

### บทที่ 3 ทบทวนเอกสาร

#### 3.1 โถหะหนัก

โถหะหนัก หมายถึง โถหะที่มีความกว้างเฉพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไปมีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 - 92 ภายในคาบที่ 4 - 7 ของตารางธาตุ มีจำนวน ทั้งหมด 68 ธาตุ

ในการทดลองนี้ใช้ตะกอนโลหะหนักที่มีปรอทปนเปื้อน 2 ชนิด คือ

1) ตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีไอทีซึ่งอยู่ในรูปตะกอนปรอทไฮดรอกไซด์ดังสมการ



2) ตะกอนโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอมศพอุตสาหกรรม

#### 3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญในทางวิศวกรรม โดยเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับทราย หิน และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้คอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะทำให้ได้คอนกรีตที่แข็งแรงทนทาน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,400 - 1,500 องศาเซลเซียส ส่วนประกอบของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ส่วนประกอบ	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ปริมาณ (%)	60-65	20-24	4-8	2-5

ที่มา : วินิต ช่อวิเชียร, 2539

เมื่อเอาส่วนประกอบข้างต้นนี้ของปูนซีเมนต์แล้ว สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก จะทำปฏิกิริยาเคมีรวมตัวกันได้สารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิด ได้แก่ ไครแคลเซียมซิลิเกต ไคแคลเซียมซิลิเกต ไครแคลเซียมอะลูมิเนต และเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 แสดงสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไครแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ไคแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไครแคลเซียมอะลูมิเนต	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

ที่มา : วินิต ช่อวิเชียร, 2539

สารประกอบทั้ง 4 ชนิดซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังนี้

1) ไครแคลเซียมซิลิเกต ( Tricalcium Silicate,  $\text{C}_3\text{S}$  ) จะทำให้ปูนซีเมนต์รับกำลังได้เร็วให้กำลังสูงและเกิดความร้อนมาก

2) ไคแคลเซียมซิลิเกต ( Dicalcium Silicate,  $\text{C}_2\text{S}$  ) จะทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้ช้าให้กำลังสูงและเกิดความร้อนน้อย

3) ไครแคลเซียมอะลูมิเนต ( Tricalcium Aluminate,  $\text{C}_3\text{A}$  ) จะทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัวทันทีที่ผสมกับน้ำ ให้ความร้อนสูง โดยจะให้กำลังรับแรงเล็กน้อยในวันแรกและจะไม่ให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่จะมีประโยชน์ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาของไครแคลเซียมซิลิเกต

4) เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ ( Tetracalcium Aluminoferrite,  $\text{C}_4\text{AF}$  ) จะก่อตัวอย่างรวดเร็ว แต่ช้ากว่าและให้ความร้อนน้อยกว่าไครแคลเซียมอะลูมิเนตเล็กน้อย ส่วนการให้กำลังรับแรงยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน

จากตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ  $\text{CaO}$  และ  $\text{SiO}_2$  รวมกันมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสารประกอบทั้งสองนี้เป็นสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของไครแคลเซียมซิลิเกต และ ไคแคลเซียมซิลิเกตซึ่งจะทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีกำลังรับแรงได้สูง

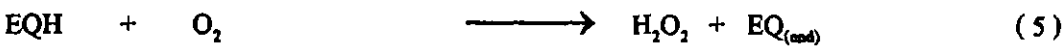
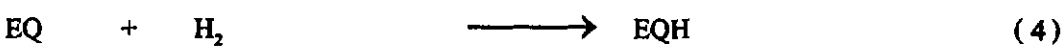
3.2.1 ชนิดและข้อกำหนดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

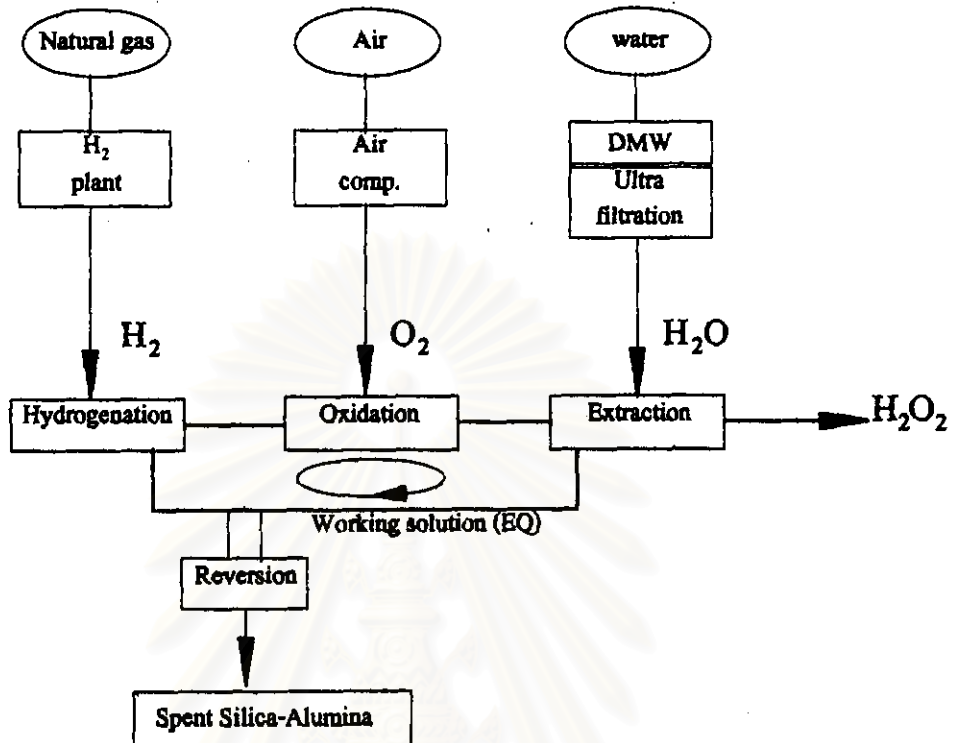
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานมีอยู่ 5 ชนิดด้วยกัน ตามที่ได้กำหนดไว้ใน ASTM C-150 กล่าวโดยย่อมีดังนี้ คือ

- ชนิดที่ 1 เป็นปูนซีเมนต์ธรรมดาหาได้ทั่วไป และใช้ในงานส่วนมาก
- ชนิดที่ 2 มีปริมาณโครแมลเซียมอะลูมินาต่ำกว่าชนิดที่ 1 และให้ความร้อนน้อยกว่าและมีความต้านทานสารพวกซัลเฟตได้สูงกว่า แต่ปริมาณโครแมลเซียมอะลูมินาจะต้องไม่เกินร้อยละ 8
- ชนิดที่ 3 เป็นซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในระยะแรก ผลิตโดยใช้การบดอย่างละเอียด และ/หรือเพิ่มปริมาณโครแมลเซียมซัลเฟต และโครแมลเซียมอะลูมินาขึ้นอีก
- ชนิดที่ 4 เป็นซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ ทำขึ้นโดยใช้โครแมลเซียมอะลูมินาต่ำ แต่ใช้โครแมลเซียมซัลเฟตมาก ซีเมนต์ชนิดนี้ใช้กันมากในการก่อสร้างพวกคอนกรีตหยาบ เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าขณะแข็งตัว
- ชนิดที่ 5 เป็นชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้ดี เพราะมีปริมาณโครแมลเซียมอะลูมินาต่ำมาก ปกติไม่เกินร้อยละ 5 แต่ถ้าจะให้ดีไม่ควรให้เกินร้อยละ 4

3.3 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นสารที่ได้จากกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยในขั้นตอนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะใช้สาร Working Solution (EQ ซึ่งเป็นสารประกอบในกลุ่มแอนทราควินโนน) ในการทำให้เกิดการรวมตัวของก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) กับก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ได้สารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) เมื่อสาร Working Solution ทำงานครบ 1 รอบการทำงานจะเกิดความชื้นและสิ่งสกปรกเพิ่มขึ้น จำเป็นต้องใช้สารซิลิกา-อะลูมินา (Silica-Alumina Powder) ในการดูดความชื้นและสิ่งสกปรกออกจากสาร Working Solution. หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วสารซิลิกา-อะลูมินาจะหมดคุณสมบัติกลายเป็นซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (Spent Silica-Alumina) ที่จะต้องกำจัดต่อไป ซึ่งปริมาณซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วดังกล่าวมีประมาณ 100 ตันต่อปี และซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วดังกล่าวจะเกิดจากขั้นตอนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องดังนี้





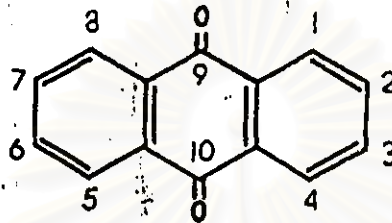
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนในกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ )  
(ข้อมูลจากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จ.ระยอง)

ตารางที่ 3.3 แสดงองค์ประกอบของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ส่วนประกอบ	ปริมาณ	
	มก./ก.	%
Aluminium oxide ( $Al_2O_3$ )	550 – 630	55.0-63.0
Silicium oxide ( $SiO_2$ )	120 – 160	12.0-16.0
Water soluble salt	70 – 130	7.0-13.0
Humidity ( $H_2O$ )	100	10.0
Ethyl tetrahydro anthraquinone	23.08	2.31
Ethyl anthraquinone	9.85	0.99
Ethyl dihydroxy anthraquinone	6.61	0.66

### 3.3.1 สารแอนทราควิโนน (Antraquinone)

สารแอนทราควิโนนมีสูตรทางเคมีคือ  $C_{14}H_{10}O_2$  มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็มสีเหลือง มีจุดหลอมเหลวที่  $286\text{ }^{\circ}\text{C}$  บางชนิดของสารแอนทราควิโนนใช้ทำสีข้อมผ้า และยาถ่าย โดยมีสูตรโครงสร้างประกอบไปด้วยระบบวงแหวน และหมายเลข ดังแสดงต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 แสดงสูตรโครงสร้างของสารแอนทราควิโนน (Travor Robinson, 1980)

### 3.4 ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

การผสมคอนกรีตด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีปฏิริยาที่เข้ามาเกี่ยวข้องคือ

1) ปฏิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) เป็นปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว ปฏิริยาจะขึ้นกับสารประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งสารประกอบดังกล่าวจะทำให้ปฏิริยากันและเปลี่ยนเป็นวัสดุประสาน ผลิตภัณฑ์ของปฏิริยาไฮเดรชันมีชื่อเรียกรวม ๆ ว่าซีเมนต์เจล (Cement gel) ประกอบด้วย แคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (C-S-H) ประมาณร้อยละ 50 - 90 โดยปริมาตร และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ประมาณร้อยละ 20-25 โดยปริมาตร มีลักษณะเป็นผลึกที่หยาบมากและมีขนาดเล็ก ซึ่งมีการเกิดปฏิริยาดังนี้



ขั้นตอนของปฏิริยาไฮเดรชัน คือ เมื่อผงซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำแล้วจะเกิดเป็นไฮเดรตคอนพาวนต์ โดยไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ) และไดแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_2\text{S}$ ) จะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในสมการที่ 7 และ 8

ปฏิริยานี้จะดำเนินไปเรื่อยๆ โดยที่แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) จะแยกตัวออกมาจากแคลเซียม-ซิลิเกต ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) ไปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) จนสารละลายนั้นอิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) หรือสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) ถูกทำปฏิริยาไปจนหมด

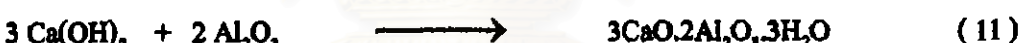
สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้ง 2 ส่วน ได้แก่

1.1) แคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (Calcium-Silicate-Hydrate, C-S-H) มีสูตรเคมีดังนี้



1.2) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, C-H) เป็นสารที่สามารถปฏิกิริยาต่อไปได้อีก ถ้ามีสารประกอบที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา

2) ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) สารปอซโซลานหมายถึง วัสดุซึ่งตัวเองไม่มีสมบัติเป็นตัวประสาน แต่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และก่อตัวเป็นตัวประสานได้ซึ่งมีสารประกอบหลักคือ  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , และ  $CaO$  วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมของซีเมนต์พิเศษจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้สารประกอบแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรตเช่นเดียวกับปฏิกิริยาของ ไครแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) และ ไคแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) ที่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนถึงจึคจำกัดขีดหนึ่ง ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการเคมีดังต่อไปนี้



3.5 ของเสียอันตราย (Hazardous Waste)

