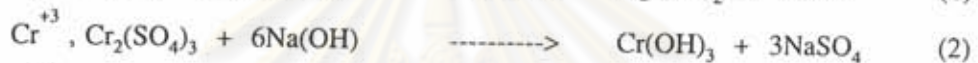


### บทที่ 3

#### บททวนเอกสาร

#### โลหะหนัก

โลหะหนักที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ โครเมียม , โปรท และเหล็กซึ่งอยู่ในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการบำบัดด้วยการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียที่ไขว้เคราะห์ค่าซีไอดีซึ่งในน้ำเสียนี้อมีปริมาณโลหะหนักจำนวนมาก ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการเคมีได้ดังนี้



#### ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญในทางวิศวกรรม โดยเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับทราย หิน และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้คอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะทำให้ได้คอนกรีตที่แข็งแรงทนทาน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,400 - 1,500 องศาเซลเซียส ส่วนประกอบของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักได้ดังนี้

สารประกอบ	ปริมาณ (%)
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
SO <sub>3</sub>	2.6
MgO	1.5
K <sub>2</sub> O	0.5
Na <sub>2</sub> O	0.3

เมื่อเผาส่วนประกอบข้างต้นนี้ของปูนซีเมนต์แล้วสารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม,ซิลิกา, อลูมินา และเหล็กจะทำปฏิกิริยาเคมีรวมตัวกันได้สารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิดได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต, ไดแคลเซียมซิลิเกต, ไตรแคลเซียมอลูมิเนต และเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงชื่อสารประกอบสูตรทางเคมีและชื่อย่อของสารประกอบในปูนซีเมนต์

ชื่อสารประกอบ	สูตรทางเคมี	ชื่อย่อ
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	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

อุดม หงษ์ประธานพร (พ.ศ.2533) กล่าวถึงสารประกอบทั้ง 4 ชนิดซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไว้ดังนี้

ไตรแคลเซียมซิลิเกต [ tricalcium silicate ,  $\text{C}_3\text{S}$  ] จะทำให้ปูนซีเมนต์รับกำลังได้เร็ว ให้กำลังสูง และเกิดความร้อนมาก

ไดแคลเซียมซิลิเกต [ dicalcium silicate ,  $\text{C}_2\text{S}$  ] จะทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้ช้า ให้กำลังสูง และเกิดความร้อนน้อย

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต [ tricalcium aluminate ,  $\text{C}_3\text{A}$  ] จะทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัวทันทีที่ผสมกับน้ำ ให้ความร้อนสูง โดยจะให้กำลังรับแรงเล็กน้อยในวันแรกและจะไม่ให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่จะมีประโยชน์ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต

เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ [ tetracalcium aluminoferrite ,  $\text{C}_4\text{AF}$  ] จะก่อตัวอย่างรวดเร็ว แต่ช้ากว่าและให้ความร้อนน้อยกว่าไตรแคลเซียมอลูมิเนตเล็กน้อย ส่วนการให้กำลังรับแรงยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน

ในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_2\text{S}$ ) รวมกันประมาณ 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และเป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพราะฉะนั้นจึงมีการศึกษาโดยใช้ X-ray diffraction เพื่อที่จะศึกษาสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ) สารประกอบไดแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_2\text{S}$ ) และตัวประสานแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต [Calcium-Silicate-Hydrate, C-S-H] ซึ่งเป็นตัวก่อให้เกิดการประสานและรับกำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลังจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว

จากตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ CaO และ SiO<sub>2</sub> รวมกันมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสารประกอบทั้งสองนี้เป็นสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตซึ่งจะทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีกำลังรับแรงได้สูง

### เถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอยเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตไฟฟ้าในการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงนั้นจะได้เถ้าลอยที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหินประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของถ่านหิน เถ้าของถ่านหินจะอยู่ในสภาพต่างกันโดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 จำพวกคือ

1.) เถ้าก้นเตา (bottom ash) ซึ่งมีขนาดใหญ่และตกลงก้นเตา  
2.) เถ้าตะกรัน (slag ash) เป็นเถ้าที่หลอมละลาย เกาะเป็นตะกรันที่ผนังของเตาเผาหรือหม้อน้ำ

3.) เถ้าลอย (fly ash) เป็นเถ้าที่มีเม็ดละเอียดโดยที่เถ้านี้จะลอยไปพร้อมกับแก๊สร้อนจากปล่องเตาจะถูกจับโดยเครื่องจับตกตะกอนเถ้า (precipitator) แล้วถูกส่งไปที่ถังเก็บ

เถ้าที่ได้จะเป็นเถ้าลอยประมาณร้อยละ 80 ของทั้งหมดซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 0.03 มิลลิเมตร ถึง 0.42 มิลลิเมตร และพบว่าเถ้าลอยจะมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์โดยพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักอาจจะสูงถึง 2 เท่าของปูนซีเมนต์ โดยมวลเถ้าลอยจะมีเม็ดค่อนข้างกลมจนถึงกลม (subrounded to rounded) ทั้งนี้เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.23 ถึง 2.48 สำหรับส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของถ่านหินซึ่งแตกต่างกันตามแหล่งต่างๆกัน แม้กระทั่งลิกไนต์ที่ขุดมาจากตำแหน่งที่ต่างกันแหล่งเดียวกัน โดยทั่วไปส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอยได้แก่ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub> และ C ทั้งนี้ส่วนประกอบต่างๆ เหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งที่มาของเถ้าลอยนั้นๆ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าเป็นปัญหาต่อการนำเถ้าลอยไปใช้งานเพราะขาดการควบคุมคุณภาพและคุณสมบัติต่างๆ ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาแสดงในตารางที่ 3.2, 3.3, 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.2 แสดงผลวิเคราะห์ธาตุอลูมิเนียมโดยวิธี X-ray Photoelectron Spectroscopy  
(ตัวอย่างเก็บเดือนเมษายน 2533 : Ratanasthien and others , 1990)

Element	Binding Energy	Atom %	
		Fly Ash	Bottom Ash
Fe	711.9	0.71	0.49
O	531.3	60.01	50.32
Na	497.0	2.79	0.41
N	399.4	1.53	0.36
Ca	346.7	3.17	8.44
Mg	305.7	1.28	2.38
K	292.0	0.84	-
C	284.2	7.24	23.74
S	168.0	10.81	1.13
Si	101.6	5.92	7.87
Al	74.2	5.72	5.86
	Total	100.00	100.00

ที่มา เอกสารสัมมนาทางวิชาการเรื่องศึกษภาพการนำธาตุอลูมิเนียมมาใช้ประโยชน์ของสำนักงาน  
วิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 ผลวิเคราะห์โดย X-ray Fluorescence ของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์จากแม่เมาะ  
(ตัวอย่างเก็บเดือนเมษายน 2533 : Ratanasthien and others , 1990)

Element	Fly Ash	Bottom Ash	High Ca Ash	High Si Ash
Al %	9.81	10.78	4.39	12.08
Fe %	11.01	8.04	11.17	7.05
Ca %	6.39	10.03	16.57	2.07
K %	1.38	1.83	0.72	1.54
Mg %	1.19	2.34	2.63	0.67
Na %	0.43	0.42	1.23	0.20
Si %	17.01	30.66	16.83	22.28
Ti %	0.13	0.20	0.00	0.21
As (ppm)	213	18.3	220	89.8
Ba (ppm)	690	740	1000	390
Ce (ppm)	54.1	65.6	22.7	66.5
Co (ppm)	33.7	32.8	26.3	20.9
Cr (ppm)	66.5	63.7	54.3	67.6
Cs (ppm)	26.0	25.7	15.3	26.1
Dy (ppm)	4.42	5.22	2.12	6.14
Hf (ppm)	5.19	5.92	2.16	6.35
La (ppm)	32.8	34.8	12.2	35.6
Mn (ppm)	582	500	814	260
Mo (ppm)	19.9	11.2	16.0	14.1
Ni (ppm)	53.3	52.1	102.9	27.6
U (ppm)	6.21	5.57	2.62	5.81
Rb (ppm)	144	151	66.3	163
Sb (ppm)	8.60	2.50	7.62	6.06
Sc (ppm)	23.0	25.6	9.69	27.1
Sm (ppm)	8.09	8.54	3.08	8.38
Sr (ppm)	700	720	1190	250
Ta (ppm)	0.58	0.68	0.34	0.65
Te (ppm)	17.1	16.9	8.01	19.3
V (ppm)	131	131	83.5	136
Yb (ppm)	6.20	5.91	1.90	7.49

ที่มา เอกสารสัมมนาทางวิชาการเรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์ของ  
สำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ตารางที่ 3.4 ผลวิเคราะห์ออกไซด์หลักของเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 3, 6, และ 9 (สรุปตัวอย่างเก็บเดือนกุมภาพันธ์ 2534 : Hart and others, 1993)

Major Oxide	Bottom Ash			Fly Ash (ESPA)				
	Unit 3	Unit 6	Unit 9	Unit 3/1	Unit 6/1	Unit 9/1	Unit 9/2	Unit 9/3
Loss or Ignition	1.38	1.89	4.73	1.38	0.80	1.90	1.49	2.98
SiO <sub>2</sub> %	31.64	45.45	44.29	38.27	46.02	46.82	46.42	44.86
TiO <sub>2</sub> %	0.34	0.42	0.40	0.38	0.44	0.43	0.43	0.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	17.08	26.09	24.93	18.60	26.44	26.26	26.29	25.88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	22.40	10.97	9.81	20.13	10.84	10.47	10.46	10.92
MgO %	3.54	2.04	2.15	3.19	1.96	2.05	2.08	2.05
CaO %	17.18	10.24	10.20	14.63	9.43	8.95	8.49	9.01
MnO %	0.09	0.08	0.07	0.08	0.06	0.07	0.05	0.06
K <sub>2</sub> O %	2.12	2.50	2.40	2.23	2.58	2.74	2.72	2.76
Na <sub>2</sub> O %	1.13	0.28	0.43	0.61	0.23	0.14	0.33	0.68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	0.18	0.13	0.12	0.16	0.11	0.11	0.11	0.15

ที่มา เอกสารสัมมนาทางวิชาการเรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยถ่านหินมาใช้ประโยชน์ของสำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติทางเคมีในรูปร้อยละของออกไซด์ของเถ้าลอยลิกไนต์

Month	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	Slaging Index	Fouling Index
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

ที่มา เอกสารสัมมนาทางวิชาการเรื่องศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์ ของสำนักงานวิจัยและพัฒนาวิชาการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

จากตารางข้างต้นแสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอยลิกไนต์ ได้แก่ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C 618-85 ได้แบ่งประเภทของเถ้าลอยตามปริมาณของ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ไว้ดังนี้

1.) เถ้าลอย class C จะมีส่วนประกอบของ SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อยู่ปริมาณไม่ต่ำกว่า 50 %

2.) เถ้าลอย class F จะมีส่วนประกอบของ SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อยู่ปริมาณไม่ต่ำกว่า 70 %

นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างเถ้าลอยทั้งสองชนิด คือเถ้าลอย class C ได้จากการเผาถ่านหินประเภทซับบิทูมินัสหรือลิกไนต์เป็นถ่านหินเกรดต่ำมีปริมาณคาร์บอนน้อย ส่วนเถ้าลอย class F ได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์หรือบิทูมินัส ซึ่งถ่านหินทั้งสองชนิดนี้ใช้กันมากในแถบยุโรป อเมริกาและญี่ปุ่น เป็นถ่านหินเกรดดี ให้พลังงานความร้อนมาก เพราะมีปริมาณคาร์บอนสูง มีความแข็งและเป็นถ่านหินที่เกิดมาก่อนถ่านหินประเภทอื่น

อนึ่ง เถ้าลอย class F จะมีปริมาณคาร์บอนหลงเหลืออยู่มาก และอาจมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่ด้วย ในขณะที่เถ้าลอย class C จะมีปริมาณสารทั้งสองเหลือน้อยกว่า แต่จะมีปริมาณ CaO ในปริมาณที่มากกว่า 10 % จึงจัดอยู่ในประเภทสารปอซโซลาน และตัวประสาน ทั้งนี้ เพราะเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซิลิกาและอลูมินาในเถ้าลอยนั่นเอง ส่วนเถ้าลอย class F เป็นสารปอซโซลานแต่เพียงอย่างเดียว ตารางที่ 3.6 แสดงมาตรฐาน ASTM C 618-85 ซึ่งเกี่ยวกับสารวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ

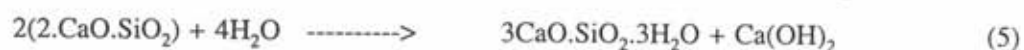
ตารางที่ 3.6 แสดงมาตรฐาน ASTM C 618-85 ซึ่งเกี่ยวกับสารวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ

		ชั้นของวัสดุผสม		
		N	F	C
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% น้อยที่สุด	70.0	70.0	50.0
SO <sub>3</sub>	% มากที่สุด	4.0	5.0	5.0
Pozzolan Index	% น้อยที่สุด	75	75	75
ปริมาณน้ำที่ต้องการ	% มากที่สุด	115	105	105

### ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

การผสมคอนกรีตด้วยเถ้าลอยลิกไนต์จะมีปฏิกิริยาที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับ

1.) ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว ปฏิกิริยาจะขึ้นกับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งสารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกันและกัน ผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันมีชื่อเรียกรวมๆว่า ซีเมนต์เจล (cement gel) ประกอบด้วยแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (C-S-H) ประมาณร้อยละ 50 - 90 โดยปริมาตร และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) อีกประมาณร้อยละ 20 - 25 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต เพราะมีปริมาณสูงสุด มีลักษณะเป็นผลึกที่หยาบมากและมีขนาดเล็ก ซึ่งมีการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ขั้นตอนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือ เมื่อผงซีเมนต์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำแล้วจะเกิดเป็นไฮเดรตคอมพาวนด์ โดยไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>2</sub>S) จะแตกตัวออกเป็นออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในสมการที่ 4 และ 5



ปฏิกิริยานี้จะดำเนินไปเรื่อยๆ โดยที่แคลเซียมไดออกไซด์ (CaO) จะแยกตัวออกจากมาจากแคลเซียมซิลิเกต (CaO.SiO<sub>2</sub>) ไปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) จนสารละลายนั้นอิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) หรือสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต (CaO.SiO<sub>2</sub>) ถูกทำปฏิกิริยาไปจนหมด

สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทั้ง 2 ส่วนได้แก่

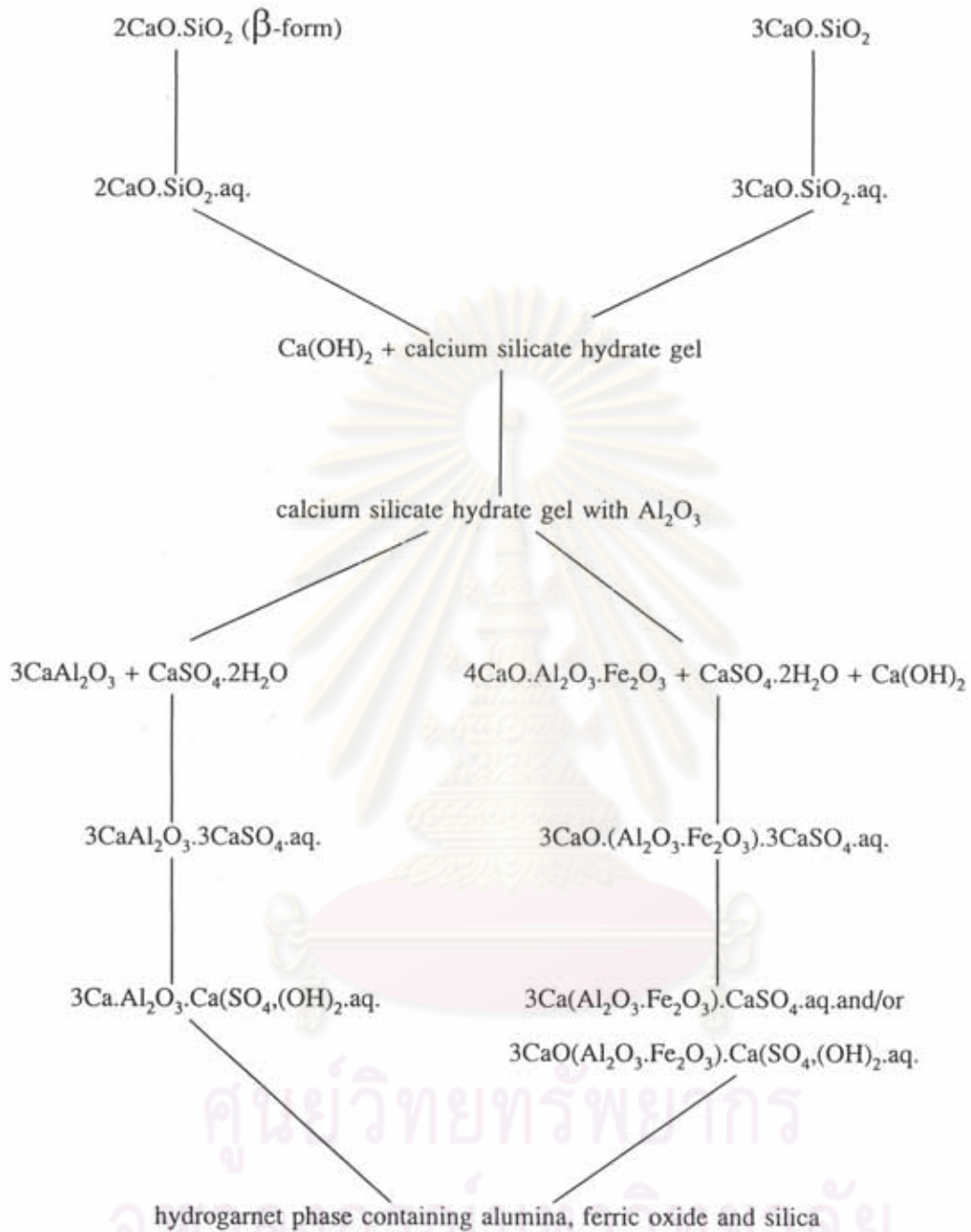
1.1) แคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (Calcium-Silicate-Hydrate , C-S-H) ซึ่งมีสูตรเคมีเป็น 3CaO.SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O ซึ่งเป็นตัวประสาน

1.2) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide , Ca(OH)<sub>2</sub>) เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีกถ้ามีสารประกอบที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา

2.) ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzalanic reaction) แก๊สลอยลิกไนต์เป็นสารปอซโซลานอย่างหนึ่งตามมาตรฐาน ASTM C 595 ซึ่งสารปอซโซลานหมายถึง วัสดุซึ่งตัวเองไม่มีสมบัติเป็นตัวประสาน แต่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และก่อตัวเป็นตัวประสานได้ ซึ่งมีสารประกอบหลักคือ SiO<sub>2</sub> , Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ CaO ดังนั้นถ้าใส่แก๊สลอยลิกไนต์ในสภาพบ่มเป็นฝุ่นผสมกับน้ำ CaO ส่วนที่เป็น free lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) นอกจากนี้วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของซีเมนต์พิเศษจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้สาร ประกอบแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรตเหมือนกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>2</sub>S) ที่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะเพิ่มขึ้นตามเวลา (age-hardening property) จนถึงขีดจำกัดขีดหนึ่งซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการเคมีดังต่อไปนี้



สารประกอบแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O) และสารประกอบแคลเซียม-อลูมินต-ไฮเดรต (3CaO.2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3H<sub>2</sub>O) เป็นสารประกอบที่ทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นซึ่งจากการศึกษาจะพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และการผสมแก๊สลอยเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะทำให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งเป็นการลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันลงด้วย



รูปที่ 3.1 แสดงผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ของเสียเสี่ยงอันตราย (hazardous waste)

มีผู้ให้ความหมายของของเสียเสี่ยงอันตรายไว้อย่างต่างกัน โดยที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ให้นิยามโดย Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) กล่าวไว้ว่าของเสียเสี่ยงอันตราย คือ ของเสียที่เป็นของแข็งหรือเป็นส่วนผสมของของเสียที่เป็นของแข็งหลายชนิดซึ่งด้วย ปริมาณ ความเข้มข้น หรือลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี หรือทางการติดเชื้อของของเสียเหล่านั้นอาจจะ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังนี้

1. การแพร่ขยายการตาย หรือการติดเชื้อที่ร้ายแรงที่ไม่สามารถรักษาได้ หรือสามารถ รักษาได้เพิ่มขึ้น

2. เป็นอันตรายอย่างปัจจุบันทันด่วน หรือมีแนวโน้มที่จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพของ มนุษย์ หรือต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อทำการบำบัด , การเก็บ , การขนส่ง , การทิ้ง หรือมีการจัดการที่ไม่ เหมาะสม

ทั้งนี้ความหมายของของแข็งนั้นรวมทั้ง ของกึ่งของแข็ง , ของเหลว และแก๊สที่ถูก บรรจุในบรรจุภัณฑ์ใดๆด้วย

นอกจากนี้ The U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA.) ได้ให้นิยาม เพิ่มเติมไว้ว่า ของเสียเสี่ยงอันตรายคือ ของเสียที่มีลักษณะที่เป็นอันตรายจะต้องอยู่ภายใต้ การควบคุมของกฎหมายต้องมีลักษณะตรงกับข้อใดข้อหนึ่งหรือหลายข้อรวมกันดังนี้

- แสดงถึงลักษณะที่สามารถจุดติดไฟได้ง่าย , มีฤทธิ์กัดกร่อน , เกิดปฏิกิริยากับวัสดุอื่น ได้ง่าย หรือมีความเป็นพิษ

- เป็นของเสียที่ไม่สามารถระบุที่มาได้ (มักเกิดจากกระบวนการในอุตสาหกรรม ต่างๆ)

- เป็นของเสียเฉพาะจากอุตสาหกรรมบางประเภท

- เป็นผลิตภัณฑ์ หรือวัสดุที่ได้จากสารเคมีที่ใช้ในการพาณิชย์กรรมบางประเภท

- เป็นส่วนผสมของสารที่ถูกกำหนดว่าเป็นของเสียเสี่ยงอันตราย

- เป็นวัสดุที่ไม่ถูกกำหนดไว้ในบทบัญญัติของ The Resource Conservation and Recovery Act , Subtitle C

ในขณะที่ของเสียเสี่ยงอันตรายตามคำจำกัดความของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติกล่าวไว้ว่า เป็นของเสียหรือสิ่งที่เจือปนด้วยของเสียที่มีความเข้มข้น หรือมี คุณสมบัติทางกายภาพ เคมีหรืออื่นๆซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการตาย หรือการเจ็บป่วยทั้งที่รักษา ได้ และรักษาไม่ได้ ตลอดจนทำให้เกิดหรือมีแนวโน้มจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของ มนุษย์และสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้มีการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด, เก็บกัก, ขนส่ง, และกำจัด (พีเชรพร ชาวกิจเจริญ 2536)

ของเสียเสี่ยงอันตราย จะต้องประกอบด้วยสารหรือมีลักษณะดังต่อไปนี้

- ไวไฟ หรือติดไฟง่าย (ignitibility) ได้แก่ ของเสียที่เกิดการติดไฟได้ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดอุบัติเหตุไฟไหม้

- เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (reactivity) หรือเกิดการระเบิดได้ (explosiveness) ได้แก่ ของเสียที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นเช่น ทำปฏิกิริยากับน้ำในสภาวะที่เหมาะสมอาจทำให้เกิดแก๊สพิษต่างๆ หรืออาจเกิดการระเบิดขึ้นได้

- การกัดกร่อน (corrosivity) ได้แก่ ของเสียที่สามารถทำปฏิกิริยาเกิดการกัดกร่อนของโลหะได้ เช่น ของเสียที่เป็นกรด หรือด่าง

- เป็นพิษ (toxicity) ได้แก่ ของเสียที่มีความเป็นพิษในตัวเองสามารถทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ เช่น ของเสียที่ประกอบด้วยโลหะหนัก

- ถูกชะล้างได้ (leachability) ได้แก่ ของเสียที่ถูกชะล้างโดยน้ำให้ปลดปล่อยสารที่เป็นอันตรายออกมา ซึ่งสามารถไหลไปปะปนในแหล่งน้ำต่างๆ

- ทำให้เกิดโรค (pathogenicity) ได้แก่ ของเสียที่มีพวกจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา ไวรัส ปะปนอยู่ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้อาจทำให้เกิดโรคได้ ถ้าสัมผัสหรือเข้าสู่ร่างกาย

ทั้งนี้สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติได้แบ่งประเภทของเสียเสี่ยงอันตรายไว้เป็น 14 ประเภท ได้แก่ น้ำมันต่างๆ, เศษเหลือของสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของเหลว, กากตะกอนของสารอินทรีย์, กากตะกอนของสารอนินทรีย์, กากตะกอนโลหะหนัก, สารทำลายต่างๆ, ของเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด, ของเสียที่มีฤทธิ์เป็นด่าง, ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาผิดแบบ (รวมทั้งวัตถุที่ไม่ได้มาตรฐาน), polychlorinated biphenyls (PCBs), เศษเหลือของสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารละลาย, ของเสียจากการล้างรูปภาพ, ของเสียติดเชื้อและของเสียชุมชน

การกำจัดของเสียเสี่ยงอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน (stabilization/solidification of hazardous waste)

การทำให้คงตัว (stabilization) หมายถึง กระบวนการที่ของเสียถูกเปลี่ยนแปลงทางเคมีให้มีความคงตัวมากขึ้น ทั้งนี้รวมทั้งการทำให้อยู่ในรูปที่ไม่สามารถละลายได้ ซึ่งจะกักธาตุหรือสารประกอบที่เป็นพิษไว้ในโครงสร้างทางผลึกของสารที่ทำให้เกิดความคงตัว แต่ไม่เหมือนกับ การทำให้สลัดจ์ที่เกิดจากการบำบัดคงตัว ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันแต่มีกระบวนการต่างกัน

การทำให้เป็นก้อน (solidification) หมายถึง กระบวนการที่มีการเติมสารบางชนิดลงในของเสีย เพื่อให้ได้ของแข็งที่มีเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีลักษณะทางกายภาพดีขึ้นและมีความคงตัวมากขึ้น ซึ่งทำให้มวลสารนั้นพร้อมที่จะถูกจัดการ หรือขนส่งต่อไป

การทำให้คงตัว และการทำให้เป็นก้อน เป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อป้องกันการละลายของสารเคมีที่เป็นของเสียเสี่ยงอันตราย และการปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นวัตถุประสงค์พื้นฐานของการทำให้คงตัว และการทำให้เป็นก้อนมีดังนี้

- ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของของเสียให้เหมาะสมในการเคลื่อนย้ายของเสียนั้น
- การลดพื้นที่ผิวของของเสียเพื่อป้องกัน หรือลดการรั่วไหลของสารมลพิษ
- การจำกัดการละลายของสารมลพิษที่อยู่ในของเสีย
- การกำจัดสารมลพิษออกจากของเสีย

ตารางที่ 3.7 แสดงกระบวนการกำจัดของเสียเสี่ยงอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อนประเภทต่างๆ 7 วิธี ได้แก่ Cement Based, Pozzolan (Lime Based), Thermoplastic, Organic Polymer, Surface Encapsulation, Self-cementing และ Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics ซึ่งการเลือกวิธีการบำบัดของเสียดังกล่าวควรเลือกให้เหมาะสมกับของเสียประเภทต่างๆ โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติเฉพาะของของเสีย สำหรับโลหะหนักนั้นสามารถกำจัดได้หลายวิธีเช่น Cement Based, Pozzalan (Lime Based), Thermoplastic, Surface Encapsulation และ Glassification

Rijal (1990) ได้สรุปข้อดีและข้อเสีย สำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี ไว้ในตารางที่ 3.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.7 แสดงกระบวนการกำจัดของเสียเสี่ยงอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน

กระบวนการการทำให้เป็นก้อน (solidification)	รายละเอียด
1. Cement Based	ของเสียจะถูกผสมลงไปนซีเมนต์ น้ำ และ ส่วนผสม อย่างอื่น ๆ และปล่อยให้แห้งจนแข็งตัวเป็นก้อนซีเมนต์
2. Pozzolanic (Lime Based)	ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาว และวัสดุที่มีคุณสมบัติ เป็นปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย , ผงซีเมนต์ที่เตาเผา เป็น ต้น ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งตัวได้เมื่อผสมน้ำแล้วปล่อยให้ แข็งตัว
3. Thermoplastic	นำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมให้ กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น bitumen , paraffin หรือ polyethylene ปล่อยให้ส่วนผสมเย็นตัว ลงและแข็งตัว
4. Organic Polymer	ของเสียในขั้นแรกจะถูกผสมกับสาร โพลีเมอร์ (gelling agents หรือ formadehyde) และเติมสารคะตะลิสต์ ผสมให้เข้ากันก่อนที่สาร โพลีเมอร์แข็งตัว
5. Surface Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันแน่น แล้วเคลือบผิวนอก ของของเสียที่ถูกบดอัดด้วยสารเคลือบเช่น polyethylene หรือ organic resins
6. Self-cementing	สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซิลเฟต และ แคลเซียมซิลไฟด์ ที่เกิดจากการ กำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ การกำจัดแก๊ส ซิลเฟอร์ ไดออกไซด์ สามารถนำมาใช้ผสมกับตะกอน ของเสียเพื่อหล่อให้แข็งตัวได้ โดยวัสดุที่ได้จะมี คุณสมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและมีความสามารถ ให้น้ำซึมได้น้อย
7. Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics	สารที่เป็นอันตรายมาก เช่น กากสารกัมมันตรังสี สามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็น ส่วนผสมของแก้ว หรือ synthetic silicate mineral เพื่อ ป้องกันการไม่ให้สารอันตรายนี้ถูกชะละลายด้วยน้ำ สามารถนำไปกำจัดต่อไปโดยไม่ต้องมีกระบวนการหุ้ม หรือบรรจุครั้งที่ 2

ตารางที่ 3.8 แสดงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี

ประเภท ของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Cement Based	chemical fixation solidification	แห้งหรือเปียก (โดยทั่วไปเหมาะ กับของเสียที่เป็น สารอนินทรีย์)	-วัสดุที่ใช้มีราคาถูก -มีความทนทานต่อ สภาพการเปลี่ยนแปลง ทางเคมี -กำจัดของเสียจำพวก โลหะหนักได้ดี -เป็นเทคโนโลยีที่ได้มี การพัฒนาชาติแล้ว	-ของเสียที่เป็นสาร อินทรีย์บางชนิดจะ ทำลายการแข็งตัวของ ซีเมนต์ -ซีเมนต์และของเสียที่ แข็งตัวแล้วถูกชะล้าง ได้ในสถานะที่มีค่า พีเอชต่ำ -เพิ่มน้ำหนักและขนาด ของของเสีย และเพิ่ม ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และการกลบฝัง
2. Lime Based	chemical fixation solidification	แห้งหรือเปียก (โดยทั่วไปเหมาะ กับของเสียที่เป็น สารอนินทรีย์)	-วัสดุที่ใช้มีราคาถูก -เป็นเทคโนโลยีที่ได้มี การพัฒนาชาติแล้ว -การใช้ได้ลดยมาเป็น ส่วนผสมเป็นการกำจัด ของเสีย 2 ชนิด โดยใช้ กระบวนการเดียวกัน	-เหมือนกับกระบวนการประเภท Cement Based
3. Thermoplastic Based	physical fixation	แห้ง (เหมาะกับ สารอนินทรีย์)	-สามารถลดการรั่วไหล ของสารเคมีได้เป็น อย่างดี -สารละลายที่ชะล้างมี ผลต่อผลิตภัณฑ์น้อย มาก	-ต้องการเครื่องมือที่มี ราคาแพง และต้องใช้ แรงงานที่มีความ ชำนาญ -ของเสียชนิดเปียกจะ ลดประสิทธิภาพ ของกระบวนการ -ไม่สามารถใช้กำจัด สารพวก Strong oxidants , dehydrated salts

ตารางที่ 3.8 แสดงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี (ต่อ)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
4. Organic Polymer Process	physical fixation	แห้งหรือเปียก (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	- ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิด polymer's matrix - ผลกระทบที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง	- ของเสียจะถูกยึดไว้ในโพลีเมอร์อย่างหลวมๆ - สารที่มีพีเอชต่ำจะทำให้โลหะละลายออกมาได้มากขึ้น - การย่อยสลายทางชีวภาพของสารโพลีเมอร์บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ
5. Encapsulation	chemical containment	แห้งหรือเปียก	- ผลกระทบที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี - ไม่มีการชะล้างของเสียออกมา เมื่อสารที่หุ้มห่ออยู่ไม่ถูกทำลาย - ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีอื่น	- การชะล้างของเสียจะเกิดขึ้น หากสารที่หุ้มถูกทำลาย - ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่ต้องกำจัดของเสียจำนวนมากๆ
6. Self Cementing	chemical fixation	แห้งหรือเปียก	- กระบวนการนี้ต้องการสารเติมในส่วนผสม ซึ่งจะช่วยให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก	- สารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการห่อหุ้มสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะละลายได้ภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำๆ



ตารางที่ 3.8 แสดงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี (ต่อ)

ประเภท ของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
7. Classification	physical fixation	แห้ง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก้วจะถูกชะล้างได้น้อยมาก</li> <li>- การบรรจุหุ้มห่ออยู่ในเกณฑ์ดี</li> <li>- วัสดุที่มีราคาถูก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อุณหภูมิสูงอาจทำให้มีของเสียอื่นระเหยออกมา</li> <li>- ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับการให้ความร้อนแก่อุปกรณ์และต้องการผู้ชำนาญเฉพาะ</li> <li>- ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการกำจัดของเสียทุกชนิด ขกเว้นสารกัมมันตภาพรังสี และสารที่มีพิษมากๆ</li> </ul>

ที่มา Rijal (1990)

ดังนั้นจะเห็นว่ากระบวนการการบำบัด โดยทำให้เป็นก้อนมีหลายวิธีและแต่ละวิธีสามารถใช้ได้กับของเสียที่แตกต่างกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.9 ซึ่งเป็นการแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้กระบวนการต่างๆที่ใช้กับของเสียที่แตกต่างกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.9 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้ของกระบวนการต่างๆที่ใช้กับของเสียที่แตกต่างกัน

ประเภทของของเสีย	Cement Based	Lime Based	Thermoplastic Encapsulation	Thermosetting Micro Encapsulation	Macro Encapsulation
สารอินทรีย์ - สารละลายที่เป็นสารอินทรีย์และน้ำมัน	จะมีการจัดวางการก่อดัวซึ่งจะออกจากคอนกรีตในรูปสารระเหย	จะมีการจัดวางการก่อดัวซึ่งจะออกจากคอนกรีตในรูปสารระเหย	สารอินทรีย์อาจจะระเหยออกมาขณะที่ทำการให้ความร้อน	อาจจะหน่วงเหนี่ยวการก่อดัวของโพลิเมอร์	จะถูกดูดเข้าไปในโครงสร้างของมวลของแข็ง
สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของแข็ง(เช่นเส้นใยพลาสติก)	มักจะเป็นผลดีต่อการเพิ่มความทนทาน	มักจะเป็นผลดีต่อการเพิ่มความทนทาน	มักใช้เป็นวัสดุที่ใช้ในการผสมสาร(binding agent)	อาจจะหน่วงเหนี่ยวการก่อดัวของโพลิเมอร์	สามารถเข้าได้ดีกับวัสดุที่ใช้เป็นตัวผนึกที่เป็นพลาสติก
สารอินทรีย์ของเสียที่เป็นกรด	ซีเมนต์จะทำการสะเทินให้เป็นกลาง	สามารถเข้ากันได้ดี	ต้องมีการทำการสะเทินก่อนการทำผนึก	สามารถเข้ากันได้ดี	ต้องมีการทำการสะเทินก่อนการทำผนึก
Oxidizers	สามารถเข้ากันได้ดี	สามารถเข้ากันได้ดี	อาจจะทำให้โครงสร้างของแข็งที่ก่อดัวแล้วพังทลายได้	อาจจะทำให้โครงสร้างของแข็งที่ก่อดัวแล้วพังทลายได้	อาจจะทำให้วัสดุที่ทำการผนึกตัวเสียหายได้
Sulphates	อาจเป็นการหน่วงเหนี่ยวการก่อดัวถ้าไม่ใช้ซีเมนต์ที่มีลักษณะพิเศษ	สามารถเข้ากันได้ดี	อาจเกิดการสูญเสียน้ำมากเกินไปจนทำให้เกิดการแยกตัวของมวลผลและซีเมนต์	สามารถเข้ากันได้ดี	สามารถเข้ากันได้ดี

ตารางที่ 3.9 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้ของกระบวนการต่างๆที่ใช้กับของเสียที่แตกต่างกัน  
(ต่อ)

ประเภทของ ของเสีย	Cement Based	Lime Based	Thermoplastic Encapsulation	Thermosetting Micro Encapsulation	Macro Encapsulation
Halides	สามารถถูกชะ ละลายออกจาก ซีเมนต์ได้ง่าย และอาจจะ หน่วงการก่อตัว	สามารถถูกชะ ละลายออกจาก ซีเมนต์ได้ง่าย และอาจจะ หน่วงการก่อตัว	อาจเกิดการสูญ เสียน้ำมากเกินไป	สามารถเข้ากัน ได้ดี	สามารถเข้ากัน ได้ดี
โลหะหนัก	สามารถเข้ากัน ได้ดี	สามารถเข้ากัน ได้ดี	สามารถเข้ากัน ได้ดี	พีเอชที่เป็นกรด จะทำให้เกิดการ ละลายกลับมา ใหม่ของโลหะ ไฮดรอกไซด์	สามารถเข้ากัน ได้ดี
สารกัมมันต- ภาพรังสี	สามารถเข้ากัน ได้ดี	สามารถเข้ากัน ได้ดี	สามารถเข้ากัน ได้ดี	สามารถเข้ากัน ได้ดี	สามารถเข้ากัน ได้ดี

ที่มา) Khomgrit Leangon (1993)

#### การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ (Cement-based Technique)

กระบวนการที่ทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ประกอบด้วย การผสมของเสียกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และสารผสมเพิ่มอื่น ได้แก่ เถ้าลอย, ซิลิกา, ชัลไฟด์ เป็นต้น โลหะหนักหลายชนิดในของเสียจะถูกเปลี่ยนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซิลิเกตที่ไม่ละลายน้ำในสภาพแวดล้อมซึ่งมีความเป็นด่างสูงมากในปูนซีเมนต์และจะถูกจับไว้ภายในช่องว่างของโครงสร้างของส่วนผสมซีเมนต์ (Bishop, 1988) สรุปข้อดีข้อเสียได้ดังนี้

##### ข้อดี

1. สารที่เติมในส่วนผสมสามารถหาได้ง่าย
2. เทคนิคการผสมซีเมนต์ไม่ยุ่งยาก
3. วิธีการนี้สามารถทนต่อสารเคมีหลายชนิดในตะกอนของแข็งได้เป็นอย่างดี
4. เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการมีอยู่ทั่วไปหาได้ง่าย

5. ความแข็งแรงและความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแข็งตัวสามารถปรับได้ โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมลงในของเสีย
6. วัสดุที่ใช้มีราคาถูก

#### ข้อเสีย

1. ไม่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์บางชนิดที่จะทำลายกลไกการแข็งตัวของซีเมนต์
2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถถูกชะละลายได้ในสภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำ
3. การเพิ่มน้ำหนักของของเสีย โดยการหล่อด้วยซีเมนต์จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งของเสียไปกำจัดเพิ่มขึ้น

#### กลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์

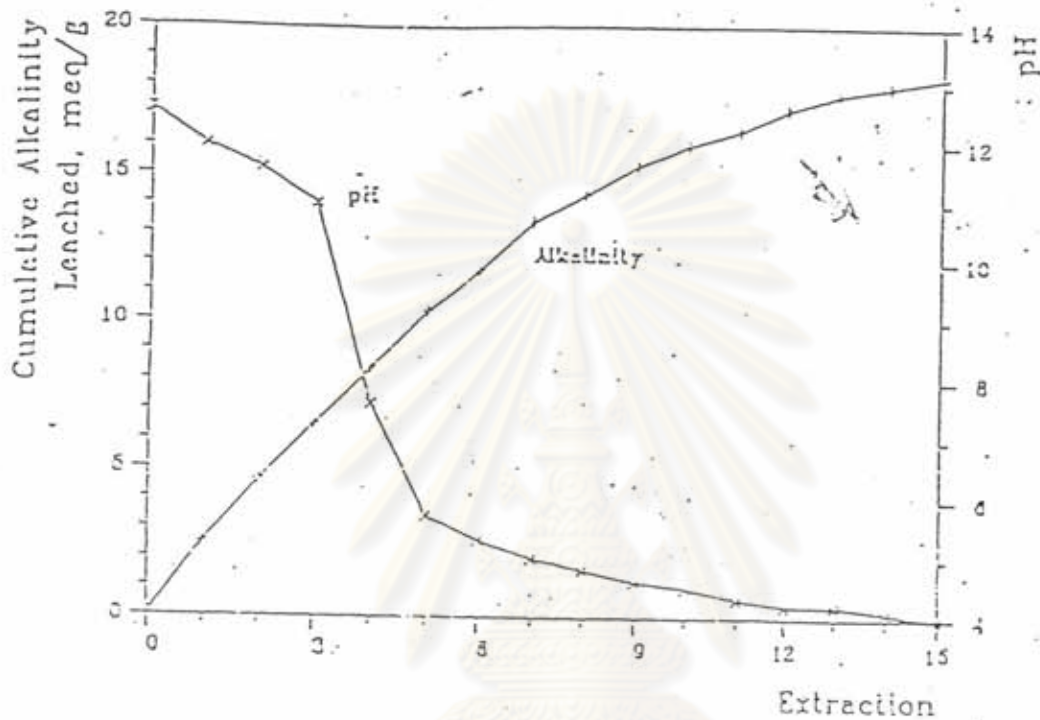
ได้มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์หลายท่านดังต่อไปนี้

Bishop (1988) ได้ทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการชะละลายโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (Cement-based Solidification) โดยใช้ของเสียสังเคราะห์ที่เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว โดยได้ศึกษาถึง buffering capacity ของวัสดุที่แข็งตัวจากการกำจัดโลหะหนัก และกลไกการยึดจับโลหะหนักของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในของเสียที่ถูกทำให้เป็นก้อน สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

#### 1. ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (buffering capacity)

จากการทดสอบ leaching test กับของเสียที่แข็งตัวในซีเมนต์โดยการชะละลายของเสียที่แข็งตัวด้วยกรดอะซิติก แล้วทำการชะละลายติดต่อกันอีกเป็นจำนวนทั้งหมด 15 ครั้ง นำมาตรวจวัดค่าพีเอช และค่าความเป็นด่าง (alkalinity) แล้วนำไปเขียนกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อทำการชะละลายของเสียที่แข็งตัวหลายๆ ครั้งพบว่า ค่าพีเอชของกรดที่ผ่านการชะละลายแล้วมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเกือบคงที่ในครั้งที่ 15 ส่วนค่าความเป็นด่างสะสม (cumulative alkalinity) จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยในครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะละลายได้จะเหลือน้อยมากซึ่งมีค่าประมาณ 1.7% ของค่าความเป็นด่างที่สะสมทั้งหมด โดยความเป็นด่างจะถูกชะละลายออกมามากในช่วงต้น และลดลงตามลำดับจนถึงครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างสะสมถึงการชะละลายในครั้งที่ 15 มีค่าเท่ากับ 18.3 meq/g ซึ่งถือว่าเป็นค่า buffering capacity ของของเสียแข็งตัว

ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะละลายออกมาแต่ละครั้งนี่จะเป็นตัวควบคุมพีเอชของการชะละลายโดยการสะท้อนกรดอะซิดิกที่ใช้ในการทดลองให้เป็นกลาง



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างจากการทดสอบการชะละลาย

## 2. กลไกการยึดจับโลหะ (mechanism of fixation)

จากกราฟรูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะที่ถูกชะละลาย (แคลเซียม, โครเมียม, และตะกั่ว) กับค่าความเป็นด่าง และซิลิกอน ซึ่งจะถูกระบายมากขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลงต่ำกว่า 6.0 จากการทดลองที่ผ่านมาหลายๆ ครั้งทำให้ทราบว่าโลหะหนักอาจจะอยู่ในโครงสร้างของของเสี้ยวที่แข็งตัวในรูปแบบต่างๆ เช่นอยู่ในรูพรุนของโครงสร้างภายในของของเสี้ยวที่แข็งตัว, ถูกเกาะติดกับผนังรูพรุน, และทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์

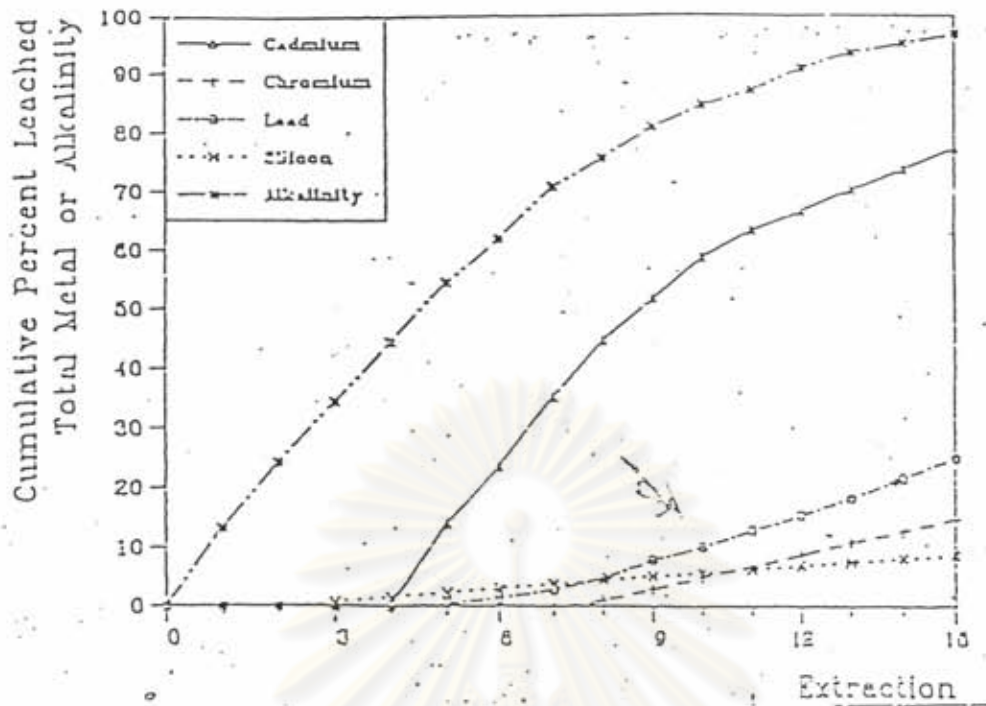
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมจะถูกชะละลายออกมาได้มากกว่าโครเมียม และตะกั่วซึ่งถูกชะละลายออกมาได้น้อย

กรณีที่โลหะหนักถูกล้อมอยู่ในของแข็ง หรืออยู่ในรูปพรุน หรือเกาะติดผิวรูปพรุนแล้ว โลหะหนักเหล่านั้นควรจะถูกระบายออกมาคล้ายกับการชะละลายออกมากำค่าความเป็นด่าง (alkalinity) จากรูปที่ 3.3 เส้นกราฟของแคลเซียมสะสมถูกชะละลายออกมากจะคล้ายคลึงกับเส้นกราฟของค่าความเป็นด่างสะสมที่ถูกชะละลายออกมา ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่าแคลเซียมอาจจะอยู่ในของเสี้ยวที่แข็งตัวในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยอยู่ตามรูปพรุนและเกาะติดอยู่กับผนังของรูปพรุน

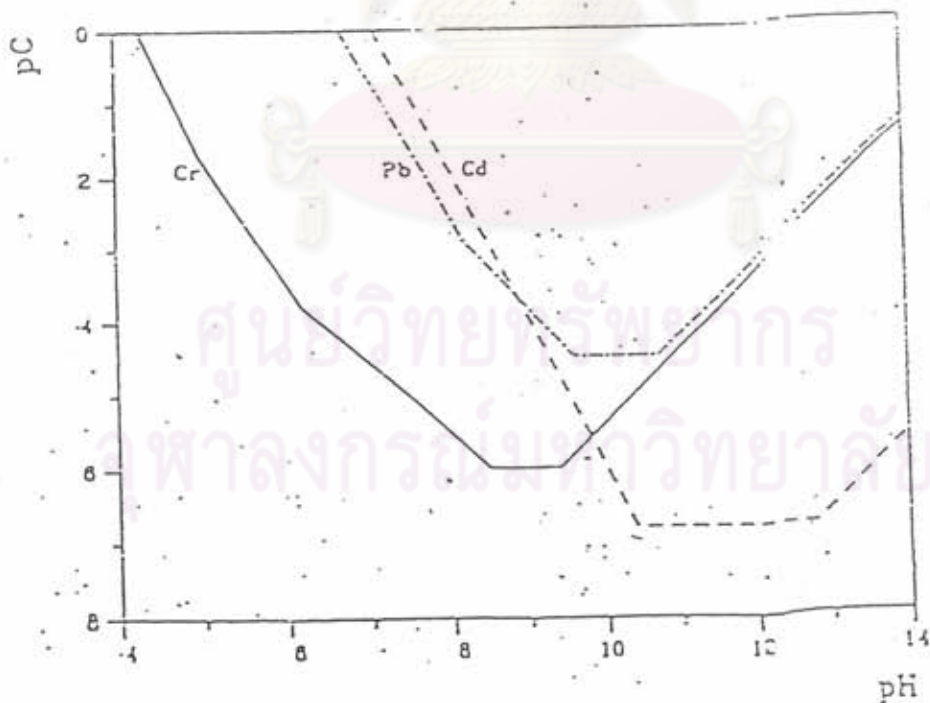
สำหรับโครเมียมและตะกั่วนั้นเมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟแล้วจะมีรูปแบบของการถูกชะละลายคล้ายกับการชะละลายของซิลิกอนซึ่งเป็นสารที่อยู่ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์และทราย ดังนั้นจึงเชื่อว่าโครเมียมและตะกั่วจะถูกยึดติดอยู่ในโครงสร้างของซิลิกอนมากกว่าเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูปพรุน การชะละลายของโครเมียมและตะกั่วค่อนข้างยากที่จะเกิดขึ้นเฉพาะที่พีเอชต่ำๆ และต่ำกว่าพีเอชในการชะละลายแคลเซียม อัตราการชะละลายของโลหะหนักทั้งสองนี้มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการชะละลายที่คาดคะเนจากการชะละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ แสดงว่าโลหะทั้งสองนี้จะเกาะติดอย่างแข็งแรงภายในโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกา และถูกชะละลายออกเมื่อโครงสร้างของซิลิกานี้ถูกทำลาย

รูปที่ 3.4 แสดงถึงกราฟ pC - pH diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม, โครเมียม, และตะกั่วในสารละลายที่มีค่า ionic strength 0.75 โมลาร์ พบว่าในขณะที่เริ่มผสมปูนซีเมนต์และส่วนผสมอื่นๆ ค่าพีเอชจะมีค่าสูงประมาณ 12-13 ซึ่งทำให้แคลเซียมส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ และอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นของแข็งที่อยู่ในรูปพรุนของซีเมนต์ ส่วนโครเมียมและตะกั่วจะละลายน้ำได้ และมีส่วนในปฏิกิริยาการก่อตัวของซีเมนต์ และเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกเกต จากสาเหตุดังกล่าวนี้จึงอธิบายได้ว่าแคลเซียมจะถูกชะละลายออกมาเช่นเดียวกับค่าความเป็นด่าง ส่วนโครเมียมและตะกั่วจะถูกชะละลายออกมาโดยขึ้นอยู่กับการละลายของซิลิกเกต

ภายหลังการทดลอง leaching test ได้วิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งของสารทั้งหมดพบว่าหลังจากการทดลองชะละลาย 15 ครั้ง ปริมาณสารที่ถูกชะละลายออกไปประมาณ 50-70 % ของปริมาณทั้งหมดก่อนการทดลอง แต่ว่ายังมีโลหะหนักเหลืออยู่โดยมีแคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว เหลืออยู่ 50 , 85 และ 75 % ตามลำดับ และมีโลหะที่เป็นสารประกอบโดยปกติในซีเมนต์ ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็ก และซิลิกอนเหลืออยู่ 90 , 98 และ 80 % ตามลำดับ และแคลเซียมเหลืออยู่ 8% ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์ที่แข็งตัวสามารถยึดติดกับโลหะหนักได้ดี และยากที่จะทำการชะละลายโลหะหนักออกจากซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วดังกล่าว



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายกับค่าความเป็นด่าง และซิลิกอนจากการทดสอบการชะละลาย



รูปที่ 3.4 กราฟแสดง pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม , โครเมียมและตะกั่ว

Poon (1985) ได้ทำการศึกษากลไกการยึดจับของสังกะสีและปรอทโดยใช้วิธี Cement/Silicate Stabilization ในงานวิจัยนี้ได้มีการทำ leaching test, การส่องดูอนุภาคต่างๆ ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM), การวิเคราะห์สารต่างๆ ด้วย X-ray Diffraction (XRD), และการทำ porosimetry ดังจะสามารถสรุปได้ดังนี้

เมื่อใช้ SEM มองดูตัวอย่างซีเมนต์ที่ไม่มีการผสมโซเดียมซิลิเกตหรือโลหะหนักใดๆ พบว่าผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยของแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (C-S-H), ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นรูปหลอดของ Ettringite และผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ต่อมาเมื่อใช้มองดูตัวอย่างซีเมนต์ที่มีการผสมโซเดียมซิลิเกต (ซึ่งจะได้สารที่เรียกว่าในบทความนี้ว่า "Chemfix") แต่ไม่ได้ผสมโลหะหนัก พบว่านอกจากจะพบผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่กล่าวมาข้างบนแล้ว พบว่ามี calcium silicate gel อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อใช้ SEM ไปส่องดูตัวอย่าง Chemfix ที่มีการผสม  $Zn^{2+}$  ประมาณ 2% พบว่าไม่มีผลิตภัณฑ์เส้นใยของ C-S-H และผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่พบว่ามีผลิตภัณฑ์หลอดของ Ettringite เต็มไปหมดและปรากฏว่ามีแผ่นและปริซึมรูปหกเหลี่ยมของ Monosulfate (Afm) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 นอกจากนี้ยังพบว่ามีช่องว่างเต็มไปหมด (ซึ่งผลต่างๆ เหล่านี้ยังเห็นได้เด่นชัดยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มการผสม  $Zn^{2+}$  เป็น 6%) แต่จากผลการทำ leaching test แล้วพบว่าปริมาณ  $Zn^{2+}$  รั่วไหลออกมาน้อยตลอดการทดลอง นอกจากนี้จากผลของ porosimetry studies ยังได้ยืนยันว่าในตัวอย่างของ Chemfix ที่มี  $Zn^{2+}$  นั้นมีรูพรุนเกิดขึ้นมากมายและยังทำให้รูพรุนเหล่านั้นมีขนาดใหญ่มากขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.7-3.8 และจากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์หายไป, มี  $C_3A$  ลดลง, ผลิตภัณฑ์ของ Ettringite ใหญ่ขึ้น, และยังพบสารที่ไม่สามารถจำแนกได้ว่าเป็นสารอะไรอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.6

ส่วนใน Chemfix ที่มี  $Hg^{2+}$  ผสมอยู่ จากผลการทำ leaching test พบว่ามีปริมาณ  $Hg^{2+}$  ที่รั่วไหลออกมามากตั้งแต่เริ่มการทดลอง ส่วนผลจากการทำ porosimetry studies ของตัวอย่างนี้พบว่ามีค่าความพรุนใกล้เคียงกับตัวอย่างที่มีเพียง Chemfix และมีความพรุนต่ำกว่าตัวอย่าง Chemfix ที่มี  $Zn^{2+}$  ผสมอยู่ดังแสดงในรูปที่ 3.8 นอกจากนี้จากผลของการวิเคราะห์ XRD และ SEM นั้น ไม่พบว่า  $Hg^{2+}$  ได้ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ หรือโซเดียมซิลิเกตดังแสดงในรูปที่ 3.10-3.11

