



### บทที่ 3

#### การทบทวนเอกสาร

##### ของเสียที่เป็นอันตราย (Hazardous Waste)

ของเสียที่เป็นอันตราย ตามคำจำกัดความ ของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ หมายถึง ของเสียหรือสิ่งที่เป็นอันตรายซึ่งมีความเข้มข้น หรือมีคุณสมบัติด้านกายภาพ เคมี หรืออื่น ๆ ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการตาย หรือเจ็บป่วยทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ ตลอดจนทำให้เกิด หรือมีแนวโน้มจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมเมื่อไม่ได้มีการจัดการในการบำบัด เก็บกัก ขนส่ง และกำจัด ที่เหมาะสม -

โดยทั่วไปแล้ว คุณสมบัติที่กำหนดว่าของเสีย นั้น เข้าข่ายเป็นของเสียที่เป็นอันตรายได้แก่ สารไวไฟ สารที่มีฤทธิ์กัดกร่อน สารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย สารกัมมันตรังสี สารที่เป็นพิษ และสารที่ติดเชื้อได้ง่าย (Pojasek, 1979 อ้างจาก U.S. EPA, 1978)

โลหะหนักหลายชนิด ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในกิจการอุตสาหกรรมต่าง ๆ และจัดเป็นโลหะที่มีพิษ ได้แก่ แบริลเลียม (Be) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) เงิน (Ag) อาร์เซนิก (As) แอนติโมนี (Sb) ซีเลเนียม (Se) ทาลเลียม (Tl) ปรอท (Hg) (Pojasek, 1979) กากของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรม ที่มีการใช้โลหะหนักเหล่านี้มักจะมีโลหะหนักเจือปนซึ่งอาจเข้าข่ายเป็นของเสียที่เป็นอันตราย

โลหะหนักบางชนิดเช่น ปรอท แคดเมียม อาร์เซนิก ตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักประเภทที่มีพิษถาวร ซึ่งนอกจากจะไม่เปลี่ยนรูปไปตามกาลเวลาแล้ว ยังสามารถสะสมในร่างกายมนุษย์และสัตว์น้ำได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกจากของเสีย น้ำเสีย หรือตะกอนเพื่อป้องกันไม่ให้แพร่กระจายเข้าสู่วัฏจักรของน้ำหรือผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Srivastava, 1989)

## โลหะหนัก

### คุณสมบัติของโลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอม (Atomic Number) อยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งสิ้น 68 ธาตุ มีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) มีคุณสมบัติทางกายภาพคือ นำไฟฟ้า และความร้อนได้ดี เป็นมันวาว สะท้อนแสงได้ดี เหนียวนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญคือ มีค่าออกซิเดชัน (Oxidation Number) ได้หลายค่า

โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบอินทรีย์โลหะ (Organometallic Compound) ซึ่งเป็นพิษ และสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) ความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิด เป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อมีการสะสมในร่างกายของมนุษย์ อาจมีผลทำให้พิการ หรือเสียชีวิตได้

### ความเป็นพิษของโลหะหนักบางชนิด และตัวอย่างของโรคที่เกิดจากโลหะหนัก

#### 1. ปรอท (Mercury)

ปรอท จัดเป็นโลหะที่มีความเป็นพิษสูงสุด สารปรอท และสารประกอบปรอท แม้เพียงความเข้มข้นต่ำ ก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรง โดยเฉพาะหากปรากฏในห่วงโซ่อาหาร โรคมินามาตะ (Minamata Disease) เป็นตัวอย่างของโรคที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นพิษของสารปรอทที่ปรากฏในห่วงโซ่อาหาร โดยชาวประมงรอบ ๆ อ่าวมินามาตะ ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ของเกาะกิวชูประเทศญี่ปุ่น ที่ยังชีพด้วยการบริโภคปลาและสัตว์น้ำ ซึ่งปนเปื้อนสาร Methyl Mercury ได้ป่วยเป็นโรคกล้ามเนื้ออ่อนเพลีย สูญเสียการมองเห็น ระบบการทำงานของสมองเสื่อม และเป็นอัมพาต ในรายที่ได้รับสารเป็นจำนวนมาก อาจเสียชีวิต (Fujiki, 1972 อ้างจาก Forstner, 1981)

ในปี 1972 ชาวนาที่อาศัยอยู่ทางตอนเหนือของประเทศอิรัก ได้นำเมล็ดพันธุ์ข้าวสาลีที่ผ่านการเก็บรักษาโดยใช้ยาป้องกันเชื้อราที่เป็นสารปรอท (Ethyl Mercury-P-toluens Sulfonamillide) มาบริโภค จนทำให้เกิดโรคร้าย และเมื่อทางราชการออกประกาศกำหนดโทษผู้ที่มี

เมล็ดพันธุ์ข้าวสาาลีนี้ไว้ในครอบครอง ชาวนาจึงพากันทิ้งเมล็ดพันธุ์ข้าวสาาลีลงในแม่น้ำและทะเลสาบบริเวณใกล้เคียงนั้นจากเหตุการณ์ครั้งนี้ ทำให้ประชาชนชาวอิรักเสียชีวิตไปประมาณ 5,000 ถึง 50,000 คน และมีผู้พิการตลอดชีวิตกว่า 100,000 คน หรืออาจมากกว่า 500,000 คน (Bakir et al., 1973 อ้างจาก Forstner, 1981)

## 2. แคดเมียม (Cadmium)

แคดเมียมเป็นโลหะที่มีพิษรองลงมาจากปรอท โรคอิไต-อิไต เป็นโรคที่เกิดจากพิษเรื้อรังของแคดเมียมมักเกิดในสตรีมีครรภ์ มารดาที่อยู่ในระยะให้นม ผู้สูงอายุและผู้ที่มีขาดแคลเซียม ระยะพักตัวของความเป็นพิษของแคดเมียม แตกต่างกันไป ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 5-10 ปี แต่ในบางกรณีอาจนานถึง 30 ปี ลักษณะอาการเริ่มแรก ผู้ป่วยจะแสดงอาการฟันเหลือง สูญเสียความรู้สึกในการยืม ปากแห้ง ระยะต่อมาจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงจะลดลง ทำให้ไขกระดูกเสื่อม ระยะนี้ผู้ป่วยจะมีอาการปวดบริเวณเอว สะโพก และขาไม่มีแรง โดยจะคงอาการนี้เป็นระยะเวลาหลายปี จนกระทั่งเข้าสู่ขั้นเดินไม่ได้ นอนเจ็บเรื้อรัง ปัสสาวะมี Albuminous เจือปนออกมา แสดงถึงอาการที่ไตถูกทำลายอย่างรุนแรง แคดเมียมจะไปรบกวนการเผาผลาญแคลเซียม ทำให้กระดูกอ่อนนิ่ม และโครงสร้างของกระดูกผิดปกติ ทำให้ร่างกายคดงอ ความสูงของร่างกายลดลงถึง 30 เซนติเมตร (Friberg et al., 1974 อ้างจาก Forstner, 1981)

## 3. โครเมียม (Chromium)

สารประกอบโครเมียม  $Cr^{6+}$  จะมีความเป็นพิษสูงกว่าสารประกอบโครเมียม  $Cr^{3+}$  ถึง 100 เท่า การสูดดมฝุ่นที่มีโครเมียม,  $Cr^{6+}$  เข้าไป จะมีผลให้ระบบทางเดินหายใจทำงานผิดปกติ ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการรายงานถึงการเสียชีวิตด้วยโรคมะเร็งปอดในช่วงปี 1960 จึงมีการประกาศเตือนให้ระวังการสูดดมฝุ่นที่มีโครเมียมเข้าไป อย่างไรก็ตามทางการญี่ปุ่นก็ยังไม่ให้ความสำคัญเกี่ยวกับความเป็นพิษของโครเมียมเท่าใดนัก และได้มีการนำกากของเสียที่มีโครเมียมเจือปนไปใช้ในการถมปรับพื้นที่เพื่องานก่อสร้างอาคาร โรงเรียน สนามกีฬาอยู่ทั่วไป ในช่วงเดือน สิงหาคม 1975 ได้มีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำใต้ดิน ในเมืองโตเกียวบริเวณที่มีการใช้กากของเสียโครเมียมถมปรับพื้นที่พบว่า มีโครเมียม  $Cr^{6+}$  มากกว่า 2,000 เท่า ของระดับที่ทางราชการกำหนด

#### 4. อาร์เซนิก (Arsenic)

การบริโภคน้ำที่มีอาร์เซนิกเจือปนอยู่ในระดับความเข้มข้นสูง เป็นระยะเวลาานาน จะทำให้เนื้อเยื่อของลำไส้ ผิวหนัง ตับ และประสาทถูกทำลาย ในประเทศไต้หวัน เกิดโรคชนิดหนึ่งเรียกว่า “โรคเท้าดำ” (Black-foot Disease) สาเหตุเกิดจากการบริโภคน้ำใต้ดินที่มีอาร์เซนิกเจือปนในระดับสูงถึง 2.5 mg/l (Taberer และ Norman, 1971 อ้างจาก Forstner, 1981) ผู้ป่วยจะมีอาการของเส้นโลหิตบริเวณรอบนอกใกล้ผิวหนังไม่ทำงาน ส่งผลให้เนื้อบริเวณนั้นตาย ผิวหนังเปลี่ยนสีซึ่งรวมไปถึงการมีโปรตีน Keratin และเม็ดสีมากเกินไป อาจนำไปสู่โรคมะเร็งผิวหนังได้