ประเทศไทยมีกฎหมายที่บัญญัติความหมายไว้ดังนี้

1) พ.ร.บ. วัตถุอันตราย พ.ศ.2535

มาตรา 4 วัตถุอันตราย หมายความว่า วัตถุดังต่อไปนี้

1. วัตถุระเบิดได้
2. วัตถุไวไฟ
3. วัตถุออกซิไดซ์ และวัตถุเปอร์ออกไซด์
4. วัตถุพิษ
5. วัตถุที่ทำให้เกิดโรค
6. วัตถุกัมมันตรังสี
7. วัตถุที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม
8. วัตถุกัดกร่อน

9. วัตถุที่ก่อให้เกิดการระคายเคือง
10. วัตถุอย่างอื่นไม่ว่าจะเป็นเคมีภัณฑ์ หรือสิ่งอื่นใด ที่อาจทำให้เกิดอันตรายแก่บุคคล สัตว์ พืช ทรัพย์สิน หรือสิ่งแวดล้อม

2) สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ได้แบ่งประเภทของเสียอันตรายไว้ 14 ประเภทได้แก่

1. น้ำมันต่าง ๆ
2. เศษเหลือของสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของเหลว
3. กากตะกอนของสารอินทรีย์
4. กากตะกอนของสารอนินทรีย์
5. กากตะกอนโลหะหนัก
6. สารทำละลายต่างๆ
7. ของเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรด
8. ของเสียที่มีฤทธิ์เป็นด่าง
9. ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาคิดแบบ
10. Polychlorinated Biphenyls (PCBs)
11. เศษเหลือของสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารละลาย
12. ของเสียจากการล้างรูปถ่าย
13. ของเสียคิเคซ็ือ
14. ของเสียชุมชน

### 3.6 การกำจัดของเสียอันตรายโดยการทำให้เสถียรและการทำให้เป็นก้อน (Stabilization / Solidification of Hazardous waste)

การทำให้เสถียร (Stabilization) หมายถึง การที่ของเสียถูกเปลี่ยนแปลงทางเคมีให้มีความเสถียรมากขึ้น ทั้งนี้รวมทั้งการทำให้อยู่ในรูปที่ไม่สามารถละลายได้ ซึ่งจะกักสารที่เป็นพิษไว้ในโครงสร้างทางผลึกของตัวสารที่ทำให้เกิดความเสถียรแล้ว

การทำให้เป็นก้อน (Solidification) หมายถึง การที่มีการเติมสารบางชนิดเช่น ปูนซีเมนต์ ลงในของเสียเพื่อให้ได้ของแข็งที่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีลักษณะทางกายภาพดีขึ้นและมีความเสถียรมากขึ้น ซึ่งทำให้ของเสียนั้นพร้อมที่จะถูกจัดการหรือขนส่งต่อไป

การทำให้เสถียรและการทำให้เป็นก้อน เป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อป้องกันการละลาย และการปนเปื้อนของสารเคมีที่เป็นของเสียอันตรายลงสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นวัตถุประสงค์พื้นฐานของการทำให้เสถียรและการทำให้เป็นก้อนมีดังนี้

- ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของของเสียให้เหมาะสมในการเคลื่อนย้ายของเสียนั้น
- การลดพื้นที่ผิวของของเสียเพื่อป้องกัน หรือลดการรั่วไหลของสารพิษ
- การจำกัดการละลายของสารมลพิษที่อยู่ในของเสีย

ตารางที่ 3.4 แสดงกระบวนการกำจัดของเสียอันตราย ด้วยการทำให้เป็นก้อนประเภทต่างๆ 7 วิธี ซึ่งการเลือกวิธีการบำบัดของเสียดังกล่าว ควรเลือกให้เหมาะกับชนิด และคุณสมบัติเฉพาะของของเสียสำหรับโลหะหนักนั้นสามารถกำจัดได้หลายวิธี เช่น Cement Based, Pozzolanic (Lime Based), Thermoplastic, Organic Polymer, Surface Encapsulation และ Glassification

### 3.7 การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ (Cement-based Technique)

กระบวนการที่ทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ ประกอบด้วยการผสมของเสียกับปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์และสารผสมเพิ่มอื่นเช่น วัสดุปอซโซลาน โลหะหนักหลายชนิดในของเสียจะถูกเปลี่ยนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ และโลหะซัลไฟด์ที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งจะถูกลบไว้ภายในช่องว่างของโครงสร้างของส่วนผสมซีเมนต์ (Bishop, 1988) ดังนั้นสรุปข้อดีข้อเสียไว้ดังนี้

#### ข้อดี

1. สารที่เดิมในส่วนผสมสามารถหาได้ง่าย
2. เทคนิคการผสมซีเมนต์ไม่ยุ่งยาก
3. วิธีการนี้สามารถทนต่อสารเคมีหลายชนิดในตะกอนของแข็งได้เป็นอย่างดี
4. เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการมีอยู่ทั่วไปหาได้ง่าย
5. ความแข็งแรงและความสามารถในการน้ำซึมผ่านของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแข็งตัวสามารถปรับได้โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมลงในของเสีย
6. วัสดุที่ใช้มีราคาถูก

#### ข้อเสีย

1. ไม่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์บางชนิดที่จะทำลายกลไกการแข็งตัวของซีเมนต์
2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถถูกชะละลายได้ในสภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำ
3. การเพิ่มน้ำหนักของของเสียโดยการห่อด้วยซีเมนต์จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งของเสียไปกำจัดเพิ่มขึ้น



ตารางที่ 3.4 แสดงกระบวนการกำจัดของเสียอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน

กระบวนการการทำให้เป็นก้อน	รายละเอียด
1. Cement Based	ของเสียจะถูกผสมลงไปโนซีเมนต์ น้ำและส่วนผสมอย่างอื่น ๆ และปล่อยให้แห้งจนแข็งตัวเป็นก้อนซีเมนต์
2. Pozzolanic (Lime Based)	ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาว และวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานเช่น เถ้าถอย ผงซีเมนต์ที่เคาเผา เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งตัวได้เมื่อผสมน้ำแล้วปล่อยให้แห้งตัว
3. Thermoplastic	นำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น Bitumen, Paraffin หรือ Polyethylene ปล่อยให้ส่วนผสมเย็นตัวลงและแข็งตัว
4. Organic Polymer	ของเสียในชั้นแรกจะถูกผสมกับสาร โพลีเมอร์ (Gelli agents หรือ Urea formaldehyde) และเติมสารคะติติสต์ผสมให้เข้ากันก่อนที่สารโพลีเมอร์แข็งตัว
5. Surface Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันแน่น แล้วเคลือบผิวนอกของของเสียที่ถูกบดอัดด้วยสารเหนียว เช่น Polyethylene หรือ Organic resins
6. Self-cementing	สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมซัลไฟด์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สามารถนำมาใช้ผสมกับตะกอนของเสียเพื่อหล่อให้แข็งตัวได้ โดยวัสดุที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย และมีความสามารถให้นำซึมได้น้อย
7. Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics	สารที่เป็นอันตรายมาก เช่น กากสารกัมมันตรังสีสามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็นส่วนผสมของแก้ว หรือ Synthetic Silicate Mineral เพื่อป้องกันการไม่ให้สารอันตรายนี้ถูกชะละลายด้วยน้ำ สามารถนำไปกำจัดต่อไปโดยไม่ต้องมีกระบวนการหุ้มหรือบรรจุครั้งที่ 2

Rijal, 1990 ได้สรุปข้อดีและข้อเสีย สำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธีไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Cement Based	-chemical fixation solidification	-นึ่งหรือเปือก (โดยทั่วไปเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	-วัสดุที่ใช้มีราคาถูก -มีความทนทานต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี -กำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดี -เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนามาเป็นแล้ว	-ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ -ซีเมนต์และของเสียที่แข็งตัวแล้วถูกกระด้างได้ในสภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำ -เพิ่มน้ำหนักและขนาดของของเสียและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และการฝังกลบ
2. Lime Based	-chemical fixation solidification	-นึ่งหรือเปือก (โดยทั่วไปเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	-วัสดุที่ใช้มีราคาถูก -เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนามาเป็นแล้ว -การใช้เข้าออกมาเป็นส่วนใหญ่เป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิด โดยใช้กระบวนการเดียวกัน	-เหมือนกับกระบวนการประเภท Cement Based
3. Thermoplastic Based	-physical fixation	-นึ่ง(เหมาะกับสารอนินทรีย์)	-สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีได้เป็นอย่างดี -สารละลายที่ระด้างมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก	-ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และต้องใช้แรงงานที่มีความชำนาญ -ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ -ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวก strong oxidants, dehydrated salts

ตารางที่ 3.5 แสดงข้อดีข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี ดังนี้ (ต่อ)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเนื้อ	ข้อดี	ข้อเสีย
4.Organic Polymer Process	- Physical fixation	-แห้งหรือเปื่อย (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	-ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิด polymer's matrix -ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง	-ของเนื้อจะถูกยึดไว้ในโพลีเมอร์อย่างหลวมๆ -สารที่มีพิษจะก่อให้เกิดโลหะละลายออกมาได้มากขึ้น -การย่อยสลายทางชีวภาพของสารโพลีเมอร์บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ
5. Encapsulation	- chemical containment	-แห้งหรือเปื่อย	-ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี -ไม่มีการระเหยของเนื้อออกมา เมื่อสารที่หุ้มห่ออยู่ไม่ถูกทำลาย -ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีอื่น	-การระเหยของเนื้อจะเกิดขึ้นหาก สารที่หุ้มถูกทำลาย -ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่ต้องกำจัดของเนื้อจำนวนมากๆ
6. Self Cementing	-Chemical fixation	-แห้งหรือเปื่อย	-กระบวนการนี้ต้องการสารเติมในส่วนผสมซึ่งจะช่วยให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก	-สารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ -ส่วนผสมของซีเมนต์และของเนื้อที่ไม่ได้มีการห่อหุ้มสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะละลายได้ภายใต้ภาวะที่ค่าพีเอชต่ำๆ

ตารางที่ 3.5 แสดงข้อดีข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี ดังนี้ (ต่อ)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
7. Classification	- Physical fixation	-แห้ง	-ของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก้วจะถูกชะล้างได้น้อยมาก -การบรรจุหุ้มท่ออยู่ในเกณฑ์ -ใช้วัสดุที่มีราคาถูก	-อุณหภูมิสูงอาจทำให้มีของเสียอื่นระเหยออกมา -ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับการให้ความร้อนแก่อุปกรณ์ และต้องการพื้นที่จำนวนมากเฉพาะ -ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการกำจัดของเสียทุกชนิด ยกเว้นสารกับมันสภาพรังสี และสารที่มีพิษ มากๆ

ที่มา Rijal, 1990

### 3.8 กลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์

Poon และคณะ, 1985 ได้ทำการศึกษากลไกการยึดจับของสังกะสีและปรอท โดยใช้วิธี Cement/Silicate Stabilization ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบการชะละลาย การส่องดูอนุภาคต่างๆ ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) การวิเคราะห์สารต่าง ๆ ด้วย X-ray Diffraction (XRD) และการศึกษาความพรุน ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

เมื่อใช้ SEM มองดูตัวอย่างซีเมนต์ที่ไม่มีการผสมไฮดรอกซีซิลิเกต หรือ โลหะหนักใดๆ พบว่าผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไฮเดรต (C-S-H) ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นรูปร่างของ Ettringite และผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ต่อมาเมื่อใช้มองดูตัวอย่างซีเมนต์ที่มีการผสมไฮดรอกซีซิลิเกต (ซึ่งจะได้สารที่เรียกว่า Chemfix) แต่ไม่ได้ผสมโลหะหนัก พบว่านอกจากจะพบผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่กล่าวมาข้างบนแล้ว พบว่ามีเงาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เมื่อใช้ SEM ไปส่องดูตัวอย่าง Chemfix ที่มีการผสม  $Zn^{2+}$  ประมาณ 2% พบว่าไม่มีผลิตภัณฑ์เส้นใยของ C-S-H และผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่พบว่ามีผลิตภัณฑ์รูปร่างของ Ettringite เต็มไปหมด และปรากฏว่ามีแผ่นปริซึมรูปหกเหลี่ยมของ Monosulfate (Afm) ดังรูปที่ 3.5 นอกจากนี้ยังพบว่ามีช่องว่างเต็มไปหมด (ซึ่งผลต่างๆ เหล่านี้ยังเห็นได้เด่นชัดยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มการผสม  $Zn^{2+}$  เป็น 6%) แต่จากผลการทดสอบการชะละลายแล้ว พบว่ามีปริมาณ  $Zn^{2+}$  รั่วไหลออกมาน้อยตลอดการทดลอง นอกจากนี้จากผลของการศึกษาความพรุนยังได้ยืนยันว่าใน