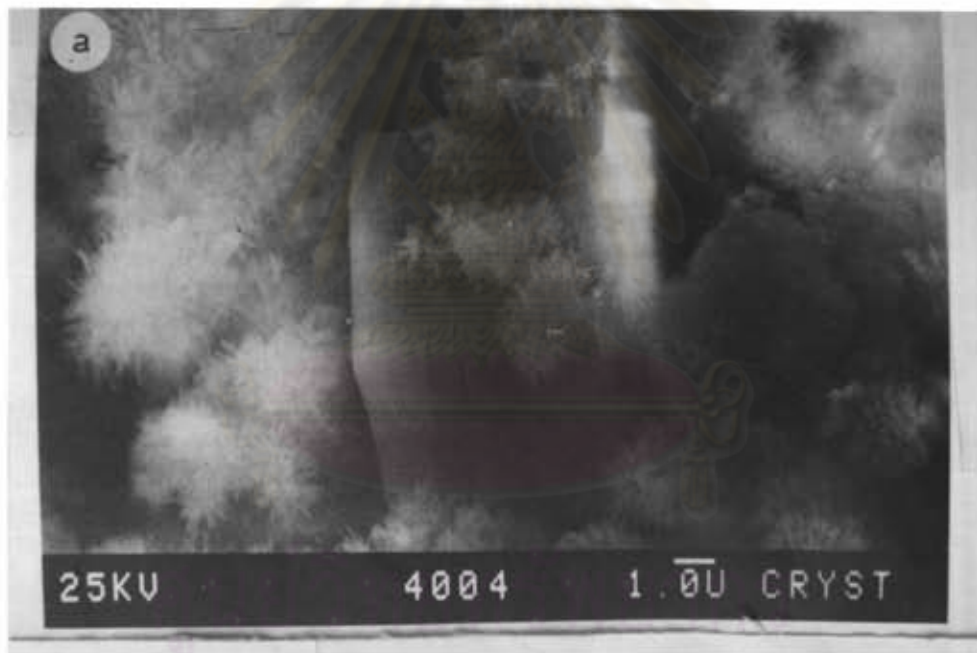
ดังนั้นจากผลการทดลองของงานวิจัยทั้งสองนี้สามารถสรุปได้ว่ากลไกที่ใช้ยึดจับโลหะหนักนั้นมีลักษณะแตกต่างกัน 2 กลไกคือ

1. chemical stabilization ไอออนของโลหะหนักนั้นอาจจะทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นมาใหม่ซึ่งยึดติดอยู่กับโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ได้ดีแม้ว่าจะมีรูพรุนเกิดขึ้นมากมาย หรืออาจจะกล่าวได้ว่า



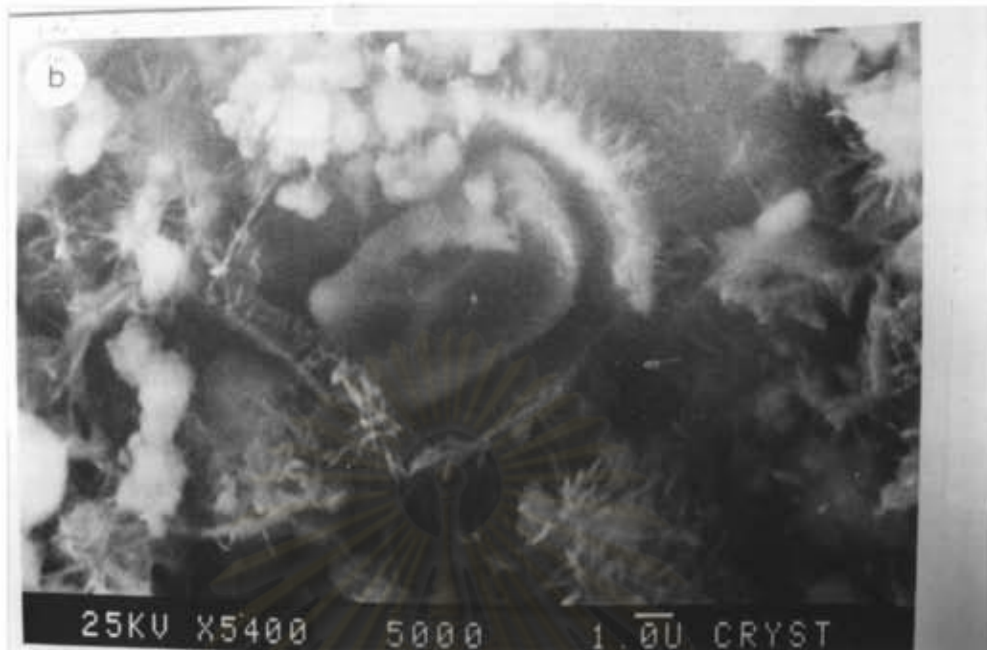
โครงสร้างของซีเมนต์ทดสอบได้ดีแม้ว่าจะมีรูพรุนเกิดขึ้นมากมาย หรืออาจจะกล่าวได้ว่า permeability มีผลต่อกลไกประเภทนี้น้อย เว้นแต่ว่าโครงสร้างของซีเมนต์ที่มีโลหะหนักยึดติดอยู่นั้นพังทลายลง จึงทำให้มีปริมาณไอออนของโลหะหนักรั่วไหลออกมา

2.physical entrapment ไอออนของโลหะหนักนั้นไม่ได้ทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ซึ่งเป็นไปได้ว่ามันยึดอยู่เพียงหลวมๆกับโครงสร้างซีเมนต์เท่านั้น จะทำให้ permeability ของก้อนซีเมนต์นั้นมีผลต่อการถูกชะละลายของโลหะหนัก ถ้ามีการเติมสารผสมเพิ่มบางตัวเช่น pulverized fly ash หรือ fumed silica เป็นต้น ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วเกิด amorphous C-S-H เพื่อไปเติมช่องว่างที่เกิดขึ้นซึ่งอาจจะทำให้สามารถลดปริมาณไอออนโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาได้

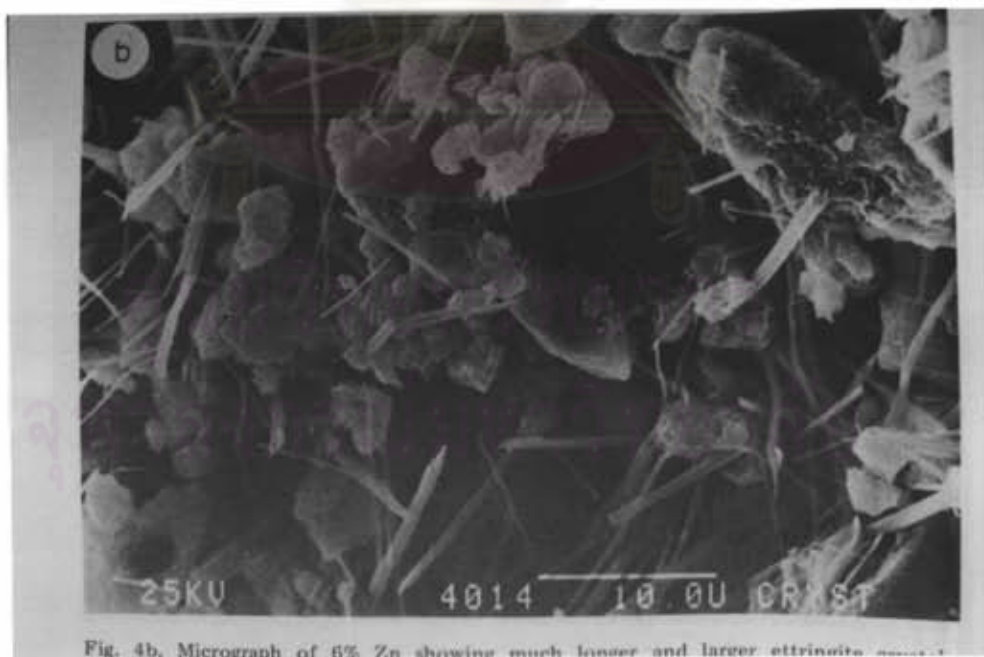


## จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

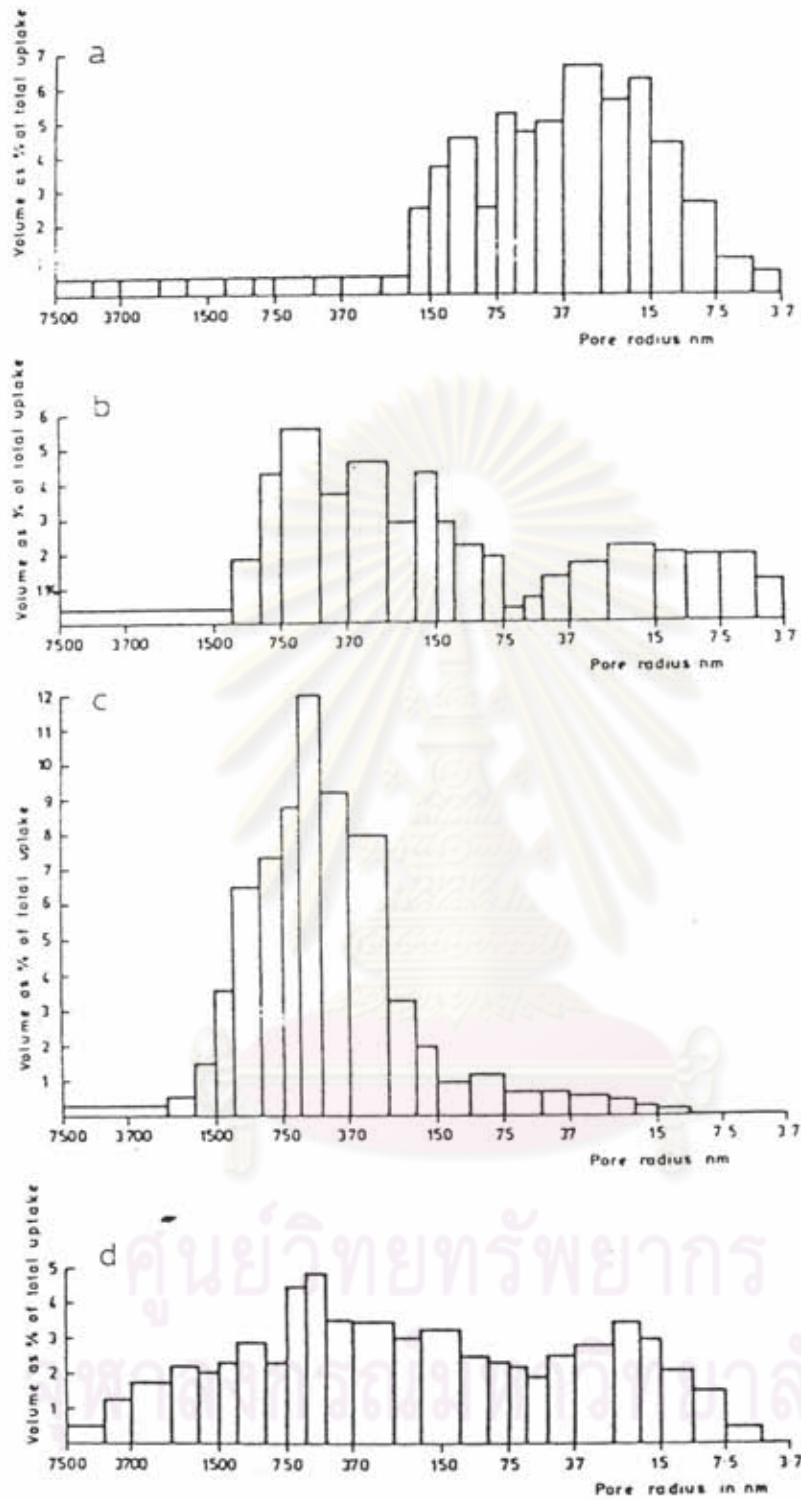
รูปที่ 3.5 Micrograph ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ธรรมดา แสดงให้เห็นว่ามีผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ขนาดใหญ่ และมีกลุ่มเส้นใยของแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรตซึ่งแทงทะลุออกมาจากผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์



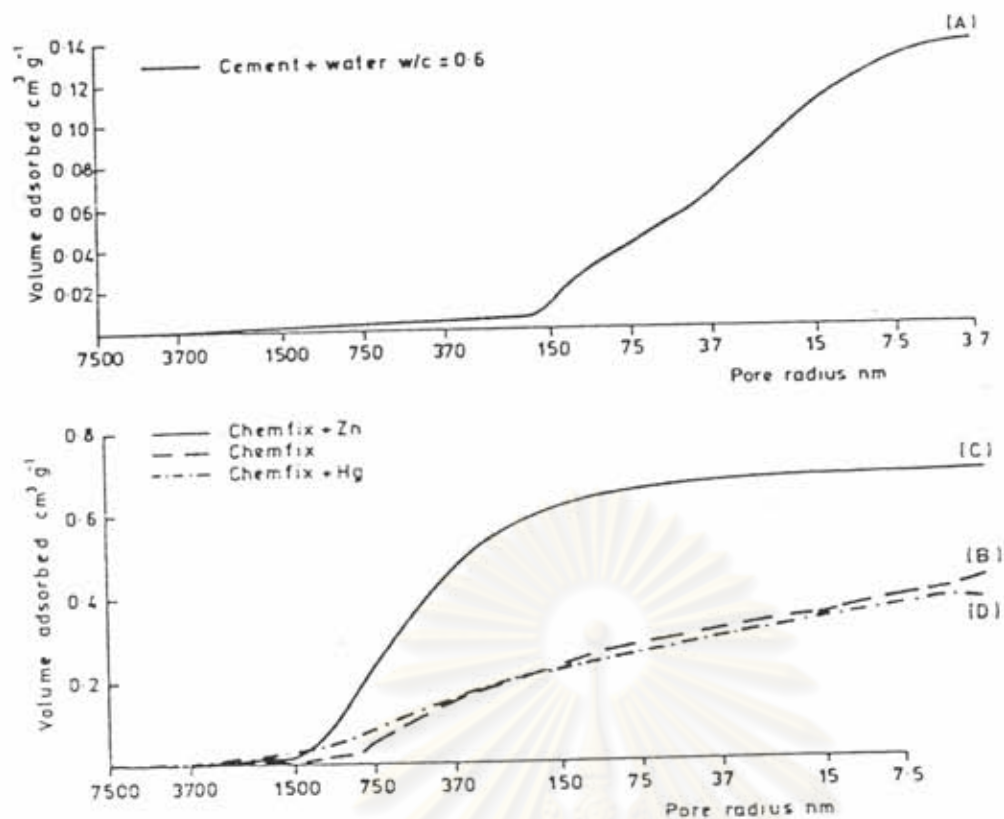
รูปที่ 3.6 Micrograph ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ผสมซิลิกา แสดงให้เห็นว่ามี Hadley grain และเจลของแคลเซียมซิลิเกต



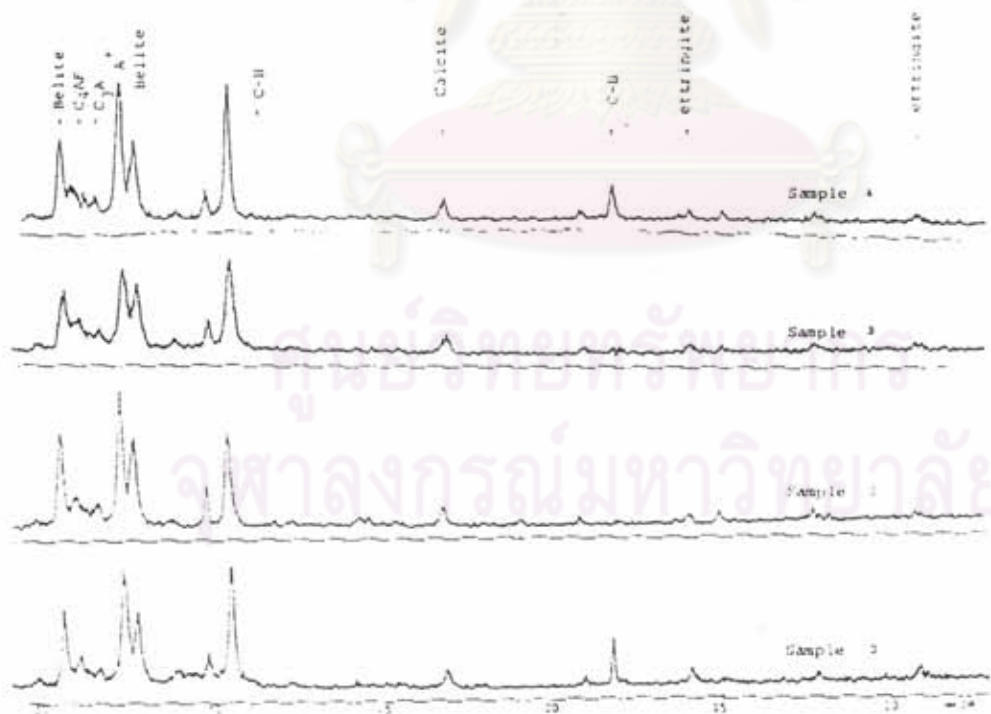
รูปที่ 3.7 Micrograph ของโครงสร้างซีเมนต์ผสมซิลิกาที่มีสังกะสีผสมอยู่ด้วย แสดงให้เห็นว่าผลึกของ Ettringite ใหญ่และยาวขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามีรูพรุนล้อมรอบอยู่มากมาย



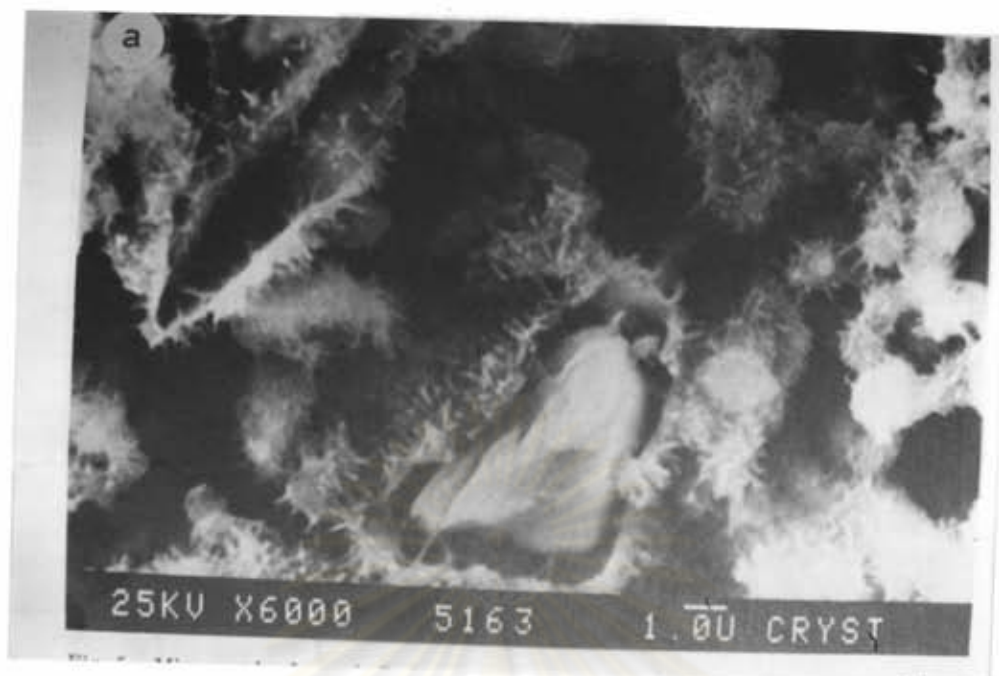
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงการกระจายขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง โดยที่รูป A คือ ซิเมนต์ธรรมดา , รูป B คือ Chemfix , รูป C คือ Chemfix+Zn และรูป D คือ Chemfix+Hg



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงปริมาณสะสมของรูพรุนในแต่ละตัวอย่าง



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะร่องรอยของสารต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ XRD



