนต์แข็งตัว ส่วนโครเมียมและตะกั่วมีส่วนร่วมในปฏิกิริยา การแข็งตัวของซีเมนต์ และเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกา





รูปที่ 3.5 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการกำจัดของเสียด้วยการทำให้เป็นก้อน (Baldwin และ คณะ, 1987)

Shin และ คณะ (1988) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ โดยการทำเป็นก้อนด้วยซีเมนต์ โดยมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์, น้ำต่อปูนซีเมนต์, ปริมาณของเสีย และปริมาณสาร Precipitator สรุปผลการวิจัยได้ว่า

1. การชะละลายของโลหะหนักได้แก่โครเมียมและสังกะสีจะลดลง เพื่อลดค่าอัตราส่วนทราย : ซีเมนต์ น้ำ : ซีเมนต์ และเพิ่มปริมาณสาร Precipitator
2. กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มตัว 14 วันจะเพิ่มขึ้น เมื่อลดอัตราส่วนทราย ซีเมนต์ น้ำ : ซีเมนต์ และปริมาณของเสียที่กำจัด
3. จากการวิเคราะห์โดย Anova analysis พบว่าอัตราส่วนทราย : ซีเมนต์จะมีผลต่อการชะละลายของโครเมียมและอัตราส่วนน้ำ : ซีเมนต์ จะมีผลต่อการชะละลายของสังกะสีและกำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์

4 จากผลการวิจัย เมื่อนำไปวิเคราะห์ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และพิจารณาถึง ปัจจัยต่าง ๆ เช่น ค่าใช้จ่าย, การชะละลายของโครเมียม และสังกะสีจะต้องต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ EPA คือ 5 และ 500 ppm และกำลังรับแรงอัด ต้องมีค่าสูงกว่า 10 กก./ซม<sup>2</sup> จะได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดกากตะกอนแห้ง 30 กรัม จะต้องใช้อัตราส่วนผสม ททราย : ซีเมนต์, น้ำ : ซีเมนต์ และปริมาณสาร precipitator เท่ากับ 1, 1.5 และ 1.075 กรัม ตามลำดับ

5. การใช้สาร precipitator และทราย จะไม่มีความสำคัญในทางเศรษฐศาสตร์และในทางปฏิบัติ

Jaggi (1988) ได้ศึกษาและทำการวิจัยกำจัดสารอันตรายจากโรงชุบโลหะอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมกำจัดศัตรูพืชซึ่งมีแคดเมียม ตะกั่ว และอัลตริน ปนเปื้อนอยู่ในของเสียตามลำดับ โดยใช้กระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยสารต่าง ๆ เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าจากแกลบ และผงซีเมนต์จากเตาที่โรงงานปูนซีเมนต์ ทดสอบคุณสมบัติของแท่งซีเมนต์แข็งตัว ได้แก่ กำลังรับแรงอัดและการชะละลาย จากผลการทดลองพบว่า การชะละลายของโลหะหนักและอัลตรินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเสียในอัตราส่วนผสม และเพิ่มอัตราส่วนของพื้นที่ผิว : ปริมาตรของแท่งซีเมนต์ และการชะละลายจะมีค่าน้อยลงเมื่อเพิ่ม pH ของสารสกัด การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด จะเกิดขึ้นเมื่อใช้ปริมาณของเสียต่ำๆ และเมื่อระยะเวลาบ่มตัวของแท่งซีเมนต์นานขึ้น อัตราส่วนผสม น้ำ : ซีเมนต์ 0.5 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ (แคดเมียมและตะกั่ว) และอัตราส่วนผสมที่ 0.35 จะเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ (อัลตริน)

จากการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน 3 ชนิด พบว่า ปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบจะเหมาะสมที่สุดสำหรับกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ และแบตเตอรี่ ปูนซีเมนต์เหมาะสมกับของเสียที่มีแคดเมียมได้ดี ผงซีเมนต์จากเตาเผาเหมาะสมกับของเสียที่เป็นยาฆ่าแมลง