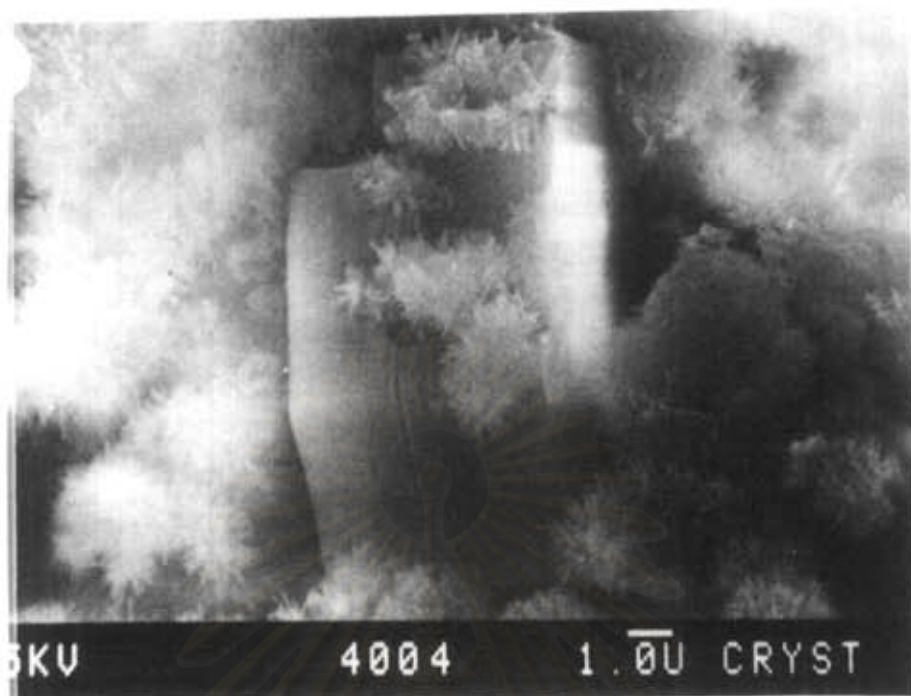
ตัวอย่างของ Chemfix ที่มี  $Zn^{2+}$  นั้นมีรูพรุนเกิดขึ้นมากมาย และยังทำให้รูพรุนเหล่านั้นมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 และจากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์หายไป เนื่องจากเส้นกราฟมีปริมาณของ  $C_3A$  ต่ำ แต่มีปริมาณของ Ettringite ที่สูงมาก และพบเส้นกราฟที่ไม่สามารถจำแนกได้ว่าเป็นสารอะไรอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.8

ส่วนใน Chemfix ที่มี  $Hg^{2+}$  ผสมอยู่ จากผลการทดสอบการชะละลาย พบว่ามีปริมาณ  $Hg^{2+}$  ที่รั่วไหลออกมามากตั้งแต่เริ่มการทดลอง ส่วนผลจากการศึกษาความพรุนของตัวอย่างนี้พบว่ามีค่าความพรุนใกล้เคียงกับตัวอย่างที่มีเพียง Chemfix และมีความพรุนต่ำกว่าตัวอย่าง Chemfix ที่มี  $Zn^{2+}$  ผสมอยู่นอกจากนี้จากผลของการวิเคราะห์ XRD และ SEM นั้นไม่พบว่า  $Hg^{2+}$  ได้ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์หรือไฮดรอกซิลิกเกต ดังแสดงในรูปที่ 3.9-3.10

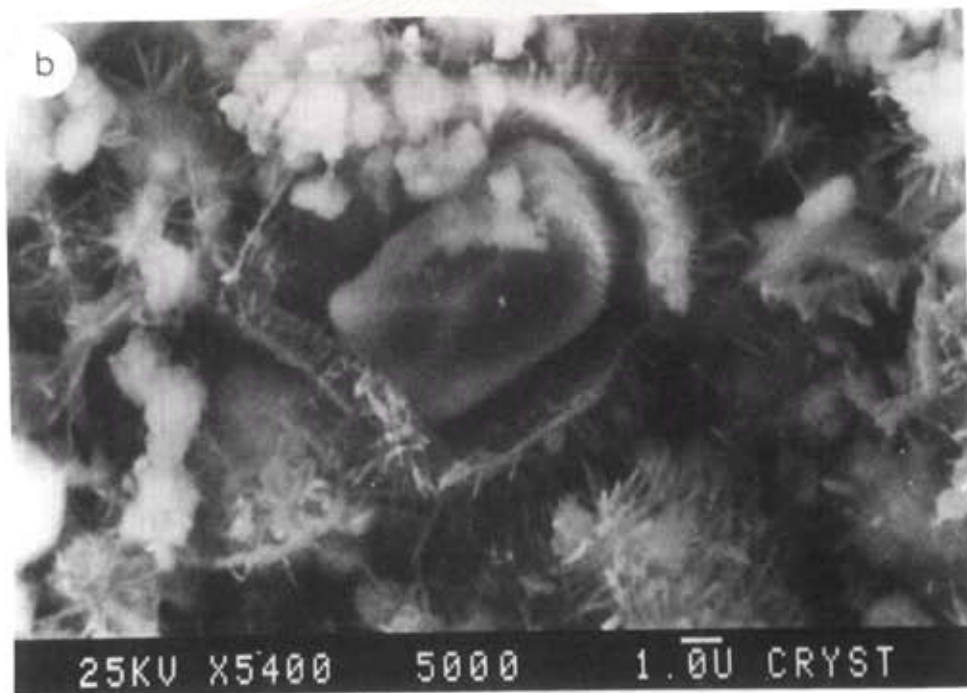
ดังนั้น จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่ากลไกที่ใช้ยึดจับโลหะหนักนั้นมีลักษณะแตกต่างกัน 2 กลไกคือ

1. Chemical stabilization ไอออนของโลหะหนักนั้นอาจจะทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นมาใหม่ซึ่งยึดติดอยู่กับโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ได้ดีแม้ว่าจะมีรูพรุนเกิดขึ้นมากมาย หรืออาจจะกล่าวได้ว่า ความซึมได้ของน้ำมีผลต่อกลไกประเภทนี้น้อย เว้นแต่ว่าโครงสร้างของซีเมนต์ที่มีโลหะหนักยึดติดอยู่นั้นพังทลายลงจึงทำให้มีปริมาณไอออนของโลหะหนักรั่วไหลออกมามาก

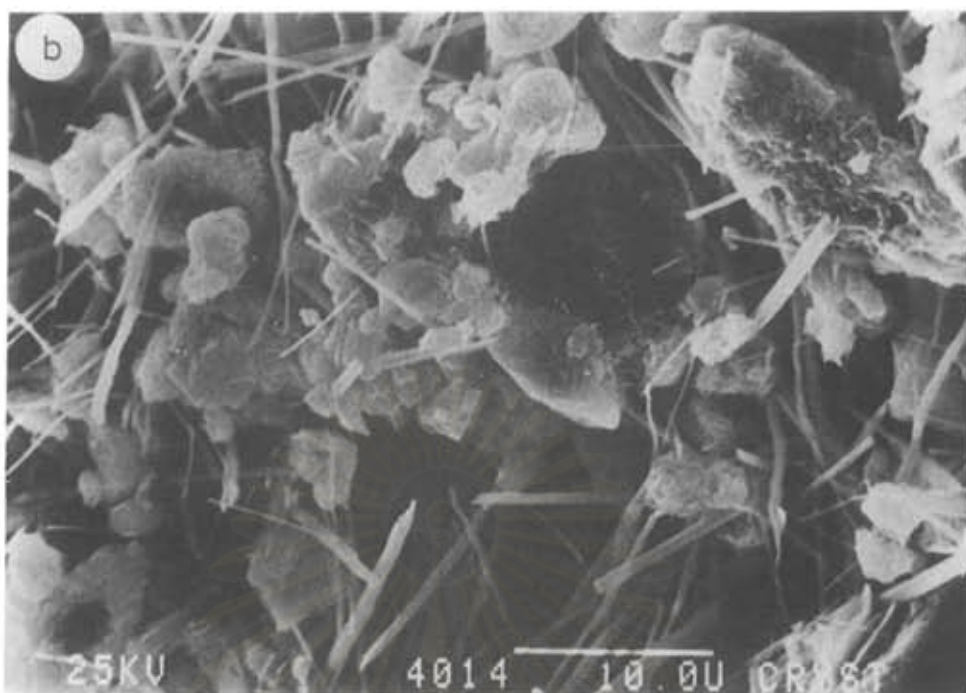
2. Physical entrapment ไอออนของโลหะหนักนั้น ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ซึ่งเป็นไปได้ว่ามันยึดอยู่เพียงหลวมๆ กับโครงสร้างซีเมนต์เท่านั้น จึงทำให้ความซึมได้ของน้ำของก้อนซีเมนต์นั้นมีผลต่อการถูกชะละลายของโลหะหนัก ถ้ามีการเติมสารผสมเติมบางตัวเช่น แกลบยกลินด์ หรือ ซิลิกาฟูม เป็นต้น ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิด Amorphous C-S-H เพื่อไปเติมช่องว่างที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้สามารถลดปริมาณไอออนโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาได้



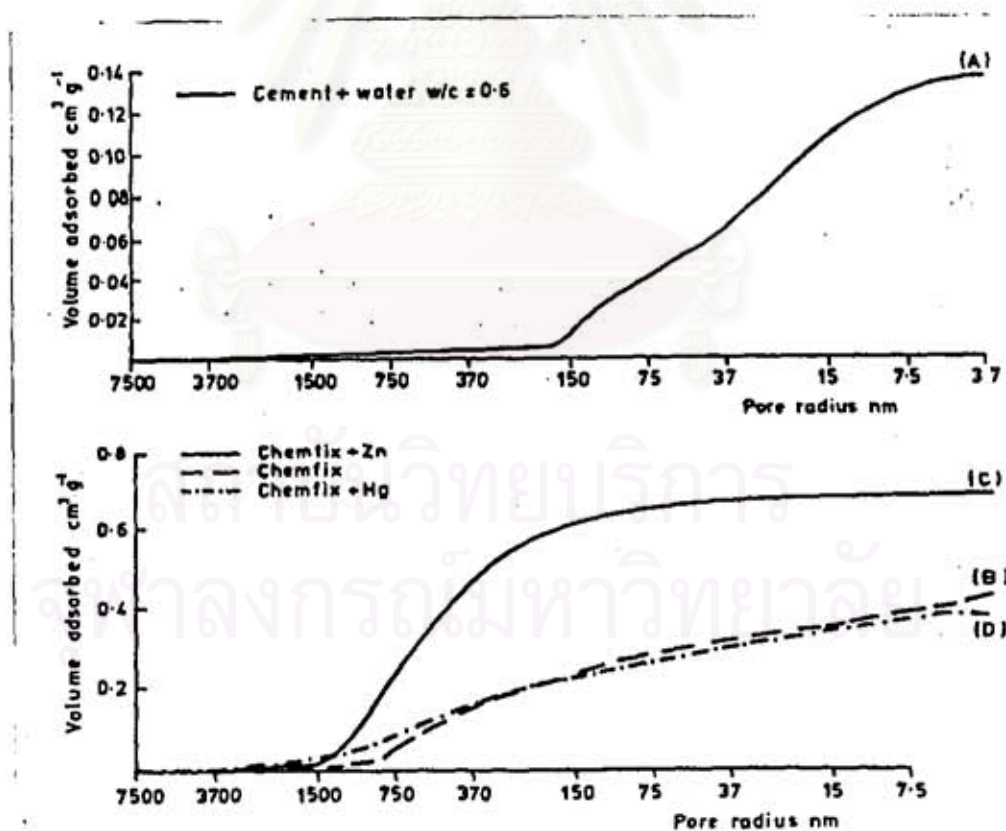
รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างซีเมนต์ธรรมดา (Poon, 1985)



