

บทที่ 3 บททวนเอกสาร

3.1 ของเสียอันตราย (Hazardous waste)

ของเสียอันตราย ตามคำจำกัดความของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ หมายถึง ของเสียหรือสิ่งที่เจือปนด้วยของเสียซึ่งมีความเข้มข้น หรือมีคุณสมบัติด้านกายภาพ เคมี หรืออื่น ๆ ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการตายหรือเจ็บป่วยทั้งที่รักษาได้ และรักษาไม่ได้ ตลอดจนทำให้เกิด หรือมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้มีการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด เก็บกัก ขนส่ง และกำจัด

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

ประเทศต่าง ๆ จะมีคำจำกัดความของคำว่ารากากหรือของเสียอันตรายของตนเอง ที่แตกต่างกันออกไป ตามแต่ว่าจะถูกพัฒนามาจากหน่วยงานของรัฐหน่วยใด เช่น ฝรั่งเศส หมายถึง ของเสียที่เกิดจากการผลิต การนำเข้า ขนส่ง หรือการทิ้ง จนอาจเป็นอันตรายต่อ ดิน พืช สัตว์ ขาดทำลายสิ่งแวดล้อม หรือไปปนเปื้อน อากาศ น้ำ ในเยอรมันมี ก็เรียกว่า เป็นของเสียพิเศษ ที่เกิดจากการประกอบธุรกิจ ที่มีคุณสมบัติ ส่วนผสม ที่จะอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ อากาศ น้ำ หรือ เป็นสิ่งที่อาจจะระเบิดได้ ติดไฟได้ หรืออาจทำให้เกิดโรค ซึ่งจะต้องกำจัดเป็นพิเศษ แยกจากรยะชุมชน ส่วนในเนเธอร์แลนด์ เรียกว่า กากสารเคมี ซึ่งหมายถึงของเสียที่ปนเปื้อนสารเคมี กลุ่มที่รัฐประกาศระบุไว้ หรือของเสียที่เกิดจากขบวนการผลิตทางเคมี สำหรับในสหราชอาณาจักร ก็เรียกว่าของเสียที่เป็นพิษ หรือเป็นสารมลพิษ ซึ่งหากเกิดขึ้น จะทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นอันตราย หรือในสหรัฐฯ ก็หมายถึงระยะที่เป็นของแข็ง ที่มีปริมาณความเข้มข้น คุณสมบัติ หรือมีเชื้อโรค จนอาจเพิ่มอัตราการตาย หรือพิการ และเป็นภัยต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เมื่อบำบัด เก็บ ขนส่ง หรือกำจัด ไม่ได้ สำหรับประเทศญี่ปุ่น จะเรียกว่า ของเสียที่ควรควบคุมเป็นพิเศษ ซึ่งหมายถึง ของเสียที่อาจจะระเบิดได้ ติดไฟได้ เป็นพิษหรือมีเชื้อโรค จนอาจทำลายสุขภาพมนุษย์ หรือสิ่งแวดล้อมของสิ่งมีชีวิต

สำหรับคำจำกัดความของไทย ซึ่งตาม พรบ. ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมของไทย พ.ศ. 2535 นั้น จะไม่มีคำนิยาม สำหรับคำว่าของเสียอันตราย โดยตรง แต่จะใช้คำว่า "ของเสีย" ซึ่งจะหมายรวมถึงระยะชุมชน และของเสียที่มีวัตถุอันตรายปนเปื้อน หากปล่อยทิ้งจนอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับ พรบ. โรงงาน 2535 ซึ่งใช้ควบคุมปัญหามลพิษ

จากการประกอบกิจการโรงงาน ได้ให้คำจำกัดความ โดยเรียกว่าเป็นวัสดุที่ไม่ได้ใช้แล้ว ที่มีคุณสมบัติ เป็น สารไวไฟ กัดกร่อน เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย มีสารพิษปน หรือมีตัวทำลายเสื่อมคุณภาพตามรายชื่อที่ระบุไว้บนเบ็อน หรือจากตะกอนที่เกิดจากการผลิต หรือจากระบบบำบัดของเสียตามรายชื่อที่ระบุ (บุญยง, 2539)

จากคำจำกัดความที่กล่าวมา สามารถแบ่งประเภทของเสียอันตรายออกเป็น 10 ประเภท (บุญยง, 2539) ได้แก่