รูปที่ 3.11 Micrograph ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ผสมซิลิกาที่มีปรอทผสมอยู่ด้วย แสดงให้เห็นว่ามี Hadley grain และ hydrated core ซึ่งมี unhydrated grain ล้อมรอบอยู่



รูปที่ 3.12 Micrograph ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ผสมซิลิกาที่มีปรอทผสมอยู่ด้วย แสดงให้เห็นว่ามีเจลของแคลเซียมซิลิเกตเช่นเดียวกับที่พบในตัวอย่างที่เป็น Chemfix ดังแสดงในรูปที่ 3.6

## ตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

Shin and Sujiwatthana (1988) ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อนในด้านความสามารถในการถูกชะละลาย และความสามารถในการรับแรงอัดของของแข็งที่ถูกทำให้เป็นก้อนแล้ว ในการทดลองนี้ใช้วิธี Cement/Silicate based Technique ซึ่งทำการทดลองกับ แคลเซียม, ตะกั่ว, อัลดริน (aldrin), และคลอเดน (chlordane) สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

ตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการถูกชะละลายและความสามารถในการรับแรงอัดคือ

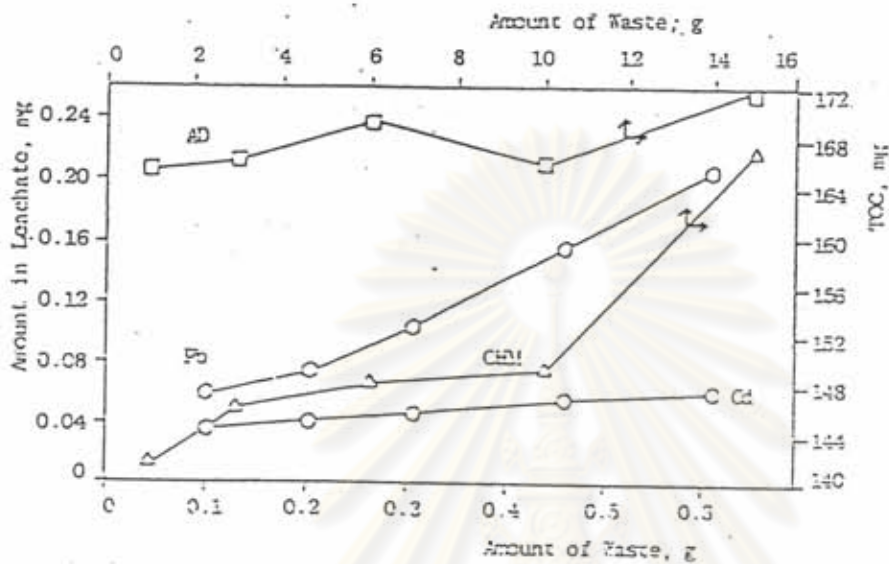
- ปริมาณของของเสียเสี่ยงอันตรายในตอนเริ่มแรก
- อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (water / cement ratio)
- พิเศษของสารละลายที่ใช้ในการสกัด
- อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (surface area / volume ratio)
- ระยะเวลาในการบ่มซีเมนต์

### 1. ปริมาณของของเสียเสี่ยงอันตรายในตอนเริ่มแรก

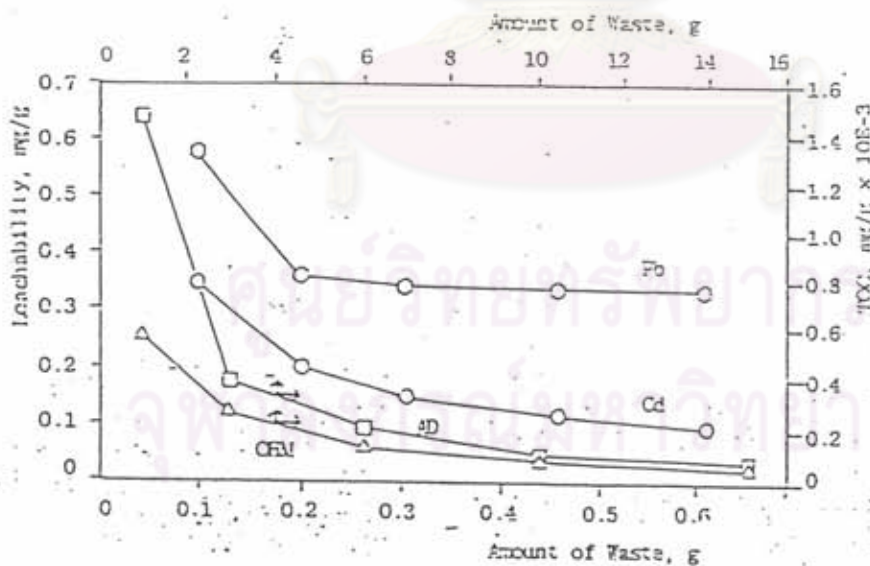
1.1 จากการทดสอบการสกัด (extraction test) โดยสกัดของเสียที่แข็งตัวในซีเมนต์ ด้วยกรดอะซิติกในเครื่อง Orbital Shaker (รุ่น GALLENKAMP-SD-125) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้ว นำมาวิเคราะห์หาปริมาณ T.O.C. และโลหะหนักในสารที่ใช้สกัด จากนั้นนำไปสกัดต่ออีก 24 ชั่วโมงและตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ T.O.C. และโลหะหนักอีกครั้ง จากผลการทดลองนำไปเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของของเสียเพิ่มขึ้นปริมาณของเสียที่ถูกชะละลายจะมากขึ้นด้วย นอกจากนี้จะเห็นว่าปริมาณของแคลเซียมและตะกั่วใน leachate มีปริมาณน้อยกว่าอัลดรินและคลอเดน ทั้งนี้เป็นเพราะว่าในซีเมนต์เพสต์มีค่าความเป็นด่างสูงในรูปของซิลิกาและ oxyhydroxides นอกจากนี้เพราะแคลเซียมซิลิเกตมีความสามารถในการดูดซับ (adsorption) กับโลหะหนักสูง อีกเหตุผลหนึ่งก็คือการทำให้ของเสียอินทรีย์แข็งตัวด้วยซีเมนต์นั้นของเสียอินทรีย์ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่ทำให้คอนกรีตแข็งตัว

จากรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของของเสียใน leachate จะเพิ่มขึ้นต่ำกว่าการเพิ่มปริมาณของเสียตอนเริ่มต้น ดังนั้นค่าความสามารถในการถูกชะละลายจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของของเสียตอนเริ่มต้น

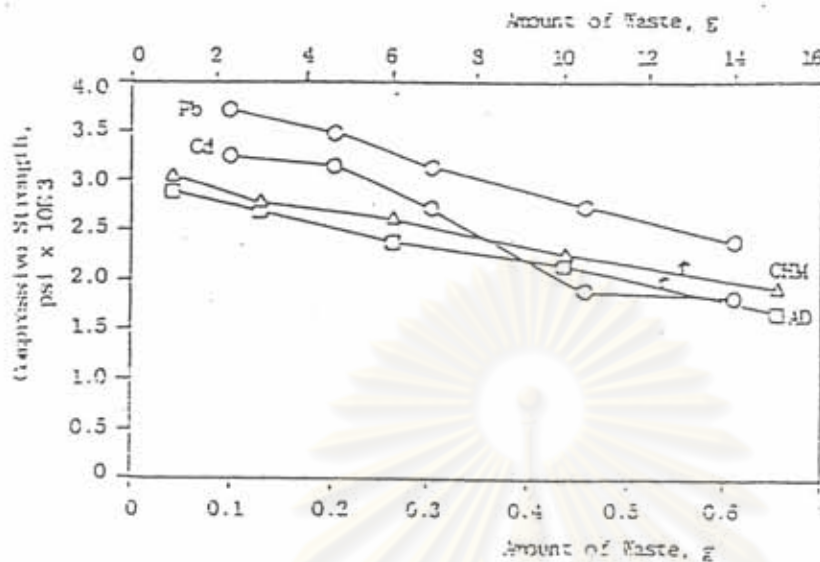
1.2 จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109-64 จะได้ผลการทดลองตามรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าถ้ามีปริมาณของของเสียในซีเมนต์เพสต์น้อยลงจะทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของซีเมนต์เพิ่มขึ้น เพราะว่าของเสียจะขัดขวางคุณสมบัติการแข็งตัวของซีเมนต์



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงปริมาณของของเสียชนิดต่างๆ ใน leachate



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงของเสียชนิดต่างๆต่อความสามารถในการถูกชะละลาย



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงผลของของเสียต่อค่ากำลังรับแรงอัด

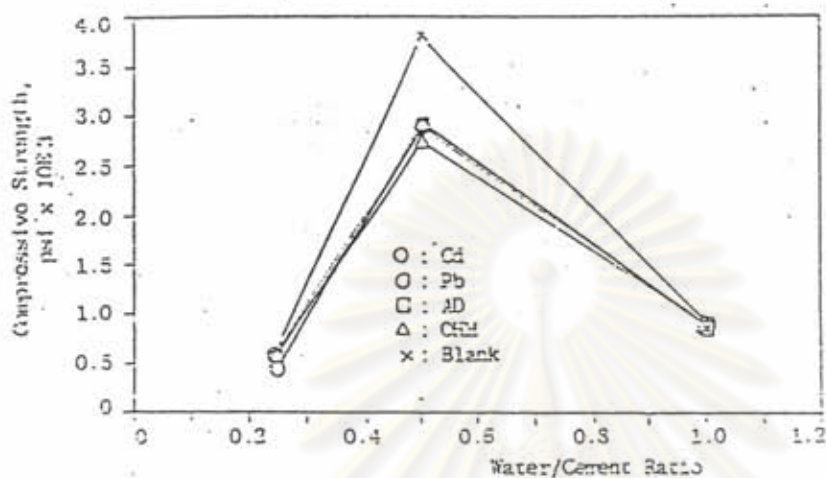
## 2. อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (water/cement ratio , w/c ratio)

2.1 จากการทดสอบการชะละลาย (leaching test) จะพบว่าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 จะมีค่า leachability ต่ำที่สุด อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อค่าความพรุนของซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว นอกจากนี้ทั้งค่าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์และค่าระดับของ compaction มีผลต่อปริมาตรของรูพรุนในซีเมนต์ เมื่อมีการทำ compaction ที่ไม่เหมาะสมและมีการปริมาณน้ำที่เติมในซีเมนต์น้อยเกินไปจะทำให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเกิดผลึกไม่ดีและไม่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้เกิดการรั่วไหลของของเสียมากขึ้น ทั้งนี้ถ้าหากมีการเติมน้ำมากขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดผลึกได้ดีขึ้น แต่ถ้าหากเติมมากเกินไปจะทำให้เกิด capillary pores ซึ่งจะทำให้เพิ่มโอกาสการรั่วไหลของของเสียได้มากขึ้น

2.2 จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (compressive strength) จะได้ผลการทดลองตามรูปที่ 3.15 จะเห็นว่าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5 จะทำให้ได้ค่าความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด ทั้งนี้เป็นไปตามที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้นว่า ทั้งการที่มีปริมาณ



น้ำที่ไม่เหมาะสมจะมีผลให้การเกิดผลปฏิกิริยาไฮเดรชันและมีความพรุนที่ไม่เหมาะสม ทำให้ลดความสามารถในการรับแรงอัดได้



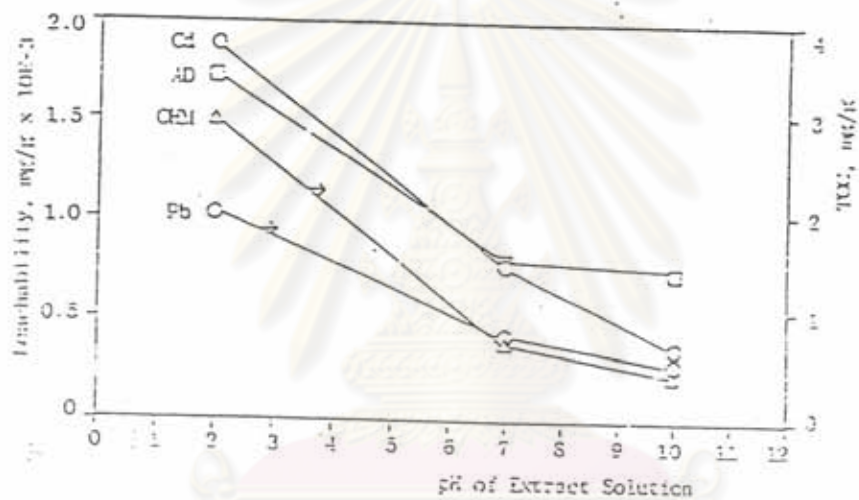
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัด

### 3. พิเศษของสารละลายที่ใช้ในการสกัด

จากการทดสอบการสกัด (extraction test) ซึ่งคล้ายกับการทดลองการหาผลของปริมาณของของเสี้ยวเสี่ยงอันตรายในตอนเริ่มแรก แต่เปลี่ยนค่าพีเอชที่ใช้สกัดเป็น 2, 7 และ 10 และหลังจากนั้นจะนำตัวอย่างไปไว้ในสารละลายที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2 จากผลการทดลองจะเห็นว่าสีของซีเมนต์ถูกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนและยังพบว่ามีส่วนซีเมนต์ถูกสกัดกรอนออกมาด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในสารละลายที่เป็นกรดจะทำลายซีเมนต์เพสต์โดยการชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และอลูมินาออกมา นอกจากนี้สารละลายที่เป็นกรดจะทำให้ตัวประสานในซีเมนต์หลุดออกมาทำให้ได้วัสดุที่ไม่เหมาะสม จากรูปที่ 3.16 แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้สารที่สกัดมีค่าพีเอชต่ำมากขึ้นเท่าไรก็จะทำให้มีค่าความสามารถในการถูกชะละลายสูงมากขึ้นด้วย ในขณะที่ค่าพีเอชเป็นกลางจะมีค่าความสามารถในการถูกชะละลายเพียง 25-45 % ของค่าที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายที่เป็นกรด ส่วนการสกัดด้วยสารละลายที่เป็นด่างจะมีค่าความสามารถในการถูกชะละลายต่ำมาก

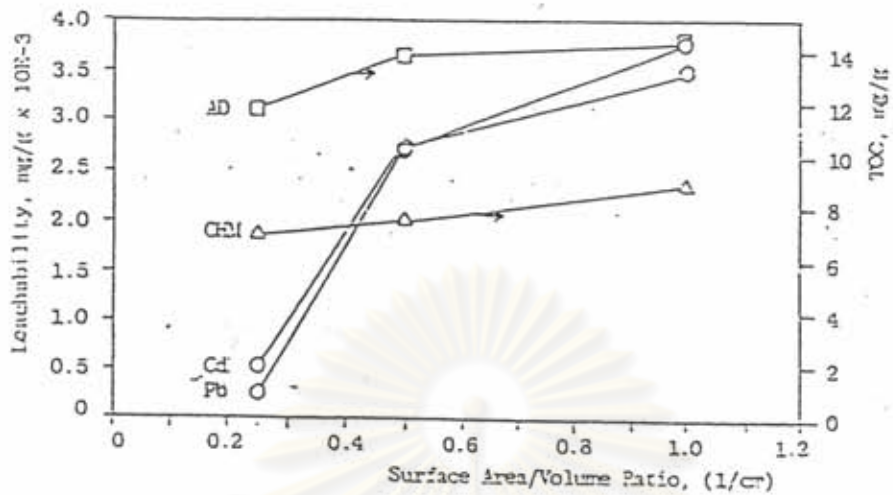
4. อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (surface area/volume ratio, a/v ratio)

จากการทดสอบการชะละลาย (extraction test) จะได้ผลการทดลองตามรูปที่ 3.17 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ถ้ายังมีค่าอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงๆจะทำให้ซีเมนต์เฟสค์มีโอกาสดูดซับชะละลายมากขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าความสามารถในการถูกชะละลายสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 3.17 กราฟแสดงผลของค่าพีเอชของสารละลายที่ใช้สกัดต่อความสามารถในการถูกชะละลาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

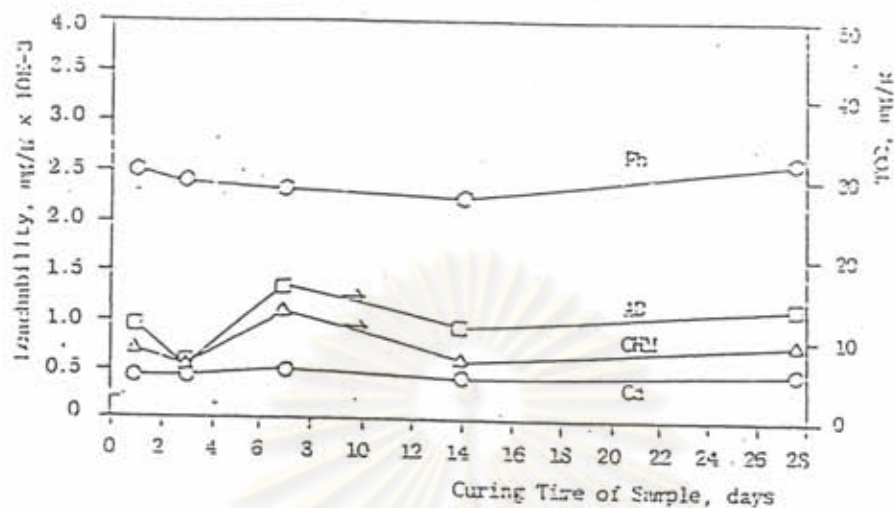


รูปที่ 3.18 กราฟแสดงผลของ surface area/volume ratio ต่อความสามารถในการถูกชะละลาย

#### 5. ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มซีเมนต์

จากรูปที่ 3.18 แสดงให้เห็นได้ว่าการที่มีระยะเวลาในการบ่มซีเมนต์นานจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ดีขึ้น แต่ว่าค่าความสามารถในการถูกชะละลายนั้นไม่ขึ้นอยู่กับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทั้งนี้การร่วไหลของของเสียต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับกลไก 2 ประการคือ adsorption-precipitation และการจำกัดการละลายของโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นการแปรค่าระยะเวลาการบ่มซีเมนต์จึงไม่มีผลต่อการถูกชะละลายของของเสีย แต่จะเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดให้เพิ่มขึ้นได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงผลของระยะเวลาการบ่มก้อนซีเมนต์ต่อความสามารถในการถูกชะละลาย

#### ความสามารถในการถูกชะละลาย (Leachability)

ความสามารถในการถูกชะละลาย หมายถึง อัตราส่วนของความเข้มข้นของสารที่ถูกชะละลายออกไปหลังจากผ่านการสกัดต่อความเข้มข้นของสารที่มีอยู่ในตอนเริ่มต้น สามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$L = W_i / W_o$$

โดยที่  $L$  = ความสามารถในการถูกชะละลาย

$W_i$  = ความเข้มข้นของสารที่ถูกชะละลายออกไป

$W_o$  = ความเข้มข้นของสารที่มีอยู่ในตอนเริ่มต้น

#### การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์ (sulfide precipitation)

การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์เป็นกระบวนการในการบำบัดน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะหนักที่เป็นพิษในปริมาณมากอย่างได้ผล โดยที่โลหะหนักเหล่านั้นถูกแยกออกจากน้ำเสียโดยการเติมสารประกอบซัลไฟด์ เช่น  $Na_2S$ ,  $NaHS$  หรือ  $FeS$  เป็นต้น ลงไปและควรมีการ