จากรายงานต่าง ๆ พบว่า น้ำดื่มที่มีอาร์เซนิกเจือปน ในระดับความเข้มข้น 210-1000  $\mu\text{g/l}$  จัดว่าเป็นพิษก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ (Aston et al., 1975 อ้างจาก Forstner, 1981) การบริโภคน้ำที่มีอาร์เซนิกเจือปนอยู่ 0.3-0.6 mg/l เป็นระยะเวลาานาน ๆ จะทำให้เกิดโรค มะเร็งผิวหนังได้ (Friberg et. al., 1979 อ้างจาก Forstner, 1981)

#### 5. ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย โดยเฉพาะกับเด็กที่อาศัยอยู่ในอาคารเก่า ชำรุด เนื่องจากเด็กมักชอบกลืนกินสารซึ่งมีโซอาหารเข้าไป เช่น ตะกั่วที่ผสมอยู่ในสีทาอาคาร หรือปูนปลาสเตอร์ สารตะกั่วนี้ จะไปทำลายสมอง ประสาทสั่งการบกพร่อง อาจถึงขั้นเสียชีวิต

พิษของสารตะกั่วที่ใช้เคลือบภาชนะเซรามิก ก่อให้เกิดอันตรายได้เช่นกัน การนำของเหลวที่มีฤทธิ์เป็นกรด เช่น น้ำผลไม้ มาใส่ในภาชนะที่เป็นพอสเซอเลน หรือเซรามิกเคลือบสี จะทำให้ตะกั่วละลายออกมา (Anon, 1972) อย่างไรก็ตามหากกรรมวิธีการเคลือบภาชนะกระทำอย่างถูกต้องเช่น นำไปเผาที่อุณหภูมิสูง ระยะเวลาานานเพียงพอ ก็จะไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพแต่อย่างใด

อาการที่แสดงถึงความเป็นพิษของสารตะกั่วในระยะยาวได้แก่ อาการของโรคไตอักเสบ (nephritis) โดยในปี 1954 พบว่า ในผู้ใหญ่จำนวน 352 คน ในรัฐควีนแลนด์ ประเทศออสเตรเลีย ที่มีสารตะกั่วอยู่ในร่างกายตั้งแต่ในวัยเด็กระยะเวลา 15 ถึง 40 ปีที่แล้ว 165 คน เสียชีวิตและอีก 94 คนป่วยเป็นโรคไตอักเสบเรื้อรัง นอกจากนี้ ยังมีรายงานอีกว่า ผู้ที่ดื่มเหล้าเถื่อน มีโอกาสเป็นโรคไตอักเสบ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการกลั่นเหล้าเถื่อนนั้นมักจะใช้ตะกั่วในการบัดกรี

## วิธีการบำบัด (Treatment) และกำจัด (Disposal) ของเสียที่เป็นอันตราย

การบำบัด (Treatment) ของเสียที่เป็นอันตราย หมายถึง การจัดการกับของเสียที่เป็นอันตรายเพื่อลดความเป็นพิษลง มีคุณสมบัติทั้งทางด้านกายภาพ และเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดขั้นสุดท้าย (Final disposal) ต่อไป ทั้งนี้วิธีการบำบัดของเสียที่เป็นอันตราย อาจแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี ดังนี้

### 1. การบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment)

การบำบัดทางกายภาพ เป็นกระบวนการแยกของแข็งออกจากของเหลว ประกอบด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

- การดูดซับด้วยคาร์บอน (Carbon adsorption)
- การเหวี่ยงโดยแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifuging)
- การรวมตะกอนและการตกตะกอน (Coagulation & Sedimentation)
- การกลั่น (Distillation)

### 2. การบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment)

การบำบัดทางเคมี เป็นวิธีการทำลายฤทธิ์ (Detoxification) ของของเสียที่เป็นอันตรายประกอบด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

- การจับยึดความเป็นพิษด้วยปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Fixation)
- การทำให้เป็นกลาง (Neutralization)
- การบำบัดด้วยวิธี ออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation & Reduction)
- การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange)
- การตกผลึก (Precipitation)

### 3. การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment)

ของเสียที่เป็นอันตรายที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ สามารถใช้วิธีการบำบัดทางชีวภาพได้ ทั้งนี้หากของเสียมีความเข้มข้นสูง ๆ หรือมีสารที่เป็นพิษต่อระบบชีวภาพ จะต้องทำการบำบัดขั้นต้น ก่อนที่จะใช้วิธีบำบัดโดยทางชีวภาพ ซึ่งมีวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

- แอคทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge)

- การย่อยสลายแบบแอนแอโรบิค (Anaerobic digestion)
- การทำปุ๋ยหมัก (Composting)

#### 4. การบำบัดด้วยความร้อน (Thermal Treatment)

การใช้ความร้อนในการบำบัดของเสียอันตรายที่เป็นสารอินทรีย์ เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมและพัฒนาและเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป การออกแบบเตาเผาอย่างเหมาะสม นอกจากจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดของเสียที่เป็นอันตรายแล้ว ยังสามารถนำความร้อนมาใช้ประโยชน์ได้ ทั้งนี้จะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมมลพิษทางอากาศ

#### วิธีการกำจัดของเสีย (Disposal Method)

วิธีการกำจัด (Disposal) ของเสียชนิดต่าง ๆ มีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับประเภทของเสีย นั้น ๆ เช่น การกำจัดโดยนำไปทิ้งในทะเล (Ocean Dumping) ฝังกลบ (Landfill) อัดลงในชั้นบาดาล (Deepwell Injection) ทั้งนี้ของเสียนั้น ๆ จะต้องผ่านการบำบัดเบื้องต้น เพื่อให้มีความเหมาะสมในการกำจัดขั้นสุดท้าย (Youn, 1990 อ้างจาก Cassell และ Wakjer, 1970)

การฝังกลบ (Landfill) เป็นวิธีการที่ใช้กำจัดของเสียที่เป็นอันตราย ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย (Youn, 1990 อ้างจาก Peter และ Ferg, 1987)

ของเสียที่เป็นของเหลวหรืออยู่ในรูปของตะกอน (Sludge) ไม่เหมาะสมที่จะกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำในของเสียและน้ำชะละลาย (Leachate) อาจปนเปื้อนลงสู่ดิน และน้ำใต้ดินได้ง่าย

#### การทำลายฤทธิ์ของเสียที่เป็นอันตรายโดยการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน

(Solidification and Stabilization of Hazardous Waste)

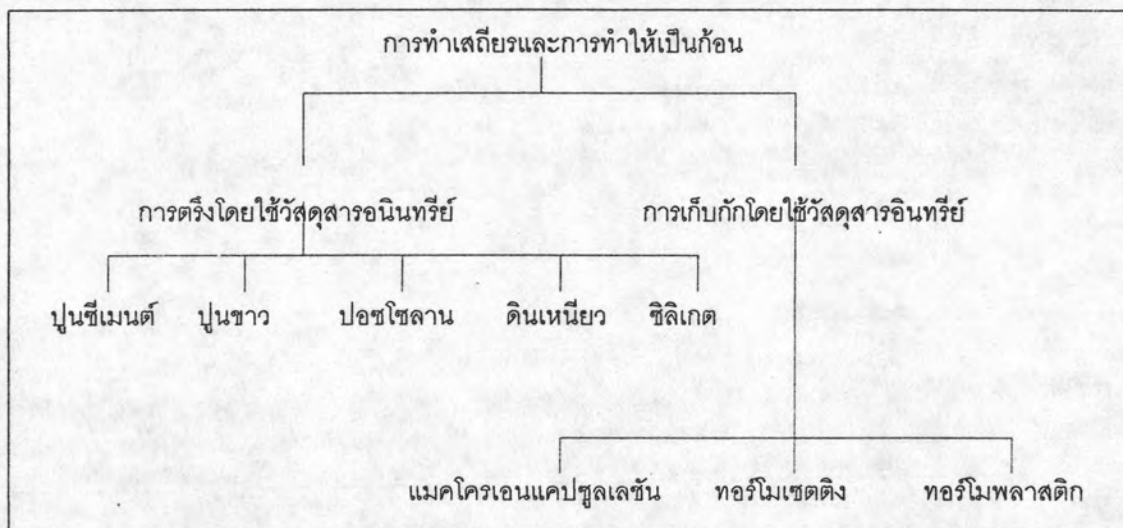
การทำให้แข็งตัวเป็นก้อน (Solidification) หมายถึง กระบวนการในการทำให้ของเสีย ที่เป็นของเหลวหรือตะกอน (Sludge) แข็งตัว คงรูปเป็นก้อน โดยการผสมกับวัสดุประสาน (Binder) ของเสียและวัสดุประสานจะทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน ยังผลให้ของเสียนั้นแข็งตัวเป็นก้อนทำให้มีความสะดวกในการเคลื่อนย้ายและขนส่ง (Solar และ Perry, 1989 อ้างถึง Wiles, 1987)