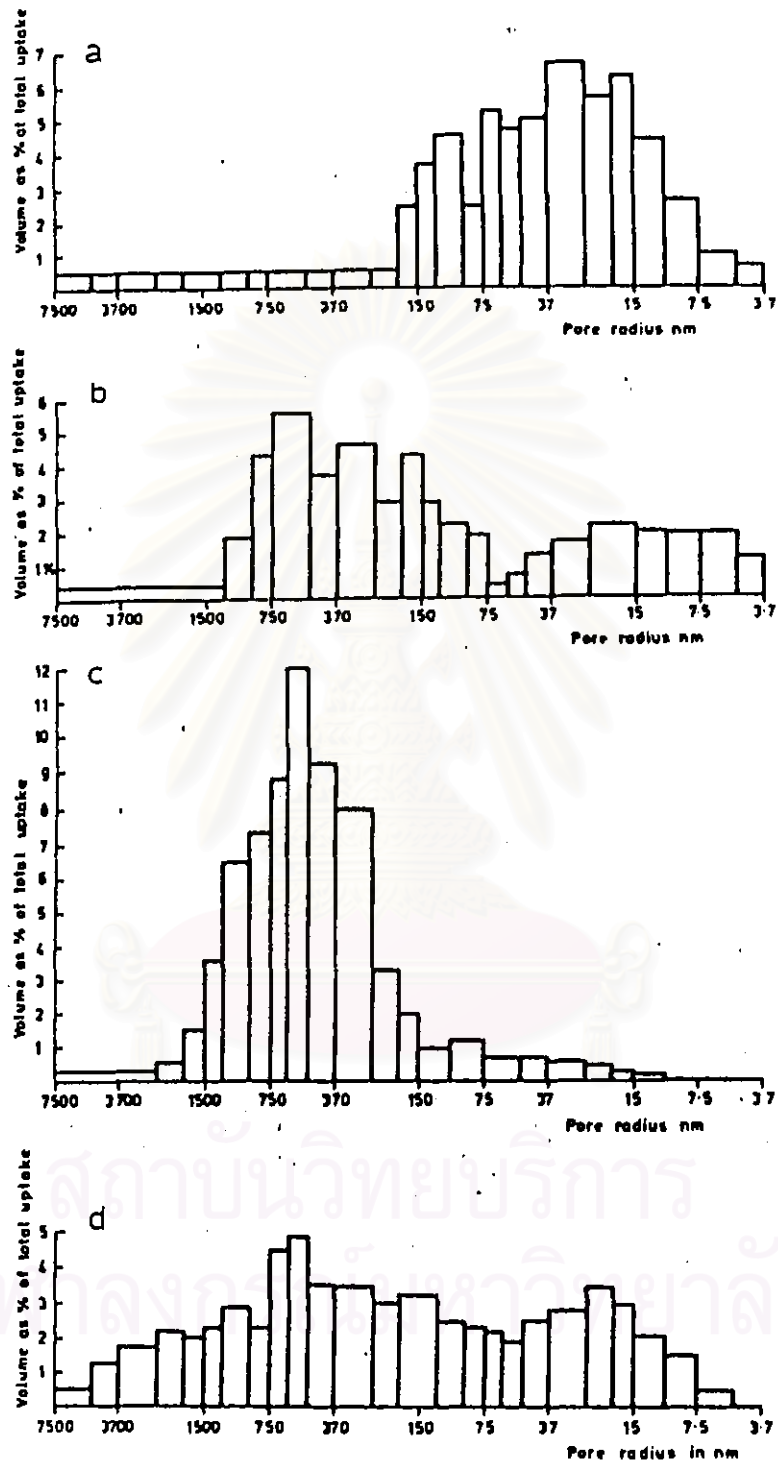
รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างซีเมนต์ผสมซิลิกา (Poon, 1985)



รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ผสมซิลิกาที่มีถึงกะทิผสมอยู่ (Poon, 1985)

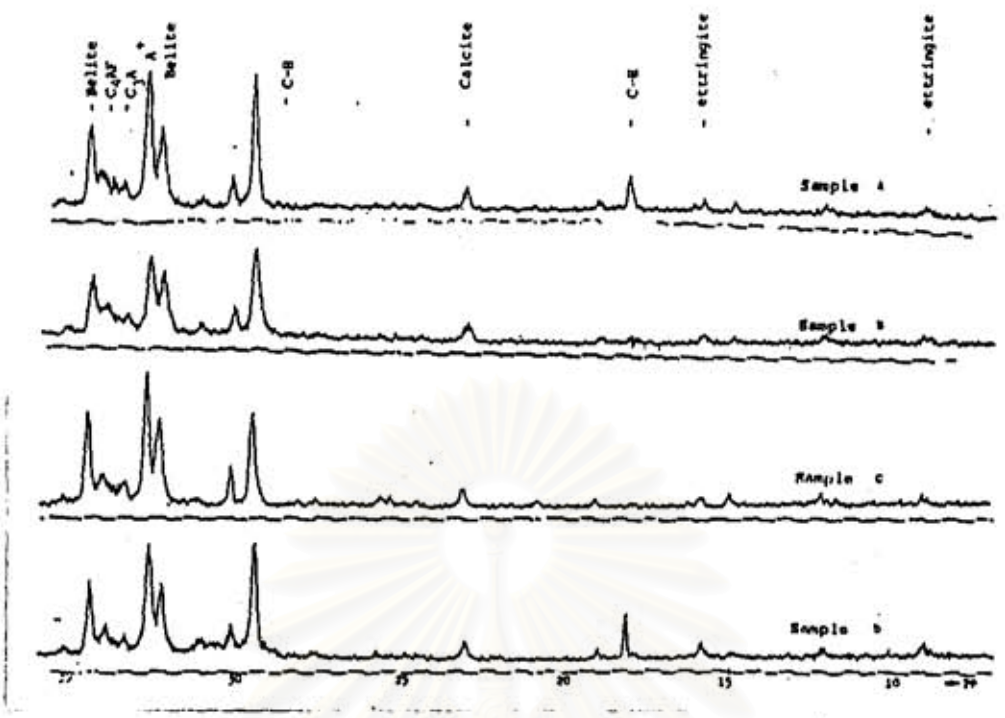


รูปที่ 3.6 แสดงปริมาณการดูดซับของรูพรุนในแต่ละตัวอย่าง (Poon, 1985)

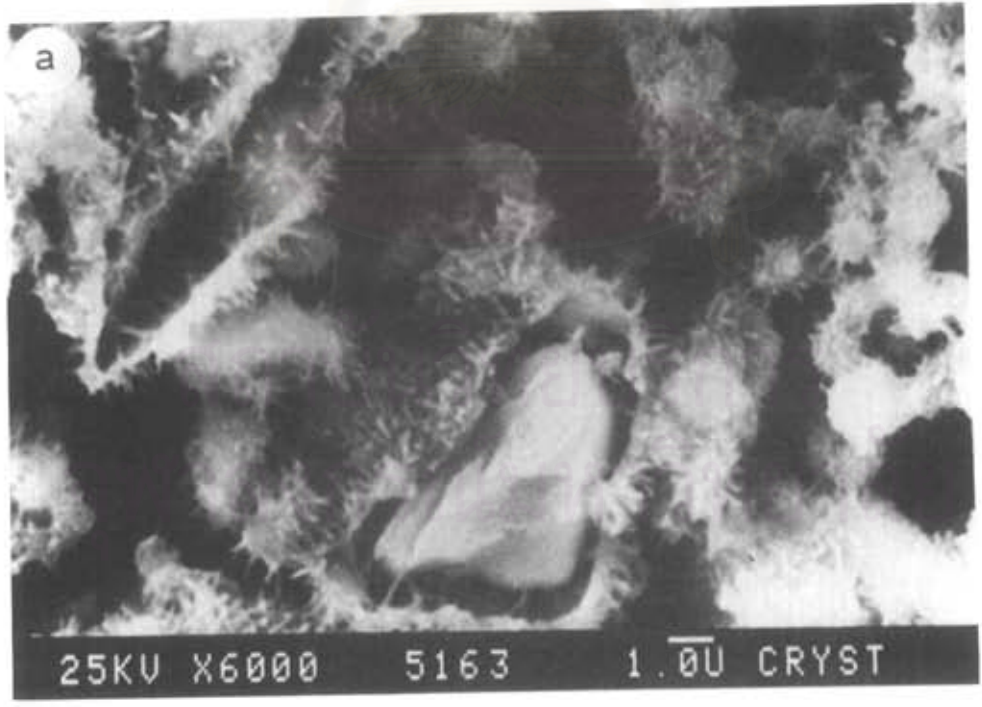


รูปที่ 3.7 แสดงการกระจายขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง โดยที่ รูป A คือซีเมนต์ธรรมดา รูป B คือ Chemfix รูป C คือ Chemfix+Zn และรูป D คือ Chemfix+Hg (Poon, 1985)





รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะร่องรอยของสารต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ XRD (Poon, 1985)



รูปที่ 3.9 แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ผสมชนิดที่มีปรอทผสมอยู่ (Poon, 1985)



รูปที่ 3.10 แสดงภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่เป็นซีเมนต์ผสมซิลิกาที่มีพรอทผสมอยู่ (Poon, 1985)

Zang และ Malhotra, 1995 ศึกษาการเติมสาร Thermally Activated Aluminosilicate Material (MK) ซึ่งมีสารประกอบหลักคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) 51.34 % อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 41.95 % และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) 0.34 % ลงในคอนกรีต และทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด แรงดึง ความยืดหยุ่น Young's modulus of Elasticity ฯลฯ โดยการเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ และคอนกรีตผสมซิลิกาพูน ดังแสดงในรูปที่ 3.11

TABLE 5  
Mechanical Properties of Hardened Concrete

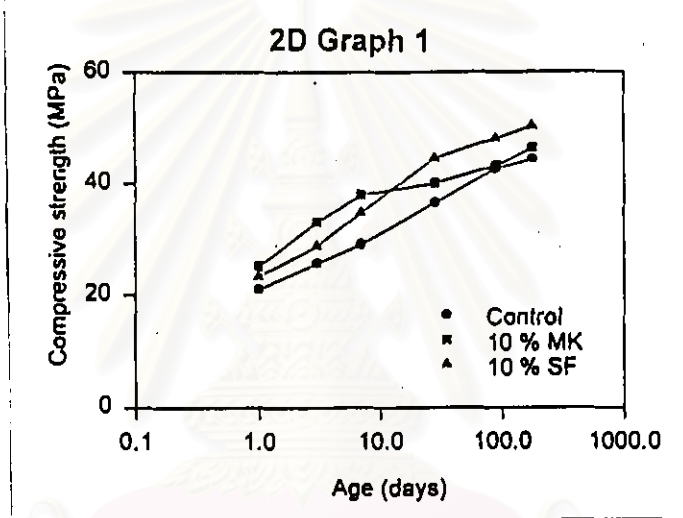
Mix no.	MK content (%)	Silica fume content (%)	W/C or W/C+MK or W/C+SF	Unit weight ( $\text{kg/m}^3$ )	Strength (MPa)								*E* Modulus** (GPa)
					Compressive*					Splitting tensile**		Flexural*	
					1d	3d	7d	28d	90d	180d	28d	28d	
C0	0	0	0.40	2350	20.9	25.5	28.9	36.4	42.5	44.2	2.7	6.3	29.6
MK10	10	-	0.40	2330	25.0	32.9	37.9	39.9	43.0	46.2	3.1	7.4	32.0
SF10	-	10	0.40	2320	23.2	28.6	34.7	44.4	48.0	50.2	2.8	7.0	31.1

\* average of three 102x203-mm cylinders, \*\* average of two 152x305-mm cylinders

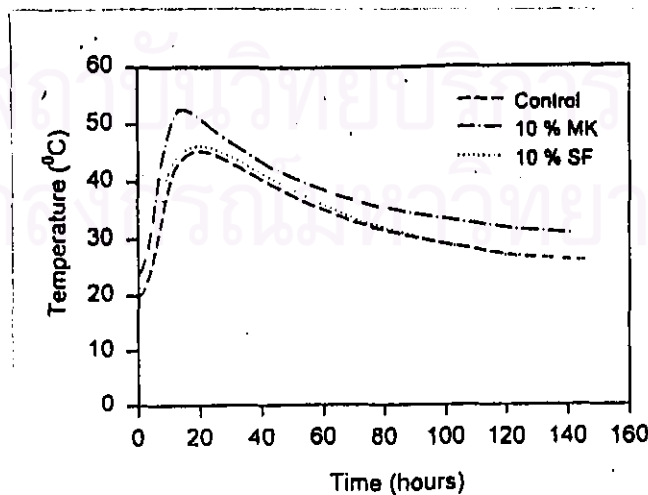
\* average of two 102x76x406-mm prisms, \*\* average of two 152x305-mm cylinders.

รูปที่ 3.11 แสดงการพัฒนา กำลังรับแรงอัดเทียบกับอายุของคอนกรีต (Zang และ Malhotra, 1995)

กำลังรับแรงอัด ความยืดหยุ่น กำลังรับแรงดึง Young's modulus of Elasticity ของคอนกรีต แสดงใน รูปที่ 3.12 ในการพัฒนากำลังรับแรงอัดเทียบกับอายุคอนกรีต พบว่าคอนกรีตผสมสารMK จะมีกำลังที่สูงกว่าในทุกอายุจนถึงอายุ 180 วันเทียบกับคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตผสมสารMK มีการพัฒนากำลังได้เร็วกว่าที่วันแรกๆ แต่จะมีกำลังลดลงหลังอายุ 28 วันไป เมื่อเทียบกับคอนกรีตผสมซิกาฟลูมแล้วคือรูปที่ 3.13 การพัฒนากำลังที่เร็วในวันแรกๆของคอนกรีตผสมสารMK เปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมซิกาฟลูม เป็นไปได้ว่ามีปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเกิดปฏิกิริยาในอัตราที่เร็วกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงมากกว่าในตอนแรกๆของคอนกรีตผสมสารMK.