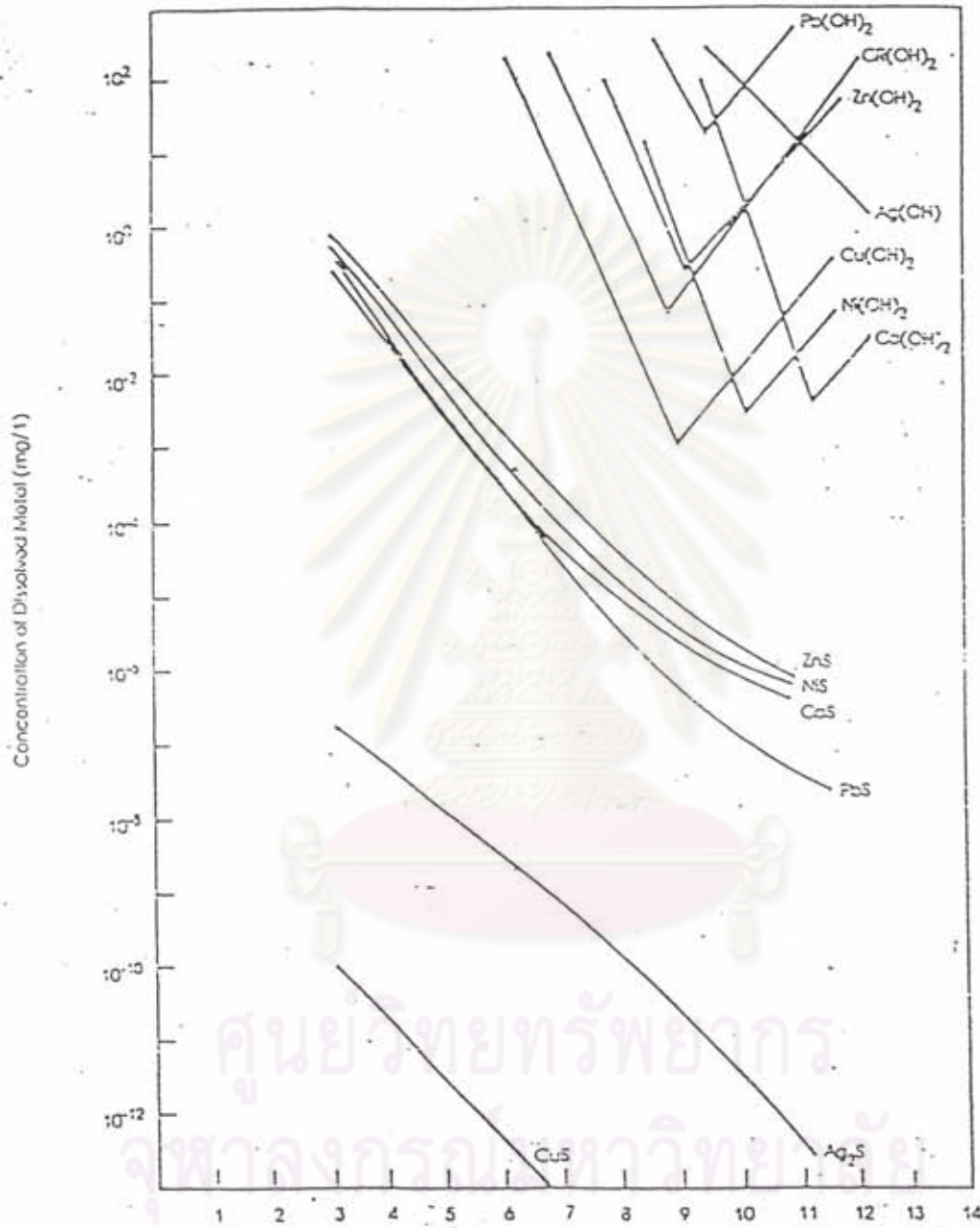
เติมสารละลายต่างตัวอื่นลงไปด้วย เช่น  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  หรือ  $\text{NaOH}$  เป็นต้น เพื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้ถึงจุดที่โลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียมีความสามารถในการละลายน้อยที่สุด เมื่อโลหะหนักตกตะกอนออกมาในรูปของซัลไฟด์ของโลหะหนักแล้ว ตะกอนเหล่านั้นจะถูกแยกออกโดยกระบวนการ flocculation และ clarification

สาเหตุที่ทำให้การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์ได้รับความเชื่อถือ คือ

- สามารถกำจัดโลหะหนักได้มากในช่วงพีเอชที่กว้างดังแสดงอยู่ในกราฟรูปที่ 3.19
- การตกตะกอนโลหะหนักบางชนิด เช่น As, Cu, Cd, Hg เป็นต้นมีประสิทธิภาพดีแม้ในช่วงพีเอชที่เป็นกรด เช่น ตะกอนของ  $\text{HgS}$  นั้นมีค่าการละลายเท่ากับ  $10^{-52.4}$  ที่ค่าพีเอชประมาณ 2
- ใช้เวลาน้อยในการสัมผัสในถังผสมให้เกิดปฏิกิริยาเพราะซัลไฟด์เป็นสารที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูง

นอกจากนี้การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์นี้ได้มีผลดีมากกว่าการตกตะกอนด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์ เพราะความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของซัลไฟด์กับไอออนของโลหะหนักเกิดขึ้นได้ดีกว่าของไฮดรอกไซด์, ความสามารถในการละลายน้ำต่ำของตะกอนซัลไฟด์ต่ำกว่าตะกอนไฮดรอกไซด์, การที่ตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักมักจะมีลักษณะเป็น amphoteric โดยธรรมชาติ และการที่ความสามารถในการละลายต่ำที่สุดของโลหะหนักไฮดรอกไซด์ต่างๆกันจะเกิดขึ้นที่พีเอชที่แตกต่างกัน ทำให้ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักที่ผสมกันหลายชนิดให้ได้มากที่สุดที่ค่าพีเอชค่าใดค่าหนึ่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.20 กราฟแสดงความสามารถในการละลายของโลหะหนักไฮดรอกไซด์และโลหะหนักซัลไฟด์

### การทดสอบการชะละลาย (leaching test)

Poon, et al. (1985) ได้แบ่งวิธีการทดสอบออกเป็น 2 วิธี คือ batch tests และ column tests ซึ่ง batch tests เป็นการทดสอบการชะละลายโดยให้ตัวอย่างสารสัมผัสกับของเหลวที่ใช้ในการสกัด (extraction solution) ในภาชนะอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ ส่วน column tests นั้นจะทำการทดสอบในคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวอย่างสารที่จะทดสอบจนแน่น และป้อนสารที่ใช้ทดสอบผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

ในอดีตกการทดสอบการชะละลายของสารนิคมใช้ทั้งวิธี batch tests และ column tests ในปัจจุบันการออกแบบเครื่องมือสำหรับ batch tests จะใช้ในการทดสอบการชะละลายของของเสียก่อนที่จะนำไปฝังกลบ

การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทดสอบแบบ batch tests และ column tests นั้นจะแสดงในตารางที่ 3.11 และ 3.12

ตารางที่ 3.10 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทดสอบแบบ batch tests

ข้อดี	ข้อเสีย
1.) ไม่ได้รับผลจากการจำกัดของ side-effect	1.) ไม่เป็นการจำลองสภาพแวดล้อมที่เป็นจริงในสถานที่ฝังกลบ
2.) ใช้เวลาในการทดสอบน้อยกว่าใน column tests	2.) ไม่สามารถวัดผลการถูกชะละลายของโลหะหนักออกมาได้จริง
3.) สามารถให้ผลการทดลองได้จำนวนมาก	3.) ต้องมีขั้นตอนการกรองที่เป็นมาตรฐาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.11 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทดสอบแบบ column tests

ข้อดี	ข้อเสีย
<p>1.) เป็นการจำลองให้เห็นถึงปริมาณของเสียที่ถูกชะละลายออกมาและเห็นสภาพการรั่วไหลของของเสียซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้าๆ</p> <p>2.) สามารถทำนายรูปแบบการรั่วไหลตามเวลาได้อย่างดี</p>	<p>1.) มีลักษณะเป็นช่องและเป็นการอัดแบบไม่สม่ำเสมอ</p> <p>2.) อุดตันได้ง่าย</p> <p>3.) อาจจะมีสิ่งมีชีวิตเกิดขึ้นได้</p> <p>4.) มีข้อจำกัดของ side effect</p> <p>5.) ต้องใช้เวลาในการทดสอบนานมาก</p> <p>6.) ไม่สามารถให้ผลการทดลองได้จำนวนมาก</p>

การทดสอบการชะละลายแบ่งได้เป็นหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์คุณภาพสารที่ต้องการทดสอบโดยใช้ปริมาณตัวอย่างสาร, วิธีการเตรียมตัวอย่างสาร, และเครื่องมือที่แตกต่างกัน

U.S.EPA. (1980) ได้กำหนดวิธี Toxicant Extraction Procedure (TEP) เป็นวิธีที่ใช้บังคับ ต่อมาได้มีการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการเป็นวิธี Extraction Procedure (EP) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ดังมีรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.12

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2531) ได้กำหนดวิธีการทดสอบการชะละลายของของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดมาแล้วโดยใช้วิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) ดังมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1.) บดตัวอย่างของเสียให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดของของเสียอยู่ระหว่าง 0.5-9.0 มิลลิเมตร

2.) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1 หนัก 50 กรัม ใส่ในตัวทำละลายซึ่งประกอบไปด้วยน้ำกลั่นผสมกับกรดไฮโดรคลอริก จนมีความเป็นกรดค้างอยู่ระหว่าง 5.8-6.3 ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายเป็น 10 เท่า (มิลลิเมตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่างของเสีย

3.) เขย่าบนเครื่องเขย่า (agitator) เป็นเวลา 6 ชั่วโมงโดยใช้เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบต่อนาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 5 เซนติเมตร

4.) กรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรองใยแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรองเท่ากับ 1 ไมครอน



ตารางที่ 3.12 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะละลาย (Extraction Test Procedures)

การทดสอบการชะละลาย	Standard Leach Test	Toxicant Extraction Procedure (US EPA)	ASTM Method A	Extraction Procedure
1. ปริมาณตัวอย่างสาร	28.6 กรัมตัวอย่างสาร (ส่วนที่เป็นของแข็ง)	ไม่ระบุน้ำหนักต่ำสุด	350 กรัม	น้ำหนักอย่างน้อย 100 กรัม (0.5% ของแข็ง)
2. การเตรียมตัวอย่างสาร	แยกของเหลวโดยใช้ 0.45 $\mu\text{m}$ . pressure filtration	แยกของเหลวโดยวิธี centrifugation หรือ filtration		บดจนมีขนาด 9.5 mm.
3. อัตราส่วนของของเหลวต่อของแข็ง	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/g ของตัวอย่างสาร
5. การควบคุมพีเอช		4.9-5.2	ไม่กำหนด	4.8-5.2
6. ภาชนะที่ใช้ทดสอบ	ภาชนะ-ปิด	ไม่กำหนด	ขวดปากกว้าง (ปิดฝา)	เครื่องกวนหรือเครื่องมือที่เทียบเท่า
7. วิธีการผสมและระยะเวลาการทดสอบ	rotating shaker 24 ชม.	mechanical stirring 24 ชม.	reciprocating shaker 48 ชม.	เครื่องกวนต่อเนื่อง 24 ชม.
8. การแยกของเหลวและของแข็ง	กรองผ่านกรองใยแก้วขนาด 0.45 $\mu\text{m}$	centrifugation หรือ กรองผ่านกรองขนาด 0.45 $\mu\text{m}$	กรองผ่านกรองขนาด 0.45 $\mu\text{m}$ โดยใช้เครื่องกรองแบบความดันหรือแบบสุญญากาศ	กรองผ่านกรองขนาด 0.45 $\mu\text{m}$

ที่มา) Perket and Webster (1981)

5.) นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่างๆตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง

## เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

Sollars และ Perry (1989) ได้กล่าวถึงการประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อนซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ของการบำบัด ได้แก่ บังคับต่างๆ เช่น การปรับปรุงให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมั่นคง, การลดพื้นที่ผิว, และการจำกัดการละลายของสารที่เป็นอันตรายเมื่อสัมผัสกับการชะละลาย ในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นในประเทศอังกฤษยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานอย่างเป็นทางการสำหรับคุณภาพของของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยวิธีข้างต้น แต่ได้มีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเช่น หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดของเสีย (Waste Disposal Authority) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการปฏิบัติงานในการบำบัดของเสีย โดยการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด, ความชื้นได้ของน้ำ และความสามารถในการถูกชะละลายของโลหะหนัก ตารางที่ 3.13 แสดงรายละเอียดของลักษณะที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการ Sealosafe จากโรงบำบัดของเสียที่เมือง West Thurrock

บริษัท Engineering-Science, บริษัท Thai DCI และบริษัท Systems Engineering (1989) ได้ดำเนินการศึกษา และจัดทำแผนการจัดการของเสียอันตรายของประเทศไทย (National Hazardous Waste Management Plan) ได้กล่าวถึงการทดสอบการชะละลายและเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน โดยแบ่งการทดสอบได้ 2 วิธี

วิธีที่ 1 การทดสอบโดยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเช่น โลหะหนักและสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ เป็นต้น โดยกำหนดค่า threshold value สำหรับสารเคมีต่างๆ ที่ถูกชะละลายออกมาจากของเสียนั้นขึ้นมา ถ้าค่าที่ทดสอบดังกล่าวสูงกว่าค่า threshold value แสดงว่าของเสียนั้นเป็นสารที่มีอันตราย เกณฑ์ในการกำหนดค่า threshold value โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 100 เท่าของมาตรฐานน้ำดื่ม ถ้าสารเคมีดังกล่าวถูกชะละลายและเจือจางในธรรมชาติได้มากกว่า 100 เท่าจะก่อให้เกิดอันตรายต่อแหล่งน้ำใสของมนุษย์ การทดสอบการชะละลายของสารเคมีจากของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อนจะเป็นการประเมินความสามารถและประสิทธิภาพของระบบบำบัดของเสีย ค่า threshold value สำหรับสารเคมีต่างๆ ได้กำหนดไว้ ดังนี้

Arsenic	5.0	มิลลิกรัม/ลิตร
Barium	100.0	มิลลิกรัม/ลิตร
Cadmium	1.0	มิลลิกรัม/ลิตร
Chromium	5.0	มิลลิกรัม/ลิตร
Mercury	0.2	มิลลิกรัม/ลิตร

Selenium	1.0	มิลลิกรัม/ลิตร
Silver	5.0	มิลลิกรัม/ลิตร
Aldrin	0.02	มิลลิกรัม/ลิตร
Lindane	0.4	มิลลิกรัม/ลิตร
Methoxychlor	10.0	มิลลิกรัม/ลิตร
Toxaphene	0.5	มิลลิกรัม/ลิตร
2,4-D	10.0	มิลลิกรัม/ลิตร
2,4,5-TP Silvex	1.0	มิลลิกรัม/ลิตร

วิธีที่ 2 เป็นวิธีการทดสอบความเป็นพิษของสารที่ถูกระบายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ (bioassay) โดยนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่เกิดจากการทดลองใช้ค่า threshold value (การทดลองนี้ใช้น้ำกลั่นเป็นสารละลาย) ถ้าค่าความเป็นพิษของสารละลายเกินค่าที่กำหนด ซึ่งได้เลือกไว้สำหรับการเจือจางในสิ่งแวดล้อมแล้ว ของเสียนั้นจะเป็นของเสียอันตรายโดยกำหนดค่า 24-hour LC 50 เมื่อน้ำสกัดมีการเจือจางน้อยกว่า 20%

U.S.EPA. (1992) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับของเสียที่สามารถนำไปทิ้งโดยการฝังกลบหรือของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วโดยการทดสอบของเสียดังกล่าวด้วยวิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (extract solution) มาตรฐานของ U.S.EPA. ได้กำหนดความเข้มข้นของโลหะหนักซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของสารที่เป็นพิษตามประเภทของของเสีย ดังมีรายละเอียดในตารางที่ 3.14

กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2531) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับลักษณะและสมบัติของของเสีย หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วท้ายประกาศกระทรวงฯ ฉบับที่ 25 โดยกำหนดสมบัติของสารมีพิษซึ่งเมื่อนำมาทำการสกัดด้วยวิธีสกัดสาร (Extraction Procedure) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าใดค่าหนึ่งดังต่อไปนี้

Arsenic	> 5	มิลลิกรัม/ลิตร
Cadmium	> 1	มิลลิกรัม/ลิตร
Chromium	> 5	มิลลิกรัม/ลิตร
Lead	> 5	มิลลิกรัม/ลิตร
Mercury	> 0.2	มิลลิกรัม/ลิตร

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2531) ได้ออกประกาศกรมโรงงานฯ ฉบับที่ 1 เรื่องกำหนดวิธีการเก็บ, การทำลายฤทธิ์, การกำจัด, การฝัง, การทิ้ง, การเคลื่อนย้าย, และการขนส่งของเสียหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว สามารถสรุปมาตรฐานที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

- 1.วิธีการทำลายของเสียหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วก่อนนำไปทิ้งหรือนำไปฝัง (ตารางที่ 3.15)
- 2.ของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (Solidification) จะต้องมามีสมบัติดังต่อไปนี้
  - น้ำซึมผ่านได้ในอัตราที่ต่ำกว่า  $1 \times 10^{-6}$  เซ็นติเมตรต่อวินาที
  - สามารถรับแรงอัดได้ไม่น้อยกว่า 14 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร
  - มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
  - มีลักษณะแข็งคล้ายหิน ไม่ไหม้ไฟ ไม่มีกลิ่น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.13 แสดงลักษณะสมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยวิธี Scalosafe

Specimen Solidified Waste Performance Characteristics Required by A Waste Disposal Authority

Characteristic	Requirement	Comparative Values
Permeability (28 days)	$> 1 \times 10^{-7}$ m/s	Sand : $1 \times 10^{-4}$ - $5 \times 10^{-5}$ m/s Silt : $1 \times 10^{-6}$ - $1 \times 10^{-7}$ m/s Concrete : $1 \times 10^{-8}$ m/s
Compressive Strength (28 days)	$< 0.34$ MN/m <sup>2</sup>	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	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> Other (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> Supernatant : None after 24 hr.	n.a. n.a. n.a. n.a. n.a. n.a. n.a. n.a. n.a. n.a. n.a.

n.a. = not applicable

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

ที่มา] Sollars and Perry (1989)

ตารางที่ 3.14 มาตรฐานความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด (Extract Solution) สำหรับของเสีย  
 เสี่ยงอันตรายที่ผ่านการบำบัดแล้ว

Waste Code	Regulated Hazardous Constituent	Concentration (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

ที่มา Sollars and Perry (1989)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.15 วิธีการทำลายฤทธิ์ของของเสียประเภทต่างๆ