1. อุปกรณ์ที่มีแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่หมดอายุการใช้งาน เช่น โทรศัพท์ เต้าไมโครเวฟ เป็นต้น
2. น้ำมันเครื่องที่หมดสภาพการใช้งาน
3. น้ำกรด - ด่าง ที่หมดอายุการใช้งาน
4. ตะกอนที่มีโลหะหนัก จำพวก ปรัชท แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม ปนเบ็อน
5. ขยะที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปนเบ็อน
6. กากหรือขี้แร่ จากการทำเหมือง ถลุงหรือหลอมโลหะ
7. ตะกอนนอนก้นถังกลั่นน้ำยาเคมีต่าง ๆ
8. น้ำยาตัวทำลาย ที่หมดสภาพการใช้งาน
9. น้ำยาล้างและขจัดรูปที่หมดอายุการใช้งาน
10. ขยะติดเชื้อโรค จากโรงพยาบาล หรือศูนย์แล็บวิเคราะห์ต่าง ๆ

3.2 โลหะหนัก

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

โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน ได้หลายรูปที่เสถียกว่โลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบอินทรีย์โลหะ (Organometallic compound) ซึ่งเป็นพิษ และสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ความเป็นพิษของโลหะหลายชนิด เป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อมีการสะสมในร่างกายของมนุษย์ อาจมีผลทำให้เกิดพิษหรือเสียชีวิตได้

โลหะหนักบางชนิด เช่น ปรอท แคดเมียม อาร์เซนิก ตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักประเภทที่มีพิษถาวร ซึ่งนอกจากจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลาแล้ว ยังสามารถสะสมในร่างกายของมนุษย์และสัตว์น้ำได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกจากของเสีย น้ำเสีย หรือตะกอน เพื่อป้องกันไม่ให้แพร่กระจายเข้าสู่วัฏจักรของน้ำหรือผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร

3.3 การผลิตเหล็กเส้น

3.3.1 ประเภทของการผลิต

โรงงานผลิตเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

1. โรงงานผลิตเหล็กเส้นประเภทใช้เตาหลอมไฟฟ้า (Arc furnace)

โรงงานประเภทนี้ส่วนใหญ่เป็นโรงงานขนาดใหญ่ ทำการผลิตโดยนำเศษเหล็กมาหลอมเหลวในเตาหลอมไฟฟ้า ปรับให้มีส่วนผสมตามมาตรฐานที่ต้องการ แล้วนำมาหล่อเป็นแท่ง (Ingot) เก็บไว้เมื่อจะทำเป็นเหล็กเส้นก็จะนำแท่งเหล็กที่หล่อไว้แล้ว มาเผาในเตาเผาให้ร้อนประมาณ $1,300^{\circ}\text{C}$ แล้วรีดเป็นเส้นขนาดต่าง ๆ

2. โรงงานผลิตเหล็กเส้นประเภทรีดซ้ำ (Re-rolling)

โรงงานประเภทนี้ไม่มีเตาหลอม ซึ่งเรียกว่าโรงงานเหล็กรีดซ้ำ (Re-rolling) จะรับและแปรรูปเหล็กเก่า โดยนำเศษเหล็กชนิดตีมาตัดเป็นชิ้นตามขนาด และนำไปเผาให้ร้อนประมาณ $1,300^{\circ}\text{C}$ แล้วรีดออกมาเป็นเส้นกลม มีขนาดตามความต้องการ

3.3.2 วัตถุดิบ

อุตสาหกรรมเหล็กเส้นทั่วไปใช้แร่เหล็กเป็นวัตถุดิบ และยังไม่มีการถลุงเหล็กในประเทศไทย ดังนั้นในการผลิตเหล็กเส้น จึงต้องใช้เศษเหล็กทั้งที่มีในประเทศและนำเข้ามาจากต่างประเทศเป็นวัตถุดิบ สำหรับวัตถุดิบอื่น ๆ ได้แก่ แร่ธาตุและสารเคมี ซึ่งใช้เป็นส่วนผสม วัตถุดิบที่สำคัญ ๆ แยกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. เศษเหล็ก เศษเหล็กที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเหล็กเส้น แบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