รูปที่ 3.12 แสดงคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว (Zang และ Molhotra, 1995)



รูปที่ 3.13 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในก้อนคอนกรีตที่อายุต่างๆกัน (Zang และ Malhotra, 1995)

### 3.9 ตัวแปรที่มีผลต่อการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

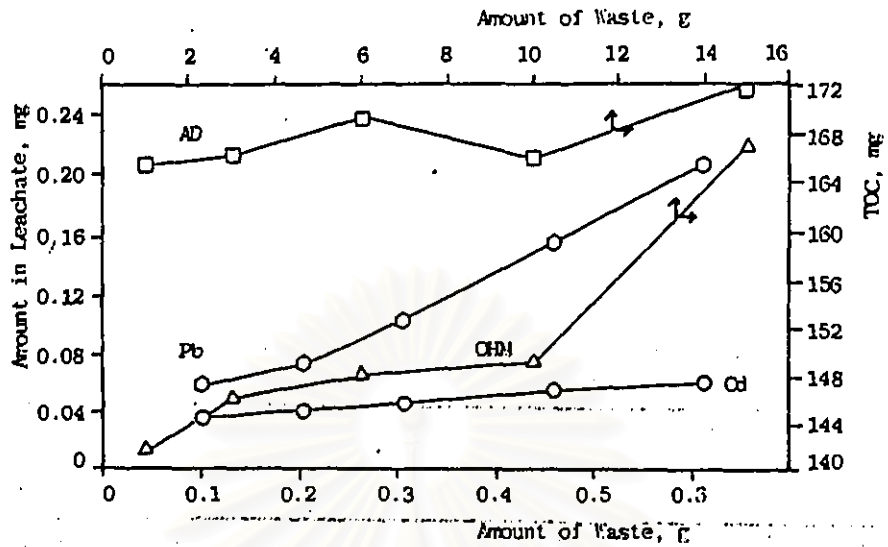
Shin และ Sujiwatthana, 1988 ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อนในด้านความสามารถในการถูกชะละลาย และความสามารถในการรับแรงอัดของของแข็งที่ถูกทำให้เป็นก้อนแล้ว ในการทดลองนี้ใช้เทคนิคแบบ Cement/Silicate-based ซึ่งทำการทดลองกับแคลเซียม คาร์บอเนต อัคริน และ คอลโคเจน สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

ตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการถูกชะละลายและความสามารถในการรับแรงอัด คือ

- ปริมาณของของเสียอันตรายในตอนเริ่มแรก
- อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ✓
- ระยะเวลาในการบ่มซีเมนต์

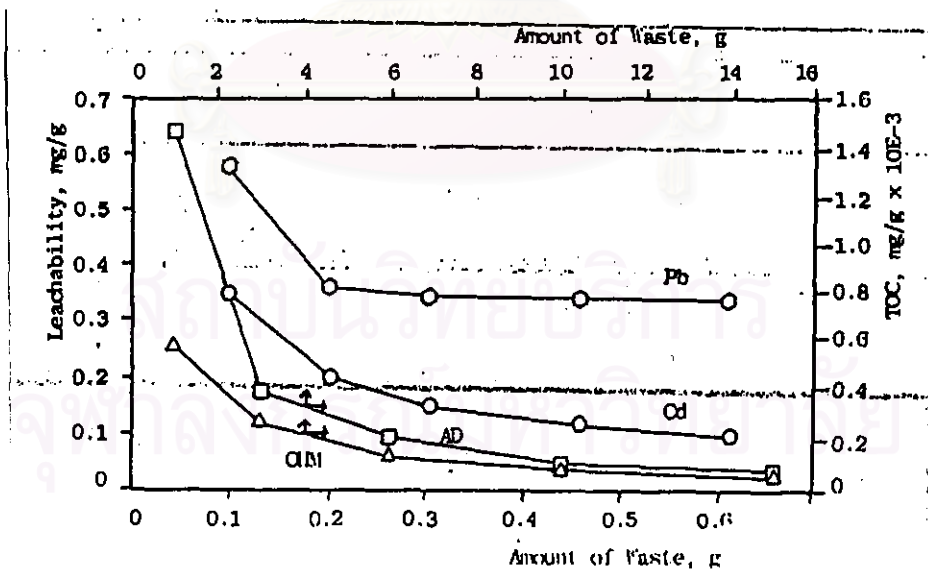
#### 1) ปริมาณของของเสียอันตรายในตอนเริ่มแรก

1.1) จากการทดสอบการสกัด โดยสกัดของเสียที่แข็งตัวในซีเมนต์ด้วยกรดอะซิติกโดยใช้เครื่อง Orbital Shaker (รุ่น Galleekamp SD-125) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณ Total Organic Carbon (TOC) และ โลหะหนักในสารที่สกัด จากนั้นนำไปสกัดต่ออีก 24 ชั่วโมงและคั่งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ TOC และ โลหะหนักอีกครั้ง จากผลการทดลองนำไปเขียนกราฟ ได้ดังรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของเสียเพิ่มขึ้นปริมาณของเสียที่ถูกชะละลายจะมากขึ้นด้วย นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า ปริมาณของแคลเซียมและคาร์บอนในน้ำชะละลายมีปริมาณน้อยกว่าอัครินและ คอลโคเจน ทั้งนี้เป็นเพราะว่าในซีเมนต์เทศมีปริมาณความเป็นด่างสูงในรูปของซิลิกาและ Oxyhydroxides และเพราะว่าแคลเซียมซิลิเกต มีความสามารถในการดูดซับกับโลหะหนักสูง อีกเหตุผลหนึ่งก็คือการทำ ให้ของเสียอินทรีย์แข็งตัวด้วยซีเมนต์นั้น ของเสียอินทรีย์จะขาดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่ทำให้คอนกรีตแข็งตัว



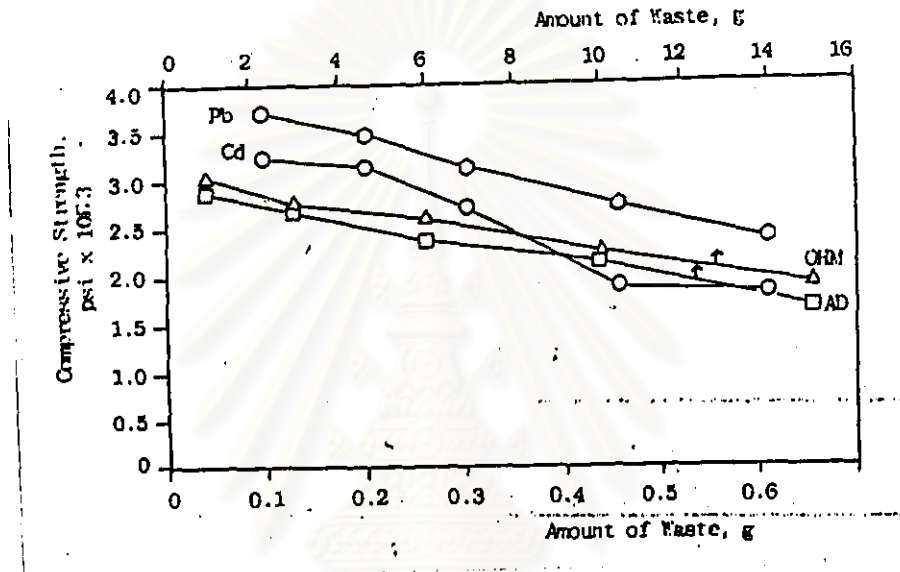
รูปที่ 3.14 กราฟแสดงปริมาณของธาตุนิตต่าง ๆ ในน้ำชะละลาย (Shin และ Sujiwatthana, 1988)

รูปที่ 3.15 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของของเสียในน้ำชะละลายจะเพิ่มขึ้นต่ำกว่าการเพิ่มปริมาณของเสียคอนเวร์ชัน ดังนั้นค่าความสามารถในการถูกระบายจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเสียคอนเวร์ชัน



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงปริมาณของธาตุนิตต่าง ๆ ต่อความสามารถในการถูกระบาย (Shin และ Sujiwatthana, 1988)

1.2) จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C-109-64 จะได้ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 จะเห็นว่าถ้ามีปริมาณของของเสียในซีเมนต์ที่ลดลงจะทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของซีเมนต์เพิ่มขึ้น เพราะว่าของเสียจะขัดขวางคุณสมบัติการแข็งตัวของซีเมนต์

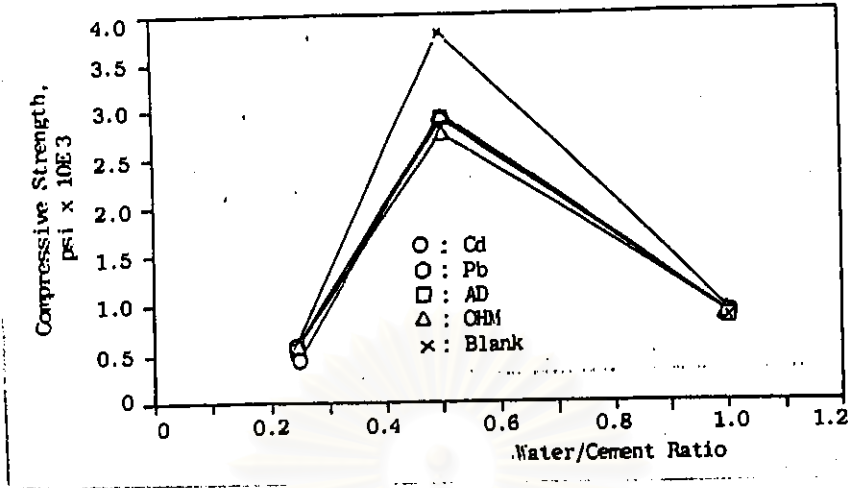


รูปที่ 3.16 กราฟแสดงผลของปริมาณของเสียต่อค่ากำลังรับแรงอัด (Shin และ Sujiwattana, 1988)

## 2) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

2.1) จากการทดสอบการชะละลาย พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 จะมีค่าความสามารถในการชะละลายต่ำที่สุด อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ มีผลต่อค่าความพรุนของซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว ปริมาณน้ำที่เติมในซีเมนต์น้อยเกินไป จะทำให้ระคายเคืองปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการเกิดผลึกไม่คิดและไม่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้เกิดการร้าวของของเสียมากขึ้น แต่ถ้าหากเติมมากเกินไปจะทำให้เกิดความพรุนซึ่งจะทำให้เพิ่มโอกาสการรั่วไหลของของเสียได้มากขึ้น

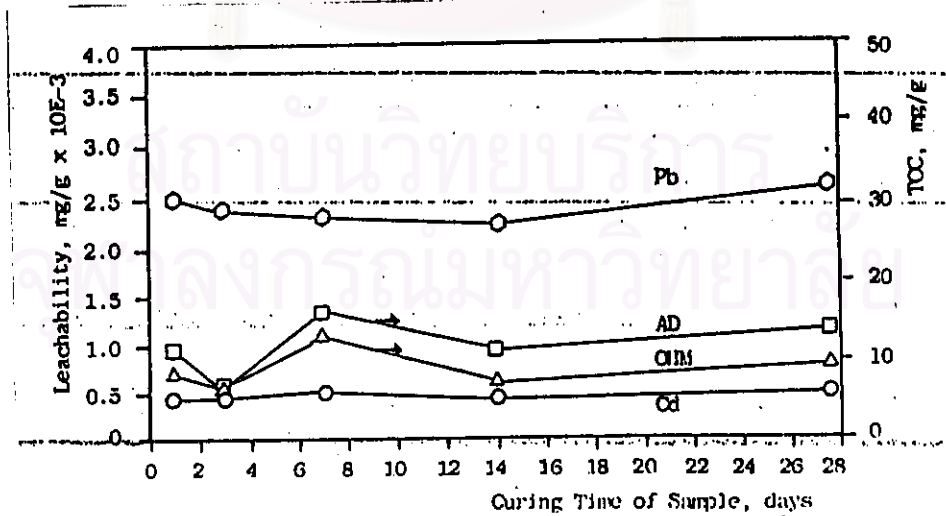
2.2) จากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.17 จะเห็นว่าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5 จะทำให้ได้ค่าความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด ทั้งนี้เป็นไปตามที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้นว่า การที่มีปริมาณน้ำที่ไม่เหมาะสมจะมีผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีความพรุนที่ไม่เหมาะสมทำให้ลดความสามารถในการรับแรงอัดได้