ประเภทของของเสีย	วิธีการทำลายฤทธิ์
1.กากตะกอนที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากตะกอนมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นเมอร์คิวริกซัลไฟด์ ( $\text{HgS}$ ) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (solidification) โดยผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเดิมผสมเพิ่มผสมลงไปด้วย
2.กากจากการผลิตหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากที่ต้องผ่านการบดให้มีขนาดเล็กลงก่อน เพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้อย่างทั่วถึง แล้วนำมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นเมอร์คิวริกซัลไฟด์ ( $\text{HgS}$ ) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (solidification) โดยผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเดิมผสมเพิ่มผสมลงไปด้วย
3.กากตะกอนหรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนักเช่น แคดเมียม, โครเมียม, ตะกั่ว, แมงกานีส เป็นต้น	ใช้สารละลายด่าง เช่น ปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ผสมกับกากตะกอนให้ทั่วกันจนสารโลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบของเกลือไฮดรอกไซด์ที่มีค่าพีเอชของของผสมประมาณ 11 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ในกรณีที่เป็นกากตะกอนหรือฝุ่นที่เปียกด้วย แคดเมียมจะต้องทำให้เป็นก้อนด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์
4.กากตะกอนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มียาฆ่าแมลง ยากำจัดศัตรูพืช หรือยากำจัดเชื้อราปนเปื้อน	เติมสารละลายด่าง เช่น ปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ในปริมาณที่สามารถจะทำลายพิษของตัวยาแต่ละชนิดได้หมด

ที่มา กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม , 2531

## การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

จากการรวบรวมผลงานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และวัสดุอื่นๆ สามารถสรุปผลงานวิจัยในช่วงปี 1985-1993 ได้ดังนี้

Poon, et al. (1985) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับกลไกการยึดจับของโลหะหนัก 2 ชนิด คือ สังกะสีและปรอทซึ่งทำการทดลองโดยการทดสอบการชะละลาย, การส่องด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM), การวิเคราะห์ด้วย X-ray Diffraction (XRD), และการทดสอบหาความพรุน (porosimetry) (ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.8) โดยเตรียมการทดสอบด้วยการเติมสารละลายทีละชนิดคือสังกะสี (ที่มีความเข้มข้น 2% และ 6%) และปรอท (ที่ความเข้มข้นเดียวกัน) เพื่อศึกษาความแตกต่างของกลไกการยึดจับในโครงสร้างของซีเมนต์ของโลหะหนักทั้งสองชนิด นอกจากนี้มีการเติมสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  40% เป็นสารเคมีผสมเพิ่มให้มีลักษณะใกล้เคียงกับสาร Chemfix ซึ่งใช้ในการทำให้เป็นก้อนในเชิงพาณิชย์ที่พบได้ทั่วไป จากนั้นนำไปบ่มในห้องที่มีความชื้นสูงเป็นเวลา 28 วัน ต่อมานำไปย่อยให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วเติมกรดอะซิติกเพื่อทดสอบการชะละลายของโลหะหนักทั้งสองชนิด นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

กลไกการยึดจับของสังกะสีในโครงสร้างซีเมนต์ควรเป็นแบบ chemical stabilization จากการทดสอบการชะละลายพบว่าความเข้มข้นของสังกะสีที่ออกมาในน้ำชะละลายมีอยู่น้อยตลอดการทดลอง จากการวิเคราะห์ด้วย SEM และ XRD ไม่พบว่ามีผลึกของ Zinc Silicate (ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากันของ  $\text{Zn}^{2+}$  และ  $\text{SiO}_3^{2-}$ ) และ Calcium Zincate (ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากันของ  $\text{Zn}^{2+}$  และแคลเซียมไฮดรอกไซด์เลย แต่การที่ผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์หายไปในตัวอย่างไม่มีสังกะสี (ก่อนนำไปทดสอบการชะละลาย) แสดงว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์อาจมีบทบาทสำคัญในการยึดจับของสังกะสีในโครงสร้างซีเมนต์ นอกจากนี้จากผลการทดสอบความพรุน (porosimetry) ของตัวอย่างนี้แสดงว่า ความพรุนและความซึมน้ำ (permeability) นั้นไม่มีผลต่อการยึดจับของสังกะสี

ส่วนกลไกการยึดจับของปรอทในโครงสร้างปรอทควรเป็นแบบ physical entrapment จากการทดสอบการชะละลายของปรอทพบว่ามีความเข้มข้นของปรอทหลุดออกมามากตลอดการทดลอง แต่จากการทดสอบความพรุนของตัวอย่างพบว่ามีความพรุนใกล้เคียงกับซีเมนต์ที่มีโซเดียมซิลิเกต ซึ่งแสดงว่าความพรุนและความซึมน้ำอาจมีผลต่อการยึดจับของปรอท นอกจากนี้จากผลการทดสอบของ SEM และ XRD พบว่าปรอทไม่ได้ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์หรือโซเดียมซิลิเกตเลย แสดงว่าผลึกของปรอทอาจติดอยู่อย่างหลวมๆกับโครงสร้างของซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อทำการชะละลายก้อนตัวอย่างจึงมีความเข้มข้นของปรอทออกมามากในทันที จึงเป็นไปได้ว่าถ้ามี



การเติมสารผสมเพิ่มบางชนิดลงไปเช่น เถ้าลอยหรือซิลิกาฟูม ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วได้ Amorphous Calcium-Silicate-Hydrate เพื่อไปลดความพรุนของ ซีเมนต์ลง

Poon, et al. (1985) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของกลไกการยึดจับทั้งสอง ประเภทของโลหะหนัก 2 ชนิดคือ สังกะสีและปรอทซึ่งทำการทดลองโดยการทดสอบ การชะละลายเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการยึดจับ โลหะหนัก นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Energy Dispersive Analysis of X-rays (EDAX) เพื่อดูความแตกต่างของโครงสร้างภายในของซีเมนต์ และความเข้มข้นของแคลเซียมและซิลิกาในแต่ละช่วงเวลาทำการชะละลาย ซึ่งสามารถสรุป ผลการวิจัยได้ดังนี้

1. แม้ว่าความเข้มข้นของสังกะสีและปรอทที่ถูกชะละลายออกมาในตอนเริ่มต้น แตกต่างกันมาก แต่พบว่ากรดอะซิดิกที่มีความเข้มข้นเท่ากันจะมีจุด breakthrough เดียวกันที่ทำให้สังกะสีและปรอทถูกชะละลายออกมามากในทันที ซึ่งจุดนี้เกิดขึ้นที่จำนวนครั้งที่ใช้ชะละลาย เดียวกันและเกิดขึ้นที่ค่าพีเอชประมาณ 7 เช่นเดียวกันแสดงอยู่ในรูปที่ 3.20-3.22 จากการ วิเคราะห์ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ถูกชะละลายออกมาสะสมจนถึงจุด breakthrough นี้ประมาณ 55% ของความเข้มข้นของแคลเซียมที่มีอยู่ก่อนการชะละลายดังแสดงอยู่ในตารางที่ 3.16

2. จากการทดสอบการชะละลายร่วมกับ micrograph เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของ องค์ประกอบภายในของโครงสร้างซีเมนต์ตามลำดับเวลาได้ดังนี้

- ก่อนการชะละลายจะพบโครงสร้างของแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮดรต (C-S-H), แคลเซียม-อลูมินต-ไฮดรต ในรูปของ Ettringite (Aft) กับ Monosulphate (Afm), unhydrated cement grain, แคลเซียมไฮดรอกไซด์, และแคลเซียมซิลิเกตเจล และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย EDAX พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมมากกว่าของซิลิกา

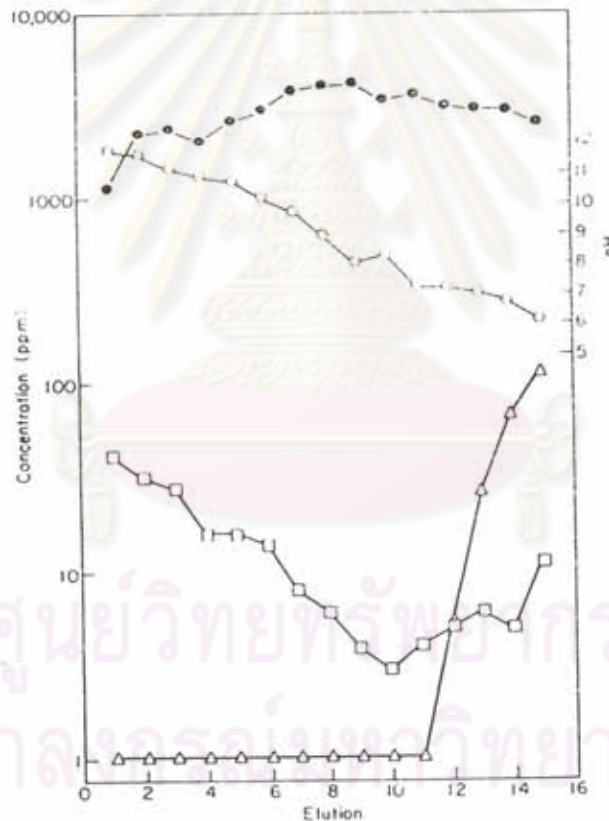
- เมื่อการชะละลายผ่านไป 1 วันพบว่า ยังมี Aft และ Afm เห็นได้อย่างชัดเจน แต่แคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮดรตมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไป จากผลการวิเคราะห์ EDAX พบว่า ความเข้มข้นของแคลเซียมยังมากกว่าของซิลิกา

- เมื่อการชะละลายผ่านไป 3 วันพบว่า มีโครงสร้างแบบเจลมากขึ้นในบริเวณที่มีการชะละลาย Aft มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับในวันแรก จากผลการวิเคราะห์ EDAX พบว่า ความเข้มข้นของแคลเซียมมีพอๆกับความเข้มข้นของซิลิกา

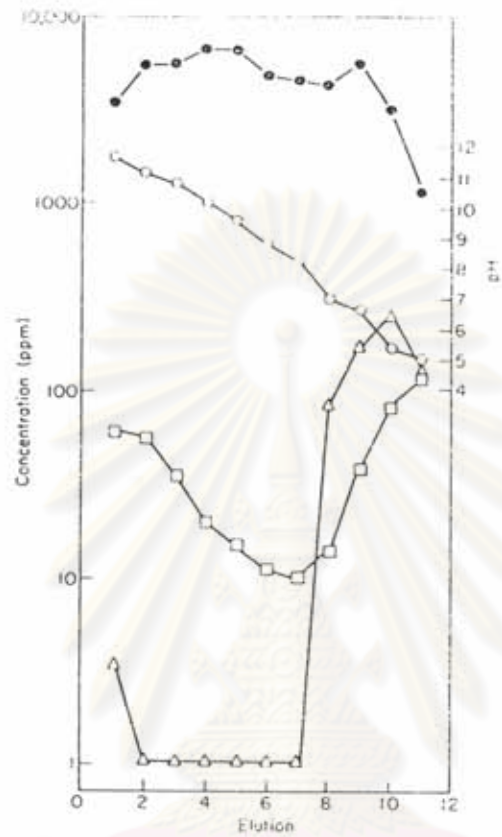
- เมื่อการชะละลายผ่านไป 4 วันพบว่า ไม่มีผลึกของ Aft อีกเลยและผลิตภัณฑ์ ต่างๆจากปฏิกิริยาไฮดรชันของซีเมนต์ถูก hydrolysed ออกไปหมดเหลือเพียงผลึกที่มีผิวราบเรียบ และมีลักษณะเป็น semi gel ของโครงสร้างของก้อนของแข็งที่มีความเข้มข้นของซิลิกาอยู่มาก

- เมื่อการชะละลายผ่านไป 5 วันพบว่า cement grain หลุดออกจากมวลของ gel & amorphous structure และความเข้มข้นของซิลิกาสูงกว่าแคลเซียม

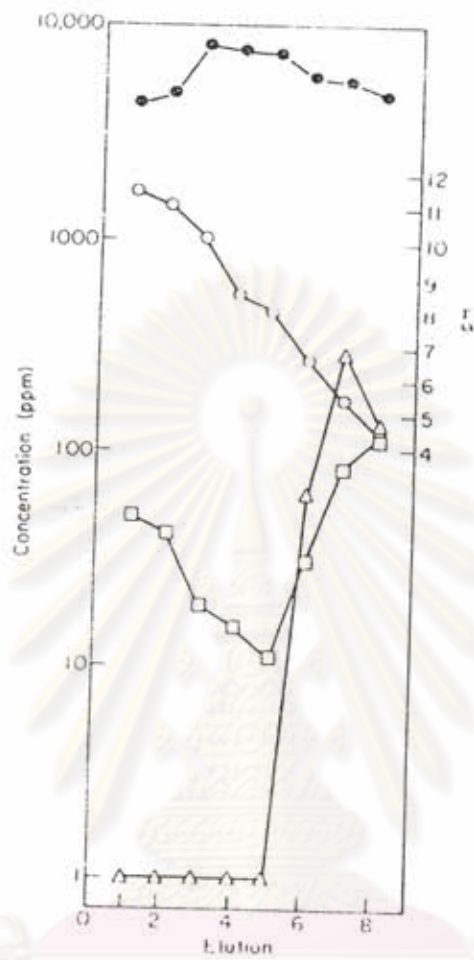
จากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีความสำคัญในกระบวนการการยึดจับโลหะหนัก ในขณะที่ C-S-H ไม่มีผลต่อกระบวนการเลยเพราะว่า C-S-H นั้นถูกชะละลายออกมาหมดตั้งแต่วันที่ 2 ที่ทำการชะละลายแต่ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งสองชนิดที่หลุดออกมายังไม่เปลี่ยนแปลง แต่ว่าเมื่อการชะละลายผ่านไป 5 วันพบว่าผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์หายไปซึ่งเป็นเวลาเดียวกับที่ความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากในทันที แต่ยังไม่มีความเห็นที่แสดงให้เห็นโดยตรงว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์นั้นมีผลต่อการยึดจับโลหะหนักแน่นอน



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงผลของ leaching test ของ 0.15 โมลาร์ของ buffered HAC leachate : o = pH ; □ = Calcium ; △ = Mercury ; ◇ = Zinc



รูปที่ 3.22 กราฟแสดงผลของ leaching test ของ 0.30 โมลาร์ของ buffered HAC leachate :  
 o = pH ; □ = Calcium ; △ = Mercury ; ● = Zinc



รูปที่ 3.23 กราฟแสดงผลของ leaching test ของ 0.50 โมลาร์ของ buffered HAC leachate :

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

## ตารางที่ 3.16 แสดงผลการตรวจสอบปริมาณของแคลเซียม

## Calcium monitoring data

Cumulative weight of Ca released before break-through (g)	
0.15 M buffered HAC	3.67
0.30 M buffered HAC	3.68
0.50 M buffered HAC	3.17
Average	3.51
Calcium (g) in 40 g raw sample	6.4
Percentage of total	55

ที่มา Poon, et al. , 1985

Shively et al. (1986) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักโดยการทำให้เป็นก้อนและทดสอบการชะละลายโลหะหนักและกำลังรับแรงอัด โดยทดสอบโลหะหนัก 4 ชนิด คือ อารซีนิก, แคลเซียม, โครเมียม, และตะกั่ว (ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.9) นอกจากนี้มีการทดสอบการชะละลายน้ำ 15 ครั้งในโลหะหนักแต่ละชนิด และโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสมกัน สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1. จากการทดสอบความเข้มข้นของน้ำสกัดจากของเสียทั้ง 4 ชนิดและของเสียผสมซึ่งผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์มาแล้ว พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ U.S.EPA. (สำหรับการสกัดโลหะหนักในครั้งแรก) ทั้งกรณีที่ใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ (water/cement ratio, w/c) เท่ากับ 0.5 และ 1.0 โดยค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของน้ำจาก 0.5 เป็น 1.0 การละลายของโลหะหนักออกจากของเสียแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเมื่อเริ่มการสกัดโลหะหนักแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ในซีเมนต์จะทำหน้าที่ทำลายฤทธิ์ของกรดที่ใช้สกัดให้เป็นกลางซึ่งทำให้ค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 10.0 และมีการละลายของสารประกอบในซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ในช่วงที่สองจะมีการละลายของโลหะหนักสูงสุดซึ่งค่าพีเอชมีค่าน้อยกว่า 6.0 ในช่วงที่สามเมื่อทำการสกัดต่อไปการละลายของโลหะหนักจะเริ่มลดน้อยลง และการละลายจากการสกัดแต่ละครั้งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในของเสีย

2. จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน พบว่าเมื่อใช้อารซีนิกและแคลเซียมมากำจัดโดยการทำให้เป็นก้อน จะทำให้กำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์ลดลงทั้งกรณีที่ใช้ค่าอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ของเสียผสมจะลดกำลังรับแรงอัดเฉพาะค่าอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ส่วนโครเมียมและตะกั่ว นั้นจะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

Shin และ Sujiwatthana (1988) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียอันตรายโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ โดยใช้ของเสีย 4 ชนิดคือ แคลเซียม, ตะกั่ว, อลด์ริน (aldrin), และคลอเดน (chlordan) โดยมีการนำก้อนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วไปทดสอบการชะละลายและทดสอบกำลังรับแรงอัด สามารถสรุปผลของการทดลองได้ดังนี้

1. ปริมาณของแคลเซียม, ตะกั่ว, อลด์ริน, และคลอเดนที่รั่วไหลออกมาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของของเสียที่ผสมลงไปในส่วนผสมของซีเมนต์กับทราย
2. กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมาแล้วลดลงในขณะที่เพิ่มปริมาณโลหะหนักที่ผสมลงไปในส่วนผสมของซีเมนต์กับทราย
3. อัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมจะลดความสามารถในการถูกชะละลายของแคลเซียม, ตะกั่ว, อลด์ริน, และคลอเดนเท่ากับ 0.5
4. ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 ทำให้ได้กำลังรับแรงอัดมากกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์ที่ 1.0 และ 0.25
5. ถ้าในสารที่ชะละลายมีค่าพีเอชในตอนเริ่มต้นต่ำมากเท่าใดจะทำให้ความสามารถในการถูกชะละลายของของเสียนั้นเพิ่มขึ้น
6. อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมีผลต่อความสามารถในการถูกชะละลายของแคลเซียม, ตะกั่ว, อลด์ริน, และคลอเดน ถ้ามีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการถูกชะละลายของของเสียนั้นเพิ่มขึ้น
7. ระยะเวลาในการบ่มของเสียมีผลต่อความสามารถในการถูกชะละลายของของเสียน้อย แต่ถ้าเพิ่มระยะเวลาในการบ่มของเสียจะทำให้กำลังรับแรงอัดของของเสียเพิ่มขึ้น
8. เทคนิคการทำของเสียให้เป็นก้อนแบบซีเมนต์-ซิลิกาเหมาะกับของเสียพวกโลหะหนักมากกว่าของเสียพวกสารอินทรีย์

Bishop, et al. (1988) ได้ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.8) ทดสอบการชะละลายค่าความเป็นด่างจากก้อนของเสีย 15 ครั้ง สามารถหาค่าความสามารถในการรักษาความเป็นกลาง (buffering capacity) ของของเสียดังกล่าวได้ 18.3 meq/g และจากการศึกษาการชะละลายโลหะหนัก 3 ชนิด คือ แคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว เพื่อศึกษาการชะละลายโลหะหนักในซีเมนต์แข็งตัว สรุปได้ว่าแคลเซียมจะอยู่ในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ และแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนหรือเกาะติดอยู่กับผนังของรูพรุนในซีเมนต์แข็งตัว ส่วนโครเมียมและตะกั่วมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ และเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกา

Shin, et al. (1988) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ โดยมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์, อัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์, ปริมาณของเสียที่ใช้ผสม, และปริมาณสารที่ใช้ทำ precipitation สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การชะละลายของโลหะหนักได้แก่โครเมียมและสังกะสีจะลดลง เพื่อลดค่าอัตราส่วนผสมของทรายต่อซีเมนต์, อัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์, และเพิ่มปริมาณสารที่ใช้ทำ precipitation

2. กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่มตัว 14 วันจะเพิ่มขึ้น เมื่อลดอัตราส่วนผสมของทรายต่อซีเมนต์, อัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์, และปริมาณของเสียที่กำจัด

3. จากการวิเคราะห์โดยวิธี Anova Analysis พบว่าอัตราส่วนผสมของทรายต่อซีเมนต์จะมีผลต่อการชะละลายของโครเมียม และอัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์จะมีผลต่อการชะละลายของสังกะสี และกำลังการรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์

4. จากผลการวิจัยเมื่อนำไปวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆเช่น ค่าใช้จ่าย, การชะละลายของโครเมียมและสังกะสีจะต้องต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ U.S.EPA. คือ 5 และ 500 ppm และกำลังการรับแรงอัดต้องมีค่าสูงกว่า 10 กก./ซม.<sup>2</sup> จะได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดกากตะกอนแห้ง 30 กรัม จะต้องใช้อัตราส่วนผสมของทรายต่อซีเมนต์, อัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์, และปริมาณสาร precipitation เท่ากับ 1, 1.5, และ 1.075 กรัม ตามลำดับ

5. การใช้สารที่ใช้ทำ precipitation และทรายจะไม่มีผลสำคัญในทางเศรษฐศาสตร์และในทางปฏิบัติ

Chang, et al. (1989) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และเถ้าจากแกลบ โดยมีการเปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักโดยใช้ซีเมนต์อย่างเดียวกับการใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าจากแกลบที่มีอัตราส่วนผสมเท่ากับ 1:1 โดยใช้โลหะหนักจากการสังเคราะห์ซึ่งมีส่วนประกอบ ได้แก่ โครเมียม, ทองแดง, และปรอท จากผลการวิจัยพบว่ากลไกการยึดจับโลหะหนักในซีเมนต์เป็นปัจจัยสำคัญในการใช้อธิบายพฤติกรรมของการชะละลายพันธะการยึดจับโลหะหนักกับซีเมนต์ที่แตกต่างกันจะมีผลทำให้การชะละลายโลหะหนักแตกต่างกัน การชะละลายของโครเมียมในซีเมนต์ผสมเถ้าจากแกลบจะสูงกว่าในการใช้ซีเมนต์อย่างเดียว ในขณะที่การชะละลายของทองแดงและปรอทในซีเมนต์อย่างเดียวสูงกว่าในซีเมนต์ผสมเถ้าจากแกลบ

ทองแดงและปรอทจะยึดจับกับซีเมนต์ โดยอยู่ในรูพรุนหรือดูดติดอยู่กับผนังของรูพรุน การชะละลายของทองแดงและปรอทจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่าง จากผลการวิเคราะห์น้ำสกัดพบ

ว่าค่าความเป็นค่าสูงจะขึ้นตามค่าการชะละลายของทองแดงและปรอท จากการเปรียบเทียบสารที่ใช้กำจัดโลหะหนักทั้งสองวิธี พบว่าวิธีกำจัดโดยใช้ซีเมนต์อย่างเดียวจะเหมาะกับการกำจัดโครเมียม ส่วนวิธีกำจัดโดยใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าจากแกลบเหมาะสำหรับการกำจัดทองแดงและปรอท

Shin, et al. (1990) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติการชะละลายของสารต่างๆต่อโลหะหนักที่ทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย (fly ash) การทดสอบใช้สารชะละลาย 3 ชนิด คือ น้ำทะเล, น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรด, และน้ำกลั่น โลหะหนักที่ใช้นำมาผสมมี 3 ชนิดคือ แคดเมียม, โครเมียม, และตะกั่ว พบว่าค่าพีเอชและความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่ใช้สกัดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการชะละลาย การเติมเถ้าลอยลงในส่วนผสมซีเมนต์จะมีผลทำให้ค่าพีเอชของน้ำที่ใช้สกัดลดลง และจะเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่ใช้สกัด ในช่วง 60 วันที่ทำการทดสอบการชะละลายปริมาณแคดเมียมสะสมที่ถูกชะละลายออกมาในน้ำทะเลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา แต่โลหะหนักอื่นๆ อัตราการชะละลายจะลดลงตามระยะเวลา

ภายหลังการทดสอบ 60 วัน น้ำหนักของตัวอย่างจะลดลงเนื่องจากองค์ประกอบของปูนขาวและโลหะหนักถูกชะละลายออกมา และขนาดของอนุภาคของโลหะหนักกรณีที่ไม่ได้เติมเถ้าลอยจะมีขนาดเล็กลงในสภาวะที่ใช้น้ำทะเลเป็นสารชะละลาย โลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมามจะถูกทำให้ตกตะกอนอีกครั้งหนึ่งภายใต้สภาวะที่เป็นค่าของน้ำทะเล สำหรับตัวอย่างที่เติมเถ้าลอยอนุภาคของโลหะหนักจะมีขนาดใหญ่กว่า ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยจะมีผลในการป้องกันการชะละลายของน้ำทะเลได้ และจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่ผิวของสารตัวอย่างด้วยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) และ X-ray Diffraction Analysis (XRD) พบว่าปูนขาวจะถูกชะละลายออกมาในขณะที่แคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮดรอกไซด์ (C-S-H), Ettringite, และยิบซัมจะเกิดขึ้นมาแทน

McWhinney, et al. (1990) ได้ทำการศึกษาลักษณะของปรอทในโครงสร้างซีเมนต์ โดยทำการผสมสารละลายเมอร์คิวริกไนเตรดลงในซีเมนต์ แล้วนำไปบ่มในห้องที่มีความชื้นสูงเป็นเวลา 28 วัน ทั้งนี้ตัวอย่างทุกชิ้นจะอยู่ภายใต้บรรยากาศที่มีแต่ไนโตรเจนตลอดเวลาจนนำไปทำการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังมีการใช้เครื่องมืออื่นๆเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ ได้แก่ X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. สารละลายเมอร์คิวริกไนเตรดที่เติมลงไปนซีเมนต์เพสต์จะทำให้ได้ผลึกสี่เหลี่ยมของเมอร์คิวริกออกไซด์ จากการวิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS ในบริเวณพื้นผิวทั่วไปพบว่าผลึกของปรอทจะจับอยู่เป็นกลุ่มก้อนคล้ายเกาะซึ่งประกอบไปด้วยสารที่คล้ายปูน เมื่อทำการตรวจ



สอบให้ใกล้ขึ้นพบว่าในบริเวณนั้นเต็มไปด้วยแคลเซียมและยังพบว่าในบริเวณที่มีการสะสมตัวของปรอทมากจะมีความเข้มข้นของซิลิกอนลดลง

2. การที่ปรอทอยู่ใน โครงสร้างซีเมนต์ในรูปของเมอร์คิวริกออกไซด์และไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นว่าการยึดจับทางกายภาพเป็นกลไกสำคัญที่จับปรอทให้อยู่ใน โครงสร้างซีเมนต์

Roy, et al. (1991) ได้ทำการศึกษาการนำบดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ที่มีการผสมเถ้าลอย class F ซึ่งในกากของเสยมีโลหะหนักได้แก่ โครเมียม, นิกเกิล, แคลเซียม, และปรอท อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนผสมของกากของเสยต่อตัวประสานเท่ากับ 1.43 ตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแล้วนำไปบ่มในห้องที่มีความชื้นสูงเป็นเวลา 28 วันเป็นอย่างต่ำ แล้วจึงนำไปตรวจสอบด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDX), Optical Microscopy, และ X-ray Diffractometry (XRD) สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าในซีเมนต์ที่มีการผสมเถ้าลอยนั้นมีส่วนผสมที่สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

- ส่วนที่ได้จากสารเจือในเถ้าลอย ได้แก่ Quartz, Mullite, และ Magnetite
- ส่วนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์, Ettringite, และ Gypsum

นอกจากนี้ยังพบ Straetlingite และแคลเซียมคาร์บอเนตอีกด้วย

2. จากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าในซีเมนต์ที่มีการผสมเถ้าลอยซึ่งมีกากตะกอนโลหะหนักด้วยมีส่วนผสมที่สามารถแยกออกได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ๆคือ

- ส่วนที่เป็นกากตะกอน
- ส่วนที่ได้จากสารเจือในเถ้าลอยได้แก่ Quartz, Mullite, และ Magnetite
- ส่วนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ซึ่งไม่เหมือนในซีเมนต์ที่มีเถ้าลอย

ได้แก่ Ettringite, Monosulphate, Gypsum และ Calcium Aluminum Hydrate แต่ไม่พบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้จากการส่องดูด้วย SEM ยังพบว่า Ettringite มีมากกว่าในซีเมนต์ที่มีเถ้าลอยผสมอยู่เท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยได้สันนิษฐานการที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์หายไปเกิดจาก

2.1 ระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของโซเดียมซิลิเกตลดลง (ขณะเดียวกันแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นได้นำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับเถ้าลอย (pozzolanic reaction)

2.2 Hydroxyl ion จากสารประกอบไฮดรอกไซด์ไปรวมตัวกับโลหะหนักแล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นมา

ดังนั้นค่าพีเอชจึงมีอิทธิพลมากต่อความคงตัวของก้อนของเสี้ยว ซึ่งพบว่าค่าพีเอชของตัวอย่างที่ซีเมนต์ผสมกับแกลลอยต่ำกว่าในตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์อย่างเดียว จึงอาจจะมีผลกระทบต่อความสามารถในการละลายของโลหะหนักได้

Cheng และ Bishop (1992) ได้ทำการศึกษาการกระจายของโลหะหนักในแท่งซีเมนต์ก่อนและหลังการทดสอบการชะละลายโดยใช้กรดอะซิติก โดยการหล่อซีเมนต์เป็นรูปทรงกลมและมีการผสมกากตะกอนโลหะหนักได้แก่ ตะกั่ว , แคลเซียม และอาร์จีนิก แล้วใช้ Scanning Electron Microscopy (SEM) ส่องดูอนุภาคของกากตะกอนโลหะหนัก และมีการใช้ Energy Dispersive X-ray (EDX) และ Wet Digestion/AA Method จากผลการทดลองพบว่าบริเวณผิวตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยกรดอะซิติก แคลเซียมส่วนใหญ่ในองค์ประกอบของโครงสร้างซีเมนต์ถูกชะละลายออกมา ในขณะที่ซิลิกอน , เหล็ก และอลูมิเนียมยังคงเหลืออยู่ในโครงสร้างซีเมนต์ ซึ่งสารดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติในการดูดซับได้ดี ดังนั้นโลหะหนักที่ละลายออกไปจะดูดซับอยู่ที่บริเวณชั้นผิวของตัวอย่างซึ่งจะช่วยป้องกันการชะละลายของโลหะหนักได้

จากการวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างพบว่า การชะละลายของโลหะหนักจะเกิดเฉพาะที่บริเวณชั้นผิวเท่านั้น ปริมาณโลหะหนักในชั้นที่ไม่มีการชะละลายยังคงมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงก่อนการทดสอบการชะละลาย

Cheng และ Bishop (1992) ได้ทำการศึกษาว่า sorption นั้นเป็นกลไกที่สำคัญต่อการบำบัดของเสี้ยวโดยการทำให้เป็นก้อน โดยได้ทำการผสมซีเมนต์กับกากตะกอนโลหะหนักที่มีส่วนผสมของแคลเซียม , ตะกั่ว และอาร์จีนิก อัตราส่วนผสมของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.60 โดยหล่อเป็นรูปทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.7 เซนติเมตร แล้วนำไปบ่มในห้องที่มีความชื้นสูงมากเป็นเวลา 78 วัน จากนั้นนำมาข่อยให้ก้อนของเสี้ยวมีขนาด 425 ไมโครเมตร (ตะแกรงมาตรฐานของ ASTM เบอร์ 40) แล้วนำไปทดสอบการชะละลายแบบ Single Batch โดยใช้กรดอะซิติกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

เมื่อกรดเข้าไปสัมผัสกับกากตะกอนที่อยู่ในก้อนซีเมนต์ แคลเซียมจะถูกชะละลายออกจากโครงสร้างของก้อนซีเมนต์ จนกระทั่งส่วนที่เหลือทิ้งไว้คือ โครงสร้างที่มีซิลิกาเต็มไปหมด เพราะซิลิกาไม่สามารถละลายได้ในช่วงพีเอชของกรดอะซิติก ดังนั้นรูปแบบของของเสี้ยวที่ถูกฉีกโดยซีเมนต์ที่ผ่านการชะละลายมาแล้วน่าจะมีลักษณะของ sorption ในรูปของ amorphous silica structure ซึ่งแสดงว่าซิลิกาเป็นตัวควบคุมปรากฏการณ์ sorption

นอกจากนี้จากผลการทดลองพบว่า กรดอะซิติกซึ่งมี organic ligand นั้นมีผลต่อพฤติกรรม sorption ของตะกั่วและอาร์จีนิกน้อยมาก แต่มีผลต่อแคลเซียมและแคลเซียมมากในขณะที่ค่าพีเอชของน้ำในรูปพูนในโครงสร้างซีเมนต์เท่ากับ 5.0

Cheeseman, et al. (1993) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการทำลายนุติโดยการทำให้เป็นก้อนซึ่งตะกอนที่นำมาทดลองได้มาจากการทำการตกตะกอนสามแบบคือ จากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 M, สารละลายโซเดียมซัลไฟด์, และสารละลายโซเดียมซัลเฟต น้ำเสียที่นำมาทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์มีปรอท, แคดเมียม, ทองแดง, นิกเกิล, ปรอท, และโครเมียม เมื่อได้ตะกอนโลหะหนักแล้วนำมาทำให้เป็นก้อนโดยใช้สัดส่วนการผสมดังนี้คือ ใช้ตะกอนโลหะหนัก 35%, ปูนซีเมนต์ 15%, เถ้าลอย 15%, และน้ำ 35% โดยน้ำหนัก นำมาผสมกันแล้วหล่อในทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร เสร็จแล้วนำไปบ่ม 28 วันและนำไปทดสอบการชะละลายต่อไป สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

อัตราการถูกชะละลายของโลหะหนักแปรผันไปตามชนิดของโลหะหนักและวิธีการทดสอบการชะละลาย ดังนั้นจึงยากต่อการเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ของผลการบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ไฮดรอกไซด์, ซัลไฟด์, และซัลเฟตเป็นตัวทำเสถียรมาก่อน นอกจากนี้ยังสามารถกล่าวได้ว่าการถูกชะละลายของโลหะหนักชนิดหนึ่งๆ ไม่ขึ้นอยู่กับเครื่องมือของโลหะหนักชนิดอื่นๆ ทั้งนี้พบว่าทำให้ตะกอนซัลเฟตให้เป็นก้อนเป็นวิธีที่ทำให้อัตราการถูกชะละลายของโลหะหนัก (ยกเว้นปรอท) ออกมาต่ำที่สุดซึ่งแสดงให้เห็นว่าซัลเฟตนี้ทำให้ของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนสามารถทนต่อการกัดได้มาก ในขณะที่ตะกอนที่ได้จากซัลเฟตนั้นสามารถเก็บกักโลหะหนักได้ต่ำที่สุด ส่วนตะกอนที่มีปรอทปนอยู่ถ้าใช้ไฮดรอกไซด์หรือซัลเฟตจะทำให้มีความสามารถในการเก็บกักต่ำ แต่ถ้าใช้ซัลไฟด์ในการทำให้เสถียรแล้วจะให้ผลดีกว่า

นฤมิตร คินิมาน (2538) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการทำลายนุติตะกอนโลหะหนักที่ได้จากน้ำเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีด้วยการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อัตราส่วนของเถ้าลอยลิกไนต์คือปูนซีเมนต์, อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสาน, อัตราส่วนผสมของน้ำต่อตัวประสาน, ค่าความเป็นกรด่างของสารละลายที่ใช้ในการสกัดโลหะหนักและระยะเวลาบ่มตัวของก้อนซีเมนต์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การเพิ่มอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักลงในตัวประสานจะมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การชะละลายของปรอท, โครเมียม และเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณตะกอนโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานที่เหมาะสมเท่ากับ 0.25

2. การเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของเถ้าลอยลิกไนต์ระหว่าง 0-75 ลงในตัวประสานจะมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของตัวอย่างลดลง การชะละลายของปรอทสูงขึ้นในขณะที่การชะละลายของโครเมียมลดลง และพบว่าที่อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานเท่า

กับ 0.25 ซึ่งในตัวประสานไม่มีเถาลอยลิกไนต์เป็นสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท แต่สัดส่วนการผสมที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมนั้นใช้อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานค่าเดียวกัน แต่ในตัวประสานมีเถาลอยผสมอยู่ด้วย 50 %

3. อัตราส่วนผสมน้ำต่อตัวประสานเท่ากับ 0.50 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทำให้เป็นก้อน

4. ระยะเวลาการบ่มมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าความชื้นได้น้ำมีค่าลดลง การชะละลายของปรอทและโครเมียมมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการบ่ม และจะมีค่าค่อนข้างคงที่ภายหลังระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

5. ตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยตัวประสานที่มีเถาลอยลิกไนต์ผสมอยู่ 0 และ 50 % ที่มีระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน มีคุณสมบัติทางกายภาพเป็นไปตามมาตรฐานของสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน สำหรับคุณสมบัติด้านการชะละลายของโลหะหนักพบว่าปรอทมีค่าสูงซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสารพิษแต่โครเมียมมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

6. ประสิทธิภาพการทำลายฤทธิ์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันของตัวประสานที่มีเถาลอยอยู่ 0 % นั้นมีค่าเท่ากับ 26.4 % สำหรับปรอท มีประสิทธิภาพต่ำมากสำหรับโครเมียม และมีค่าเท่ากับ 80 % สำหรับเหล็ก ในขณะที่ตัวประสานที่มีเถาลอยอยู่ 50 % มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ปรอทเท่ากับ 30.70 % ของโครเมียมเท่ากับ 50 % และของเหล็กเท่ากับ 90 %

7. ค่าใช้จ่ายของตัวประสานที่ใช้นในการทำให้เป็นก้อนสำหรับตัวประสานที่ไม่มีเถาลอยมีค่าเท่ากับ 6,800 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนัก และสำหรับตัวประสานที่มีเถาลอย 50 % มีค่าเท่ากับ 3,800 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนัก ดังนั้นตัวประสานที่มีเถาลอยอยู่ 50 % จึงมีความเหมาะสมในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักมากกว่าตัวประสานที่ไม่มีเถาลอย

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย