

บทที่ 3

การทบทวนเอกสาร



ของเสียที่เป็นอันตราย (Hazardous waste)

ของเสียที่เป็นอันตราย ตามคำจำกัดความของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ หมายถึง ของเสียหรือสิ่งของที่เจือปนด้วยของเสียซึ่งมีความเข้มข้น หรือมีคุณสมบัติด้านกายภาพ เคมี หรืออื่น ๆ ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการตาย หรือเจ็บป่วยทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ ตลอดจนทำให้เกิด หรือมีแนวโน้มจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมเมื่อไม่ได้มีการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด เก็บกัก ขนส่ง และกำจัด

โดยทั่วไปแล้ว คุณสมบัติที่กำหนดว่าของเสียนั้นเข้าข่ายเป็นของเสียที่เป็นอันตราย ได้แก่ เป็นสารไวไฟ มีฤทธิ์กัดกร่อน เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย เป็นสารกัมมันตรังสี มีความเป็นพิษ และติดเชื้อได้ง่าย (Pojasek, 1979 อ้างจาก U.S. EPA, 1978)

โลหะหนัก

โลหะหนักหมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งสิ้น 68 ธาตุ มีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) มีคุณสมบัติทางกายภาพคือ นำไฟฟ้า และความร้อนได้ดี เป็นมันวาว สะท้อนแสง เหนียวนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญ คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า

โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบอินทรีย์โลหะ (Organometallic compound) ซึ่งเป็นพิษ และสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดย

ผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิด เป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อมีการสะสมในร่างกายของมนุษย์ อาจมีผลทำให้พิการ หรือเสียชีวิตได้

โลหะหนักบางชนิด เช่น ปรอท แคดเมียม อาร์เซนิก ตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักประเภทที่มีพิษถาวร ซึ่งนอกจากจะไม่เปลี่ยนรูปไปตามกาลเวลาแล้ว ยังสามารถสะสมในร่างกายมนุษย์และสัตว์น้ำได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกจากของเสีย น้ำเสีย หรือตะกอนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกระจายเข้าสู่วัฏจักรของน้ำหรือผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร

U.S. EPA ได้กำหนด โลหะที่มีพิษ 13 ชนิด ที่ต้องกำจัดออกจากน้ำเสีย ได้แก่ แบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี เงิน อาร์เซนิก แอนติโมนี เซเลเนียม แทลเลียม และปรอท

กระบวนการกำจัดโลหะหนัก

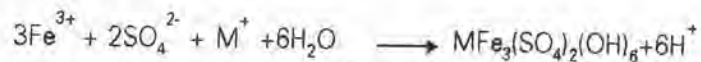
1. การตกตะกอนผลึกเกลือในรูปกากตะกอนจางไรไซด์

โดยทั่วไปแล้ว หัวแร่สังกะสีซัลไฟด์มีเหล็กเป็นมลทินปะปนอยู่เสมอประมาณร้อยละ 5 ถึง 12 ในการย่างแร่โดยเฉพาะอย่างยิ่งการย่างแร่โดยใช้เตาฟลูอิดไดซ์ จะทำให้เหล็กมลทินเหล่านี้รวมกับสังกะสีเป็นเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ซับซ้อนที่มีเหล็กรวมตัวกับสังกะสีในสัดส่วนต่างๆ และสามารถเขียนแทนได้เป็น $ZnFe_2O_4$

สังกะสีเฟอร์ไรท์ไม่ละลายในสภาพความเป็นกรดและอุณหภูมิในการแยกสกัดสังกะสีออกไซด์ สังกะสีเฟอร์ไรท์ที่อยู่ในแร่ที่ผ่านการเผาหรือย่างมาแล้วจึงเป็นส่วนที่อยู่ในกากแร่หลังการแยกสกัดด้วยกรดร่วมกับมลทินตัวอื่นๆ เช่น ตะกั่ว เงิน ทองคำ เป็นต้น สังกะสีส่วนนี้กลายเป็นส่วนที่ไม่สามารถแยกสกัดออกมาได้ ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดได้ประมาณร้อยละ 85 ถึง 93 เท่านั้น สังกะสีเฟอร์ไรท์ละลายได้ดีในกรดกำมะถันที่อุณหภูมิสูงเกือบถึงจุดเดือดแต่เหล็กส่วนใหญ่ก็จะละลายออกมาด้วย จึงต้องกำจัดออกไปก่อนที่จะให้สารละลายสังกะสีไปรวมกับสารละลายส่วนใหญ่จากการละลายสังกะสีออกไซด์ การกำจัดเหล็กออกโดยการตกตะกอนผลึกในรูปของเหล็กไฮดรอกไซด์ทำให้มีปัญหามากในทางปฏิบัติ เพราะตะกอนเหล็กไฮดรอกไซด์เป็นวุ้นที่กรองออกยากมาก ดังนั้นจึงต้องตกตะกอนผลึกเหล็กออกมาในรูปของตะกอนที่กรองออกได้ง่าย เช่น ตะกอนผลึกของเหล็กซัลเฟต และเหล็กออกไซด์ สังกะสีที่อยู่ในสังกะสี

เฟอร์ไรท์สามารถที่จะแยกสกัดออกมาได้อีก ทำให้ประสิทธิภาพการแยกสกัดสังกะสีสูงขึ้นได้ถึงร้อยละ 95 ถึง 97

กระบวนการจาโรไซต์ตกตะกอนผลึกเหล็กออกจากสารละลายซัลเฟต ในรูปของกลุ่มสารประกอบเหล็กซัลเฟตที่เรียกว่า จาโรไซต์ (Jarosite) องค์ประกอบทางเคมีของจาโรไซต์คือ $MFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ โดย M เป็นธาตุหรือประจุบวกเวเลนซ์เดียวในกลุ่มของ Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ag^+ , Rb^+ , $1/2 Pb^{2+}$ และ H_3O^+ การตกตะกอนผลึกจะเกิดขึ้นโดยการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ประมาณ 1.5 ที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียสและเติม NH_4^+ หรือ Na^+ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปเป็นไปตามสมการ



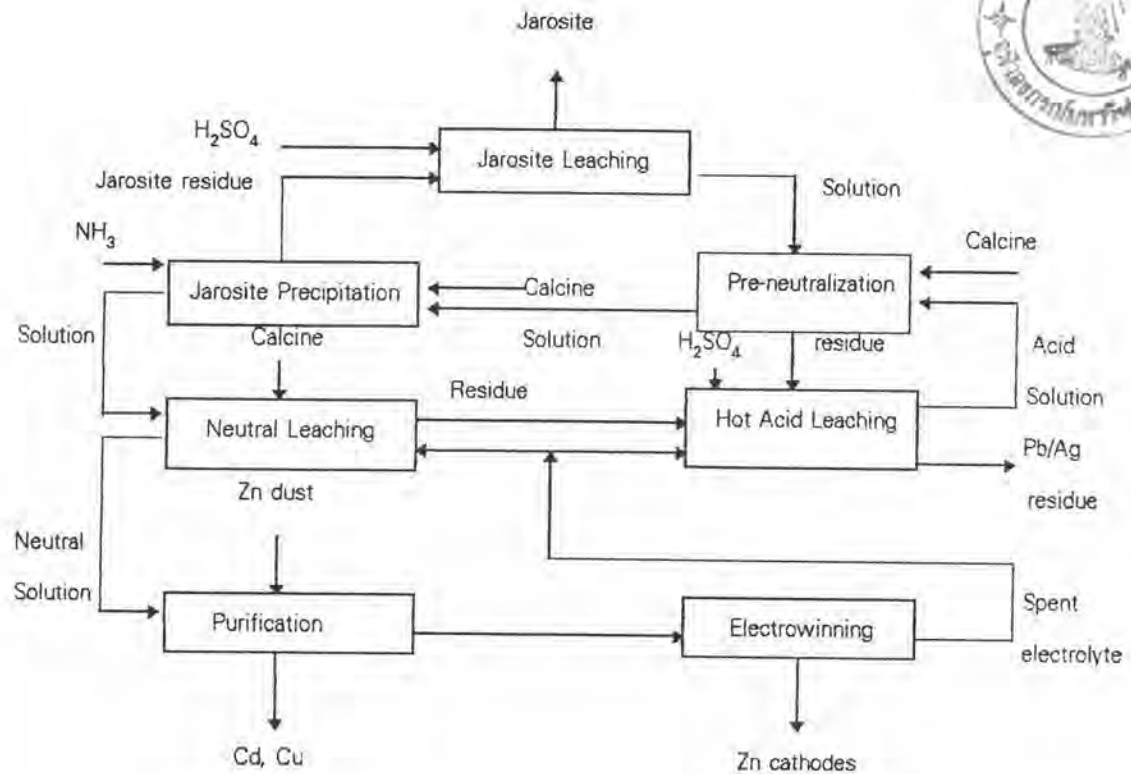
ปฏิกิริยาเกิดไฮโดรเจนไอออนขึ้น ซึ่งต้องทำให้เป็นกลาง เพื่อรักษาระดับพีเอชของสารละลายเอาไว้ตลอดเวลา จาโรไซต์จะตกตะกอนผลึกออกมาในรูปของกากตะกอนที่สามารถกรองได้ง่าย

2. การสกัดแร่โดยใช้กรดร้อน

สังกะสีเฟอร์ไรท์ละลายได้ดีในกรดกำมะถันร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80-95 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของกรดประมาณไม่ต่ำกว่า 20 กรัมต่อลิตร สารละลายที่ได้มีปริมาณเหล็กสูงในรูปของเหล็กซัลเฟต การตกตะกอนผลึกเหล็กออกมาในรูปของเหล็กไฮดรอกไซด์โดยการทำให้เป็นกลางตามปกติ มีปัญหาในการแยกคัดน้ำเพราะตะกอนเกิดเป็นวุ้น ดังนั้นการตกตะกอนผลึกเหล็กในรูปของจาโรไซต์ ทำให้การกรองแยกของแข็งออกจากของเหลวเป็นไปได้ง่ายมีประสิทธิภาพ พีเอชของสารละลายในการตกตะกอนผลึกประมาณ 1.5 แต่พีเอชที่สูงขึ้นทำให้การตกตะกอนผลึกเหล็กเป็นไปได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น แต่การกรองตะกอนจะยากยิ่งขึ้น ที่พีเอช 1.5 และอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสกำจัดเหล็กได้ประมาณร้อยละ 90-95 โดยการเติมสารเคมีที่เหมาะสม เหล็กส่วนที่เหลือในสารละลายต้องกำจัดออกในรูปของเหล็กไฮดรอกไซด์ โดยการตกตะกอนผลึกอีกครั้งหนึ่ง

กระบวนการจาโรไซต์ได้มีการใช้แพร่หลายในการแยกสกัดสังกะสี แผนผังกระบวนการอย่างง่ายได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1

แร่สังกะสีที่ถูกเผาแล้ว (Calcine) ส่วนใหญ่ถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการที่จัดทำปฏิกิริยากลาง (Neutral leach reactor) สังกะสีประมาณร้อยละ 80 ในแร่จะถูกละลายออกมาในสารละลายที่ได้จากการตกตะกอนจาโรไซต์และอิเล็กโทรไลต์ที่นำมาใช้ใหม่ โดยทั่วไปแล้วจะเติมแมงกานีสไดออกไซด์ลงไปเพื่อให้เกิดภาวะออกซิเดชัน และเหล็กปริมาณน้อยที่เกิดขึ้นในสาร



รูปที่ 3.1 แผนภูมิกระบวนการจําไรโซต์ (บริษัท ผาแดงอินดัสตรี, 2536)