รูปที่ 3.17 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัด (Shin และ Sujiwatthana, 1988)

3) ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มซีเมนต์

รูปที่ 3.18 แสดงให้เห็นได้ว่าการที่มีระยะเวลาในการบ่มซีเมนต์นานจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ดีขึ้น แต่ว่าค่าความสามารถในการดูดซับของเสียในนั้นไม่ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทั้งนี้การรั่วไหลของของเสียต่าง ๆ นั้นขึ้นอยู่กับกลไก 2 ประการคือ การตกตะกอนแบบจุดคิดพิว (Adsorption-Precipitation) และการจำกัดการละลายของเสียของโครงสร้างของซีเมนต์ทดสอบ ดังนั้นการแปรค่าระยะเวลาการบ่มซีเมนต์จึงไม่มีผลต่อการดูดซับของเสีย แต่จะเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดให้เพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงผลของระยะเวลาการบ่มก่อนซีเมนต์ต่อความสามารถในการดูดซับ (Shin และ Sujiwatthana, 1988)

### 3.10 ความสามารถในการถูกระยะถาย (Leachability)

ความสามารถในการถูกระยะถาย หมายถึง อัตราส่วนของความเข้มข้นของสารที่ถูกระยะถายออกไปหลังจากผ่านการสกัดต่อความเข้มข้นของสารที่มีอยู่ในคอนเริ่มต้น สามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$L = W_i / W_o$$

โดยที่  $L$  = ความสามารถในการถูกระยะถาย

$W_i$  = ความเข้มข้นของสารที่ถูกระยะถายออกไป

$W_o$  = ความเข้มข้นของสารที่มีอยู่ในคอนเริ่มต้น

### 3.11 การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์เป็นกระบวนการในการบำบัดน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะหนักที่เป็นพิษในปริมาณมากอย่างได้ผล โดยที่โลหะหนักเหล่านั้นถูกแยกออกจากน้ำเสียโดยการเติมสารประกอบซัลไฟด์ เช่น  $Na_2S$ ,  $NaHS$  หรือ  $FeS$  เป็นต้น ลงไป และมีการเติมสารละลายเพื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสีย ให้ถึงจุดที่โลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียมีความสามารถในการละลายน้อยที่สุด เมื่อโลหะหนักตกตะกอนออกมาในรูปของซัลไฟด์ของโลหะหนักแล้ว ตะกอนเหล่านั้นจะถูกแยกออกโดยกระบวนการรวมตะกอน(Flocculation) และกระบวนการทำใส(Clarification) สาเหตุที่ทำให้การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์ได้รับความเชื่อถือ คือ

- สามารถกำจัดโลหะหนักได้มากในช่วงพีเอชที่กว้าง ดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.19
- การตกตะกอนโลหะหนักบางชนิด เช่น  $As$ ,  $Cu$ ,  $Cd$  หรือ  $Hg$  เป็นต้น ตัวอย่างเช่นตะกอนของ  $HgS$  นั้น มีค่าการละลายเท่ากับ  $10^{-52.4}$  ที่ค่าพีเอชประมาณ 2
- ใช้เวลาน้อยในการสัมผัสในถังผสมเพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยา เพราะซัลไฟด์เป็นสารที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูง

นอกจากนี้การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์นี้ได้มีผลดีมากกว่าการตกตะกอนด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์ เพราะความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของซัลไฟด์ กับไอออนของโลหะหนักเกิดขึ้นได้ดีกว่าของไฮดรอกไซด์ ความสามารถในการละลายน้ำของตะกอนซัลไฟด์ต่ำกว่าตะกอนไฮดรอกไซด์ และการที่ตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักมีลักษณะเป็น Amphoteric โดยธรรมชาติกล่าวคือ เป็นสารที่มีสมบัติเป็นได้ทั้งกรดและเบส มักจะหมายถึงออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของโลหะที่ทำปฏิกิริยาได้ทั้งกรดและเบส



แล้วเกิดเป็นแคดไอออน หรือแอนไอออน เช่นซิงค์ออกไซด์ละลายในกรดได้  $Zn^{2+}$  แต่ถ้าละลายในเบสจะได้ซิงค์แคดไอออน ( $Zn(OH)_2$ )<sup>2-</sup>

### 3.12 การทดสอบการชะละลาย (Leaching test)

กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2531 ได้กำหนดวิธีการทดสอบการชะละลายของของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดมาแล้ว โดยใช้วิธีการสกัดสาร ดังมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. บดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดของสิ่งปฏิกูลอยู่ระหว่าง 0.5 มิลลิเมตร ถึง 5 มิลลิเมตร

2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1 หนัก 50 กรัม ใส่ในแก้วทำละลายซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมกับกรดไฮโดรคลอริก จนมีความเป็นกรดค่าระหว่าง 5.8 ถึง 6.3 ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายเป็น 10 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่างสิ่งปฏิกูล

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

4. กรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรองใยแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 1 ไมครอน นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่าง ๆ ตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง

### 3.13 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

บริษัท Engineering-Science, 1989 ได้ดำเนินการศึกษา และจัดทำแผนการจัดการของเสียอันตรายของประเทศไทย (National Hazardous Waste Management Plan) ได้กล่าวถึงการทดสอบการชะละลายและเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน โดยแบ่งการทดสอบได้ 2 วิธี คือ

1) การทดสอบโดยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี เช่น โลหะหนัก และสารอินทรีย์ที่เป็นพิษเป็นต้น โดยกำหนดค่าขีดจำกัดสำหรับสารเคมีต่าง ๆ ที่ถูกชะละลายออกมาจากของเสียนั้นขึ้นมา ถ้าค่าที่ทดสอบดังกล่าวสูงกว่าค่าขีดจำกัด (โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 100 เท่าของมาตรฐานน้ำดื่ม) ถ้าสารเคมีดังกล่าวถูกชะละลายและเจือจางในธรรมชาติได้ค่ามากกว่า 100 เท่า จะก่อให้เกิดอันตรายต่อแหล่งน้ำใช้ของมนุษย์ การทดสอบการชะละลายของสารเคมี จากของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อน จะเป็นการประเมินความสามารถและประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย ค่าขีดจำกัดสำหรับสารมลพิษต่าง ๆ ได้กำหนดดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าขีดจำกัดของสารมีพิษ

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

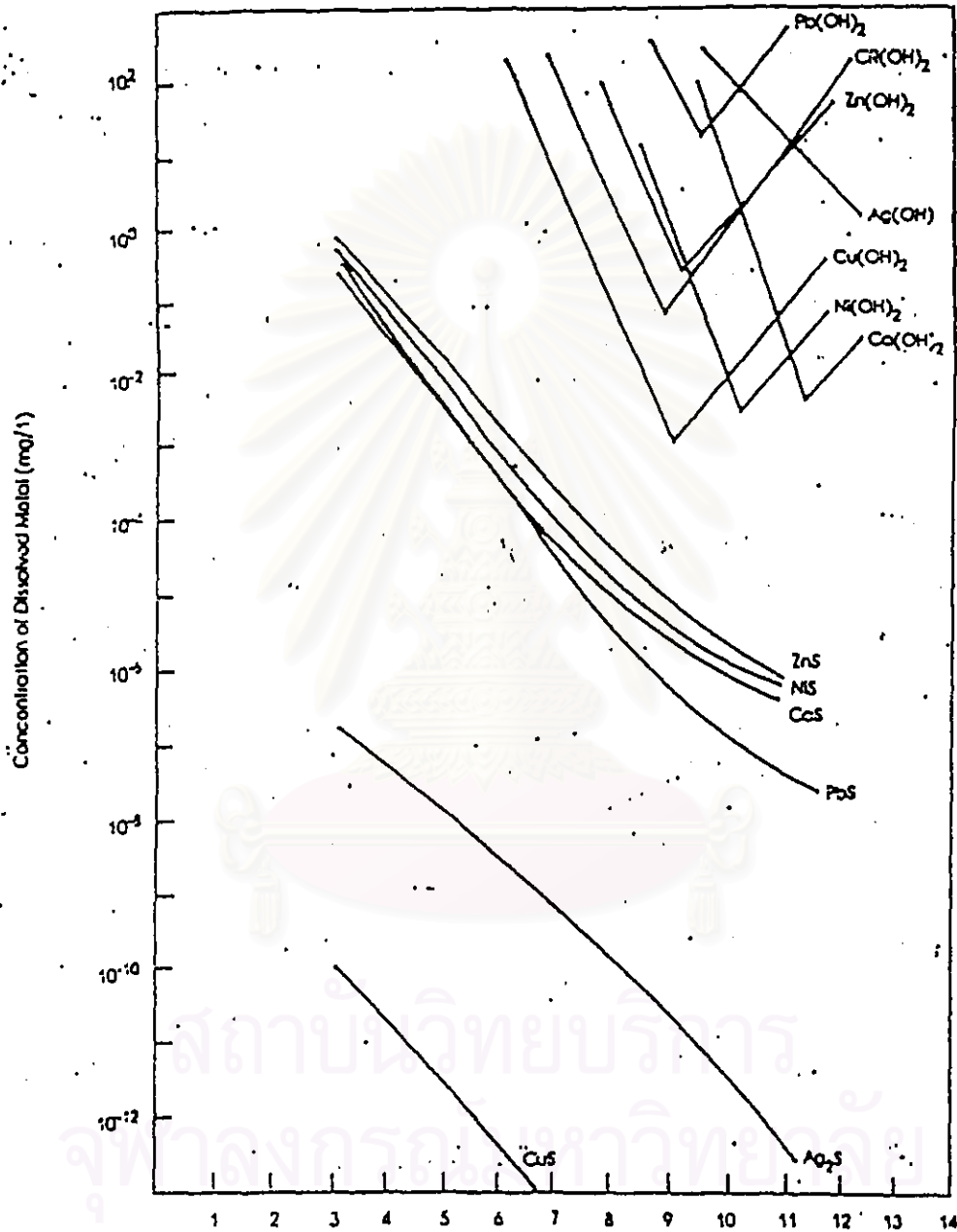
ที่มา : Engineering-Science, 1989

2) การทดสอบความเป็นพิษของสารที่ถูกชะละลายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่เกิดจากการทดลองใช้ค่าขีดจำกัด (การทดลองนี้ใช้น้ำกลั่นเป็นสารชะละลาย) ถ้าค่าความเป็นพิษของสารชะละลายเกินค่าที่กำหนดซึ่งได้เลือกไว้สำหรับการเจือจางในสิ่งแวดล้อมแล้วของเสียนั้นจัดเป็นของเสียอันตรายโดยกำหนดค่า 24-hour LC 50 เมื่อน้ำสกัดมีการเจือจางน้อยกว่า 20 % กระทรวงอุตสาหกรรม, 2531 ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับลักษณะและสมบัติของเสีย หรือวัตถุที่ไม่ใช่แล้วในห้าประเภทกระทรวงฯ ฉบับที่ 25 โดยกำหนดสมบัติของสารมีพิษซึ่งเมื่อนำมาทำการสกัดด้วยวิธีสกัดสาร และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด จะมีค่าใดค่าหนึ่งดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 แสดงค่าความเข้มข้นของสารมีพิษ

สารมีพิษ	ความเข้มข้น(มก./ล.)
อาร์ซีนิก (Arsenic)	>5
แคดเมียม (Cadmium)	>1
โครเมียม (Chromium)	>5
ตะกั่ว (Lead)	>5
ปรอท (Mercury)	>0.2

ที่มา : กระทรวงอุตสาหกรรม, 2531



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสามารถในการละลายของโลหะหนักไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์

กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2531 ได้ออกประกาศกรมโรงงานฯ ฉบับที่ 1 เรื่องกำหนดวิธีการเก็บ การทำธาตุฤทธิ์ การกำจัด การฝัง การทิ้ง การเคลื่อนย้าย และการขนส่งของเสีย หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วสรุป มาตรฐานที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

1. วิธีการทำธาตุของเสียหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วก่อนนำไปทิ้งหรือนำไปฝัง (ตารางที่ 3.8)
2. ของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (Solidification) จะต้องมีลักษณะสมบัติคือ ไปนี้
  - นำซึมผ่านได้ในอัตราที่ต่ำกว่า  $1 \times 10^{-5}$  เซ็นติเมตรต่อวินาที
  - สามารถรับแรงอัดได้ไม่น้อยกว่า 14 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตร
  - มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ดันต่อลูกบาศก์เมตร
  - มีลักษณะแข็งคล้ายหิน ไม่ไหม้ไฟ ไม่มีกลิ่น