การทำให้มีเสถียรภาพ (Stabilization) หมายถึงกระบวนการในการทำลายฤทธิ์ หรือลดความเป็นพิษของของเสียที่เป็นอันตราย โดยทำให้ของเสียที่เป็นอันตรายนั้นมีการเปลี่ยนรูปทางเคมี เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นสารเฉื่อย (Inert Substance) มากขึ้น ทั้งนี้อาจอยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ละลาย (Insoluble Substance) ความเป็นพิษจะถูกจับยึดไว้ในโครงสร้างผลึกที่คงตัว โดยปกติแล้วในระหว่างกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนนั้นมักจะเกิดกระบวนการทำให้มีเสถียรภาพขึ้นพร้อม ๆ กัน ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี สารพิษจะถูกเปลี่ยนรูปให้มีความคงตัวมากขึ้น และถูกกักไว้ในโครงสร้างโมเลกุลของก้อนมวลที่แข็งตัว (Solar และ Perry, 1989 อ้างถึง Wiles, 1987)

การทำลายฤทธิ์ของของเสียที่เป็นอันตราย โดยการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนนั้น เป็นวิธีการในการทำให้ของเสียที่เป็นอันตราย มีคุณสมบัติด้านกายภาพ และเคมี เหมาะสมในการกำจัดโดยการฝังกลบ

วิธีการทำลายฤทธิ์ โดยการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของของเสียและวัสดุที่ใช้ ดังนี้

1. การจับยึดความเป็นพิษด้วยวัสดุสารอนินทรีย์ (Inorganic Fixation) มีความเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอนินทรีย์ที่มีประจุบวก (Cation)
2. การเก็บกักความเป็นพิษด้วยวัสดุสารอินทรีย์ (Organic Encapsulation) มีความเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ และของเสียอนินทรีย์ประจุลบ (Anion)



รูปที่ 3.1 กระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน (Poon, Peter และ Perry, 1985)

ได้มีการนำเทคนิคและวิธีการต่าง ๆ มาใช้ในการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน ทั้งนี้จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของของเสียนั้น ๆ ว่า มีความเหมาะสมกับวิธีการใด เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำลาายฤทธิ์ได้ดี และประหยัดค่าใช้จ่าย

Shin, Her และ Koo (1988) อ้างจาก Landreth (1980) กล่าวถึงกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน ซึ่งมีการใช้วิธีการต่าง ๆ ดังนี้

1. วิธีการใช้ปูนซีเมนต์ (Cement-based Techniques)
2. วิธีการใช้ปูนขาว (Lime-based Techniques)
3. วิธีเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Techniques) โดยการใช้วัสดุประเภทบิทูเมน พาราฟิน หรือโพลีเอทิลีน
4. วิธีเทอร์โมเซตติง (Thermosetting Techniques) โดยการใช้วัสดุประเภทเทอร์แกนิก โพลีเมอร์
5. วิธีเอนแคปซูลเลชัน (Encapsulation Techniques)
6. วิธีการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งตัวเหมือนซีเมนต์ (Self-cementing Techniques)
7. วิธีการหลอมให้เป็นแก้ว (Glassification)



วิธีการใช้ซีเมนต์ และปูนขาว เป็นวิธีที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย มีความเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับวิธีการที่ 3-7 จะมีราคาสูงมักใช้กับของเสียอันตรายที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น ของเสียกัมมันตภาพรังสี หรือของเสียที่มีสารอินทรีย์เจือปนอยู่ในปริมาณสูง ๆ (Poon et al., 1983)

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนตามประเภทต่าง ๆ 7 วิธี การเลือกใช้วิธีบำบัดของเสียนั้นควรเลือกให้เหมาะสมกับประเภทของของเสียนั้น ๆ ของเสียที่เป็นตะกอนโลหะหนัก สามารถกำจัดได้หลายวิธี เช่น Cement Based, Lime Based, Thermoplastic, Surface Encapsulation และ Glassification

Shukrow และคณะ (1982) อ้างถึงใน Rijal (1990) ได้สรุปข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน 7 วิธี ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน ตามวิธีการต่าง ๆ

(Shukrow และคณะ, 1982)

กระบวนการหรือวิธีการ (Process or Technique)	รายละเอียด
วิธีใช้ Self-cementing	สารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน เช่น แคลเซียมซิลิเฟต และ แคลเซียมซิลไฟด์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม สามารถนำมาผสมกับกากของเสียอันตราย ทำให้เป็นก้อนแข็งได้ มีความสะดวกในการขนส่ง และมีอัตราใช้น้ำต่ำ
วิธีใช้ Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics	กากของเสียที่เป็นอันตรายสูง เช่น กากสารกัมมันตภาพรังสี จะนำมาทำการผสมกับทราย แล้วหลอมให้เปลี่ยนเป็นแร่ซิลิเกตสังเคราะห์ แก้วหรือผลึกของซิลิเกตจะป้องกันการชะละลายได้เป็นอย่างดี กากของเสียที่ทำให้แข็งตัวโดยวิธีนี้ จัดว่าเป็นวัสดุที่ปลอดภัย สามารถนำไปทิ้งได้โดยไม่ต้องหุ้มห่ออีกต่อไป
วิธีการใช้ซีเมนต์ (Cement-based)	ผสมซีเมนต์ลงในของเสีย และ/หรือเติมส่วนผสมอื่น ๆ ทิ้งไว้ให้แข็งตัว
วิธีการใช้พอสโซลานิก (Pozzolanic)	ทำการผสมกากของเสียกับปูนขาวและวัสดุที่เป็นพอสโซลานิกพร้อมกับเติมน้ำ ทิ้งให้แข็งตัว
วิธีใช้ความร้อน (Thermoplastic)	นำของเสียมาทำให้แห้ง และให้ความร้อนจากนั้นทำให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกร้อน (เช่น Bitumen, Parafin หรือ Polyethylene) ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง จะได้ก้อนแข็ง
วิธีใช้ Organic Polymer	ทำการผสมของเสียกับ Polymer ก่อน จากนั้นให้เติมสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โดยกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งส่วนผสม ก่อนที่จะแข็งตัว กากของเสียจะถูกกักไว้ภายในมวลอย่างหลวม ๆ (คล้ายฟองน้ำ)
วิธีใช้ Surface Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันแน่น จากนั้นจะใช้วัสดุเคลือบหุ้ม (เคลือบ) ผิวนอกของก้อนของเสีย เช่น Polyethylene หรือ Organic resin

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนในแต่ละวิธีการ (Shukrow, et al, 1982)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Cement and Silicate Based Solidification/Fixation	Chemical Fixation/ Solidification	แห้งหรือเปียก (โดยทั่วไป เหมาะกับของเสียที่เป็น สารอินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วัสดุที่ใช้ราคาถูก</li> <li>- มีความยืดหยุ่นต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี</li> <li>- กำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดีมาก</li> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการ พัฒนามาอย่างดีแล้ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์</li> <li>- ส่วนผสมของซีเมนต์ และกากของเสียที่ไม่ได้น้ำมันจะสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะละลายได้ ภายใต้สภาวะที่มี pH ต่ำ</li> <li>- เพิ่มน้ำหนักและปริมาณของเสียทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งและฝังกลบเพิ่มขึ้น</li> <li>- เหมือนกับกระบวนการประเภท Cement Based</li> </ul>
2. Lime Based Solidification/Fixation	Chemical Fixation/ Solidification	แห้งหรือเปียก (เหมาะ สำหรับของเสียที่เป็นสาร อินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- วัสดุที่ใช้ราคาถูก</li> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนามาอย่างดีแล้ว</li> <li>- การใช้เถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมเป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิด โดยกระบวนการเดียวกัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความเชี่ยวชาญ</li> <li>- ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ</li> <li>- ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวก Strong Oxidants, Dehydrated Salts</li> </ul>
3. Thermoplastic Based	Physical Fixation	แบบแห้ง (เหมาะกับ สารอินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีได้เป็นอย่างดี</li> <li>- สารละลายที่ชะล้างมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความเชี่ยวชาญ</li> <li>- ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ</li> <li>- ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวก Strong Oxidants, Dehydrated Salts</li> </ul>

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนในแต่ละวิธีการ (Shukrow, et al, 1982)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
4. Organic Polymer Process	Physical Fixation	แบบแห้งหรือเปียก (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิด Polymer's matrix</li> <li>- ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ของเสียจะถูกยึดไว้ใน Polymer อย่างหลวม ๆ</li> <li>- สารที่มี pH ต่ำ จะทำให้โลหะละลายออกมาได้มากขึ้น</li> <li>- การย่อยสลายทางชีวภาพของสาร Polymer บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ</li> </ul>
5. Encapsulation	Chemical Containment	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี</li> <li>- ไม่มีการชะล้างของของเสียออกมา เมื่อสารที่หุ้มห่ออยู่ไม่ถูกทำลาย</li> <li>- ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีการอื่น ๆ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การชะล้างของของเสียจะเกิดขึ้นหากสารที่หุ้มถูกทำลาย</li> <li>- ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่ต้องกำจัดของเสียจำนวนมาก ๆ</li> </ul>
6. Self Cementing Techniques	Chemical Fixation/ Solidification	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้สารเสริมประสิทธิภาพ (additive) น้อย</li> <li>- ส่วนผสมของซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์</li> <li>- ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการห่อหุ้มสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะล้างได้ภายใต้สภาวะที่มี pH ต่ำ</li> </ul>
7. Glassification(Vitrification)	Physical Fixation	แบบแห้ง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก้วจะถูกชะล้างได้น้อยมาก</li> <li>- การบรรจุหรือหุ้มห่ออยู่ในเกณฑ์ดี</li> <li>- ใช้วัสดุที่มีราคาถูก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อุณหภูมิสูงอาจทำให้ของเสียอื่นระเหยออกมาก่อนที่จะถูกตรึงไว้</li> <li>- ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับการให้ความร้อน อุปกรณ์มีราคาแพงและต้องการผู้ชำนาญงานเฉพาะ</li> <li>- ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการกำจัดของเสียทุกชนิด ยกเว้นสารกัมมันตภาพรังสี และสารที่มีพิษมาก ๆ</li> </ul>