ละลายจะตกตะกอนผลึกออกมาในรูปของเหล็กไฮดรอกไซด์พร้อมกับมลทินอื่นๆที่เป็นผลดี เช่น อาร์เซนิก แอนติโมนี และเจอร์มาเนียม ซึ่งถ้ามีปะปนอยู่ในสารละลายจะทำให้เกิดปัญหาในขั้นตอนการแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้า สารละลายที่ได้จากถังปฏิกรณ์กลางนี้มีค่าพีเอชประมาณ 5 และมีปริมาณสังกะสีประมาณ 150 กรัมต่อลิตร จะถูกแยกออกไป ตะกอนที่แยกได้จะถูกสกัดโดยใช้กรดร้อน (Hot acid leaching) ที่ 95 องศาเซลเซียส โดยใช้อิเล็กโทรไลต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่และกรดกำมะถันเติมเข้ามาใหม่ สังกะสีเฟอร์ไรท์ที่เหลืออยู่ในตะกอนจะถูกละลายออกมาพร้อมๆ กับเหล็ก ทองแดง และแคดเมียม ที่ปะปนเป็นมลทินอยู่ ตะกอนส่วนที่เหลือจากขั้นตอนนี้จะมีตะกั่วและเงินที่มีอยู่ในแร่ และโดยปกติเป็นผลพลอยได้ที่มีความที่ได้จากกระบวนการ

สารละลายที่ได้จากการสกัดตะกอนด้วยกรดร้อนจะเหลือกรดประมาณ 40 กรัมต่อลิตร ซึ่งต้องทำให้เป็นกลางมากขึ้นเหลือกรดประมาณ 10 กรัมต่อลิตร โดยใช้การเติมแร่สังกะสีที่เผาแล้ว (Calcine) ลงไปอีกในถังเตรียมปรับสภาพให้เป็นกลาง (Pre-neutralization) ดังนั้นสังกะสีออกไซด์ในแร่ที่เผาแล้วจะละลายออกมาอีก เหลือสังกะสีเฟอร์ไรท์ในตะกอนที่จะวนกลับไปสู่การสกัดตะกอนโดยกรดร้อนอีกครั้งหนึ่ง

สารละลายที่ได้จากขั้นตอนนี้เตรียมปรับสภาพให้เป็นกลาง จะนำไปตกตะกอนจําไรโซต์ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และพีเอชที่ 1.5 โดยปกติจะเติมแอมโมเนียมลงไปเพื่อตก

ตะกอนผลึกเหล็กออกมาในรูปของแอมโมเนียมจาโรไซต์ ($\text{NH}_4\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) และเติมแร่สังกะสีที่เผาแล้วลงไปอีกเพื่อปรับสภาพของกรดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา การตกตะกอนจะเกิดขึ้นโดยต่อเนืองจนกระทั่งปริมาณของเหล็กลดลงจากประมาณ 20 กรัมต่อลิตรเหลือประมาณ 1 กรัมต่อลิตร ปริมาณเหล็กจำนวนน้อยที่จะเหลือเอาไว้ในสารละลายที่จะส่งไปยังขั้นตอนการละลายแร่ (Neutral leaching) ที่ปริมาณเหล็กจะลดลงเหลือต่ำกว่า 0.01 กรัมต่อลิตร เนื่องจากตกตะกอนผลึกออกไปในรูปเหล็กไฮดรอกไซด์

กากตะกอนจาโรไซต์มีสังกะสีเฟอร์ไรท์ที่เหลือจากการละลายของแร่สังกะสีที่เผาแล้ว ที่เติมลงไปเป็นตัวทำให้เป็นกลาง (Neutralizing agent) ในการตกตะกอนจาโรไซต์ ดังนั้นในขั้นตอนที่จะเก็บสังกะสีส่วนนี้กลับมาอีกจึงต้องล้างด้วยกรดในภาวะร้อนที่จะละลายสังกะสีจากสังกะสีเฟอร์ไรท์ออกมา ส่วนกากตะกอนจาโรไซต์ก็ไม่ละลาย สารละลายส่วนนี้จะวนกลับไปขั้นตอนการเตรียมปรับสภาพให้เป็นกลาง และจาโรไซต์ที่ถูกล้างด้วยกรดร้อนแล้วจะทิ้งไป

การสกัดสังกะสีโดยกระบวนการนี้จากแร่สังกะสีที่เผาแล้ว ที่มีปริมาณสังกะสีร้อยละ 56-57 และเหล็กร้อยละ 10-11 จะได้ประสิทธิภาพในการสกัดประมาณร้อยละ 98 ของปริมาณสังกะสีทั้งหมด

ข้อได้เปรียบสำคัญของกระบวนการจาโรไซต์เกิดจากคุณสมบัติของจาโรไซต์เอง ที่เป็นเกลือเบสิคซัลเฟตตกตะกอนผลึกจากสารละลายที่เป็นกรด ทำให้สามารถใช้แร่สังกะสีที่เผาแล้วเติมเป็นตัวทำให้เป็นกลางและทำให้ซัลเฟตส่วนเกินตกตะกอนออกมาได้อีกด้วย นอกจากนี้เมื่อเกิดเป็นตะกอนจาโรไซต์แล้วจะเสถียรการชะละลายของกรด ดังนั้นแร่สังกะสีที่เผาแล้วที่ยังไม่ละลายออกมาที่ผสมรวมกับจาโรไซต์ก็สามารถแยกสกัดออกมาได้โดยการล้างด้วยกรด

ข้อเสียของกระบวนการนี้อาจมีอยู่เพียง 2 ประการ ได้แก่ ความจำเป็นที่ต้องใช้สารเคมีช่วยในการตกตะกอนผลึก ซึ่งโดยปกติจะใช้แอมโมเนียที่ทำให้เกิดเป็นจาโรไซต์ ปริมาณความต้องการแอมโมเนียในทางทฤษฎีประมาณ 37 กิโลกรัมต่อจาโรไซต์ 1,000 กิโลกรัม แต่ในทางปฏิบัติจะใช้แอมโมเนียน้อยกว่า 30 กิโลกรัมต่อ 1,000 กิโลกรัมของจาโรไซต์ เพราะแอมโมเนียจาโรไซด์มักจะมี H_3O^+ อยู่ด้วย ประการที่สอง คือ ปริมาณเหล็กในจาโรไซด์ที่ค่อนข้างต่ำประมาณร้อยละ 35 ทำให้ปริมาณกากตะกอนเกิดขึ้นมาก มีปัญหาในการกำจัดภายหลัง จากแร่สังกะสีที่เผาแล้วที่มีสังกะสีประมาณร้อยละ 56-57 และเหล็กร้อยละ 10-11 จะเกิดกากตะกอนจาโรไซด์ประมาณ 0.53 ตันต่อโลหะสังกะสี 1 ตัน

กระบวนการผลิตของโรงงานผาแดงอินดัสตรี ที่ จังหวัดตาก จะเปลี่ยนจากกระบวนการผลิตในปัจจุบันที่ใช้แร่สังกะสีซิลิเกต (รูปที่ 3.2) เป็นกระบวนการที่ใช้แร่สังกะสีที่เผาแล้ว (Calcine) ซึ่งได้จากการย่างแร่สังกะสีซิลิเกต (รูปที่ 3.3) ในปี พ.ศ. 2538 จากกระบวนการผลิตใหม่นี้ จะเกิดกากตะกอนจาโรไซด์ขึ้น 2 ประเภท ได้แก่ กากตะกอนจาโรไซด์แบบธรรมดา

(Conventional Jarosite) และกากตะกอนซิลิโคจาโรไซต์ (Silico Jarosite) ซึ่งเกิดจากการเติมแร่สังกะสีซิลิเกตเข้าไปแทนแร่สังกะสีที่เผาแล้วในขั้นตอนการตกตะกอนจาโรไซต์

การบำบัดและกำจัดของเสียที่เป็นอันตราย

การบำบัดของเสียที่เป็นอันตราย หมายถึง การจัดการกับของเสียที่เป็นอันตรายเพื่อลดความเป็นพิษและทำให้มีสมบัติทั้งทางด้านกายภาพและเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดขั้นสุดท้ายต่อไป ทั้งนี้วิธีการบำบัดของเสียที่เป็นอันตราย อาจแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี คือ

1. การบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) เป็นการแยกของแข็งและของเหลวออกจากกันซึ่งประกอบด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การดูดซับด้วยคาร์บอน การกลั่น การเหวี่ยง โดยแรงหนีศูนย์กลาง และการตกตะกอน

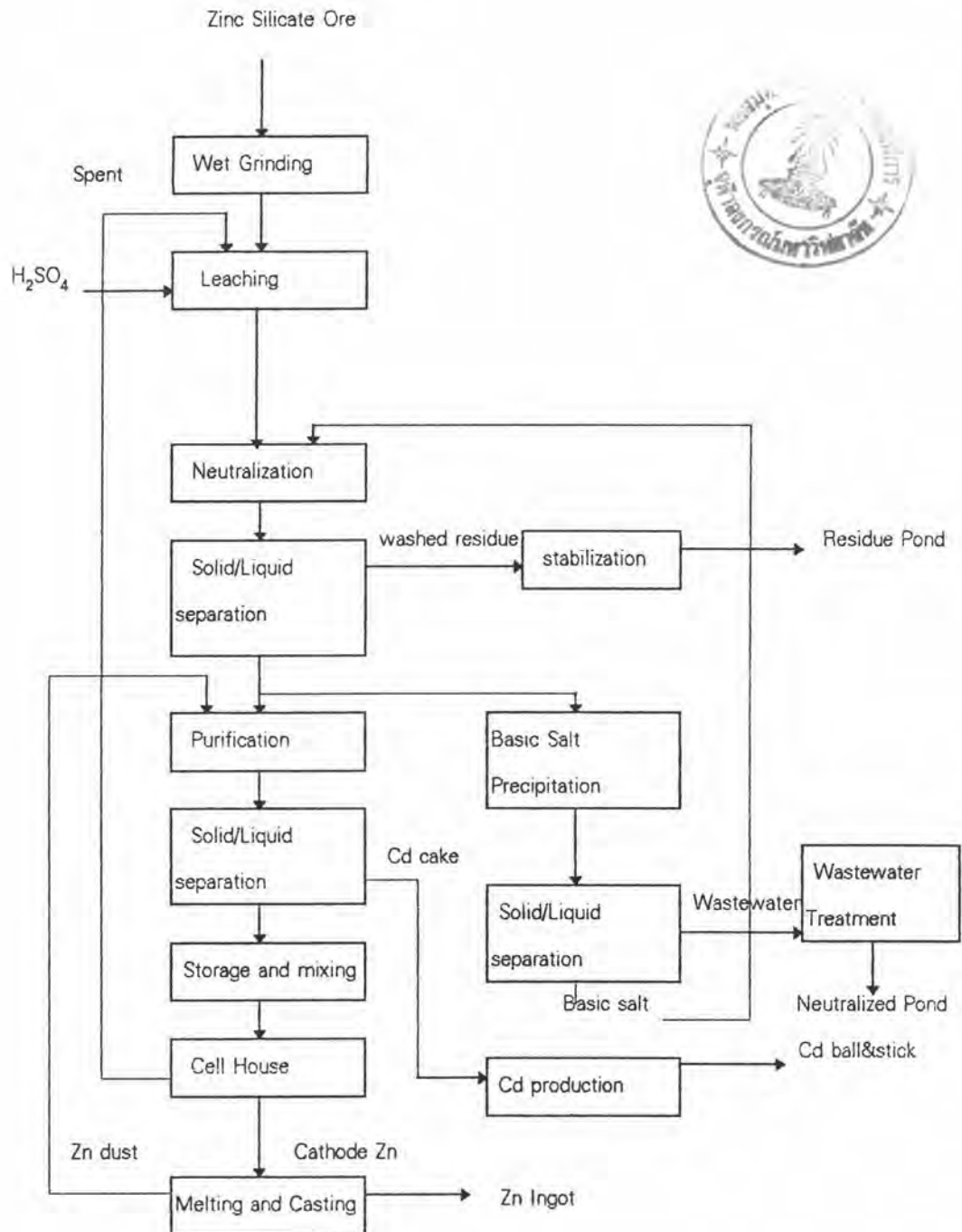
2. การบำบัดทางเคมี (Chemical treatment) เป็นวิธีการทำลายฤทธิ์ของของเสียที่เป็นอันตรายซึ่งประกอบด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การทำสะเทิน การบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชัน การบำบัดด้วยวิธีรีดักชัน การตกตะกอนผลึก และการแลกเปลี่ยนประจุ

3. การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) ของเสียที่เป็นอันตรายที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ สามารถใช้การบำบัดทางชีวภาพได้ ซึ่งประกอบด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ แอททิเวเตดสลัดจ์ การย่อยสลายแบบแอนแอโรบิค การทำปุ๋ย ทั้งนี้หากมีปริมาณของเสียมากหรือมีสารที่เป็นพิษต่อระบบชีวภาพต้องทำการบำบัดก่อนที่จะใช้วิธีทางชีวภาพ

4. การบำบัดด้วยความร้อน (Thermal treatment) การใช้ความร้อนในการบำบัดของเสียประเภทสารอินทรีย์ เป็นวิธีการที่ยอมรับกันทั่วไป เช่น การเผาไหม้

การกำจัดของเสียชนิดต่าง ๆ มีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับประเภทของเสียนั้น ๆ เช่น การกำจัดโดยนำไปทิ้งในทะเล เมาในเตาเผา ผังกลบ และอัดลงในชั้นบาดาล ทั้งนี้ของเสียนั้น ๆ จะต้องผ่านการบำบัดก่อน เพื่อให้มีความเหมาะสมในการกำจัดขั้นสุดท้าย (Youn, 1990 อ้างจาก Cassell และ Walker, 1970)

การผังกลบเป็นวิธีการที่ใช้กำจัดของเสียที่เป็นอันตราย ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายของเสียที่เป็นของเหลวหรืออยู่ในรูปของสลัดจ์ไม่เหมาะสมที่จะกำจัดโดยวิธีการผังกลบ ทั้งนี้เนื่องจากของเหลวในของเสียหรือน้ำชะละลาย อาจปนเปื้อนลงสู่ดิน และน้ำใต้ดินได้ง่าย (Youn อ้างจาก Peter และ Ferg, 1987)



รูปที่ 3.2 แผนภูมิกระบวนการถลุงสังกะสีของโรงงานผาแดงอินดัสตรี ปี พ.ศ. 2535

การทำเสถียรของเสียที่เป็นอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน

1. คำจำกัดความและที่มาของการทำให้เป็นก้อน

การทำเสถียร (Stabilization) หมายถึง กระบวนการในการลดความเป็นพิษของกากของเสีย โดยการเปลี่ยนรูปทางเคมีของของเสีย ให้มีรูปแบบที่เสถียรยิ่งขึ้น ซึ่งอาจรวมถึงการสร้างสารประกอบที่ไม่ละลาย ซึ่งจับดักสารพิษไว้ในโครงสร้างของผลึกที่เสถียร (Sollar และ Perry, 1989 อ้างจาก Wiles, 1987)

การทำให้เป็นก้อน (Solidification) เป็นกระบวนการซึ่งนำวัสดุสารมาเติมลงในของเสีย ซึ่งของเสียนั้นอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือตะกอน แล้วทำให้กากของเสียนั้นเป็นก้อนแข็ง มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น สามารถเคลื่อนย้ายขนส่งได้สะดวก ในระหว่างการทำให้เป็นก้อน มักเกิดการทำให้เสถียรพร้อมกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น โดยสารมลพิษถูกทำให้เสถียรและถูกจับดักไว้ในโครงสร้างโมเลกุลของก้อนมวลที่แข็งตัว (Sollar และ Perry อ้างจาก Wiles)

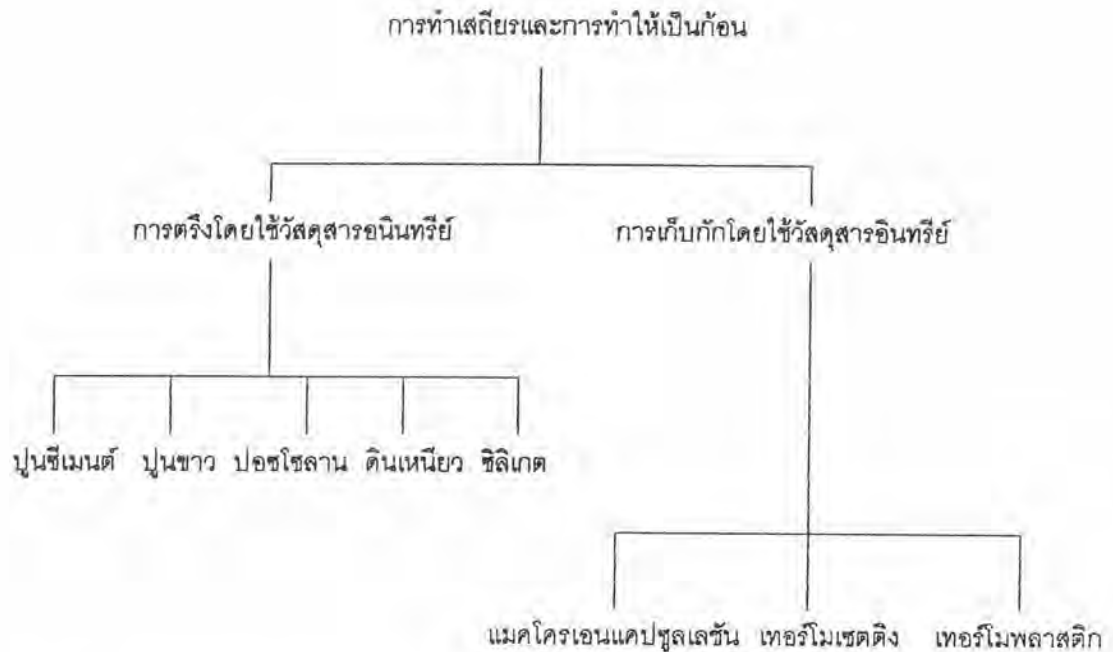
Thompson, Malone และ Jones (1979) รายงานว่า ในระยะแรกการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนใช้สำหรับของเสียที่เป็นสารกัมมันตรังสี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของของเสียให้ดีขึ้น เพื่อที่สามารถขนย้ายไปยังสถานที่กำจัดได้สะดวก วัสดุสารที่ได้จากกระบวนการจะต้องมีสมบัติดังนี้ คือ บรรจุของเสียให้อยู่ในรูปที่ไม่สามารถถูกชะละลายได้ ไม่สามารถย่อยถูกสลาย ลดศักยภาพของการแผ่รังสี และสามารถผลิตได้ง่ายในราคาถูก การทำของเสียจากอุตสาหกรรมให้เป็นก้อนแตกต่างจากการทำสารกัมมันตรังสีให้เป็นก้อน ตรงที่ของเสียจากอุตสาหกรรมมีปริมาณมากกว่าและมีความเป็นพิษน้อยกว่าของเสียกัมมันตรังสี

Poon, Peters และ Perry (1983) กล่าวว่า การทำให้เสถียรและการทำให้เป็นก้อนสามารถแบ่งได้อย่างกว้างๆ คือ การตรึงโดยใช้วัสดุสารอนินทรีย์ (Inorganic fixation) ซึ่งเหมาะสำหรับของเสียอนินทรีย์โดยเฉพาะพวกประจุบวก และการเก็บกักโดยใช้วัสดุสารอินทรีย์ (Organic encapsulation) ซึ่งเหมาะสำหรับของเสียอินทรีย์และของเสียอนินทรีย์ประจุลบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

การทำให้เป็นก้อนถูกออกแบบขึ้นมา เพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้ (Cheng และ Bishop, 1992 กล่าวจาก Cullinane และคณะ, 1986)

1. ปรับปรุงลักษณะสมบัติทางกายภาพของของเสียและสามารถขนส่งได้สะดวก
2. ลดพื้นที่ผิวของของเสีย ซึ่งก็คือ การลดการแพร่กระจายออกไปของสาร

3. จำกัตสภาพละลายได้ขององค์ประกอบที่เป็นพิษในของเสีย



รูปที่ 3.4 การแบ่งกระบวนการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อน

(Poon, Peters และ Perry, 1983)

Shuckrow, Pajak และ Touhill (1982) รายงานว่า การทำให้เป็นก้อนมีการใช้วิธีการต่างๆ 7 วิธี คือ วิธีการใช้ปูนซีเมนต์ (Cement-based techniques) วิธีการใช้ปูนขาว (Lime-based techniques) วิธีการใช้เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic techniques) โดยใช้วัสดุประเภทบิทูเมน พาราฟิน หรือโพลีเอทิลีน วิธีการใช้ออร์แกนิกโพลีเมอร์ (Organic polymers) วิธีการเอนแคปซูลเลชัน (Encapsulation) วิธีการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งตัวเหมือนซีเมนต์ (Self-cementing techniques) วิธีการหลอมให้เป็นแก้ว (Glassification)

Shuckrow และคณะ (1982) ได้สรุปข้อดี และข้อเสียของการทำให้เป็นก้อน ทั้ง 7 วิธีการ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

2. การทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์

การทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ส่วนใหญ่จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน ทั้งนี้อาจมีการใช้วัสดุเติมเพิ่มประสิทธิภาพบางประเภท เช่น แกลบยลิกไนต์ ซิลิกา

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทำให้เป็นก้อนในแต่ละวิธีการ (Shukrow และคณะ, 1982)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Cement and Silicate Based Solidification/Fixation	Chemical Fixation/Solidification	แห้งหรือเปียก (โดยทั่วไปเหมาะกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ราคาถูก - มีความยืดหยุ่นต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี - กำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดีมาก - เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาอย่างดีแล้ว 	<ul style="list-style-type: none"> - สารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการก่อตัวของคอนกรีต - ส่วนผสมของซีเมนต์ และกากของเสียที่ไม่ได้นุ่มสามารถถูกย่อยสลาย และถูกชะละลายได้ ภายใต้ภาวะที่มีพีเอชต่ำ - เพิ่มน้ำหนักและปริมาณของเสียทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งและฝังกลบเพิ่มขึ้น
2. Lime Based Solidification/Fixation	Chemical Fixation/Solidification	แห้งหรือเปียก (เหมาะสำหรับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ราคาถูก - เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างดีแล้ว - การใช้เถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมเป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิด โดยกระบวนการเดียวกัน 	<ul style="list-style-type: none"> - เหมือนกับกระบวนการประเภท Cement Based
3. Thermoplastic Based Solidification/Fixation	Physical Fixation	แบบแห้ง (เหมาะกับสารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีได้เป็นอย่างดี - สารละลายที่ชะล้างมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความเชี่ยวชาญ - ของเสียชนิดเปียกลดประสิทธิภาพของกระบวนการ - ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวก Strong Oxidants, dehydrated salts
4. Organic Polymer Process	Physical Fixation	แบบแห้งหรือเปียก (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิดโครงสร้างของโพลีเมอร์ - ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นต่ำลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียถูกยึดไว้ในโพลีเมอร์อย่างหลวมๆ - สารที่มีพีเอชต่ำจะทำให้โลหะละลายออกมา - การย่อยสลายทางชีวภาพของสารโพลีเมอร์บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทำให้เป็นก้อนในแต่ละวิธีการ (Shukrow และ คณะ, 1982)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
5. Encapsulation	Chemical Containment	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> - ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี - ไม่มีการชะละลายของของเสียออกมา เมื่อสารที่หุ้มห่ออยู่ไม่ถูกทำลาย - ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีการอื่น ๆ 	<ul style="list-style-type: none"> - การชะล้างของของเสียจะเกิดขึ้นหากสารที่หุ้มถูกทำลาย - ไม่เหมาะสมในกรณีที่ต้องกำจัดของเสียจำนวนมาก
6. Self Cementing Techniques	Chemical Fixation / Solidification	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้วัสดุเติมเพิ่มประสิทธิภาพ (additive) น้อย - ส่วนผสมของซีเมนต์ก่อตัวเร็วมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - สารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการก่อตัวของคอนกรีต - ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการหุ้มสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะล้างได้ภายใต้ภาวะที่มีพีเอชต่ำ
7. Glassification (Vitrification)	Physical Fixation	แบบแห้ง	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก้วจะถูกชะละลายได้น้อยมาก - การบรรจุอยู่ในเกณฑ์ดี - ใช้วัสดุที่มีราคาถูก 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิสูงอาจทำให้องค์ประกอบของเสียระเหยออกมาก่อนที่จะถูกตรึงไว้ - ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับการให้ความร้อน อุปกรณ์มีราคาแพงและต้องการผู้ชำนาญงานเฉพาะ - ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการกำจัดของเสียทุกชนิด ยกเว้นสารกัมมันตรังสี และสารที่มีพิษมาก ๆ