ตารางที่ 3.8 วิธีการทำธาตุฤทธิ์ของสิ่งปฏิกูลประเภทต่าง ๆ

ประเภทของสิ่งปฏิกูล	วิธีการทำธาตุฤทธิ์
1. กากตะกอนที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากตะกอน มาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นเมอร์คิวริกซัลไฟด์( $\text{HgS}$ ) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน(Solidification) โดยผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ หรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม(Additive) ผสมเพิ่มผสมลงไปด้วย
2. กากจากการผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากที่ต้องผ่านการบดให้มีขนาดเล็กลงก่อนเพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้อย่างทั่วถึง แล้วนำมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นเมอร์คิวริกซัลไฟด์( $\text{HgS}$ )แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (Solidification)โดยผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ หรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม(Additive) ผสมเพิ่ม ผสมลงไปด้วย
3. กากตะกอนหรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว เป็นต้น	ใช้สารละลายต่าง เช่น ปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ผสมกับกากตะกอนให้ทั่วกัน จนสารโลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบของเกลือ-ไฮดรอกไซด์ที่มีค่าพีเอช(pH) ของของผสมประมาณ 11 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ในกรณีที่เป็นกากตะกอนหรือฝุ่นที่เปียกด้วยแคดเมียม (Cd) จะต้องทำให้เป็นก้อนต่อด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์
4. กากตะกอนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีขี้เถ้าแอมलग ขี้เถ้าจัดศัตรูพืช หรือขี้เถ้าจัดเชื้อราปนเปื้อน	เติมสารละลายต่าง เช่น ปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )ในปริมาณที่สามารถที่จะทำธาตุ ทิศของตัวขี้เถ้าแต่ละชนิดได้หมด

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2531

กระทรวงอุตสาหกรรม, 2540 ได้ออกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 เรื่องการกำจัด  
สิ่งปนเปื้อนหรือสิ่งวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว טרูปมาตรฐานที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

1. บัญชีลักษณะ และคุณลักษณะของสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ดังนี้

สารที่ถูกชะล้างได้ (Leachable Substance) เป็นสารซึ่งเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธีสกัดสาร  
(Leachate Extraction Procedure) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด แล้วมีปริมาณ  
โลหะหนัก หรือวัสดุพิษในน้ำสกัดเท่ากับ หรือมากกว่าค่าใดค่าหนึ่งดังต่อไปนี้

อาร์ซีนิก (ทั้งหมด) (Arsenic (total))	5.0	มก./ล.
แคดเมียม (ทั้งหมด) (Cadmium (total))	1.0	มก./ล.
ตะกั่ว (ทั้งหมด) (Lead (total))	5.0	มก./ล.
ปรอท (ทั้งหมด) (Mercury (total))	0.2	มก./ล.

2. การบำบัดโดยกระบวนการปรับเสถียร กระบวนการครีงสาร กระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็ง  
(Stabilization / Fixation / Solidification Processes) ได้แก่ การทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยสารประสาน  
(Pozzolanic and Cement Based Solidification)

3. สิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ผ่านการปรับเสถียร (Stabilization) และการทำให้เป็นก้อนแข็ง  
(Solidification) แล้ว จะต้องมียุทธสมบัติดังต่อไปนี้

3.1 สามารถรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) ซึ่งทดสอบมาตรฐาน ASTM  
D-1633 และ D-2166 ได้ ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กด  
ทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบ (Secured landfill) ได้อย่างปลอดภัย

3.2 มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

3.3 มีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ fluid) เป็นไปตาม  
เกณฑ์ในการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) เพื่อทดสอบว่าสิ่งปนเปื้อนและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วได้  
ผ่านการทำลายฤทธิ์และปรับเสถียรอย่างสมบูรณ์ ตามวิธีการที่ระบุไว้ ก่อนการนำไปฝังกลบ

4. การสกัดสาร (Leachate extraction procedure) และการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสาร  
อันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ extraction fluid) ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

4.1 การสกัดสารเพื่อทดสอบหาปริมาณสารที่ถูกชะล้างได้(Leachable) จากสิ่งปฏิกูล และ วัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และเพื่อทดสอบว่าสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วได้ผ่านการทำลาชฤทธิ์ หรือปรับเสถียร อย่างสมบูรณ์แล้วนั้น ให้ใช้วิธีดังแสดงในตารางที่ 3.9 ซึ่งเปรียบเทียบกับวิธีสกัดสารเดิมด้วย

4.1.1 หากตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วเป็นของเหลว หรือของแข็งปะปน ในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ให้กรองตัวอย่างนั้นด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรู กรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ตามข้อ 4.2

4.1.2 หากตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว มีของแข็งปะปนในปริมาณมาก กว่าร้อยละ 0.5 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

(1) บดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ให้เป็นผง แล้วร่อนผ่าน ตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร

(2) นำตัวอย่างที่ได้จาก (1)หนัก 100 กรัม เดิมด้วยน้ำสกัด (Leachant) หรือ น้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic acid rain extraction fluid) ซึ่งประกอบด้วยน้ำดินผสมสารละลายกรด กำมะถัน และกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรดต่างที่เอชของส่วน ผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง

(3) เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

(3) กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน

(5) นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ตามข้อ 4.2

4.2 การวิเคราะห์หาค่าสารอันตรายต่างๆในของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วจากข้อ 4.1.1 หรือ ข้อ 4.1.2 ให้ใช้วิธีมาตรฐาน US EPA SW 846 หรือวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้งตามประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรมแบบที่ 2 (พ.ศ.2539) ลงวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ.2539 ในกรณีที่ผลการวิเคราะห์ ของสารละลายจากการสกัดมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานดังที่ระบุในข้อ 5 หมวด 1 ของภาคผนวกที่ 1 ให้ ดำเนินการทำลาชฤทธิ์ใหม่ เพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้

ตารางที่ 3.9 เปรียบเทียบวิธีการสกัดสารและคุณสมบัติของของเสียที่ทำภายใต้ฤทธิ์แล้วตาม  
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ปี พ.ศ. 2531 และ พ.ศ. 2540

	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2531	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2540
การสกัดสาร	1. บดตัวอย่างถึงปฏิกูลให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดของสิ่งปฏิกูลระหว่าง 0.50-5.0 มม.	1. บดตัวอย่างถึงปฏิกูลให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มม.
	2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1.หนัก 50 กรัม ใส่ในถ้วยทำละลายซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมกรดไฮโดรคลอริก จนมีความเป็นกรดค่าระหว่าง 5.8-6.3 ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายเป็น 10 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่างถึงปฏิกูล	2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1.หนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัดหรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรดค่ามีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของส่วนผสมในอัตราส่วน 20 เท่า
	3. เขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 6 ชั่วโมงโดยใช้เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบต่อนาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 5 ซม.	3. เขย่าบนเครื่องกรวนเขย่าแบบหมุนที่มีอัตราหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
	4. กรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 1 ไมครอน	4. กรองสารละลายด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6-0.8 ไมครอน
	5. นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่างๆตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง	5. นำของเหลวที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่างๆตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง
คุณสมบัติของ สิ่งปฏิกูลที่ทำ ให้เป็นก้อน	1. น้ำซึมผ่านได้ในอัตราต่ำกว่า $1 \cdot 10^{-5}$ ซม./ว.	1. ความซึมน้ำไม่ได้กำหนด
	2. รับแรงอัดได้ไม่น้อยกว่า 14 กก./ซม. <sup>2</sup>	2. รับแรงอัดได้ไม่น้อยกว่า 3.5 กก./ซม. <sup>2</sup>
	3. มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตัน/ม. <sup>3</sup>	3. มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตัน/ม. <sup>3</sup>
	4. วิเคราะห์ค่าสารมลพิษต่างๆตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง	4. มีความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดเป็นไปตามเกณฑ์ในการสกัดสารตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมปี พ.ศ. 2540

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2531 และ พ.ศ. 2540

### 3.14 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

จากการรวบรวมผลงานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และวัสดุอื่น ๆ สามารถสรุปผลงานวิจัยในช่วงปี 1985-1998 ได้ดังนี้

Poon และคณะ, 1985 ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับกลไกการยึดจับของโลหะหนัก 2 ชนิด คือ สังกะสี และปรอทซึ่งทำการทดลองโดยการทดสอบการชะละลาย การส่องด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) การวิเคราะห์ด้วย X-ray Diffraction (XRD) และการทดสอบหาความพรุน (ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.8) โดยเตรียมการทดสอบด้วยการเติมสารละลายที่ละชนิด คือ สังกะสี (ที่มีความเข้มข้น 2 % และ 6 %) และปรอท (ที่ความเข้มข้นเดียวกัน) เพื่อศึกษาความแตกต่างของกลไกการยึดจับในโครงสร้างของซีเมนต์ของโลหะหนักทั้งสองชนิด นอกจากนี้มีการเติมสารละลายไฮเดรียมซิลิเกต 40% เป็นสารเคมีผสมเพิ่มให้มีลักษณะใกล้เคียงกับสาร Chemfix ซึ่งใช้ในการทำให้เป็นก้อนในเชิงพาณิชย์ที่พบได้ทั่วไป จากนั้นนำไปบ่มในห้องที่มีความชื้นสูงเป็นเวลา 28 วัน ค่อยนำไปย่อยให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วเติมกรดอะซิติกเพื่อทดสอบการชะละลายของโลหะหนักทั้งสองชนิด นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ที่กล่าวแล้วในข้างต้นซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

กลไกการยึดจับของสังกะสีในโครงสร้างซีเมนต์ควรเป็นแบบ Chemical stabilization จากการทดสอบการชะละลายพบว่า ความเข้มข้นของสังกะสีที่ออกมาในน้ำชะละลายมีอยู่น้อยลดการทดลองจากการวิเคราะห์ด้วย SEM และ XRD พบว่ามีผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์หายไปในตัวอย่างไม่มีสังกะสี (ก่อนนำไปทดสอบการชะละลาย) แสดงว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์อาจมีบทบาทสำคัญในการยึดจับของสังกะสีในโครงสร้างซีเมนต์ นอกจากนี้จากผลการทดสอบความพรุนของตัวอย่างนี้แสดงว่าความพรุนและความชื้นได้ของน้ำนั้น ไม่มีผลต่อการยึดจับของสังกะสี

ส่วนกลไกการยึดจับของปรอทในโครงสร้างปรอทควรเป็นแบบ Physical entrapment จากการทดสอบการชะละลายของปรอทพบว่ามีความเข้มข้นของปรอทหลุดออกมามากลดการทดลอง แต่จากการทดสอบความพรุนของตัวอย่างพบว่า มีความพรุนใกล้เคียงกับซีเมนต์ที่มีไฮเดรียมซิลิเกต ซึ่งแสดงว่าความพรุนและความชื้นได้ของน้ำอาจมีผลต่อการยึดจับของปรอท นอกจากนี้จากการทดสอบของ SEM และ XRD พบว่าปรอทไม่ได้ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อทำการชะละลายก้อนตัวอย่างจึงมีความเข้มข้นของปรอทออกมามากในทันที จึงเป็นไปได้ว่าถ้ามีการเติมสารผสมเพิ่มบางชนิดลงไป เช่น แกลตอย หรือ ซิลิกาฟูม ซึ่งจะ ไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วได้ Amorphous Calcium - Silicate-Hydrate เพื่อไปลดความพรุนของซีเมนต์ลง



McWhimney และคณะ, 1990 ได้ทำการศึกษาลักษณะของปรอทในโครงสร้างซีเมนต์ โดยทำการผสมสารละลายเมอร์คิวริกในเครตลงในซีเมนต์ แล้วนำไปบ่มในห้องที่มีความชื้นสูงเป็น เวลา 28 วัน ทั้งนี้ตัวอย่างทุกชิ้น จะอยู่ภายใต้บรรยากาศที่มีแต่ในโครเจนตลอดเวลาก่อนนำไปทำการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังมีการใช้เครื่องมืออื่นๆ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ได้แก่ X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. สารละลายเมอร์คิวริกในเครตที่เติมลงไปนซีเมนต์ทดสอบ จะทำให้ได้ผลึกสีเหลืองของเมอร์คิวริกออกไซด์ จากการวิเคราะห์ด้วย SEM และ EDS ในบริเวณพื้นผิวทั่วไปพบว่าผลึกของปรอทจะจับอยู่เป็นกลุ่มก้อนคล้ายเกาะซึ่งประกอบไปด้วยสารที่คล้ายขุยมะพร้าว เมื่อทำการตรวจสอบให้ใกล้ขึ้นพบว่าในบริเวณนั้นเต็มไปด้วยแคลเซียม และยังพบว่าในบริเวณที่มีการสะสมตัวของปรอทมากจะมีความเข้มข้นของซิลิกอนลดลง