Chang (1989) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักด้วย กระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และซีเถ้าจากแกลบ เปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักระหว่างการใส่ซีเมนต์อย่างเดียว กับซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ 1:1 โดยใช้โลหะหนักจากการสังเคราะห์ ได้แก่ โครเมียม ทองแดง และปรอท จากผลการวิจัยพบว่ากลไกการยึดเกาะโลหะหนักในซีเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญในการใช้อธิบายพฤติกรรมของการชะละลาย พันธะการยึดเกาะระหว่างโลหะหนักกับซีเมนต์ที่แตกต่างกันจะมีผลให้การชะละลายโลหะหนักแตกต่างกัน การชะละลายของโครเมียมในซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบจะสูงกว่าในซีเมนต์อย่างเดียว ในขณะที่การชะละลายของทองแดงและปรอทในซีเมนต์อย่างเดียว สูงกว่าซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ

ทองแดงและปรอทจะถูกยึดอยู่ในซีเมนต์ ในรูปพูนหรือดูดติดกับผนังของรูปพูนการชะละลายทองแดงและปรอท จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่าง จากผลการวิเคราะห์น้ำสกัดพบว่าค่าความเป็นด่างจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าการชะละลายของทองแดงและปรอทจากการเปรียบเทียบสารที่ใช้กำจัดโลหะหนักทั้ง 2 วิธี พบว่าวิธีกำจัดโดยใช้ซีเมนต์อย่างเดียวจะเหมาะกับการกำจัดโครเมียม ส่วนวิธีกำจัดโดยใช้ซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบเหมาะสำหรับกำจัดทองแดงและปรอท

Rijal (1990) ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดกากตะกอนน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยสารซีเมนต์ เพื่อกำจัดโลหะหนักในกากตะกอนน้ำเสีย ได้แก่ โครเมียม และสังกะสี และสารซีเมนต์ที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ (อัตราส่วน 1:1) ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักที่อัตราส่วนผสมของตัวแปรต่างๆ ผลการวิจัยพบว่า กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจะลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสมการชะละลายของโลหะหนักเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกากตะกอนกำลังรับแรงอัดจากการทดสอบตัวอย่างที่หล่อจากปูนซีเมนต์ จะสูงกว่าตัวอย่างที่หล่อจากปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ

การชะละลายโครเมียมในตัวอย่างที่หล่อจากปูนซีเมนต์จะต่ำกว่าในตัวอย่างที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบที่อัตราส่วนผสม กากตะกอน : ซีเมนต์ น้อยกว่า 0.2 แต่เมื่ออัตราส่วนผสมมากกว่า 0.5 การชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบจะต่ำกว่าตัวอย่างที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์สังกะสีจะถูกยึดเกาะในปูนซีเมนต์ได้ดีกว่าในส่วนผสมปูนซีเมนต์กับซีเถ้าแกลบ อัตราส่วนผสมกากตะกอน : ซีเมนต์ ที่เหมาะสมกับสารซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิดเท่ากับ 0.5

Youn (1990) ได้ทำการวิจัยกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย COD จากห้องปฏิบัติการโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ และวัสดุผสมของปูนขาวกับซีเถ้าแกลบ ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการชะละลายของแท่งซีเมนต์จากการทดลองพบว่า

กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่หล่อจากปูนซีเมนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มตัวและจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสมสำหรับตัวอย่างที่หล่อด้วยปูนขาวผสมซีเถ้าแกลบนั้น กำลังรับแรงอัดจะไม่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม กล่าวคือในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นและต่อไปจะค่อยๆ ลดลงและกำลังรับแรงอัดจะสูงขึ้นตามปริมาณกากตะกอนที่เพิ่มขึ้นการชะละลายจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของกากตะกอน

ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่หล่อจากปูนซีเมนต์ จะสูงกว่าตัวอย่างที่หล่อจากปูนขาวผสมซีเถ้าแกลบ

จากการศึกษานี้สรุปได้ว่าปูนขาวและซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์สามารถนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการทำให้เป็นก้อนได้ทำให้ค่าการชะละลายของโลหะหนักต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์มากและค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าสูงพอสำหรับการนำไปฝังกลบ