ซัลไฟด์ เป็นต้น เพื่อช่วยเสริมประสิทธิภาพในการทำให้แข็งตัวและจับยึดความเป็นพิษโดยของเสียที่เป็นของเหลว หรือของเหลวในสลัดจ์จะเป็นส่วนหนึ่งของน้ำเพื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำให้เกิดเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเจลจะโตขึ้นและเกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง ในภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูงของซีเมนต์เพสต์ มีผลทำให้โลหะหนักในของเสียเปลี่ยนรูปเป็นโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซิลิเกตที่ไม่ละลายและถูกจับติดอยู่ภายในโครงของเนื้อซีเมนต์ โลหะบางชนิดอาจถูกกักอยู่ภายในโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อนของซีเมนต์ (Bishop, 1988)

2.1 สารเจือปนที่เป็นอุปสรรคต่อการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์

สารเจือปนหลายประเภทมีผลต่อการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ Thomson, Malone และ Jones ได้รายงานประเภทของสารเจือปนไว้ดังนี้

สารอินทรีย์ ดินตะกอน (silts) และดินเหนียว จะมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวนานขึ้น โดยอาจใช้เวลาหลายวัน ทั้งนี้ไม่ควรมีสารอินทรีย์เจือปนมากกว่าร้อยละ 10 หากมีสารอินทรีย์ในปริมาณมาก ๆ จะต้องทำการบำบัดก่อนหน้าการทำลายฤทธิ์ด้วยปูนซีเมนต์

สารประกอบบางชนิด เช่น เกลือของแมงกานีส ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี มีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้นและกำลังรับแรงอัดเปลี่ยนไป เกลือโซเดียม เช่น อาร์ซีเนต โบเรต ฟอสเฟต ไฮโอเดต และซัลไฟด์ มีผลหน่วงการแข็งตัวของซีเมนต์

สารประกอบประเภทซัลเฟต มีผลหน่วงการแข็งตัวของซีเมนต์ นอกจากนี้จะทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เกิดเป็นยิบซัม และสารประกอบซัลโฟลูมิเนต (Sulfoaluminate compound) ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวของวัสดุสาร ยังผลให้ก้อนวัสดุแตกสลายได้

ของเสียที่เป็นอันตรายที่มีประจุลบ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โครเมต และอาร์ซีเนต จะต้องทำการบำบัดก่อนหน้าการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ (Rijal, 1990 อ้างรายงานของ Barnes และคณะ, 1979)

Sallars และ Perry กล่าวถึงประเภทของของเสียที่ไม่เหมาะสมสำหรับการบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

2.2 ข้อดีและข้อเสียของการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์

Thomson, Malone และ Jones ได้สรุปข้อดีของการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ดังนี้

1. สารที่เติมในส่วนผสมหาได้ง่ายในราคาที่สมเหตุสมผล
2. เทคนิคการผสมซีเมนต์ได้มีการพัฒนาเป็นอย่างดี

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการหาได้ทั่วไป
4. ใช้กับของเสียที่มีสมบัติแปรเปลี่ยนได้เป็นอย่างดี
5. สามารถควบคุมความแข็งหรือลดความให้ซึ่มได้ของผลิตภัณฑ์ โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

ตารางที่ 3.2 ประเภทของของของเสียที่ไม่เหมาะสม ในการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อน

(Sollars และ Perry, 1989)

ประเภทของของเสีย	เหตุผลที่ไม่สมควรใช้
1. ของเสียอินทรีย์	
1.1 มีส่วนประกอบเกลือที่ละลายได้อยู่มาก	มีผลต่อการก่อตัวของซีเมนต์
1.2 มีส่วนประกอบสารพิษประจุลบอยู่มาก เช่น โบเรต	สามารถชะละลายได้ง่ายกว่าพวกประจุบวก
1.3 มีส่วนประกอบของสารหน่วงการก่อตัวของซีเมนต์ เช่น ซัลเฟต ในปริมาณที่มาก	มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้
1.4 ผลตกตะกอนที่เป็นพิษ	เป็นอันตรายต่อสุขภาพ
1.5 ผลิตภัณฑ์เมื่อสัมผัสกับน้ำหรือต่าง เช่น โลหะคาร์ไบด์	เป็นอันตรายต่อสุขภาพ
2. ของเสียอินทรีย์	
2.1 มีวัสดุที่ติดไฟ หรือเกิดระเบิดได้	เป็นอันตรายต่อสุขภาพ
2.2 มีสารประกอบพวดยาฆ่าแมลง	สามารถชะละลายออกมาได้ง่าย
2.3 มีสารประกอบที่หน่วงการก่อตัว เช่น น้ำตาล	มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้

ข้อเสียของการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์สรุปได้ดังนี้ คือ

1. ผลิตภัณฑ์ที่มีกำลังรับแรงอัดต่ำอาจถูกชะละลายได้โดยสารละลายที่เป็นกรด
2. การบำบัดก่อนอาจจำเป็นต้องทำในกรณีของเสียมีสารเจือปนที่มีผลต่อการก่อตัวของซีเมนต์
3. ปูนซีเมนต์และสารที่เติมในส่วนผสมทำให้เกิดการเพิ่มขนาดและน้ำหนักของของเสีย



3. กลไกการยึดจับโลหะหนัก

Bishop ศึกษากลไกการยึดจับโลหะหนักจากกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ โดยใช้โลหะหนักสังเคราะห์เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

3.1 ความจุบัพเฟอร์

จากการทดสอบการสกัด 15 ครั้งโดยใช้วิธีการสกัดสารของ U.S. EPA ตรวจวัดพีเอช และความเป็นด่าง ผลที่ได้เขียนเป็นกราฟแสดงดังรูปที่ 3.5 จากกราฟพบว่า ความเป็นด่างสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งของการสกัด โดยในครั้งที่ 15 ความเป็นด่างมีค่าประมาณร้อยละ 15 ของความเป็นด่างสะสมทั้งหมด ความเป็นด่างสะสมของการสกัดทั้ง 15 ครั้ง มีค่าประมาณ 18.3 มิลลิสมมูล/กรัม ซึ่งถือเป็นค่าความจุบัพเฟอร์ของของเสียที่ทำให้เป็นก้อน ความเป็นด่างที่ถูกสกัดออกมาแต่ละครั้งเป็นตัวควบคุมพีเอชของน้ำที่ผ่านการสกัด โดยสะท้อนกรดอะซิติกให้เป็นกลาง พีเอชของกรดอะซิติกที่ผ่านการสกัดใน 3 ครั้งแรกมีค่าสูงเกิน 10 ระหว่างการสกัดอีก 3 ครั้งต่อมาพีเอชมีค่าลดลงต่ำกว่า 6 พีเอชของการสกัดอีก 9 ครั้งต่อมาลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าประมาณ 4 ในการสกัดครั้งที่ 15

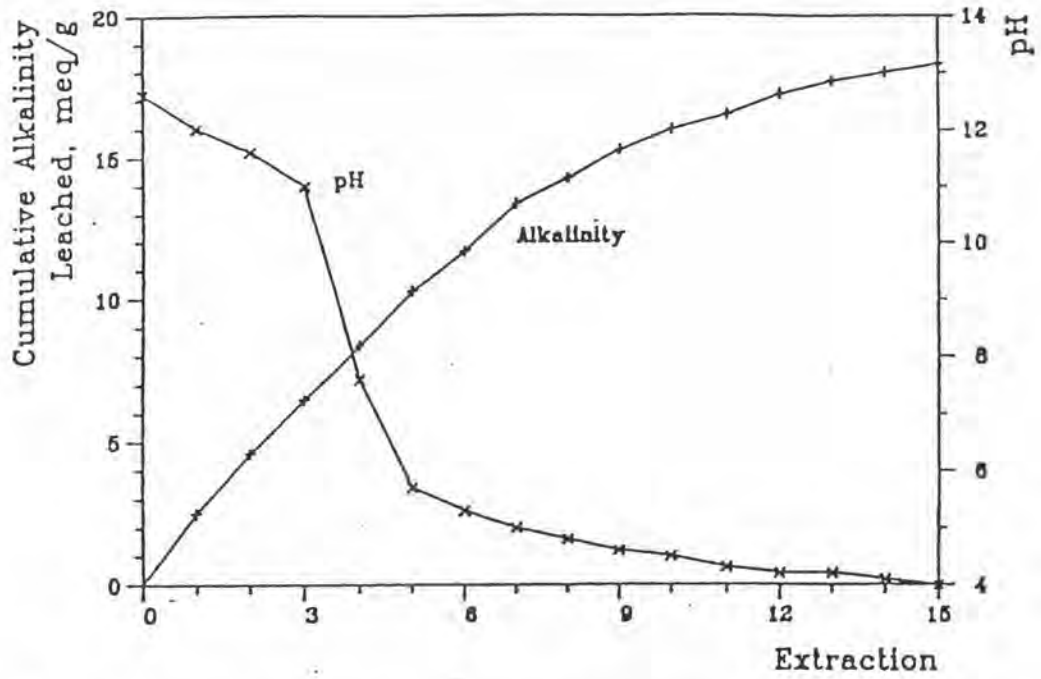
3.2 การยึดจับโลหะหนัก

จากการทดลองที่ผ่านมาหลายครั้งทำให้ทราบว่า โลหะหนักอาจอยู่ในโพรงของโครงสร้างของของเสียที่แข็งตัว ดูดแนบ(Adsorption)บนผนังโพรง และทำปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อนกับสารประกอบของซีเมนต์เฟสท์