1.1 เศษเหล็กเรือ (Ship plate) และเศษเหล็กเข็มพืด (Sheet pile) เศษเหล็กทั้ง 2 ประเภทนี้ จะต้องนำมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ให้ได้ขนาดและน้ำหนักตามที่กำหนดแล้วนำไปเผา และรีดออกมาเป็นเส้นตามขนาดที่ต้องการ เหล็กเส้นที่รีดจากเศษเหล็กประเภทนี้จะได้มาตรฐานตามที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดไว้ เนื่องจากวัตถุดิบมีคุณภาพสูง สำหรับเศษเหล็กเรือปัจจุบัน

ได้มีการนำเรือเก่ามาจากต่างประเทศ เพื่อรีไซเคิลเศษเหล็กมาเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเหล็กเส้น เหล็กรูปพรรณ และอื่น ๆ อีกหลายประเภท

1.2 เศษเหล็กชนิดแผ่น (Cobble Plate Import) เป็นเหล็กแผ่นหนาซึ่งจะต้องนำมาตัดเป็นชิ้น ๆ แล้วนำไปเผา และรีดออกมาเป็นเหล็กเส้นตามขนาดที่ต้องการ เศษเหล็กประเภทนี้ส่วนใหญ่นำเข้ามาจากต่างประเทศแทบทั้งสิ้น โดยนำเข้าจากประเทศออสเตรเลีย อังกฤษ แบลเยียม เยอรมัน และ ไต้หวัน เป็นต้น

1.3 เศษเหล็กชนิดดี (Re-rolled Scrap Import) เป็นเศษเหล็กซึ่งอยู่ในสภาพดี เช่น เหล็กท่อน เหล็กฉาก เหล็กทรงรถไฟ เป็นต้น โดยนำเศษเหล็กเหล่านี้มาตัดเป็นท่อน ๆ แล้วนำไปเผา และรีดออกมาเป็นเส้นตามขนาดที่ต้องการเช่นเดียวกัน เศษเหล็กประเภทนี้ไม่มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งสามารถหาได้ภายในประเทศส่วนหนึ่ง แต่ส่วนใหญ่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ

1.4 เหล็กชิ้นเล็ก ๆ (Scrap) เป็นเศษเหล็กชิ้นเล็กชิ้นน้อย เช่น เศษเหล็กที่ได้จากการรีไซเคิลอาคารต่าง ๆ เศษตะปู เศษเหล็กจากตัวถังรถยนต์ เป็นต้น นำมาผลิตเป็นเหล็กเส้น โดยผ่านกระบวนการเตาหลอม เศษเหล็กชนิดนี้เป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมเหล็กเส้น เมื่อเปรียบเทียบกับเศษเหล็กชนิดแผ่นและเศษเหล็กชนิดดี เศษเหล็กประเภทนี้หาได้จากทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ แต่ส่วนใหญ่แล้วต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เนื่องจากเศษเหล็กชิ้นเล็ก ๆ มีราคาต่ำ แม้ว่าจะช่วยทำให้ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตเหล็กเส้นต่ำลง แต่การผลิตเหล็กเส้นโดยใช้วัตถุดิบประเภทนี้ต้องผ่านกระบวนการผลิตในเตาหลอม โรงงานประเภทนี้จึงต้องติดตั้งอุปกรณ์การผลิตราคาสูงกว่าโรงงานที่ใช้วัตถุดิบจากเหล็กสองประเภทแรก

2. วัตถุดิบอื่น ๆ นอกจากเศษเหล็กทั้งสามประเภทดังกล่าว ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับการผลิตเหล็กเส้นแล้ว ยังมีวัตถุดิบอีกหลายชนิดที่เป็นส่วนผสมในการผลิตเหล็กเส้น เพื่อให้ปรับปรุงคุณภาพของเหล็กเส้นให้ได้มาตรฐานตามที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดไว้

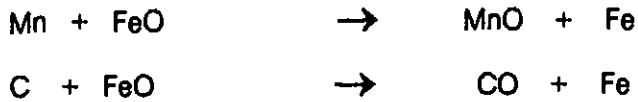
วัตถุดิบเหล่านี้ได้แก่ หินขาว หินเผา โดโลไมท์ แร่ฟลูออไรท์ และสารเคมี เช่น เฟอร์โรแมงกานีส เฟอร์โรซิลิกอน อมอร์ฟัสแกรไฟท์ แมกเนเชียกลิงเกอร์ เป็นต้น เพื่อเพิ่มปริมาณแมงกานีส ซิลิกอน ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม คาร์บอน ฟลูออไรท์ ไม้แก่เหล็ก เป็นต้น