### วัตถุประสงค์ของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน

วัตถุประสงค์ของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน คือ เพื่อลดความเป็นพิษ หรือเก็บกักความเป็นพิษของของเสียที่เป็นอันตราย เป็นการป้องกันไม่ให้ความเป็นพิษแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อม ได้มีการตั้งข้อกำหนดที่สำคัญไว้ 4 ประการ ดังนี้

1. ทำให้ของเสียเป็นของแข็ง
2. เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายขนส่ง
3. ลดพื้นที่ผิวของของเสีย ซึ่งจะเป็นการลดการแพร่กระจายของสารพิษ
4. ลดอัตราการละลายของสารพิษ เมื่อสัมผัสกับสารละลาย

Barnes et al., 1979 อ้างถึง ใน Rijal, 1990 ได้สรุปวัตถุประสงค์ของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนเสถียร ดังนี้ :

1. สารพิษทั้งหมดในของเสีย จะต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย ไม่ทำปฏิกิริยาเคมี และไม่เคลื่อนที่
2. ก้อนของเสียที่แข็งตัวเสถียรแล้วต้องไม่ซึมน้ำ มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด
3. ก้อนของเสียที่แข็งตัวเสถียรแล้วต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้
  - มีขนาดคงที่
  - ทนต่อสภาพ แห้ง/เปียก หนาว/ร้อน ได้เป็นอย่างดี
  - สามารถรับแรงอัดได้ดี
  - มีค่าอัตราความซึมน้ำต่ำ
  - ในระหว่างกระบวนการต้องไม่ทำให้ปริมาณของเสียเพิ่มขึ้นมากขึ้น
  - ควรเลือกใช้วิธีการที่ประหยัด หรือนำของเสียอื่น ๆ มาใช้ในกระบวนการ เช่น แก้วลอยลิกไนต์ หรือบอกไซต์ (Bauxite)
  - ควรพิจารณาการนำเอาก้อนของเสียที่แข็งตัวเสถียรแล้วไปใช้ประโยชน์
  - ในการกำจัดของเสียที่แข็งตัวเสถียรแล้วนั้น ต้องไม่นำสถานที่ที่ใช้ฝังกลบไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น

## การทำให้แข็งตัวเป็นก้อนโดยใช้วัสดุซีเมนต์

(Solidification and Stabilization by Cement-based Technique)

การทำให้แข็งตัวเป็นก้อนโดยใช้วัสดุซีเมนต์ โดยมากจะใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาและปูนขาว เป็นวัสดุประสาน ทั้งนี้อาจมีการใช้วัสดุปรุงแต่ง (Additive) บางประเภท เช่น เถ้าลอยลิกไนต์ ซิลิกาเกต ชัลไฟด์ เป็นต้น เพื่อช่วยเสริมประสิทธิภาพในการทำให้แข็งตัวและจับยึดความเป็นพิษ ของเสียที่เป็นของเหลว หรือน้ำในตะกอนของเสียจะเป็นส่วนหนึ่งของน้ำเพื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะทำให้เกิดสภาพความเป็นด่างสูงมาก ยังผลให้โลหะหนักในของเสียเปลี่ยนรูปเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ และโลหะซิลิเกต ซึ่งมีอัตราการละลายต่ำ และถูกจับติดอยู่ภายในรูพรุนของเนื้อซีเมนต์ โลหะบางชนิดอาจถูกกักอยู่ภายในโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อนของซีเมนต์ (Bishop, 1988) การใช้วัสดุซีเมนต์นี้เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ ในการทำลายฤทธิ์ของเสียที่เป็นอันตราย โดยเฉพาะตะกอนที่เกิดจากการตกผลึกของโลหะหนัก

### สารมลทินที่เป็นอุปสรรคต่อการทำให้แข็งตัวเสถียรโดยใช้ปูนซีเมนต์

ในการทำลายฤทธิ์ของเสียที่เป็นอันตรายโดยการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์นี้ ไม่ควรมีสารมลทินที่หน่วงการแข็งตัวของซีเมนต์ เจือปนอยู่ในปริมาณที่เป็นอันตรายต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการแข็งตัว สารมลทินเหล่านี้ได้แก่

สารอินทรีย์ ดินตะกอน (Silts) และดินเหนียว จะมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัว และแข็งตัวนานขึ้น โดยอาจใช้เวลาหลายวัน ทั้งนี้ไม่ควรมีสารอินทรีย์เจือปนมากกว่าร้อยละ 10 หากมีสารอินทรีย์ในปริมาณมาก ๆ จะต้องทำการบำบัดเบื้องต้นก่อนการทำลายฤทธิ์ ด้วยปูนซีเมนต์ (Rijal, 1990 อ้างถึง Malone และ Jones, 1983)

สารประกอบบางชนิด เช่น เกลือของแมงกานีส ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี จะมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น และกำลังรับแรงอัดเปลี่ยนไป เกลือโซเดียม เช่น อาร์ซีเนต โบเรต ฟอสเฟต ไอโอเดต และชัลไฟด์ จะมีผลหน่วงการแข็งตัวของปูนซีเมนต์

สารประกอบประเภทซัลเฟต จะมีผลหน่วงการแข็งตัวของซีเมนต์ นอกจากนี้จะทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ เกิดเป็น ยิบซั่ม และสารประกอบซัลโฟอะลูมิเนต (Sulfoaluminate Compound) ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวของวัสดุสาร ยังผลให้ก้อนวัสดุแตกสลายได้ (Thomson, Malone และ Jone, 1979)

ของเสียที่เป็นอันตรายที่มีประจุลบ เช่น โซยาไนต์ โครเมต และอาร์ซีเนต จะต้องทำการบำบัดเบื้องต้นก่อนการทำลายฤทธิ์ โดยการใช้ปูนซีเมนต์ (Rijal, 1990 อ้างรายงานของ Barnes และคณะ, 1979)

Salars และ Perry (1989) กล่าวถึงประเภทของของเสียที่ไม่เหมาะสมสำหรับการบำบัด โดยการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนเสถียร โดยการใช้ซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

กลไกในการทำลายฤทธิ์ของการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนโดยการใช้วัสดุซีเมนต์

การทำให้ของเสียที่เป็นอันตรายแข็งตัวเป็นก้อนนั้น จะเป็นการทำลายฤทธิ์และลดความเป็นพิษลงโดยมีกลไกในการทำลายฤทธิ์ดังนี้

1. เป็นการเจือจาง (Dilution) ความเป็นพิษลงเนื่องจากการเติมวัสดุประสานลงในของเสีย
2. ความเป็นด่างของซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักในของเสีย เกิดเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีอัตราการละลายต่ำ
3. เกิดปฏิกิริยาคูดัดผิว (Adsorption) ระหว่างโลหะหนักกับซีเมนต์
4. โลหะหนัก ถูกจับยึดไว้ระหว่างช่องว่างของมวลซีเมนต์
5. การทำให้เป็นก้อนเป็นการลดพื้นที่ผิวของของเสีย ยังผลมีพื้นที่สัมผัสกับน้ำน้อยลง ซึ่งทำให้มีการละลายน้อยลง

ตารางที่ 3.3 กากของเสียที่ไม่เหมาะสมสำหรับการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อน  
(Sollars และ Perry, 1989)

ประเภทของกากของเสีย	เหตุผลที่ไม่สมควรใช้
<p>1. กากของเสียอินทรีย์</p> <p>1.1 มีส่วนประกอบเกลือที่ละลายได้อยู่ในปริมาณสูง</p> <p>1.2 มีส่วนประกอบสารพิษประจุลบ เช่น โบเรต ในปริมาณที่สูง</p> <p>1.3 มีส่วนประกอบของสารหน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์เช่น ซัลเฟต ในปริมาณ ที่มาก</p> <p>1.4 เกิดกลิ่นที่เป็นพิษ</p> <p>1.5 เกิดก๊าซพิษเมื่อสัมผัสกับน้ำ หรือ ด่าง เช่น โลหะคาร์ไบด์</p>	<p>มีผลต่อการก่อตัวของปูนซีเมนต์</p> <p>สามารถชะละลายออกมาได้ง่ายกว่าพวกประจุบวก</p> <p>มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้</p> <p>เป็นอันตรายต่อสุขภาพ</p> <p>เป็นอันตรายต่อสุขภาพ</p>
<p>2. กากของเสียอินทรีย์</p> <p>2.1 มีวัสดุที่ติดไฟ หรือ เกิดระเบิดได้</p> <p>2.2 มีสารประกอบพวกยาฆ่าแมลง</p> <p>2.3 มีสารประกอบที่หน่วงการก่อตัวของปูนซีเมนต์ เช่น น้ำตาล</p>	<p>เป็นอันตรายต่อสุขภาพ</p> <p>สามารถชะละลายออกมาได้ง่าย</p> <p>มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้</p>