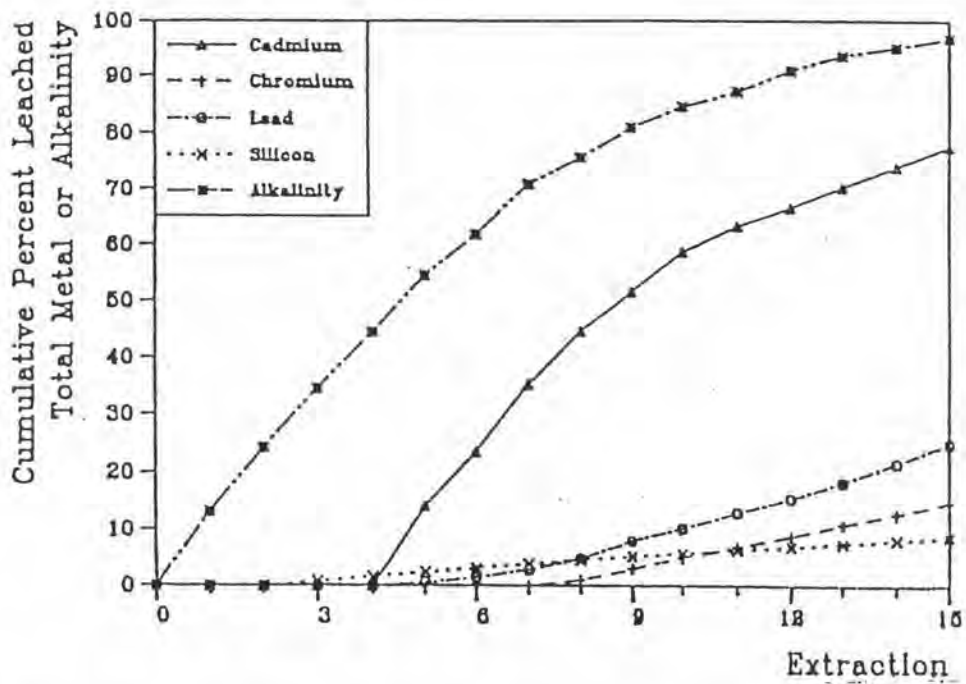
ถ้าโลหะหนักถูกติดไปในโครงสร้างแข็งในโพรงหรือถูกดูดแนบบนพื้นผิวโพรง โลหะหนักเหล่านั้นควรถูกชะละลายออกคล้ายกับการชะละลายของความเป็นด่าง จากรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่า มีความคล้ายกันของเส้นกราฟความเป็นด่างสะสมและแคดเมียมสะสม ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่า แคดเมียมควรอยู่ในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์และเกาะติดอยู่ตามผนังโพรง

โครเมียมและตะกั่วน่าจะถูกยึดติดอยู่ในโครงสร้างของซิลิกามากกว่าอยู่ในโพรง ถ้าเป็นดังที่กล่าวไว้ โลหะเหล่านั้นควรถูกชะละลายออกมาเมื่อโครงสร้างของซิลิกาถูกทำลาย และจากรูปที่ 3.6 พบว่าเส้นกราฟสะสมของโครเมียมและตะกั่วคล้ายกับของซิลิกอน ดังนั้นโครเมียมและตะกั่วควรอยู่ในรูปซิลิเกตที่ไม่ละลายมากกว่าที่จะอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์

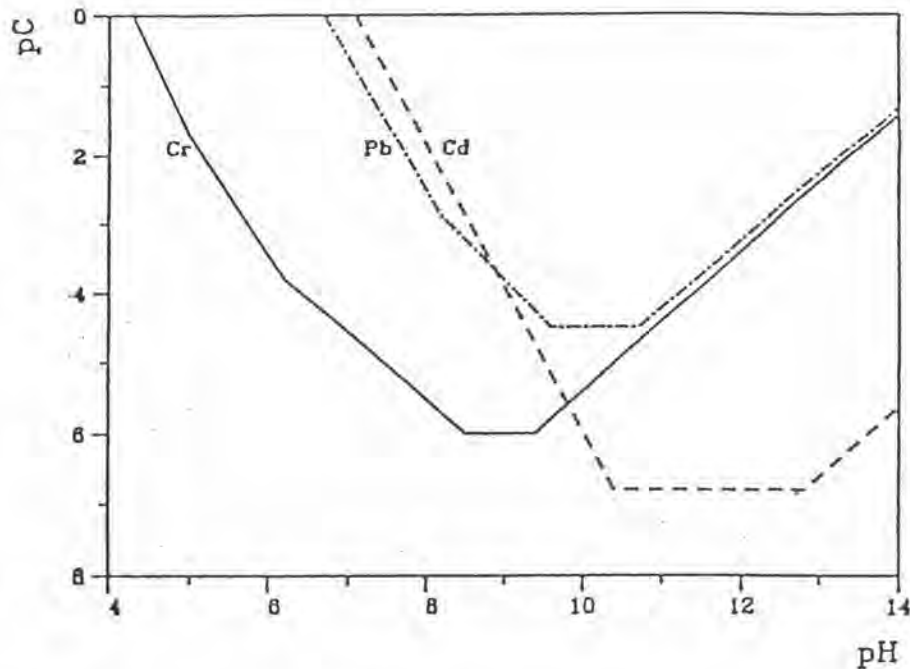
รูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพ pC-pH สำหรับไฮดรอกไซด์ของตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม ในสารละลายที่มีค่ากำลังประจุ (Ionic strength) 0.75 โมลาร์ ในขณะที่เริ่มผสม



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงพีเอชและความเป็นด่างสะสมจากการสกัด 15 ครั้ง (Bishop, 1988)



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสะสมที่โลหะหนักถูกชะละลาย ความเป็นด่างถูกชะละลาย และซิลิคอนถูกชะละลาย จากการสกัด 15 ครั้ง (Bishop, 1988)



รูปที่ 3.7 แผนภาพ pC-pH สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว (Bishop, 1988)

ซีเมนต์ พีเอชที่สูงของซีเมนต์เพสต์ประมาณ 11-12 ทำให้โครเมียมและตะกั่วอยู่ในรูปละลายและกลายเป็นส่วนหนึ่งของปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ซึ่งเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิเกตสำหรับแคลเซียมอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นของแข็งที่ค่าพีเอชช่วงนี้ และไม่มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการแข็งตัวจึงถูกดูดซับในรูพรุน จากสาเหตุดังกล่าวนี้จึงอธิบายได้ว่าโครเมียมและตะกั่วถูกชะละลายออกมาโดยขึ้นกับการละลายของซิลิเกต สำหรับแคลเซียมถูกชะละลายออกมาตามการชะละลายของความเป็นต่าง

ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ ที่กล่าวถึงนี้ หมายถึง ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ซึ่งเมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกันและสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย แบ่งปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ 5 ประเภท คือ ประเภทหนึ่ง ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary portland cement) สำหรับใช้ในงานก่อสร้าง หรือผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา ไม่อยู่ในภาวะอากาศรุนแรง หรือในที่ที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ เป็นต้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว ตราเพชรเม็ดเดียว

ประเภทสอง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified portland cement) ใช้ในงานก่อสร้างหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมก่อสร้างใด ๆ ที่เกิดความร้อน และทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานเขื่อนคอนกรีต ตอม่อสะพาน เป็นต้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร

ประเภทสาม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (High-Early-Strength portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ จะให้กำลังสูงในระยะแรก ใช้ในงานก่อสร้าง หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความสามารถในการรับกำลังอัดได้เร็ว เช่น งานเสาเข็ม คาน พื้นที่ต้องการถอดแบบเร็ว เป็นต้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดง ตราสามเพชร

ประเภทสี่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low-Heat portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำสุด ใช้ในงานคอนกรีตหยาบ เช่น เขื่อน ซึ่งเป็นโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่เกิดความร้อนสะสมมาก

ประเภทห้า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistant portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ทนทานซัลเฟตได้สูง ใช้สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น ในน้ำหรือดินที่มีค่าสูง มีระยะเวลาในการแข็งตัวช้ากว่าประเภทหนึ่ง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม (วินิต ช่อวิเชียร, 2529)

องค์ประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในรูปของออกไซด์และในรูปของสารประกอบ แสดงในตารางที่ 3.3

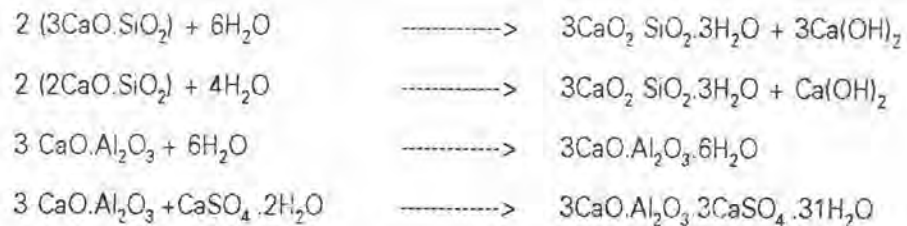
ตารางที่ 3.3 ออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ และสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (วินิต ช่อวิเชียร, 2529)

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

ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำ เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ยังผลให้เกิดความเหนียว และจับตัวกันแน่น เป็นก้อนแข็ง

ออกไซด์ในปูนซีเมนต์ เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปไฮดรต Neville (1981) ได้แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



ความเป็นต่างที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงความจุบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของซีเมนต์ เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมสูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชสูงกว่า 11 ผลึกแคลเซียมซิลิเกตที่ไม่ละลาย จะรวมตัวเกิดเป็นโครงสร้างซีเมนต์

นอกจากนี้แคลเซียมซิลิเกต ยังมีความสามารถในการดูดซับ (Adsorption) แคลเซียมและโลหะอื่นๆได้เป็นอย่างดี (Shively และคณะ, 1986 กล่าวจาก Batchelar และ Mcdevitt 1984 ; Warren และ Dudas, 1984 ; Panday และคณะ, 1985)

ซีเมนต์เพสต์มีภาวะต่างสูง และมีพื้นผิวออกซีไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึกของโลหะแอมโฟเทอริก (Amphoteric metal) และปฏิกิริยาในการดูดซับที่ซับซ้อน (Shively และคณะ)

น้ำจะชะละลายเนื้อซีเมนต์ โดยการละลายปูนขาวออกจากเนื้อซีเมนต์ และอาจรวมถึงอลูมินาบางส่วน หากปฏิกิริยาเกิดต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จะเหลือกากไฮเดรตของซิลิกา เหล็กออกไซด์ และอลูมินา ถ้าซีเมนต์มีเนื้อแน่น และมีความให้ซึมได้ดี ปฏิกิริยาจะเกิดช้ามาก จนไม่ทำความเสียหายกับซีเมนต์ (Lea, 1956)

Lea รายงานว่า สารละลายซัลเฟตของต่างชนิดต่างๆ สามารถทำลายเนื้อซีเมนต์ได้ ก่อนข้างรุนแรง ซัลเฟตของโซเดียม ไปแทสซีเยม แอมโมเนียม และอื่น ๆ จะทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเนื้อซีเมนต์ ได้แคลเซียมซัลเฟต แคลเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับ ไฮเดรตของแคลเซียมอลูมินา ทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ปริมาตรของวัสดุสารจะเพิ่มขึ้นเกิดการขยายตัว ทำให้ก้อนซีเมนต์แตกสลายได้

ปูนขาว

ปูนขาวเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาหินปูน จนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์แยกตัวออกมา ประเภทของปูนขาวขึ้นกับส่วนประกอบของหินปูนและขั้นตอนการเผา ถ้าหินปูนถูกเผาอย่าง สมบูรณ์ปูนขาวที่ได้ก็เป็นพวกปูนขาวดิบ (Quick lime) แต่ถ้าได้รับความชื้นองค์ประกอบออกไซด์ จะรวมตัวกับน้ำกลายเป็นรูปของไฮดรอกไซด์ ซึ่งเรียกว่า ปูนขาวสุก (Hydrated lime) ตามท้อง ตลาดปูนขาวดิบมีส่วนประกอบแคลเซียมออกไซด์ประมาณร้อยละ 61.1 และแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 24 สำหรับปูนขาวดิบมีเฉพาะแคลเซียมไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 81.6 (สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532)

วิธีการสกัดสารและการทดสอบการชะละลาย (Extraction procedure and leaching test)