3.3.3 กรรมวิธีการผลิตเหล็กเส้นโดยใช้เตาหลอมไฟฟ้า

นำเศษเหล็กที่ผ่านการคัดเลือก และผ่านการตัดขนาดเล็กลงให้พอเหมาะกับการป้อนเข้าเตาหลอมไฟฟ้า มารังน้ำหนัก และเทรวมในถังเหล็กใหญ่เพื่อนำไปเทลงในเตาหลอมไฟฟ้า เมื่อฝาเตาปิดเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มจ่ายกระแสเข้าถึงเศษเหล็ก โดยผ่านแท่งถ่านตัวนำที่ตอนปลายแท่งถ่าน เมื่อสัมผัสกับเศษเหล็กก็จะเกิดการลัดวงจรไฟฟ้าทำให้เกิดเปลวไฟอันร้อนแรง มีความร้อนสูงถึง $2,000^{\circ}\text{C}$ ความร้อนทำให้เศษเหล็กหลอมละลาย จนในที่สุดกลายเป็นของเหลว มีอุณหภูมิประมาณ $1,540^{\circ}\text{C}$ พนักงานเตาหลอมจะตักเอาตัวอย่างของน้ำเหล็กออกจากปากประตูเตา เทลงในแบบหล่อเล็ก ๆ ที่เตรียมไว้ รอให้แข็งตัวแล้วนำส่งห้องควบคุมคุณภาพ เพื่อตรวจหาปริมาณของธาตุคาร์บอน, แมงกานีส, กำมะถัน และฟอสฟอรัส ใช้เวลาประมาณ 10 นาที พนักงานเตาหลอมจะทราบปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำเหล็กในเตาที่ทำการผลิต และจะทำการกำจัดธาตุที่มีเกินอัตราความต้องการออกเสีย เช่น ธาตุคาร์บอน, กำมะถัน, ฟอสฟอรัส เป็นต้น ให้ปริมาณลดต่ำลงอยู่ในขีดมาตรฐาน เช่น การผลิตเหล็กสำหรับรีดเป็นเหล็กเส้นกลมธรรมดา ปริมาณธาตุต่าง ๆ ในน้ำเหล็กจะต้องมีมาตรฐานดังนี้ ธาตุคาร์บอน ต้องต่ำกว่า 0.20% โดยน้ำหนัก, ธาตุกำมะถัน ต้องต่ำกว่า 0.05% และธาตุฟอสฟอรัส ต้องต่ำกว่า 0.05% เป็นต้น สำหรับวิธีการกำจัดนั้น มีวิธีดังนี้, ธาตุคาร์บอนกำจัดออกด้วยการเป่าฟลักซ์ออกซิเจน ผ่านท่อเหล็กลงไปใต้ผิวน้ำเหล็ก หรือโดยการเติมแร่เหล็กลงไปแทนก็ได้ ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นดังนี้ $2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$ ส่วนธาตุกำมะถันและธาตุฟอสฟอรัสกำจัดโดยการเติมหินปูนลงไปใต้น้ำเหล็ก ธาตุกำมะถัน และธาตุฟอสฟอรัสจะถูกกำจัดออกไปในรูป CaS และ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ เมื่อธาตุที่มีเกินถูกกำจัดออกมาตามต้องการแล้ว พนักงานเตาหลอมจะเร่งพลังไฟฟ้า เพื่อให้มีอุณหภูมิสูงถึง $1,600^{\circ}\text{C}$ แล้วจึงเริ่มวิธีการ Refining คือการกำจัดก๊าซ O_2 ที่ค้างอยู่ในน้ำเหล็กออก โดยการเติมผงถ่านละเอียดเข้าไปภายในเตา เมื่อปริมาณของก๊าซ O_2 ลดลงถึงขีดที่ต้องการแล้วจึงทำการเติมธาตุอื่น ๆ เช่น ธาตุแมงกานีส, ธาตุซิลิกอนลงไปในน้ำเหล็กตามอัตราที่ต้องการ เพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ได้ตามที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดไว้ แล้วจึงทำการชั่งตัวอย่างในห้องทดลองตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีอีกเป็นครั้งที่สอง เพื่อปรับปรุงส่วนประกอบให้ถูกต้อง ก่อนที่จะเทน้ำเหล็กออกจากเตาหลอม ช่วงเวลาดังแต่เริ่มจ่ายไฟฟ้าถึงเทออกจากเตาประมาณ 3 ชั่วโมง ได้น้ำเหล็กประมาณครั้งละ 26 ตัน