ข้อดีของการทำลายฤทธิ์ของของเสียที่เป็นอันตราย โดยการทำให้แข็งตัวด้วยปูนซีเมนต์

การทำลายฤทธิ์ของของเสียที่เป็นอันตรายโดยการทำให้แข็งตัวด้วยปูนซีเมนต์ มีข้อดี ดังนี้

1. ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก
2. สามารถผสมให้เข้ากับของเสียได้ง่าย เทคนิคการผสมได้มีการพัฒนาเป็นอย่างดี
3. มีความยืดหยุ่น กล่าวคือ ใช้กับของเสียที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี
4. สามารถควบคุมความแข็งหรือลดอัตราการซีเมนน้ำของผลิตภัณฑ์ได้ โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

### ปูนซีเมนต์

ซีเมนต์ หมายถึงวัสดุที่ใช้ประสาน มีคุณสมบัติในการยึดเหนี่ยวอนุภาค หรือวัสดุชิ้นเล็ก ๆ ให้จับตัวกันเป็นก้อนแข็งได้ (Soroka, 1979)

ซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. Non Hydraulic Cements หมายถึงซีเมนต์ชนิดที่ไม่สามารถก่อตัว หรือแข็งตัวในน้ำตลอดจนไม่มีความคงตัว (stable) ในน้ำ เช่น ปูนพลาสติกเตอร์
2. Hydraulic Cements หมายถึงซีเมนต์ชนิดที่สามารถก่อตัว และแข็งตัวได้ในน้ำมีความคงตัว (stable) ในน้ำ เช่น ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จัดเป็น Hydraulic Cement ที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (American Standards of Testing Material, ASTM) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ของประเทศไทย แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ 5 ประเภท ดังนี้

ประเภท 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับใช้ในงานก่อสร้าง หรือผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา ไม่อยู่ในสภาวะอากาศรุนแรง หรือในที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ เป็นต้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว ตราเพชรเม็ดเดียว

ประเภท 2 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) ใช้ในงานก่อสร้างหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมก่อสร้างใด ๆ ที่เกิดความร้อน และทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานเขื่อนคอนกรีต ตอม่อสะพาน เป็นต้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร

ประเภท 3 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (High-Early-Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ จะให้กำลังสูงในระยะแรก ใช้ในงานก่อสร้าง หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความสามารถในการรับกำลังอัดได้เร็ว เช่น งานเสาเข็ม คาน พื้นที่ต้องการถอดแบบเร็ว เป็นต้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดง ตราสามเพชร

ประเภท 4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low-Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำสุด ใช้ในงานคอนกรีตหยาบ เช่น เขื่อน ซึ่งเป็นโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่เกิดความร้อนสะสมมาก

ประเภท 5 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ทนทานซัลเฟตได้สูง ใช้สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น ในน้ำหรือดินที่มีค่าสูง มีระยะเวลาในการแข็งตัวช้ากว่าประเภท 1 ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม

นอกจากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ 5 ประเภทตามมาตรฐานที่กล่าวแล้ว ยังมีปูนซีเมนต์ประเภทอื่น ๆ อีก เช่น ปูนซีเมนต์ซิลิกา (Silica Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ได้จากการบดเม็ดปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาที่บดบดประมาณ 25-30% มีลักษณะการแข็งตัวช้า ไม่ยัด หรือหดตัวมาก เหมาะสำหรับงานก่ออิฐ ฉาบปูนงานโครงสร้างอาคารขนาดเล็ก ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเสือ ตรางูเห่า ตรานกอินทรี องค์กรประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ในรูปของออกไซด์ และในรูปของสารประกอบ แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ และสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
(วินิต ช่อวิเชียร, 2529)

องค์ประกอบ	ร้อยละ
1. ออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ	
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	60-65
ซิลิกา (SiO <sub>2</sub> )	20-24
อลูมินา (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4-8
เหล็กออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2-5
2. องค์ประกอบในรูปสารประกอบ	
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (3CaO.SiO <sub>2</sub> )	49
ไดแคลเซียมซิลิเกต (2CaO.SiO <sub>2</sub> )	25
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	12
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8

### เถ้าลอยลิกไนต์

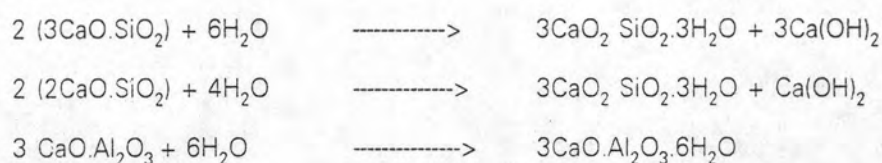
เถ้าลอยลิกไนต์ คือ ส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ โดยที่เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกจากปล่องควัน และถูกจับไว้โดย Electrostatic Precipitator เถ้าลอยลิกไนต์มีคุณสมบัติเป็นวัสดุ Pozzolan มีส่วนประกอบหลักคือ SiO<sub>2</sub> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> CaO เมื่อผสมกับน้ำ CaO ส่วนที่เป็น Free Lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำเป็น Ca(OH)<sub>2</sub> ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เกิดเป็นสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate และ Calcium Aluminate Hydrate ซึ่งมีคุณสมบัติยึดประสาน (Cementitious)

## ปูนขาว

ปูนขาวเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาหินปูนจนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์แยกตัวออกมา ประเภทของปูนขาว ขึ้นกับส่วนประกอบของหินปูนและขั้นตอนการเผา ถ้าทำการเผาหินปูนอย่างสมบูรณ์ จะได้ปูนขาวดิบ (Quick Lime) Quick Lime เมื่อได้รับความชื้น องค์ประกอบออกไซด์จะรวมตัวกับน้ำกลายเป็นรูปของไฮดรอกไซด์ ซึ่งเรียกว่าปูนขาวสุก (Hydrated Lime) ปูนขาวดิบตามท้องตลาด มีส่วนประกอบแคลเซียมออกไซด์ประมาณร้อยละ 61 และคิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ประมาณร้อยละ 81.6 (สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2532)

## ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำ เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ยังผลให้เกิดความเหนียว และจับตัวกันแน่นเป็นก้อนแข็งออกไซด์ในปูนซีเมนต์ เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปไฮเดรท โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้



ความเป็นด่างที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงความจุฟเฟอร์ (Buffering Capacity) ของซีเมนต์ เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมสูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเป็นกรด-ด่าง (pH) สูงกว่า 11 ผลึกแคลเซียมซิลิเกตที่ไม่ละลาย จะรวมตัวเกิดเป็นโครงสร้างซีเมนต์ (Nevill, 1981)

ซีเมนต์เพสต์ที่มีความเป็นด่างสูง และมีพื้นผิวออกซีไฮดรอกไซด์ จะเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกของโลหะแอมโฟเทอริก (Amphoteric Metal) และปฏิกิริยาในการดูดติดผิวของโลหะ (Shively และคณะ, 1986)

### ผลกระทบของน้ำ สารละลายเกลือ และกรดต่าง ๆ ที่มีต่อซีเมนต์

น้ำ ตลอดจนสารละลายเกลือ และกรดต่าง ๆ จะทำลายเนื้อซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว หากแต่ซีเมนต์ที่มีเนื้อแน่น และมีอัตราการซึมน้ำต่ำมาก ๆ ปฏิกริยานี้จะเกิดขึ้นช้ามาก จนถือว่าไม่มีผลเสียหายต่อเนื้อซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม ในบางสภาวะอาจมีผลกระทบต่อเนื้อซีเมนต์ค่อนข้างรุนแรง เช่น

น้ำบริสุทธิ์ จะทำลายเนื้อซีเมนต์ โดยการละลายปูนขาวออกจากเนื้อซีเมนต์ และอาจรวมถึงอลูมินาบางส่วน หากปฏิกิริยาเกิดต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จะเหลือกากไฮดรอกซิลิกา เหล็กออกไซด์ และอลูมินา ถ้าซีเมนต์มีเนื้อแน่น และมีความซึมน้ำต่ำ ปฏิกริยาจะเกิดช้ามาก จนไม่ทำความเสียหายกับซีเมนต์

น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรด จะมีผลกระทบต่อซีเมนต์รุนแรงมากขึ้น อัตราการทำลายจะสูงขึ้นตามสภาพความเป็นกรด โดยทั่วไปการย่อยสลายเนื้อซีเมนต์ของกรด จะไม่มีผลทำให้เกิดการขยายตัวของก้อนซีเมนต์ แต่จะมีผลให้ซีเมนต์อ่อนตัวลง

สารละลายซัลเฟตของต่างชนิดต่าง ๆ สามารถทำลายเนื้อซีเมนต์ได้ค่อนข้างรุนแรง ซัลเฟตของโซเดียม โปแตสเซียม แอมโมเนียม และอื่น ๆ จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเนื้อซีเมนต์ ได้แคลเซียมซัลเฟต แคลเซียมซัลเฟต จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลของแคลเซียมอลูมินา ทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ปริมาตรของวัสดุสารจะเพิ่มขึ้นเกิดการขยายตัว ทำให้ก้อนซีเมนต์แตกสลายได้ (Lea, 1956)

ซีเมนต์ที่มีเนื้อแน่น มีความทึบน้ำสูง หรือมีอัตราการซึมน้ำ (Permeability) ต่ำ จะได้รับผลกระทบจากสารละลายเกลือหรือกรดต่าง ๆ น้อย ดังนั้นของเสียที่เป็นอันตรายที่ผ่านการทำลายฤทธิ์โดยการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ จะมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมได้ดีขึ้น ถ้ามีอัตราการซึมน้ำต่ำ

การตรวจสอบคุณสมบัติของของเสียอันตรายที่ผ่านการทำลายฤทธิ์ โดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง

การทำลายฤทธิ์ของเสียที่เป็นอันตราย โดยการทำให้เป็นก้อนแข็งนั้น เป็นวิธีการบำบัดของเสียที่เป็นอันตราย เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสม ในการนำไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ ดังนั้น จึงต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยทั่วไปแล้วจะทำการตรวจสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

1. ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength)
2. อัตราค่าความซึมน้ำ (Permeability)
3. ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมา (Leachate)

นอกจากนี้ อาจมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพเพิ่มเติมดังนี้

- ค่าความหนาแน่น
- พิจารณาลักษณะภายนอก เช่น มีลักษณะแข็งคล้ายหิน ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ เป็นต้น

1. ค่ากำลังรับแรงอัด

การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด มีวิธีการทดสอบ 2 วิธี คือ Confined Compressive Strength และ Unconfined Compressive Strength

ของเสียที่เป็นอันตรายเมื่อนำมาทำให้แข็งตัวเป็นก้อนโดยผสมกับปูนซีเมนต์ ลักษณะการแข็งตัวจะต่างจาก ซีเมนต์มอร์ตาร์ (Cement Mortar) กล่าวคือก้อนตัวอย่างแข็งตัวได้ แต่ไม่มีความแกร่ง (Rigid) เมื่อนำไปทำการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด ลักษณะการวิบัติ (Failure) ของก้อนตัวอย่าง จะเป็นแบบ Plastic Deformation ค่า Unconfined Compressive Strength ต่ำ

## 2. อัตราค่าความซึมน้ำ (Pemeability)

วัสดุคล้ายดิน (Earth Material) เกือบทุกชนิดจะยอมให้น้ำซึมผ่านได้ เรียกว่า อัตราค่าความซึมน้ำ (Permeability) วัสดุใดมีอัตราค่าความซึมน้ำต่ำ แสดงว่าวัสดุนั้นมีความทึบน้ำสูง น้ำซึมผ่านได้ยาก อัตราการชะละลายของสารพิษจะขึ้นอยู่กับอัตราค่าความซึมน้ำ วิธีการทดสอบหาอัตราค่าความซึมน้ำมี 2 วิธีคือ

- วิธีใช้ความดันคงที่ (Constant Head)
- วิธีใช้ความดันไม่คงที่ (Falling Head)

## 3. คุณสมบัติในการชะละลาย (Leachate)

การทดสอบหาคุณสมบัติ ของน้ำชะละลาย มีหลายวิธีขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์

Perket และ Webster (1981) กล่าวถึงการสกัดสาร (Extraction) หมายถึงวิธีการมาตรฐานที่ใช้ทดสอบคุณภาพของน้ำชะละลายในห้องปฏิบัติการ เพื่อกำหนดประเภทของเสียว่าเป็นของเสียที่เป็นอันตรายหรือไม่ การชะละลาย (Leaching) เป็นการทดสอบคุณสมบัติของน้ำชะละลาย เพื่อใช้อ้างอิงในพฤติกรรมงานสนาม อย่างไรก็ตาม คำสองคำนี้สามารถใช้แทนกันได้

การทดสอบแบบคอลัมน์ (Column Test) สำหรับการทดสอบแบบแบทช์ ของเสียจะสัมผัสกับสารละลายภายในภาชนะบรรจุอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาของช่วงการทดสอบ แต่การทดสอบแบบคอลัมน์ สารละลายที่ใช้ในการสกัดจะถูกป้อนผ่านคอลัมน์ซึ่งบรรจุของเสียที่อัดแน่นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา หรือเป็นช่วงเวลา (Perket และ Webster, 1981)

จากการที่มีวิธีการสกัดสารหลายวิธี Perket และ Webster (1981) ได้สรุปวิธีการสกัดที่ใช้อ้างอิงทั่ว ๆ ไป แสดงดังตารางที่ 3.5

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2531) ได้กำหนดวิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) ในการหาปริมาณความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำสกัดดังนี้

1. บดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดของสิ่งปฏิกูลระหว่าง 0.5 มม. ถึง 5 มม.

2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1. หนัก 50 กรัม ใส่ในตัวทำละลายซึ่งประกอบด้วย น้ำกลั่นผสมกับกรดไฮโดรคลอริก จนมีความเป็นกรด-ด่าง ระหว่าง 5.8 ถึง 6.3 ในอัตราส่วน ปริมาตรของสารละลายเป็น 10 เท่า (มล.) ของน้ำหนัก (ก.) ของตัวอย่างสิ่งปฏิกูล
3. เขย่าบนเครื่องเขย่า ๗ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบ ต่อนาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 5 ซม.
4. กรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ของรู 1 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่าง ๆ ตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ ในการวิเคราะห์



ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบวิธีการสกัดสาร (Extraction Test Procedure)

(Perket และ Webster, 1981)

การทดสอบการชะละลาย	Standard Leach Test	Toxicant Extraction Procedure	ASTM Method A	Extraction Procedure
1. ปริมาณตัวอย่างสาร	28.6 กรัมตัวอย่างสาร (ส่วนที่เป็นของแข็ง)	ไม่ระบุน้ำหนักต่ำสุด	350 กรัม	น้ำหนักอย่างน้อย 100 กรัม (0.5% ของแข็ง)
2. การเตรียมตัวอย่างสาร	แยกของเหลวโดยใช้ 0.45 $\mu$ m pressure filtration	แยกของเหลวโดยวิธี centrifugation หรือ filtration		
3. อัตราส่วนของเหลวต่อของ แข็ง	10 : 1 ถึง 7 : 1	10 : 1 (เริ่มต้น 8 : 1)	4 : 1	20 : 1 (เริ่มต้น 16 : 1)
4. สารที่ใช้ทดสอบการ ชะละลาย (Extraction Solution)	Buffered acetic acid หรือ น้ำกลั่น	acetic acid หรือ Sodium hydroxide	ASTM Type IV water	0.5 N acetic acid; 4 มล./ก ของตัวอย่างสาร
5. การควบคุม pH		4.9 - 5.2	ไม่กำหนด	4.8 - 5.2
6. ภาชนะที่ใช้ทดสอบ	ภาชนะปิด	ไม่กำหนด	ขวดปากกว้าง (ปิดฝา)	เครื่องกวนหรือเครื่องมือที่เทียบเท่า
7. วิธีการผสมและระยะเวลาการ ทดสอบ	rotating shaker 24 ชม.	mechanical stirring 24 ชม.	reciprocating shaker 48 ชม.	เครื่องกวนต่อเนื่อง 24 ชม.
8. การแยกของเหลวและของแข็ง	กรองผ่านกระดาษกรอง ใยแก้ว ขนาด 0.45 $\mu$ m	กรองผ่านกระดาษกรอง ขนาด 0.45 $\mu$ m	กรองผ่านกระดาษกรอง ขนาด 0.45 $\mu$ m โดยใช้ เครื่องกรองแบบความดัน หรือแบบสูญญากาศ	กรองผ่านกระดาษกรอง ขนาด 0.45 $\mu$ m

## เกณฑ์มาตรฐานและคุณสมบัติของของเสียที่ผ่านการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน

Sollars และ Perry (1989) ได้กล่าวถึงการประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดโดยการทำให้แข็งตัว ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ของการบำบัด ได้แก่ ปัจจัยต่าง ๆ เช่น การปรับปรุงให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมั่นคง การลดพื้นที่ผิว และการจำกัดการละลายของสารที่เป็นอันตรายเมื่อสัมผัสกับสารชะล้างในช่วงเวลาดังกล่าวนั้น ประเทศสหราชอาณาจักร (ประเทศอังกฤษ) ยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานเป็นทางการสำหรับคุณภาพของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยวิธีการข้างต้น แต่ได้มีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอาทิ หน่วยงานที่เกี่ยวกับการกำจัดของเสีย (Waste Disposal Authority) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการปฏิบัติงานในการบำบัดของเสีย โดยการทดสอบค่า Compressive Strength, Permeability และ Leachability ตารางที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการ Sealosafe จากโรงบำบัดของเสียที่เมือง West Thurrock

บริษัท Engineering-Science บริษัท Thai DCI และบริษัท Systems Engineering (1989) ได้ดำเนินการศึกษาและจัดทำแผนการจัดการของเสียอันตรายของประเทศไทย (National Hazardous Waste Management Plan) ได้กล่าวถึงการทดสอบการชะละลายและเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสีย โดยการทำให้แข็งตัว โดยแบ่งการทดสอบได้ 2 วิธีคือ



วิธีที่ 1 การทดสอบโดยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี อาทิ โลหะหนัก และสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ เป็นต้น โดยกำหนดค่ามาตรฐานของสารมลพิษ สำหรับสารเคมีต่าง ๆ ที่ถูกชะละลายออกมาจากของเสียขึ้น ถ้าค่าที่ทดสอบดังกล่าวสูงกว่าค่ามาตรฐานของสารมลพิษ แสดงค่าของเสียนั้นเป็นสารที่มีอันตราย เกณฑ์ในการกำหนดค่ามาตรฐานของสารมลพิษ โดยทั่ว ๆ ไปจะมีค่าประมาณ 100 เท่าของมาตรฐานน้ำดื่ม ดังนั้น สารเคมีดังกล่าวถูกชะละลายและเจือจางในธรรมชาติได้มากกว่า 100 เท่า ก็จะไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อแหล่งน้ำใช้ของมนุษย์ การทดสอบการชะละลายของสารเคมีจากของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน จะเป็นการประเมินความสามารถและประสิทธิภาพของระบบบำบัดของเสีย ค่ามาตรฐานของสารมลพิษต่าง ๆ กำหนดไว้ ดังนี้

อาร์เซนิก	5.0 มก./ล.
แบเรียม	100.0 มก./ล.
แคดเมียม	1.0 มก./ล.
โครเมียม	5.0 มก./ล.
ปรอท	0.2 มก./ล.
เซเลเนียม	1.0 มก./ล.
เงิน	5.0 มก./ล.
Endrin	0.02 มก./ล.
Lindane	0.4 มก./ล.
Methoxychlor	10.0 มก./ล.
Toxaphene	0.5 มก./ล.
2,4-D	10.4 มก./ล.
2,4,5 - TP Silvex	1.0 มก./ล.

วิธีที่ 2 เป็นวิธีการทดสอบความเป็นพิษของสารที่ถูกชะละลายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ (Bioassay) โดยนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่เกิดจากการทดลองใช้ค่ามาตรฐานของสารมลพิษ (การทดลองนี้ใช้น้ำกลั่นเป็นสารชะละลาย) ถ้าความเป็นพิษของสารชะละลายเกินค่า

กำหนด ซึ่งได้เลือกไว้สำหรับการเจือจางในสิ่งแวดล้อมแล้ว ของเสียนั้นจะถูกจัดว่าเป็นของเสียอันตราย โดยกำหนดค่า 24-hour LC 50 เมื่อน้ำสกัดมีการเจือจางน้อยกว่า 20 %

US. EPA (1992) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับของเสียที่สามารถนำไปทิ้งโดยการฝังกลบหรือของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยการทดสอบของเสียดังกล่าวด้วย วิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Extract Solution) มาตรฐานของ EPA ได้กำหนดความเข้มข้นของโลหะหนัก ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของสารที่เป็นพิษ ตามประเภทของของเสีย ดังมีรายละเอียดในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 มาตรฐานความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด (Extract Solution) สำหรับของของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดแล้ว (US. EPA 1992)

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

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

อาร์เซนิก	>5	มก./ล.
แคดเมียม	>1	มก./ล.
โครเมียม	>5	มก./ล.
ตะกั่ว	>5	มก./ล.
ปรอท	>0.2	มก./ล.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2531) ได้ออกประกาศกรมโรงงานฯ ฉบับที่ 1 เรื่อง กำหนดวิธีการเก็บ ทำลายฤทธิ์ กำจัด ผัง ทิ้ง เคลื่อนย้ายและขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว สรุปมาตรฐานที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

1. วิธีการทำลายสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วก่อนนำไปทิ้งหรือฝัง
2. สิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (Solidification) จะต้องมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้
  - น้ำซึมผ่านได้ในอัตราต่ำกว่า  $1 \times 10^{-6}$  ซม./วินาที
  - รับแรงอัด (Compressive Strength) ได้ไม่น้อยกว่า 14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
  - มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
  - มีลักษณะแข็งคล้ายหินไม่ไหม้ไฟ ไม่มีกลิ่น

#### การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

จากการรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดของเสียที่เป็นอันตราย โดยการทำให้เป็นก้อนแข็งและเป็นก้อน ด้วยวัสดุซีเมนต์และวัสดุอื่น ๆ ในช่วงปี 1986-1995 สรุปได้ ดังนี้

Walsh และคณะ (1986) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสารประกอบอินทรีย์ต่อกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทำการทดลองเติมเอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol , EG ) และ p-bromophenol , PBP ( ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ ) ลงในปูนซีเมนต์ ในสัดส่วนต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ระหว่าง 0.02 ถึง 0.2 จากนั้นให้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 21-25°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ถึง 3 เดือน ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

การเติมสารประกอบอินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดลงในปูนซีเมนต์ จะมีผลทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป โดยที่สาร EG จะมีผลกระทบมากกว่า PBP แม้จะเติมในปริมาณน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของ EG มีขนาดใกล้เคียงกับโมเลกุลน้ำ ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะเข้าไปแทนที่โมเลกุลของน้ำระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะไปทำลายโครงสร้างผลึกของซีเมนต์

ในก้อนตัวอย่างที่มีส่วนผสมของ EG เกือบทุกตัวอย่าง และที่มี PBP ผสมอยู่ในปริมาณมาก ๆ จะมีผลหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน

Bishop ( 1988 ) ได้ทำการศึกษา การชะละลายโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อนด้วยซีเมนต์ โดยใช้ของเสียสังเคราะห์เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว ผลการศึกษาพบว่า ลักษณะของการชะละลายของโครเมียมและตะกั่วมีรูปแบบของการชะละลายคล้ายคลึงกับการชะละลายของซิลิกอน ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์และทราย ดังนั้นจึงเชื่อว่าโครเมียมและตะกั่วถูกจับยึดไว้ในโครงสร้างของปูนซีเมนต์

ลักษณะของการชะละลายของแคดเมียม จะคล้ายคลึงกับค่าความเป็นด่างที่ถูกชะละลายออกมา จึงสันนิษฐานได้ว่า แคดเมียม จะอยู่ในรูปพรีนโดยเกาะติดตามผนังรูปพรีนของก้อนของเสียที่แข็งตัวในรูปของแคดเมียมไฮดรอกไซด์

Jaggi ( 1988 ) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุประสานประเภทวัสดุซีเมนต์ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์แกลบ ผงซีเมนต์ในเตา ( Cement klin Dust ) ในการทำให้กากของเสียอันตรายคงสภาพโดยการทำให้แข็งตัว กากของเสียอันตรายที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย

1. กากของเสียอันตรายจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และโรงงานผลิตแบตเตอรี่ ซึ่งมีแคดเมียมและตะกั่วเจือปน
2. กากของเสียอันตรายประเภทสารอินทรีย์ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตยาฆ่าแมลง ซึ่งมีสารอัลดริน (Aldrin) เจือปน

เมื่อทำการตรวจวัดค่าอัตราการชะละลายของสารพิษ และค่าความสามารถในการรับแรงอัด เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวัสดุประสานแต่ละประเภท ผลสรุปได้ ดังนี้

- อัตราการชะละลายจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของกากของเสียในก้อนตัวอย่าง และอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของก้อนตัวอย่าง แต่จะเป็นอัตราส่วนผกผันกับ ค่า pH แรกเริ่มของสารละลายที่ใช้ในการสกัดสาร
- ค่าความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น หากใช้ปริมาณสารพิษน้อยลง และจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่าง
- อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกากของเสียอินทรีย์ สำหรับกากของเสียอินทรีย์ ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.35
- การใช้ซีเมนต์แกลบผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วน 1:1 จะทำให้กากของเสียจากโรงงานชุบโลหะคงสภาพได้ดีที่สุด
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้โลหะแคดเมียมละลายน้อยที่สุด
- การใช้ซีเมนต์กันเตาเป็นวัสดุประสาน จะทำให้ค่าการชะละลายต่ำที่สุด และมีความสามารถรับแรงอัดพอเพียงสำหรับการบำบัดกากของเสียจากยาฆ่าแมลง

Shin และ Sujitwatthana (1988) ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณของกากของเสียอันตรายในส่วนผสม อัตราน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (a/v ratio) pH ของสารละลายที่ใช้ในการสกัดสาร และระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่างกากของเสียอันตรายที่ทำให้แข็งตัวและคงสภาพโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน โดยทดลองใช้กากของเสียอันตราย 4 ชนิด คือ กากของเสียที่มีแคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) อัลดริน (AD) และ Chlordane (OHM) ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- ปริมาณ Cd, Pb, Ad และ OHM ที่ถูกชะละลายออกมาเป็นสัดส่วนกับปริมาณของเสียที่เติมลงในส่วนผสมของปูนซีเมนต์และทราย
- ค่าความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโลหะหนักลงในส่วนผสมของซีเมนต์และทราย
- อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) เท่ากับ 0.5 จะทำให้ค่าการรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างสูงกว่าเมื่อใช้ W/C ratio ที่ 1.0 และ 0.25
- การใช้สารละลายที่มี pH ต่ำในการสกัดสาร จะทำให้มีการชะละลายสูงขึ้น



- ค่า a/v ratio จะมีผลต่อการชะละลาย ค่า a/v ratio สูง จะมีการชะละลายสูงขึ้น
- ระยะเวลาในการบ่มก่อนตัวอย่าง มีผลต่อการชะละลายน้อยมาก แต่จะมีผลทำให้ค่าความสามารถรับแรงอัดสูงขึ้น ถ้าระยะเวลาในการบ่มนานขึ้น
- การใช้ปูนซีเมนต์และซิลิกาในกระบวนการทำให้แข็งตัวและคงสภาพ เหมาะสำหรับภาคของเสียที่มีโลหะหนักมากกว่าของเสียประเภทสารอินทรีย์ จำพวกยาฆ่าแมลง