Perket และ Webster (1981) กล่าวถึงการสกัดสาร (extraction) หมายถึงวิธีการ มาตรฐานที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อกำหนดประเภทของเสียว่า เป็นของเสียที่เป็น อันตรายหรือไม่ คำว่า การชะละลาย (leaching) เป็นการทดสอบสมบัติของน้ำชะละลาย เพื่อใช้ อ้างอิงในพฤติกรรมงานสนาม อย่างไรก็ตาม คำสองคำนี้สามารถใช้แทนกันได้

วิธีการทดสอบที่ใช้ทั่ว ๆ ไป สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ การทดสอบ แบบแบตช์ (Batch test) และการทดสอบแบบคอลัมน์ (Column test) สำหรับการทดสอบแบบ แบตช์ ของเสียจะสัมผัสกับสารละลาย ภายในภาชนะบรรจุอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาของช่วงการ ทดสอบ แต่การทดสอบแบบคอลัมน์ สารละลายที่ใช้ในการสกัดจะถูกป้อนผ่านคอลัมน์ซึ่งบรรจุ ของเสียที่อัดแน่นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา หรือเป็นช่วงเวลา (Perket และ Webster)

จากการที่มีวิธีการสกัดหลายวิธี Perket และ Webster ได้สรุปวิธีการสกัดที่ใช้ อ้างอิงทั่ว ๆ ไป แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบวิธีการสกัดสาร (Perket และ Webster, 1981)

การทดสอบการชะละลาย	Standard Leach Test	Toxicant Extraction Procedure	ASTM Method A	Extraction Procedure
1. ปริมาณตัวอย่างสาร	28.6 กรัมตัวอย่างสาร (ส่วนที่เป็นของแข็ง)	ไม่ระบุน้ำหนักค่าสุด	350 กรัม	น้ำหนักอย่างน้อย 100 กรัม (0.5% ของแข็ง)
2. การเตรียมตัวอย่างสาร	แยกของเหลว โดยใช้ 0.45 μ m pressure filtration	แยกของเหลวโดยวิธี centrifugation หรือ filtration	-	บดให้มีขนาด 9.5 มม
3. อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง	10 : 1 ถึง 7 : 1	10 : 1 (เริ่มต้น 8 : 1)	4 : 1	20 : 1 (เริ่มต้น 16 : 1)
4. สารที่ใช้สกัด (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	แปรเปลี่ยน	4.9 - 5.2	ไม่กำหนด	4.8 - 5.2
6. การระกอบที่ใช้ทดสอบ	ภาชนะปิด	ไม่กำหนด	ขวดปากกว้าง (ปิดฝา)	เครื่องกวนหรือเครื่องมือที่เทียบเท่า
7. วิธีการผสมและระยะเวลาการทดสอบ	rotating shaker 24 ชม	mechanical stirring 24 ชม	reciprocating shaker 48 ชม	เครื่องกวนต่อเนื่อง 24 ชม
8. การแยกของเหลวและของแข็ง	กรองผ่านกระดาษกรอง ขนาด 0.45 μ m	กรองผ่านกระดาษกรอง ขนาด 0.45 μ m	กรองผ่านกระดาษกรอง ขนาด 0.45 μ m โดยใช้เครื่องกรองแบบความดันหรือแบบสุญญากาศ	กรองผ่านกระดาษกรอง ขนาด 0.45 μ m

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2531) ได้กำหนดวิธีการสกัดสาร ในการหาปริมาณของสารมลพิษในน้ำสกัดดังนี้

1. บดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดของสิ่งปฏิกูลระหว่าง 0.5 มม. ถึง 5 มม.
2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1.หนัก 50 กรัม ใส่ในตัวทำลายซึ่งประกอบด้วย น้ำกลั่นผสมกับกรดไฮโดรคลอริก จนมีความเป็นกรดต่าง ระหว่าง 5.8 ถึง 6.3 ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายเป็น 10 เท่า (มล.) ของน้ำหนัก (ก.) ของตัวอย่างสิ่งปฏิกูล
3. เขย่าบนเครื่องเขย่า เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบต่อนาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 5 ซม.
4. กรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรู 1 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่างๆ ตามวิธีมาตรฐาน ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง

การประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

วิธีการประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ต้องมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์เบื้องต้นของการบำบัด ได้แก่ การปรับปรุงโครงสร้างของกากของเสียให้แข็งแรง เป็นก้อนแข็ง ลดพื้นที่สัมผัส และจำกัดสภาพละลายได้ของสารมลพิษเมื่อสัมผัสกับของเหลวที่มาชะล้าง (Sollars และ Perry, 1989)

Clements และ Griffiths (1985) รายงานว่า Sealosafe เป็นเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นในประเทศอังกฤษ ประมาณปี ค.ศ. 1970 ใช้ในการบำบัดของเสียที่เป็นอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีการนี้มีชื่อเรียกว่า Stablex และได้มีการกำหนดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องพิจารณา ดังนี้

1. กำลังรับแรงอัด มีการทดสอบกำลังรับแรงอัดอยู่ 2 วิธี คือ กำลังรับแรงอัดแบบปิดกัก (Confine compressive strength) และ กำลังรับแรงอัดแบบไม่ปิดกัก (Unconfine compressive strength) ของเสียบางชนิดที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนจะไม่เป็นก้อนแข็งเหมือนกับคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ เมื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด ลักษณะการวิบัติจะเป็นแบบพลาสติก ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ปิดกักค่อนข้างต่ำ เมื่อนำของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนมาผึ่งกลบ ก็ย่อมจะมีแรงดันจากวัสดุอื่นๆโดยรอบ ดังนั้นการใช้กำลังรับแรงอัดแบบปิดกักน่าจะเหมาะสมกว่า

2. ความให้ซึมได้ การที่สารมลพิษเคลื่อนที่ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจากของเสียที่ฝังอยู่ในสถานที่กลบฝังขึ้นอยู่กับความให้ซึมได้ ซึ่งหมายถึง อัตราซึ่งน้ำผ่านเข้าสู่วัสดุสาร ถ้าความให้ซึมได้ต่ำ ก็เป็นไปได้ที่น้ำจะไหลนองผ่านผิวหน้าของของเสียเท่ากับเป็นการลดการปนเปื้อนของสารมลพิษลงสู่ น้ำ ถึงแม้ว่าการทำให้เป็นก้อนจะเปลี่ยนรูปสารมลพิษให้อยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ละลายแล้วก็ตาม แต่ความสามารถในการละลายของสารประกอบเหล่านี้ก็ยังมีอยู่ ดังนั้น ของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนต้องมีความให้ซึมได้ที่ต่ำ เพื่อที่จะลดการปนเปื้อนของสารมลพิษออกไปสู่สิ่งแวดล้อม

3. การชะละลาย จากคุณสมบัติที่กำหนดให้มีความให้ซึมได้ที่ต่ำ แต่ถ้าเกิดภาวะแวดล้อมต่างๆมากระทำต่อผลิตภัณฑ์เป็นระยะเวลายาวนาน อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนที่พื้นผิวได้ ดังนั้นต้องมีการแน่ใจว่าสารมลพิษจะไม่ถูกชะละลายออกมา หรือชะละลายในปริมาณที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายถึงแม้ว่ากากของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนจะแตกเป็นชิ้นเล็กๆ โดยวิธีที่นิยมใช้ทดสอบเรียกว่า Equilibrium Test

Sollar และ Perry ได้รายงานลักษณะสมบัติที่ต้องการของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยวิธี SeolSAFE จากโรงบำบัดของเสียที่เมือง West Thurrock แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ลักษณะสมบัติที่ต้องการของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยวิธี SeolSAFE (Sollar และ Perry, 1989)

ลักษณะสมบัติ	เกณฑ์กำหนด	ค่าเปรียบเทียบ
ความให้ซึมได้ (28 วัน)	น้อยกว่า 1×10^{-7} ม./วินาที	ทราย 1×10^{-4} ม./วินาที ดินตะกอน 1×10^{-6} - 1×10^{-7} ม./วินาที คอนกรีต 1×10^{-8} ม./วินาที
กำลังรับแรงอัด (28 วัน)	มากกว่า 0.34×10^6 นิวตัน/ตร.ม.	คอนกรีต 30×10^6 นิวตัน/ตร.ม. มอร์ตาร์ 20×10^6 นิวตัน/ตร.ม. Grouts 0.5×10^6 - 4×10^6 นิวตัน/ตร.ม.
คุณภาพน้ำชะละลาย	พีเอช 8-11 COD น้อยกว่า 280 ก./ม. ³ Total CN น้อยกว่า 1 ก./ม. ³ Total Sulphide น้อยกว่า 5 ก./ม. ³ Total Phenol น้อยกว่า 5 ก./ม. ³ NH ₃ น้อยกว่า 40 ก./ม. ³ Zn น้อยกว่า 10 ก./ม. ³ Hg น้อยกว่า 0.5 ก./ม. ³ (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Ba, Co, Mb, Sn, As, Se, Sb) น้อยกว่า 5 ก./ม. ³ Total Pesticides น้อยกว่า 0.1 ก./ม. ³ Supernatant ต้องไม่มีหลังจาก 24 ชม.	- - - - - - - - - - -

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2531) ได้กำหนดสมบัติของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ดังนี้

1. น้ำซึมผ่านได้ในอัตราต่ำกว่า 1×10^{-6} ซม./วินาที
2. รับแรงอัด ได้ไม่น้อยกว่า 14 กก./ซม.²
3. มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตัน/ม.³
4. มีลักษณะแข็งคล้ายหิน ไม่ไหม้ไฟ ไม่มีกลิ่น

เกณฑ์มาตรฐานในการระบุของเสียที่เป็นอันตราย

U.S. EPA (1992) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับของเสียที่สามารถนำไปฝังกลบโดยวิธีการทดสอบที่เรียกว่า Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ซึ่งวิธีการทดสอบมีดังนี้

สำหรับของเสียที่มีปริมาณของแข็งน้อยกว่าร้อยละ 0.5 กรองแยกของเหลวออกจากของแข็งด้วยกระดาษกรองใยแก้ว 0.6-0.8 ไมครอน นำของเหลวไปวิเคราะห์

สำหรับของเสียที่มีปริมาณของแข็งมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 0.5 กรองแยกของเหลวออกจากของแข็ง นำของเหลวไปวิเคราะห์ และนำสภาวะของแข็งไปสกัดสาร

สารสกัดที่ใช้มี 2 ชนิด ได้แก่

สารสกัดชนิดแรก เป็นสารสกัดที่ได้จากการเติม 5.7 มิลลิลิตร ของกรดเกลืออะซิติก ลงในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร และเติม 64.3 มิลลิลิตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

สารสกัดชนิดที่สอง เป็นสารสกัดที่ได้จากการทำ 5.7 มิลลิลิตรของกรดเกลืออะซิติก ให้เจือจางโดยปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น

นำตัวอย่างเล็กๆ 5 กรัมผสมกับน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตร แล้วกวนอย่างแรงเป็นเวลา 5 นาที

ถ้าพีเอชน้อยกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดแรก

ถ้าพีเอชมากกว่า 5 เติม 3.5 มิลลิลิตรของกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล แล้วให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เมื่อทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องถ้าพีเอชน้อยกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดแรก ถ้าพีเอชมากกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดที่สอง

นำตัวอย่างประมาณ 100 กรัม และใช้สารสกัดปริมาณ 20 เท่าของน้ำหนักตัวอย่าง

ถ้ามีสารระเหยง่ายต้องใช้ภาชนะบรรจุพิเศษ

เขย่าด้วยการหมุนรอบ 30 ± 2 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ± 2 ชั่วโมง

กรองแยกของเหลวออกจากของแข็ง ด้วยกระดาษกรองใยแก้ว 0.6 - 0.8 ไมครอน

นำของเหลวไปวิเคราะห์ค่าสารมลพิษ

ถ้าเป็นไปได้สภาวะของเหลวที่อยู่ในของเสียตอนแรกจะถูกเติมลงในน้ำสกัด และของเหลวที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ร่วมกันต่อไป

จากวิธีทดสอบหาปริมาณสารมลพิษในน้ำสกัด ถ้าความเข้มข้นของสารมลพิษที่ได้มากกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.6 ของเสียนั้นก็ถือว่าเป็นของเสียอันตราย

ตารางที่ 3.6 ค่ามาตรฐานของสารมลพิษต่างๆ จากการทดสอบด้วยวิธี TCLP (U.S. EPA, 1992)

สารมลพิษ	ระดับมาตรฐาน (มก./ล.)	สารมลพิษ	ระดับมาตรฐาน (มก./ล.)
อาร์เซนิก	5.0	Hexachlorobenzene	0.13
แบเรียม	100.0	Hexachlorobutadiene	0.5
เบนซีน	0.5	Hexachloroethane	3.0
แคดเมียม	1.0	ตะกั่ว	5.0
Carbon tetrachloride	0.5	Lindane	0.4
Chlordane	0.03	ปรอท	0.2
Chlorobenzene	100.0	Methoxychlor	10.0
คลอโรฟอร์ม	6.0	Methyl ethyl ketone	200.0
โครเมียม	5.0	Nitrobenzene	2.0
o-Cresol	200.0	Pentachlorophenol	100.0
m-Cresol	200.0	Pyridine	5.0
p-Cresol	200.0	เซลีนียม	1.0
Cresol	200.0	เงิน	5.0
2,4-D *	10.0	Tetrachloroethylene	0.7
1,4 -Dichlorobenzene	7.5	Toxaphene	0.5
1,2-Dichloroethane	0.5	Trichloroethylene	0.5
1,1-Dichloroethylene	0.7	2,4,5-Trichlorophenol	400.0
2,4-Dinitrotoluene	0.13	2,4,6-Trichlorophenol	2.0
Endrin	0.02	2,4,5-TP (Silvex) **	1.0
Heptachlor	0.008	Vinyl chloride	0.2

* สารประกอบประเภท Dichlorophenol

** สารประกอบประเภท Trichlorophenol

กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2531) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับลักษณะสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 โดยกำหนดสมบัติของสารมลพิษ ซึ่งเมื่อนำมาทำการสกัดสารด้วยวิธีการสกัดสาร และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดแล้ว ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดมีค่าใดค่าหนึ่งดังต่อไปนี้

อาร์เซนิก มากกว่า 5 มก./ล.

แคดเมียม มากกว่า 1 มก./ล.

โครเมียม มากกว่า 5 มก./ล.



ตะกั่ว มากกว่า 5 มก./ล.

ปรอท มากกว่า 0.2 มก./ล.

บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน์ (2536) รายงานว่า กลุ่มประเทศสมาชิกยุโรป ได้พิจารณาแยกคุณสมบัติของของเสียที่เป็นอันตรายตามลักษณะของหลุมฝังกลบ โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. สำหรับฝังกลบกากของเสียที่เป็นอันตราย
2. สำหรับฝังกลบของเสียเฉื่อย (Inert waste)
3. สำหรับฝังกลบขยะชุมชน และของเสียที่ไม่อันตราย

ทั้งนี้ ในการวิเคราะห์ตัวอย่างของเสียจะต้องพยายามคงรูปเดิมให้ได้มากที่สุด หากเป็นชิ้นโตต้องบดให้เล็กลง แล้วทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน DIN 38414-S4 ซึ่งจะต้องเขย่าโดยการหมุนครึ่งละ 180 ° ต่อหน้าที่ นาน 24 ชั่วโมง แล้วเหวี่ยงแยกหรือกรองแยกน้ำใสกับตะกอนด้วยผ้ากรอง 0.45 μm หากผลการวิเคราะห์น้ำสกัด พบว่า

น้ำสกัดมีค่าอยู่ในช่วงของเสียที่เป็นอันตราย ต้องนำไปฝังกลบสำหรับของเสียที่เป็นอันตราย สำหรับน้ำสกัดที่มีค่าสูงเกินกว่าช่วงค่าที่ระบุไว้ ของเสียนั้นต้องส่งไปทำลายฤทธิ์ ก่อนที่จะนำไปฝังกลบสำหรับกากของเสียอันตราย หากทำลายฤทธิ์ไม่ได้จะต้องฝังในที่ที่ออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อเก็บชั่วคราวหรืออาจให้ฝังกลบปนกับที่ฝังกลบขยะชุมชน

น้ำสกัดมีค่าไม่เกินค่าสูงสุดของของเสียเฉื่อยตามที่ระบุไว้ ก็ถือว่าเป็นของเสียเฉื่อยสามารถทิ้งหรือฝังได้ทั่วไป

น้ำสกัดอยู่ระหว่างค่าของเสียเฉื่อยและค่าต่ำสุดสำหรับฝังในที่ฝังกลบของเสียอันตราย ให้ถือว่าเป็นของเสียที่ไม่อันตราย

ค่าสารมลพิษในน้ำสกัด ที่ถือว่าเป็นช่วงของของเสียอันตรายที่สามารถฝังกลบในหลุมฝังกลบแบบของเสียที่เป็นอันตราย และของเสียเฉื่อย ตามการจำแนกของกลุ่มประเทศสมาชิกยุโรปแสดงดังตารางที่ 3.7

การศึกษาที่ผ่านมา

Shively และคณะ (1986) ได้ศึกษาการทำเสถียรโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสอง โลหะหนักที่ใช้ในการทดลองแต่ละตัวได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสมรวมกัน โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด และหาปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด 15 ครั้ง (Sequential extractions) ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3.7 แสดงช่วงของของเสียที่เป็นอันตรายและของเสียเฉื่อย
(บุญยง ไฉ่ห้วงศ์วัฒน์, 2536)

สารมลพิษ	ช่วงของเสียที่เป็นอันตราย	ช่วงของเสียเฉื่อย
ตะกั่ว	0.4 - 0.2 มก./ล.	สารมลพิษทุกตัวรวม กันไม่มากกว่า 5 มก./ล. และไม่มี สารมลพิษตัวใดตัวหนึ่ง เกินค่าที่ระบุไว้
แคดเมียม	0.1 - 0.5 มก./ล.	
โครเมียม (+6)	0.1 - 0.5 มก./ล.	
ทองแดง	2 - 10 มก./ล.	
นิกเกิล	0.4 - 2.0 มก./ล.	
ปรอท	0.02 - 0.1 มก./ล.	
สังกะสี	2-10 มก./ล.	
ฟิเอช	4-13	
อาร์เซนิก (+3)	0.2-1.0 มก./ล.	
ฟีนอล	20-100 มก./ล.	
ฟลูออไรด์	10-50 มก./ล.	น้อยกว่า 5 มก./ล.
แอมโมเนีย	0.2-1.0 ก N/ล.	น้อยกว่า 50 มก./ล.
คลอไรด์	1.2-6.0 ก./ล.	น้อยกว่า 0.5 ก./ล.
ไซยาไนด์	0.2-1.0 มก./ล.	น้อยกว่า 0.1 มก./ล.
ซัลเฟต *	0.2-1.0 ก./ล.	น้อยกว่า 1.0 ก./ล.
ไนไตรต์	6-30 มก./ล.	น้อยกว่า 3 มก./ล.
AOX **	0.6-30 มก./ล.	น้อยกว่า 0.3 มก./ล.
Solvents ***	0.02-0.1 มก Cl/ล.	น้อยกว่า 10 มคก.Cl/ล.
Pesticides ***	1-5 มคก.Cl/ล.	น้อยกว่า 0.5มคก.Cl/ล.
Lipoph sub	0.4-2.0 มก./ล.	น้อยกว่า 1 มก./ล.

หมายเหตุ * = ถ้าเป็นไปได้ ควรน้อยกว่า 500 มก./ล.

** = Adsorbed organically-bound halogens

*** = Chlorinated

1. กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน ของก้อนตัวอย่างที่เกิดจากการทำอาร์เซนิกให้เป็นก้อนและการทำแคดเมียมให้เป็นก้อน มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ส่วนโครเมียมและตะกั่วที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

2. ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด 15 ครั้ง น้อยกว่าความเข้มข้นที่ทำนายจากความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ ประมาณ 100 ถึง 10,000 เท่าและลักษณะการละลายของโลหะหนักแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรก แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์จะทำการละลายฤทธิ์ของกรดที่ใช้ในการสกัด ทำให้พีเอชสุดท้ายมากกว่า 10.0 และมีการละลายของสารในซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ช่วงที่สอง จะมีการละลายของโลหะหนักสูงที่สุด พีเอชลดลงเหลือน้อยกว่า 6.0 ช่วงที่สาม พีเอชยังคงน้อยกว่า 6.0 โลหะหนักที่มีความสามารถในการละลายต่ำเริ่มที่จะละลายออกมา และโลหะหนักที่ละลายออกมาจากการสกัดแต่ละครั้งสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในของเสีย

Shin และ Sujiwatthana (1988) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมทรายในอัตราส่วน 1 ต่อ 2 บำบัดของเสีย 4 ชนิด คือ แคดเมียม ตะกั่ว อัลตรีน (Aldrin) และคลอเดน (Chlordane) จากการศึกษาพบว่า

1. ปริมาณของเสียที่ถูกสกัดออกมาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของเสียที่เติมลงในส่วนผสม
2. กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเสียลงในส่วนผสม
3. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ให้ทั้งกำลังรับแรงอัดสูงสุดและปริมาณของเสียในน้ำสกัดต่ำสุด
4. พีเอชของสารละลายที่ใช้สกัดยิ่งน้อยการชะละลายจะเกิดมาก
5. อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของก้อนตัวอย่างสูงขึ้นความสามารถในการถูกชะละลายจะเพิ่มขึ้น
6. ระยะเวลาในการบ่มตัวไม่มีผลมากนักต่อความสามารถในการถูกชะละลาย
7. การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และทราย เหมาะสมสำหรับการทำเสถียรของเสียประเภทโลหะหนักได้ดีกว่าของเสียพวกสารอินทรีย์ในยาฆ่าแมลง

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2532) ศึกษาวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพของกากแร่สังกะสีจากกระบวนการผลิตสังกะสีของบริษัทผาแดงอินดัสตรี จำกัด โดยใช้เทคนิคการเติมปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ และเทคนิคด้านความร้อนสูง ผลการศึกษาพบว่า

1. ปูนขาวและปูนซีเมนต์สามารถนำมาใช้ผสมกับกากแร่สังกะสีได้ ในสัดส่วน ปริมาณปูนขาวร้อยละ 4 หรือปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของกากสังกะสีแห่งนั้นพอเพียงที่ทำให้ ส่วนผสมมีความคงสภาพและป้องกันไม่ให้โลหะหนักถูกชะละลายออกมาได้ ในการศึกษา สมบัติของส่วนผสม ได้กระทำภายในระยะเวลาบ่ม 90 วัน ถ้าต้องการให้ส่วนผสมมีสมบัติทาง วิศวกรรมที่ดีแล้ว ควรใช้ปริมาณปูนขาวร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 12

2. ในด้านการเพิ่มเสถียรภาพด้วยความร้อน พบว่ากากแร่ผ่านความร้อนเกิน 1000 องศาเซลเซียส มีเสถียรภาพดี การชะละลายของโลหะหนักมีน้อยมากต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับการใส่ประโยชน์ของกากแร่มีแนวโน้มที่ใช้ประโยชน์ทาง เศรษฐกิจได้โดยทำกระเบื้อง (Tile) ถ้าใช้ส่วนผสมที่มีกากแร่เจือปนไม่มากกว่าร้อยละ 80 ผสม กับดินขาว