ปฏิกิริยาเคมีของโลหะและธาตุที่อยู่ในเตาหลอมเหล็กไฟฟ้านี้ คือ





น้ำเหล็กที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการแล้วก็พร้อมที่จะเทออกจากเตาได้ โดยเทลงในถังน้ำเหล็ก ซึ่งด้านในกรวดด้วยอิฐทนไฟ บันจันไฟฟ้าจะหิวพาดังน้ำเหล็กไปเทลงในแบบหล่อ เพื่อหล่อเป็นแท่งเหล็ก น้ำหนักแท่งเหล็กประมาณ 100 ก.ก. ต่อแท่ง ระหว่างการเทลงแบบหล่อนั้น จะมีการตักตัวอย่างน้ำเหล็กไปให้ห้องทดลองตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีเป็นครั้งสุดท้าย และถือผลการวิเคราะห์ครั้งนี้ แทนคุณสมบัติของเหล็กเตานั้น

เมื่อถอดเหล็กแท่งออกจากแบบหล่อแล้ว ต้องนำไปแต่งผิวนอกให้เรียบร้อยแล้วจึงส่งไปรีดเป็นเหล็กเส้นต่อไป

การรีดเริ่มตั้งแต่การนำเหล็กแท่งเข้าเตาอบ เตาอบเผาด้วยน้ำมันเตาใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ความร้อนประมาณ $1,300^{\circ}\text{C}$ เหล็กแท่งจะร้อนแดงและพร้อมที่จะนำเข้ารีดในเครื่องรีด โดยผ่านชั้นการรีดเป็นชั้น ๆ ตามขนาดที่ต้องการ แล้วจึงผ่านไปยังเครื่องตัด ตัดให้ได้ความยาว 10-12 เมตร และนำไปพับที่เครื่องพับเหล็กเส้นและนำไปเรียงเก็บไว้

สรุปกรรมวิธีการผลิตเหล็กเส้นโดยใช้เตาหลอม

1. ขั้นตอนอุ่นเศษเหล็ก (Scrap Preheating System) โดยการทำให้เศษเหล็กผสมกับส่วนผสมทางเคมี คือ ธาตุคาร์บอน แมงกานีส กำมะถัน และฟอสฟอรัส ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม
2. ขั้นตอนการหลอมเหล็ก (Electric Arc Furnace) เศษเหล็กและส่วนผสมทางเคมีดังกล่าวจะหลอมลงในเตาหลอมตามรูปลักษณะต่าง ๆ คือ เหล็กแท่งเล็ก (Billet) เหล็กแท่งใหญ่ (Bloom) หรือเหล็กแท่งหล่อ (Ingot)
3. ขั้นตอนการรีดเหล็ก (Roller) ขั้นตอนการรีดเหล็กเสริมคอนกรีตแบบนี้ เรียกว่า กรรมวิธีรีดร้อน กล่าวคือ เหล็กที่ผ่านการหลอมมาแล้วจะอยู่ในลักษณะของเหล็กแท่งเล็ก (Billet) และยังคงร้อนอยู่ จะถูกนำรีดทำการรีดเหล็กแท่งไปเป็นเหล็กเส้นกลมหรือเหล็กข้ออ้อยตามขนาดและเส้นผ่าศูนย์กลางที่ต้องการ

สำหรับโรงงานที่นำกากตะกอนจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้ามาศึกษาในงานวิจัยนี้ มีส่วนผสมโดยประมาณในการผลิตเหล็กเส้นต่อการหลอม 1 เตา (heat) ดังนี้

เศษเหล็ก	26.5	ตัน
ปูนขาว	1	ตัน
ถ่านหิน	0.08	ตัน

แมงกานีส	0.24	ตัน
ซิลิกอน	0.07	ตัน

โดยกรรมวิธีการผลิตเหล็กเส้นของโรงงานแห่งนี้ ในขั้นตอนการหลอมเศษเหล็ก จะนำเศษเหล็กใส่ลงไปในเตาหลอมไฟฟ้า เพื่อทำให้เศษเหล็กหลอมละลายเป็นของเหลวด้วยอุณหภูมิประมาณ $1,600^{\circ}\text{C}$ แล้วพ่นก๊าซออกซิเจนลงไปในน้ำเหล็ก เติมคาร์บอนและปูนขาวลงไป เกิดตะก้นลอยขึ้นมาที่ส่วนบนของน้ำเหล็ก แล้วจึงเทตะก้นทิ้งออกมาทางปากเตา ตะก้นที่เกิดขึ้น คือ ตะก้นดำ หลังจากได้ตะก้นดำแล้ว จึงใส่แมงกานีส ซิลิกอน และปูนขาวลงไปในน้ำเหล็ก เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็ก ในขั้นตอนนี้จะเกิดตะก้นลอยขึ้นมาที่ส่วนบนของน้ำเหล็ก แล้วจึงเทตะก้นทิ้งออกมาทางปากเตา ตะก้นที่เกิดขึ้น คือ ตะก้นขาว น้ำเหล็กที่จะถูกนำไปหล่อเป็นแท่งเหล็ก ซึ่งเมื่อถอดเหล็กแท่งออกจากแบบหล่อแล้ว ต้องนำไปแช่ผิววนอกให้เรียบร้อยแล้วจึงถูกส่งนำไปรีดเป็นเหล็กเส้นต่อไป

ในภาาหลอมแต่ละเตา (heat) จะมีปริมาณเหล็กที่หลอมได้ประมาณ 26 ตัน และมีปริมาณกากตะก้นเกิดขึ้นทั้งหมดประมาณ 1.5 ตัน ใน 1 วัน โรงงานจะหลอมได้ 14 เตา (heat) จึงผลิตเหล็กได้ประมาณ 370 ตัน และมีกากตะก้นเกิดขึ้นประมาณ 21 ตัน