Shin และคณะ (1988) ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนของทรายต่อซีเมนต์ (S/C ratio) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) ปริมาณของตะกอน และปริมาณของ Precipitator ที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนัก และค่าความสามารถรับแรงอัดของตะกอนของเสียอันตรายของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ทำให้แข็งตัวและคงสภาพโดยการใช้ซีเมนต์ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า

- S/C ratio มีอิทธิพลต่อการชะละลายของ  $Cr^{6+}$  มากที่สุด โดยที่ S/C ratio สูง  $Cr^{6+}$  จะถูกชะละลายออกมามาก
- W/C ratio จะมีอิทธิพลต่อการชะละลายของ Zn และค่าความสามารถรับแรงอัดโดยที่ W/C ratio สูง จะทำให้การชะละลายของ Zn มาก และค่าความสามารถรับแรงอัดต่ำ

Youn (1990) ได้ทำการศึกษาวิจัยการทำให้ตะกอนของเสียจากห้องทดลอง (ส่วนใหญ่เป็นของเสียจากน้ำเสีย COD) ให้เป็นก้อนแข็ง โดยใช้วัสดุประเภทซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- อัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) ที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ ซึ่งให้ค่าการรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 0.5 และ 0.9 ตามลำดับ
- เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในปูนซีเมนต์จะทำให้ค่าการรับแรงอัดต่ำลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ จะมีแนวโน้มให้ค่าการรับแรงอัดสูงขึ้น
- เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ ค่าการชะละลายจะมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ จะให้ค่าการชะละลายน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก

- อัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) จะมีผลต่อการรับแรงอัด โดยที่ค่า W/C ratio เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าการรับแรงอัดลดลงทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์แก้ว
- ค่าการรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะสูงขึ้น ตามเวลาการบ่มก้อนตัวอย่าง ในทางตรงกันข้าม เมื่อใช้ปูนขาวผสมซีเมนต์แก้ว จะทำให้ค่าการรับแรงอัดสูงขึ้นในช่วงแรก ของการบ่มก้อนตัวอย่าง (ประมาณ 7 วัน) หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง
- ค่าการชะละลาย มีค่าลดลงเมื่อทำการบ่มก้อนตัวอย่างนานขึ้น ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์แก้ว

Rijal (1990) ได้ทำการศึกษาในการทำให้ตะกอนน้ำเสียจากห้องทดลองแข็งตัวและคงสภาพ ไม่มีการเคลื่อนตัวของโลหะหนัก (Cr และ Zn) โดยการใช้วัสดุประเภทซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับซีเมนต์แก้ว (อัตราส่วน 1:1) โดยทำการผสมตะกอนกับวัสดุประสานผสมทราย (1:2) ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ กัน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 สำหรับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเท่ากับ 0.65 สำหรับปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แก้ว

การประเมินประสิทธิภาพในการจับโลหะหนักไว้ในก้อนตัวอย่างของวัสดุประสานแต่ละชนิด จะทำการทดสอบค่าอัตราการชะละลาย และค่าความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ตัวแปรต่าง ๆ ผลสรุปได้ ดังนี้

- ค่าความสามารถรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง จะลดลงตามปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม
- ค่าอัตราการชะละลายจะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของตะกอนต่อวัสดุประสาน
- การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน จะทำให้ก้อนตัวอย่างมีความสามารถรับแรงอัดได้สูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แก้วทุกตัวอย่าง
- ค่าอัตราการชะละลายของโครเมียมในก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะต่ำกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แก้ว ที่อัตราส่วนของตะกอนต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.2 แต่ที่อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุประสานสูงกว่า 0.5 ตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน จะให้ค่าการชะละลายโครเมียมสูงกว่า

Claudio (1991) ได้ทำการศึกษาการทำให้ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าให้เป็นก้อนแข็ง โดยใช้วัสดุประเภทซีเมนต์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ฟอสโซแลนนิคซีเมนต์ และซีเมนต์กันเตาเป็นวัสดุประสาน ผลการทดลองสรุปว่า

- กระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งโดยใช้ซีเมนต์ เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการจับโลหะที่เป็นพิษเช่น แคดเมียม ปรอท ตะกั่ว และโลหะอื่น ๆ เช่น โครเมียม นิเกิล ทองแดง หรือสังกะสี ซึ่งจะมีเจือปนอยู่ในตะกอนน้ำเสีย จากโรงงานชุบโลหะในปริมาณสูง
- ปริมาณโลหะต่าง ๆ ในน้ำสกัด (ยกเว้น  $Al^{3+}$ ) มีปริมาณต่ำกว่ามาตรฐานน้ำดื่ม
- ส่วนผสมของตะกอนกับปูนซีเมนต์ที่อายุ 90 วันขึ้นไป จะมีความแข็งแรงคล้ายกับคอนกรีตโครงสร้าง

Cheng และ Bishop (1992) ได้ทำการศึกษาการกระจายของโลหะหนักในแท่งซีเมนต์ก่อนและภายหลังการทดสอบการชะละลายโดยใช้กรดอะซิติก ซีเมนต์จะถูกหล่อเป็นรูปทรงกลมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และกากตะกอนโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และอาร์เซนิก โลหะหนักจะถูกวิเคราะห์ โดยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) Energy Dispersive X-ray (EDX) และ Wet Digestion/AA Method จากผลการวิจัยพบว่า บริเวณผิวของตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยกรดอะซิติก แคลเซียมส่วนใหญ่ในองค์ประกอบของซีเมนต์จะถูกชะละลายออกมา ในขณะที่ซิลิกอน เหล็ก และอลูมิเนียมยังคงเหลืออยู่ และสารดังกล่าวนี้จะมีคุณสมบัติในการดูดซับ และดูดติดผิวได้ดี ดังนั้น โลหะหนักที่ละลายออกไปจะถูกดูดติดผิวที่บริเวณชั้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งจะช่วยป้องกันการชะละลายของโลหะหนักได้

จากการวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างพบว่าการชะละลายของโลหะหนักจะเกิดเฉพาะที่บริเวณชั้นผิวน้ำเท่านั้น ปริมาณโลหะหนักในชั้นที่ไม่มีอาการชะละลายยังคงมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงก่อนการทดสอบการชะละลาย

Yang และคณะ (1993) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการทำกากตะกอนปรอทให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ และปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัด โดยการเติมสารโพลีเมอร์ ลาเทกซ์ ลงในส่วนผสม จากผลการทดลอง พบว่า สารโพลีเมอร์ลาเทกซ์ มากกว่า 3% จะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของก้อนของเสีย จากการทดสอบ Freezing Thawing Test ก้อนของเสียที่ไม่เติมสาร

โพลีเมอร์ลาเทกซ์ จะเกิดการแตกร้า ส่วนก่อนของเสียที่เติมสารโพลีเมอร์ลาเทกซ์ จะไม่เกิดการแตกร้า ผลดีของการเติมสารข้างต้นดังกล่าว ยังช่วยลดความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจากการทดสอบด้วยวิธี TCLP พบว่าปริมาณโลหะหนักลดลงมาก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติมกับไม่เติมสารโพลีเมอร์ ทั้งนี้จากการทดสอบด้วยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) พบว่าผลของโพลีเมอร์ลาเทกซ์ จะทำให้เกิดโครงสร้างเชื่อมโยงเป็นตาข่ายในเนื้อของของเสียที่แข็งตัว ซึ่งจะช่วยยึดจับโลหะหนักไม่ให้ถูกชะละลายออกมา

Leangon (1993) ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาหาวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนของกากตะกอน จากโรงงานฟอกหนัง และกากตะกอนจากโรงงานเซมิคอนดักเตอร์ โดยกากตะกอนจากโรงงานฟอกหนัง จะมีโครเมียม และสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ ส่วนกากตะกอนจากโรงงานเซมิคอนดักเตอร์ ประกอบด้วย ทองแดง ตะกั่ว และดีบุก วัสดุประสาน 5 ชนิด ที่นำมาใช้ทดลอง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เถ้าจากแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และซิลิกาฟูม จากการทดสอบกระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยใช้วัสดุประสานผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของก้อนของเสียแข็งตัว อาทิ กำลังรับแรงอัด การชะละลายและค่าใช้จ่ายในการกำจัด พบว่าวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกำจัดกากตะกอนดังกล่าว มีดังนี้

	ปูนซีเมนต์	เถ้าจากแกลบ	เถ้าลอยลิกไนต์
1. กากตะกอนจากโรงฟอกหนัง	0.7	0.2	0.1
2. กากตะกอนจากโรงงานเซมิคอนดักเตอร์	0.7	0.1	0.2

โดยสามารถกำจัดกากตะกอนได้สูงสุดในอัตราส่วน กากตะกอนต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.64 และ 1.37 ตามลำดับ

นฤมิตร (2538) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการทำละลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนัก จากการบำบัดน้ำเสียซีไอดี โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ ผลการศึกษาสรุปได้ว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์จะทำให้ตะกอนโลหะหนักมีคุณสมบัติทางกายภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม แต่ปรอทมีการชะละลายออกมามาก่อนข้างสูงจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสารพิษของกรมโรงงาน

อุตสาหกรรม โครเมียมและเหล็กมีการชะละลายออกมาน้อยมาก ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ ร้อยละ 50 เป็นวัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ได้ดีกว่าซีเมนต์ล้วน