2. การที่ปรอทอยู่ในโครงสร้างซีเมนต์ในรูปของเมอร์คิวริกออกไซด์ และไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นว่าการยึดจับทางกายภาพเป็นกลไกสำคัญที่ใช้จับปรอทให้อยู่ใน โครงสร้างซีเมนต์

Yang และคณะ, 1993 ศึกษาผลกระทบของ Polymer latex ในเรื่องคุณสมบัติของการทำให้เป็นก้อนของของแข็ง โดยใช้ Mercury containing sludge เป็นตัวอย่างการทดลอง โดยใช้ส่วนผสมของซีเมนต์ 3 ชนิด และเติมหรือไม่เติม Polymer latex คุณสมบัติของก้อนของแข็ง ถูกวิเคราะห์โดย SEM ทดสอบการแข็ง-ละลาย (Freezing and Thawing Test) ทดสอบเปียกและแห้ง (Wetting and Drying Test) วัดกำลังรับแรงอัด และการถูกชะละลายของสารมีพิษ (TCLP) การรับแรงอัดของตัวอย่างที่มีอายุ 28 วัน พบว่ามีค่ามากกว่า 3 วัน และ 7 วัน การเติม Polymer latex ผลดีของการเติม Polymer latex (3% โดยน้ำหนัก) จะให้ผลการเพิ่มกำลังรับแรงอัดสำหรับตัวอย่างมากกว่าตัวอย่างที่ไม่เติม Polymer latex คือ การถูกชะละลายของปรอทมีค่าลดลง อีกอย่างหนึ่งคือ การก่อตัวของ Cross linked ในก้อนซีเมนต์

Zhang และ Malhotra, 1995 ได้ทำการวิจัยคุณสมบัติของ Thermally Activated Alumino-Silicate Material (MK) ควบคู่กับคุณสมบัติของคอนกรีตสด และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วทั้งที่ผสมและไม่ผสมสารMK นี้ และคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารMK มีคุณสมบัติปอซโซลานิก และสามารถผสมกับวัสดุซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตที่มีคุณภาพสูงได้ ซึ่งพบว่าค่า Slump Air content และระยะเวลาก่อตัวที่น่าพอใจ คอนกรีตที่ผสมสารMK 10 % จะมีกำลังที่สูงกว่าทุกอายุของคอนกรีตเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ผสมสารMK ที่อายุ 28 วันคอนกรีตผสมสารMK จะมี

กำลังรับแรงดึง ความยืดหยุ่น และ Young's modulus of Elasticity มากกว่า แต่มีการแตกตัวเมื่อแห้งน้อยกว่า เมื่อเปรียบกับตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ผสมสารMK

Chawakitchareon และ Kiniman, 1996 ได้ทำการศึกษาความสามารถในการทำลาถฤทธิ์ตะกอนโลหะหนัก ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดี ด้วยกระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสาน ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายที่ใช้ในการสกัดโลหะหนัก และระยะเวลาบ่มของก้อนซีเมนต์ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การเพิ่มอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักลงในวัสดุประสาน จะมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การชะละลายของปรอท โครเมียม และเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณตะกอนโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมเท่ากับ 0.25

2. การเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของเม็ดลอยติกในระหว่าง 0 - 75 ลงในวัสดุประสานจะมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นของตัวอย่างลดลง การชะละลายของปรอทสูงขึ้น ในขณะที่การชะละลายของโครเมียมลดลง และพบว่าอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 และในวัสดุประสานไม่มีเม็ดลอยติกในค้เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท แต่สัดส่วนการผสมที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมนั้น ใช้อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานค่าเดียวกับของปรอทแต่มีเม็ดลอยติกอยู่ด้วย 50 %

3. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อน

4. ระยะเวลาการบ่มมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าความซึมได้ของน้ำมีค่าลดลง การชะละลายของปรอทและ โครเมียมมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการบ่ม และมีค่าค่อนข้างคงที่ภายในระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

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

6. ประสิทธิภาพการทำลาถฤทธิ์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ของวัสดุประสานที่มีเม็ดลอยอยู่ 0 % มีค่าเท่ากับ 26.4 % สำหรับปรอทมีประสิทธิภาพค้มากสำหรับโครเมียมและมีค่าเท่ากับ 80% ส่วนวัสดุ

ประสานที่มีแก๊สออกซิเจนอยู่ 50% มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ปรอทเท่ากับ 30.7% ของ โครเมียมเท่ากับ 50 % และของเหล็กเท่ากับ 90%

7. ค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อนสำหรับวัสดุประสานที่มีแก๊สออกซิเจนอยู่ 0% มีค่าเท่ากับ 6,800 บาท ค่อดันของตะกอนโลหะหนัก และสำหรับวัสดุประสานที่มีแก๊สออกซิเจนอยู่ 50% มีค่าเท่ากับ 3,800 บาทค่อดันของตะกอนโลหะหนัก ดังนั้นวัสดุประสานที่มีแก๊สออกซิเจนอยู่ 50% จึงมีความเหมาะสมในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักมากกว่าวัสดุประสานที่มีแก๊สออกซิเจนอยู่ 0%

อนุวัฒน์ ปูนพันธัชฉาย, 2539 ได้ทำการศึกษาการทำเสถียรตะกอนโลหะหนัก ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอดี โดยการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์ลงไปในตะกอนก่อนนำไปทำให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์และแก๊สออกซิเจนในการทดลองนี้แสดงถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีผลกับการทำให้เป็นก้อน และแสดงลักษณะสมบัติทางกายภาพของตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน อาทิเช่น กำจัดรับแรงอัด ความหนาแน่นและความชื้นได้ของน้ำ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบการชะละลายเพื่อหาความเข้มข้นของโครเมียม ปรอท และเหล็กด้วย รวมทั้งหาประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ และประมาณค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน ในงานวิจัยนี้มีการทดลองที่ชุดได้แก่ ในการทดลองที่หนึ่ง เป็นการหาปริมาณการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์ ซึ่งมีการแปรค่าปริมาณการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์ตั้งแต่ 0 ถึง 4.50 เท่าของค่าปริมาณทางทฤษฎีของความเข้มข้นของโครเมียม, ปรอท และเหล็กที่มีอยู่ในตะกอน การทดลองที่สอง เป็นการหาอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนัก ค่่ววัสดุประสานซึ่งมีการแปรค่าตั้งแต่ 0.25 0.35 0.50 0.60 และ 0.70 ในการทดลองที่สาม เป็นการแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างที่ 3 7 14 และ 28 วัน การทดลองที่สี่ เป็นการมาสัดส่วนที่เหมาะสมในการทดลองที่หนึ่ง และสองมาใช้กับตะกอนโลหะหนัก ที่ได้จากศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมคำ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การเพิ่มสัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไปในตะกอนโลหะหนักก่อนการทำให้เป็นก้อนทำให้ค่ารับแรงอัดมีค่าลดลง และการดูการชะละลายของโครเมียม, ปรอท และเหล็ก มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน สัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมคือ 1.75 เท่าของค่าปริมาณทางทฤษฎีซึ่งทำให้ค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานสารพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ที่สัดส่วนการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 3.00 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีจะทำให้ค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดต่ำมาก

2. อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อดัวัสดุประสานที่เหมาะสมคือ 0.25 เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อดัวัสดุประสานมากกว่านี้ จะทำให้ตะกอนโลหะหนักและดัวัสดุประสานไม่

สามารถจับตัวให้เป็นก้อนได้ นอกจากนี้ค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

3. ระยะเวลาในการบ่มตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง กล่าวคือทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นและค่าความสามารถในการซึมได้ของน้ำลดลง รวมทั้งความเข้มข้นของโครเมียม และปรอทในน้ำสกัดลดลงเช่นกัน

4. ขั้นตอนการเติมโซเดียมซัลไฟด์ และอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานที่ใช้กับน้ำเสี้ยวโอดีสามารถนำไปใช้กับตะกอนโลหะหนักที่ได้จากโรงงานเคือบอเพียม และตะกอนโลหะหนักจากโรงงานกำจัดกากอุตสาหกรรมแถมค่าได้ โดยตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแล้วผ่านเกณฑ์มาตรฐานของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน และมาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

5. ประสิทธิภาพในการทำให้เป็นก้อนของตะกอนโลหะหนักที่อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานเท่ากับ 0.25 ซึ่งสำหรับสัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีเท่ากับ 60.01 และ 91.40 % สำหรับโครเมียมและปรอทตามลำดับ และสำหรับสัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 3.00 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีเท่ากับ 94.00 และ 99.49 % สำหรับโครเมียมและปรอทตามลำดับ ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นของโครเมียมและปรอทในน้ำสกัดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรมในทั้งสองสัดส่วนการเติมสาร โซเดียมซัลไฟด์

6. ค่าใช้จ่ายในการทำตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนโดยใช้สัดส่วนการเติมโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีเท่ากับ 5,000 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนัก และสำหรับสัดส่วนการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 3.00 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีเท่ากับ 5,790 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนัก ในขณะที่ถ้าไม่มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 3,900 บาทแต่จะมีค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดมีค่าสูงกว่ามาตรฐานสารมีพิษของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (สูงกว่า 0.2 มก./ล.)

ดวงสมร ผดุงเกียรติวงษ์, 2540 ได้ศึกษาเปรียบเทียบการทำตะกอนปรอทซัลไฟด์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าถอยถิกไนต์และปูนซีเมนต์ผสมซิติกาฟลูม ซึ่งมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อัตราส่วนผสมของโซเดียมซัลไฟด์เพื่อให้ได้ตะกอนที่เหมาะสม, อัตราส่วนผสมของตะกอนปรอทซัลไฟด์ต่อวัสดุซีเมนต์ อัตราส่วนผสมของวัสดุประสาน และค่าใช้จ่ายในการบำบัด การวิจัยนี้จะนำตะกอนปรอทจากการบำบัดน้ำเสี้ยวโอดี และตะกอนหลุดจฟลูออเรสเซนซ์มาหาสัดส่วนการผสมโซเดียมซัลไฟด์ที่เหมาะสม จากนั้นนำไปทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ เถ้าถอยถิกไนต์ และซิติกาฟลูม โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับการทำกากหลอมคฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซัลฟาตัม และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยติกไนต์มีค่าเท่ากับ 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ สำหรับการทำตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอไลต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซัลฟาตัม ค่าอัตราส่วนของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมคือ 0.75

2. อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ : ซัลฟาตัมสำหรับการทำกากหลอมคฟลูออเรสเซนต์ และตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอไลต์ให้เป็นก้อนมีค่าเท่ากับ 1: 0.2 และ 1: 0.4 ตามลำดับ สำหรับการทำกากหลอมคฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยติกไนต์พบว่า อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : เถ้าลอยติกไนต์ที่เหมาะสมคือ 1: 1

3. ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมสำหรับการทำกากหลอมคฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซัลฟาตัมและปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยติกไนต์มีค่าเท่ากันคือ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี และมีค่าเท่ากับ 0.5 สำหรับการทำตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอไลต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซัลฟาตัม

4. ระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น การชะละลายของโลหะหนักมีค่าลดลงตามระยะเวลาบ่มและมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อระยะเวลาบ่มสูง

5. การทำตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอไลต์ให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนที่เหมาะสมจากการวิจัยที่ระยะเวลาบ่ม 14 วันมีประสิทธิภาพในการทำให้ปรอทและ โครเมียมคงตัวเท่ากับ 96.89% และ 94.58 % ตามลำดับและผ่านเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษของกระทรวงอุตสาหกรรม

6. การทำกากหลอมคฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อนที่อัตราส่วนที่เหมาะสม จากการวิจัยที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันมีประสิทธิภาพในการทำให้ปรอทคงตัวโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซัลฟาตัมและปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยติกไนต์มีค่าเท่ากับ 97.72 % และ 97.77% ตามลำดับและผ่านเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษของกระทรวงอุตสาหกรรม

7. ค่าใช้จ่ายในการทำตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอไลต์ให้เป็นก้อนมีค่าเท่ากับ 7,700 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนัก สำหรับการทำกากหลอมคฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ซัลฟาตัมและเถ้าลอยติกไนต์เป็นวัสดุประสานมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 4,930 และ 2,610 บาทตามลำดับ