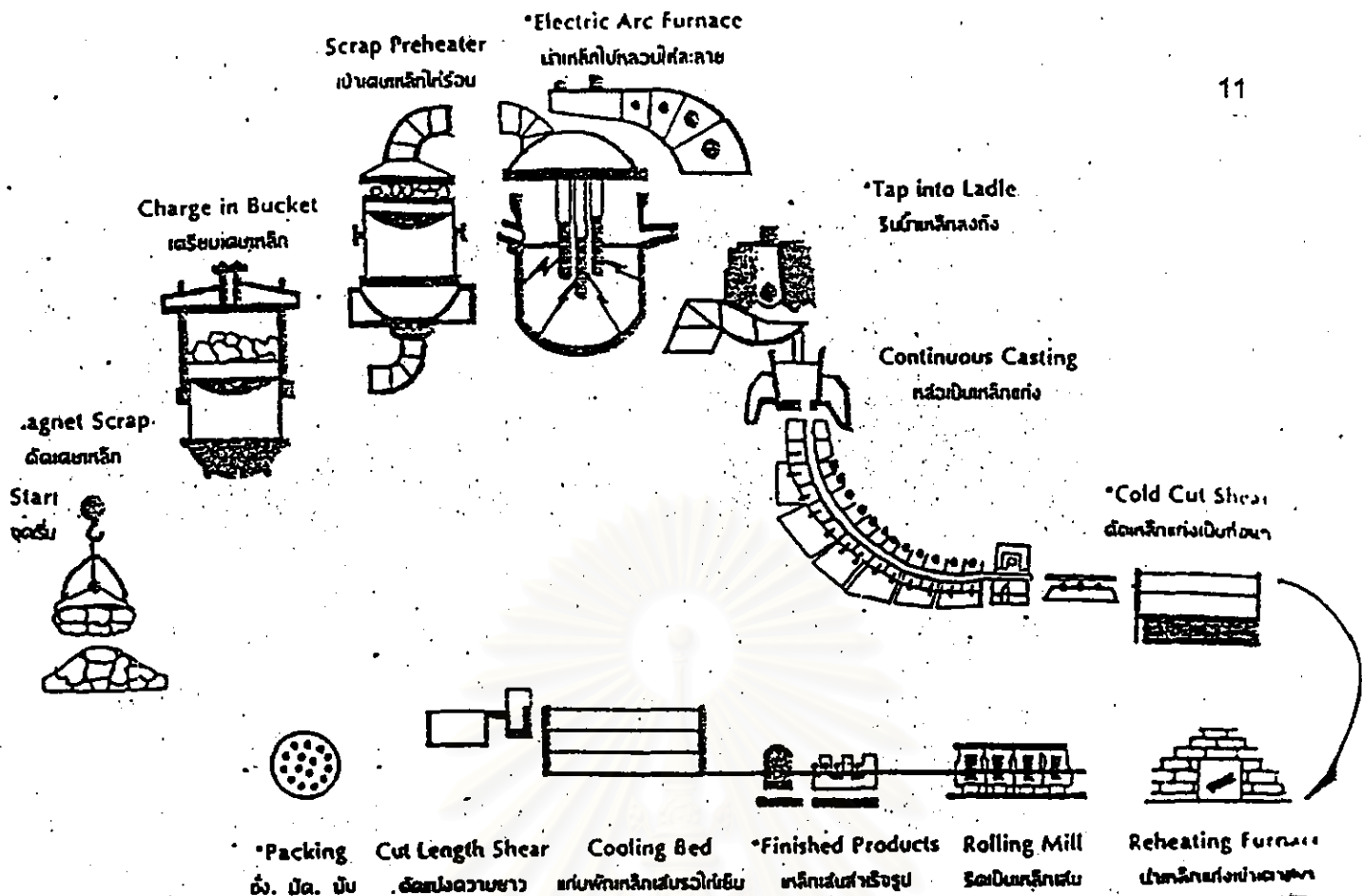
ในระหว่างการหลอมเหล็กจะมีฝุ่นและควันจากเตาหลอมลอยขึ้นมาจากน้ำเหล็ก ซึ่งทางโรงงานมีวิธีการป้องกันมลภาวะทางอากาศนี้ โดยใช้เครื่องดูดที่ติดตั้งอยู่ที่หลังคาด้านบนเตาหลอม เพื่อดูดฝุ่นและควันไปเก็บไว้ที่ถุงกรองเก็บกักฝุ่น ฝุ่นและควันเกิดขึ้นประมาณ 1.5% ของปริมาณเหล็กที่หลอมได้

3.3.4 การเกิดกากตะก้นจากเตาหลอมเหล็ก

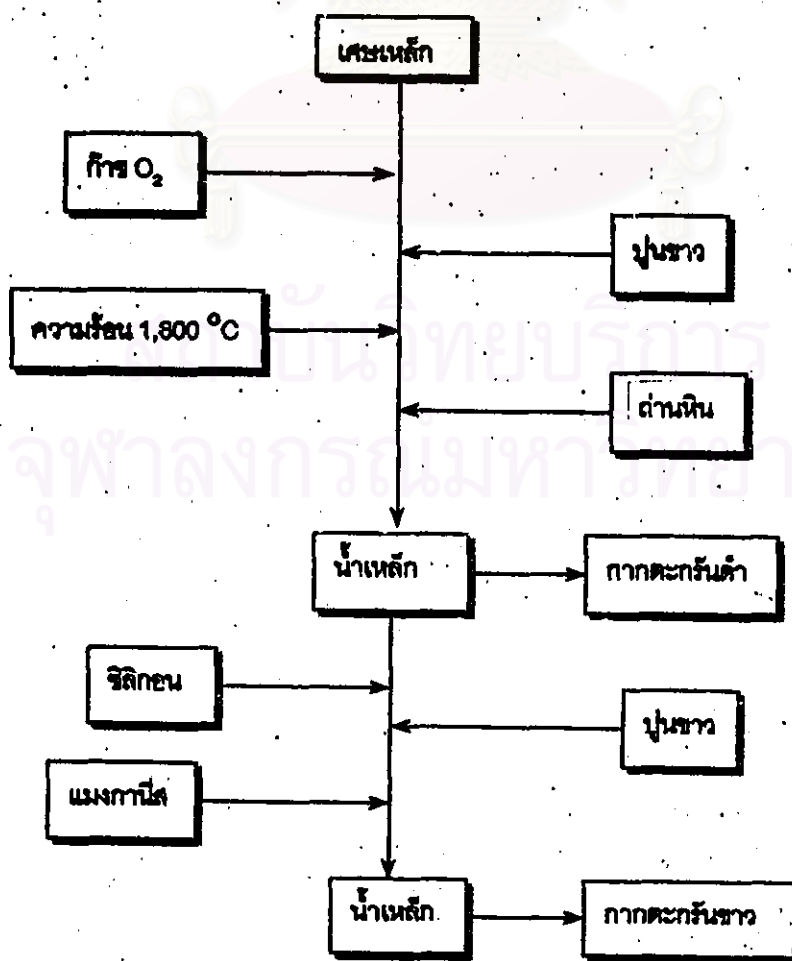
ในภาาผลิตเหล็กเส้นโดยใช้เตาหลอม จะมีกากตะก้นเกิดขึ้นประมาณ 2% - 6% ของปริมาณเหล็กที่หลอมได้ โดยกากตะก้นที่เกิดขึ้นมี 2 ประเภท คือ