Bishop (1988) ศึกษาการกลไกของการยึดจับโลหะหนัก (แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และ โลหะหนักทั้ง 3 ผสมรวมกัน) ของการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สอง โดยทำการสกัด 15 ครั้ง สามารถหาความจุฟเฟอร์ของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนได้ 18.3 มิลลิลิตร/กรัม โดยที่กลไกในการยึดจับโลหะเป็นดังนี้ คือ แคดเมียมอยู่ในรูปของโลหะ ไฮดรอกไซด์ซึ่งแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนหรือเกาะติดกับผนังของรูพรุนในซีเมนต์ที่แข็งตัว สำหรับ โครเมียมและตะกั่วจะทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เฟสท์เกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนกับซิลิกา

Shin, Her และ Koo (1988) ศึกษาปัจจัย 4 อย่าง ได้แก่ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณกากตะกอนเปียก และปริมาณสาร Precipitator ในการทำให้ เป็นก้อน สำหรับสลัดจ์จากอุตสาหกรรมชุบโลหะที่มีสังกะสี โครเมียม และเฮกเซน ผลการศึกษา สรุปได้ดังนี้

1. ความเข้มข้นของสังกะสีและโครเมียมในน้ำสกัดลดลง เมื่อลดอัตราส่วนทรายต่อ ปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และเพิ่มปริมาณสาร Precipitator

2. กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 14 วันเพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และลดปริมาณสลัดจ์

3. จากการวิเคราะห์โดยวิธี ANOVA พบว่าอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์มีผลอย่าง สำคัญต่อการชะละลายของโครเมียม และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีผลอย่างสำคัญต่อการ ชะละลายของสังกะสีและกำลังรับแรงอัด

4. นอกจากนี้ภาวะที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้กับสลัดจ์แห้งหนัก 30 กรัม ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาณสาร Precipitator เท่ากับ 1, 1.5 และ 1.075 กรัมตามลำดับ

Rijal (1990) ศึกษาการทำให้เป็นก้อนของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยทำการบำบัดก่อนด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกเพื่อให้ได้กากตะกอนไฮดรอกไซด์ของโครเมียม และสังกะสี วัสดุประสานที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับเถ้าแกลบในอัตราส่วน 1 ต่อ 1) ผลการศึกษาพบว่า

1. กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสลัดจ์ในส่วนผสม
2. เมื่อเพิ่มปริมาณสลัดจ์ในส่วนผสมทำให้ความสามารถถูกชะละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น
3. สลัดจ์ที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์สามารถยึดจับโครเมียมได้ดีกว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วนสลัดจ์ต่อวัสดุประสานน้อยกว่า 0.2 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมมากกว่า 0.5 ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า
4. เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น การชะละลายของโลหะหนักลดลง
5. อัตราส่วนสลัดจ์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ให้ค่าที่เหมาะสมสำหรับกำลังรับแรงอัดและจำกัดความสามารถถูกชะละลายของโลหะหนัก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ให้ค่าที่เหมาะสมสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และ 0.75 สำหรับปูนซีเมนต์ผสมกับเถ้าแกลบ

Youn (1990) ได้ทำการศึกษา การทำเสถียรสลัดจ์น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการซึ่งส่วนใหญ่เป็นสลัดจ์จากน้ำเสียซีโอดีมาทำให้เป็นก้อน โดยใช้วัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมกับเถ้าแกลบ ผลการทดลองสรุปได้ว่า

1. ความสามารถในการถูกชะละลาย เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนสลัดจ์น้ำเสียต่อปูนซีเมนต์ และเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะเวลาบ่มตัว
2. กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มตัวและมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม ในกรณีที่ใช้ปูนขาวผสมเถ้าแกลบเป็นวัสดุประสาน กำลังรับแรงอัดไม่เพิ่มตามระยะเวลาบ่มตัว คือ ในช่วงแรกเพิ่มขึ้นและช่วงเวลาดำเนินการลดลง และกำลังรับแรงอัดสูงเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากตะกอนที่เพิ่มขึ้นจากค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ พบว่าก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์จะมีค่าสูงกว่าก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนขาว

3. เถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์สามารถใช้เป็นวัสดุประสานในการทำให้เป็นก้อนได้ และกำลังรับแรงอัดมีค่าสูงพอสำหรับนำไปฝังกลบ

Shin และคณะ (1990) ศึกษาลักษณะการชะละลายของโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย โลหะหนักสังเคราะห์ที่ใช้ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม ตะกั่ว โครเมียม และไฮดรอกไซด์ของโลหะทั้ง 3 ชนิดผสมกัน ทดสอบกับตัวทำละลายที่ใช้สกัด 3 ประเภท คือ น้ำทะเล น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรด และน้ำกลั่น จากการศึกษาพบว่าชนิดของสารสกัด มีผลโดยตรงต่อพีเอชและปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด การเติมเถ้าลอยลงในส่วนผสมซีเมนต์ ทำให้พีเอชสุดท้ายของน้ำสกัดลดลงและเป็นการเพิ่มปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมา

จากการทดสอบการชะละลายทางจลนศาสตร์ (Dynamic leaching test) ในช่วงเวลา 60 วัน เมื่อใช้น้ำกลั่นเป็นสารชะละลายพบว่า แคลเซียมถูกชะละลายออกมาในปริมาณเล็กน้อย สำหรับโครเมียมถูกชะละลายน้อยกว่าแคลเซียมและตะกั่ว และตรวจไม่พบยกเว้นที่เวลาเริ่มต้น สำหรับตะกั่วถูกชะละลายออกมาน้อยลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป หลังจากสิ้นสุดเวลาชะละลาย น้ำหนักของก้อนตัวอย่างลดลงเนื่องจากเกิดการละลายออกของปูนขาวและโลหะหนัก เมื่อใช้น้ำทะเลเป็นสารชะละลายพบว่า จากสภาวะที่เป็นต่างของน้ำทะเลโลหะหนักที่ละลายเกิดการตกผลึกขึ้นอีก และตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยจะมีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำทะเล

Tay (1990) ได้ศึกษาการชะละลายของเถ้าลอย เถ้าลอยที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ปูนขาว และเถ้าลอยที่ผ่านการทำให้เสถียรโดยใช้ปูนซีเมนต์ โดยนำเถ้าลอยหรือเถ้าลอยที่ผ่านการทำให้เสถียรมาบรรจุลงในคอลัมน์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. ให้มีชั้นความสูง 10 ซม. และใช้ชั้นทรายสูง 10 ซม. และ 5 ซม. วางประกบผิวด้านบนและด้านล่างของเถ้าลอยตามลำดับ และทดลองให้น้ำประปาไหลผ่าน โดยรักษาระดับเฮด 20 ซม. เหนือผิวทรายชั้นบนกำหนดอัตราไหลออกจากคอลัมน์ 50 ลิตรต่อวันเป็นระยะเวลา 3 เดือน ผลการทดลองสรุปได้ว่า เถ้าลอยที่ผ่านการทำให้เสถียรด้วยปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ มีความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำชะละลายต่ำกว่าค่าที่เครื่องสามารถตรวจวัดได้ แสดงว่าปูนซีเมนต์และปูนขาว มีประสิทธิภาพสูงในการทำให้เสถียรเถ้าลอย

Claudio (1991) ได้ทำการศึกษาการทำสลัดจ์จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ให้เป็นก้อนโดยใช้วัสดุประสาน 3 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอซโซลานิก และปูนซีเมนต์กันเตาเผา มาทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.3, 0.5 และ 0.7 ผลการทดลองสรุปได้ว่า การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงในการตรึง

โลหะที่มีพิษ เช่น แคดเมียม ปรอท และตะกั่ว จากสลัดจ์น้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และสลัดจ์ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนสามารถจัดอยู่ในประเภทสารเฉื่อย

Cheng และ Bishop (1992) ศึกษาการกระจายตัวของโลหะหนัก(ตะกั่ว แคดเมียม และอาร์เซนิก) ในกระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ ผลการวิเคราะห์โดยวิธี SEM , EDX และ Wet digestion/AA พบว่าที่บริเวณพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น โดยเกิดจากกรดอะซิติคที่ใช้ชะละลาย ซึ่งแคลเซียมส่วนใหญ่ถูกชะละลายในขณะที่ซิลิโคน เหล็กและอลูมิเนียมยังคงเหลืออยู่ที่ผิว ซึ่งสารที่เหลืออยู่นี้มีคุณสมบัติดูดซับและดูดซึมและป้องกันการชะละลายของโลหะหนักได้ ผลการทดลองยังสรุปได้อีกว่า การชะละลายของโลหะหนักจะเกิดเฉพาะบริเวณพื้นผิวเท่านั้น

Leangon (1993) ศึกษาวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดในการทำให้เป็นก้อนของสลัดจ์จากโรงงานฟอกหนังและจากโรงงานเคมีคอนดักเตอร์ ซึ่งสลัดจ์จากโรงงานฟอกหนังมีโครเมียมและสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ส่วนสลัดจ์จากโรงงานเคมีคอนดักเตอร์มีทองแดง ตะกั่ว และดีบุกเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ วัสดุประสานที่ใช้ศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เถ้าแกลบ เถ้าลอย และซิลิกาฟูม ผลการศึกษาสรุปได้ว่า

1. สลัดจ์จากโรงงานฟอกหนัง ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.7:0.2:0.1 สามารถทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราส่วนสลัดจ์ต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.64
2. สลัดจ์จากโรงงานเคมีคอนดักเตอร์ ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.7:0.1:0.2 สามารถทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราส่วนสลัดจ์ต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 1.37
3. สลัดจ์จากโรงงานทั้ง 2 ประเภทที่ทำให้เป็นก้อน สามารถผลิตเป็นก้อนคอนกรีตปูทางเดินได้

Fuessle และ Taylor (1994) ศึกษาการทำเสถียรฝุ่นจากเตาหลอมที่ใช้ไฟฟ้าอาร์ค (Electric arc furnace dust) โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ และวัสดุตัวเติมเพิ่มประสิทธิภาพ ได้แก่ เถ้าลอย และซิลิกาฟูม (Silica fume) เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเติมเถ้าลอยและซิลิกาฟูม ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 และอัตราส่วนซิลิกาฟูมต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.15 โดยศึกษาที่อัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อของเสียเท่ากับ 0.12 และ 0.20 ทดสอบหาความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดตามวิธี TCLP ที่ระยะเวลาบ่ม 60 และ 335 วัน ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตัว

เติมให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าเมื่อใช้ซิลิกาฟูม และที่ระยะเวลาบ่ม 335 วัน การเติมซิลิกาฟูมช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการเติมเถ้าลอยโดยเฉพาะโครเมียม ตะกั่ว และนิกเกิล

นฤมิตร (2538) ศึกษาการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอติโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ ศึกษาปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องและทดสอบสมบัติทางกายภาพของตะกอนโลหะหนักที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และความชื้นได้ ทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก ได้แก่ ปรอท โครเมียม และเหล็ก

ผลการทดลอง พบว่า การใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0 และ 50 เป็นวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0.25 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 และระยะเวลาบ่ม 28 วัน ทำให้สมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก พบว่า ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดมีค่าสูงเกินมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ในขณะที่โครเมียมและเหล็กมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 50 เป็นวัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์โลหะหนักได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ล้วน กล่าวคือ มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ปรอท โครเมียม และเหล็ก ร้อยละ 30.7, 52.5 และ 90 ตามลำดับ