Shin และ คณะ (1990) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติการชะละลายของสารต่างๆ ต่อโลหะหนักที่ถูกทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย (Fly ash) ทดสอบสารชะละลาย 3 ชนิด คือ น้ำทะเล น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรดและน้ำกลั่น และใช้โลหะหนัก 3 ชนิด คือ แคดเมียม โครเมียมและตะกั่ว พบว่า ค่า pH และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการชะละลายการเติมเถ้าลอยลงในส่วนผสมซีเมนต์จะมีผลทำให้ค่า pH ของน้ำสกัดลดลง และจะเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด ในช่วง 60 วันที่ทำการทดสอบการชะละลาย ปริมาณแคดเมียมสะสมที่ถูกชะออกมาในน้ำทะเลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา แต่โลหะอื่นๆ อัตราการชะละลายจะลดลงตามระยะเวลา

ภายหลังการทดสอบ 60 วัน น้ำหนักของตัวอย่างจะลดลงเนื่องจากองค์ประกอบของปูนขาวและโลหะหนักจะถูกชะละลาย และขนาดของอนุภาคของโลหะหนัก กรณีที่ไม่ได้เติมเถ้าลอยจะมีขนาดเล็กลงในสภาวะที่ใช้ น้ำทะเลเป็นสารชะละลายโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาจะถูกทำให้ตกผลึกอีกครั้งหนึ่งภายใต้สภาวะที่เป็นต่างของน้ำทะเล สำหรับตัวอย่างที่เติมเถ้าลอยอนุภาคของโลหะหนักจะมีขนาดใหญ่กว่า ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยจะมีผลในการป้องกันการชะละลายของน้ำทะเลได้ และจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่มีของสารตัวอย่างด้วยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) และ X-ray diffraction analysis (XRD) พบว่าปูนขาวจะถูกชะละลายออกมาในขณะที่แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) ettringite และยิบซัม ( $\text{CaSO}_4$ ) จะเกิดขึ้นมาแทน

Stegemann Côté (1991) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการทดสอบของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (Solidified Waste) ภายใต้โครงการร่วมมือระหว่าง Environment Canada, US EPA. และ Alberta Environment ทดสอบของเสีย 5 ชนิด ได้แก่ สารละลายสังเคราะห์ (Synthetic Solution) ตะกอนสังเคราะห์ (Synthetic Sludge) Aluminum coil plating sludge Dredged sediment และ Wood preservation waste soil ทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และส่วนผสมอื่น ๆ และได้ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ อาทิ ความหนาแน่น ความชื้น การซึมของน้ำ กำลังรับแรงอัด ฯลฯ คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ การทดสอบการชะละลายด้วยวิธีต่าง ๆ และการตรวจสอบโดยใช้ X-ray Diffraction, Scanning Electron Microscopy และ Energy Dispersive X-ray Analysis ผลการทดสอบโดยเฉพาะตะกอนสังเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วยแคดเมียม โครเมียม นิกเกิล และปรอท 4,18,19 และ 0.2 มก./ก. สรุปได้ดังนี้

ก. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

- ความหนาแน่นจำเพาะ	2.55
- ความชื้น	2.6 %
- การซึมของน้ำ	$6 \times 10^{-9}$ M/S
- กำลังรับแรงอัด	1370 kpa

ข. การทดสอบการชะละลาย (TCLP)

พารามิเตอร์	ของเสีย (มก./ล.)	ของเสียผ่านการทำให้เป็นก้อน (มก./ล.)
pH	5.7	10.1
Cd	ND	-
Cr	ND	0.052
Ni	ND	0.34
Hg	2.8	0.51

Cheng และ Bishop (1992) ได้ทำการศึกษาการกระจายของโลหะหนักในแท่งซีเมนต์ ก่อนและภายหลังการทดสอบการชะละลายโดยใช้กรดอะซิติก ซีเมนต์จะถูกหล่อเป็นรูปทรงกลมด้วยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และกากตะกอนโลหะหนักได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และอาร์เซนิก โลหะหนักจะถูกวิเคราะห์โดยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) Energy dispersive X-ray (EDX) และ Wet digestion/AA Method จากผลการวิจัยพบว่า บริเวณผิวของตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยกรดอะซิติก แคลเซียมส่วนใหญ่ในองค์ประกอบของซีเมนต์จะถูกชะละลายออกมา ในขณะที่ซิลิกอน, เหล็ก และอลูมิเนียมยังคงเหลืออยู่ และสารดังกล่าวนี้จะมีคุณสมบัติในการดูดซับและดูดติดผิวได้ดี ดังนั้น โลหะหนักที่ละลายออกไปจะถูกดูดติดผิวที่บริเวณชั้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งจะช่วยป้องกันการชะละลายของโลหะหนักได้

จากการวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างพบว่าการชะละลายของโลหะหนักจะเกิดเฉพาะที่บริเวณชั้นผิวเท่านั้น ปริมาณโลหะหนักในชั้นที่ไม่มีการชะละลายยังคงมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงก่อนการทดสอบการชะละลาย

Yang และคณะ (1993) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการทำกากตะกอนปรอทให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์และปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัด โดยการเติมสารโพลิเมอร์ ลาเทกซ์ ลงในส่วนผสม จากผลการทดลอง พบว่า สารโพลิเมอร์ ลาเทกซ์ มากกว่า 3% จะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของก้อนของเสียจากการทดสอบ Freezing and thawing test ก้อนของเสียที่ไม่เติมสารโพลิเมอร์ ลาเทกซ์ จะเกิดการ

แตกร้าว ส่วนก่อนของเสียที่เติมสารโพลีเมอร์ ลาเทกซ์ จะไม่เกิดการแตกร้าว ผลดีของการเติมสารข้างต้นดังกล่าวยังช่วยลดความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจากการทำซ้ำด้วยวิธี TCLP พบว่าปริมาณโลหะหนักลดลงมาก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติมกับไม่เติมสารโพลีเมอร์ ทั้งนี้จากการทดสอบด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าผลของโพลีเมอร์ ลาเทกซ์ จะทำให้เกิดโครงสร้างเชื่อมโยงเป็นตาข่ายในเนื้อของของเสียแข็งตัว ซึ่งจะช่วยยึดจับโลหะหนักไม่ให้ถูกชะละลายออกมา

Leangon (1993) ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาหาวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนของกากตะกอน จากโรงงานฟอกหนัง และกากตะกอนจากโรงงานเคมีคอนดักเตอร์ โดยกากตะกอนจากโรงงานฟอกหนัง จะมีโครเมียมและสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ ส่วนกากตะกอนจากโรงงานเคมีคอนดักเตอร์ประกอบด้วย ทองแดง ตะกั่ว และดีบุก วัสดุประสาน 5 ชนิดที่นำมาใช้ทดลอง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เถ้าจากแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และซิลิกาฟูม จากการทดสอบกระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยใช้วัสดุประสานผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของก้อนของเสียแข็งตัว อาทิ กำลังรับแรงอัด การชะละลายและค่าใช้จ่ายในการกำจัด พบว่าวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกำจัดกากตะกอนดังกล่าวมีดังนี้

ปูนซีเมนต์ : เถ้าจากแกลบ : เถ้าลอยลิกไนต์

1. กากตะกอนจากโรงฟอกหนัง	0.7	:	0.2	:	0.1
2. กากตะกอนจากโรงงานเคมีคอนดักเตอร์	0.7	:	0.1	:	0.2

โดยสามารถกำจัดกากตะกอนได้สูงสุดในอัตราส่วน กากตะกอน : วัสดุประสาน 0.64 และ 1.37 ตามลำดับ

Fuessle และ Taylor (1994) ได้ทำการศึกษาการทำลายฤทธิ์ของฝุ่นจากเตาหลอมที่ใช้ไฟฟ้าอาร์ค โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ และส่วนผสมอื่น ได้แก่ เถ้าลอยและซิลิกาฟูม ศึกษาเปรียบเทียบผลของการเติมเถ้าลอยและซิลิกาฟูม ที่อัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อของเสีย 0.12 และ 0.2 โดยใช้ระยะเวลาบ่ม 60 วันและ 335 วัน จากผลการทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLP พบว่าที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมของวัสดุประสานจะช่วยให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าการใช้ซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสม ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลาย ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และนิกเกิล อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับที่ระยะเวลาบ่ม 335 วัน ซิลิกาฟูมทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการใช้เถ้าลอย โดยเฉพาะแคดเมียม ตะกั่ว และนิกเกิล