1. กากตะก้นดำ (Oxidizing slag)

กากตะก้นประเภทนี้เกิดเมื่อป้อนเศษเหล็กเข้าไปในเตาหลอม ใส่ปูนขาว ให้ความร้อนประมาณ $1,600^{\circ}\text{C}$ แล้วพ่นก๊าซออกซิเจนลงไปในน้ำเหล็ก ก๊าซออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับธาตุต่าง ๆ ในน้ำเหล็ก เกิดเป็นสารมลทิน เช่น คาร์บอน กลายเป็น คาร์บอนมอนอกไซด์, แมงกานีส กลายเป็น แมงกานีสออกไซด์ เป็นต้น ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับสารมลทินต่าง ๆ เกิดเป็นตะก้น ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำเหล็ก จึงแยกตัวลอยอยู่ส่วนบนของน้ำเหล็ก การแยกตะก้นออกจากเตาหลอม ทำ



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงกรรมวิธีการผลิตเหล็กเส้น



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการเกิดกากตะกอน

ได้โดยการเทออกมาทางปากเตาใส่ในถังรองรับตะก้น เมื่อตะก้นเย็นลงจะแข็งตัว เป็นก้อนขนาด 2 ถึง 10 เซนติเมตร และมีสีดำ จึงเรียกกากตะก้นชนิดนี้ว่า กากตะก้นดำ

2. กากตะก้นขาว (Reducing slag)

กากตะก้นประเภทนี้เกิดหลังจากขั้นตอนการทำกากตะก้นดำแล้ว โดยเติมปูนขาว ซิลิกอน ฟลูออไรต์ ลงในน้ำเหล็ก เพื่อปรับปรุงกากตะก้นให้มีสมบัติตามที่ต้องการ ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับ ส่วนประกอบที่ถูกขจัดและสารมลทินต่าง ๆ เกิดเป็นตะก้น ซึ่งมีความต่างจำเพาะต่ำกว่าน้ำเหล็ก จึงแยกตัวลอยอยู่ส่วนบนของน้ำเหล็ก การแยกตะก้นออกจากเตาหลอม ทำได้โดยการเทออกมาทาง ปากเตาใส่ในถังรองรับตะก้น เมื่อตะก้นเย็นลงจะแข็งตัว เป็นก้อนขนาด 4 ถึง 10 เซนติเมตร และมีสีขาว จึงเรียกกากตะก้นชนิดนี้ว่า กากตะก้นขาว

กากตะก้นดำและกากตะก้นขาว จะเกิดอย่างละ 50% ของกากตะก้นทั้งหมด

3.3.5 ส่วนประกอบทางเคมีของกากตะก้นจากเตาหลอมเหล็ก

ส่วนประกอบทางเคมีของกากตะก้นทั้งสองประเภท แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของกากตะก้นจากเตาหลอมเหล็ก (Peters, 1982)

ส่วนประกอบทางเคมี	ปริมาณของส่วนประกอบ (%)	
	กากตะก้นดำ (Oxidizing slag)	กากตะก้นขาว (Reducing slag)
Basicity, CaO / SiO ₂	3 - 5	3 - 4
CaO	40 - 50	55 - 70
SiO ₂	12 - 20	15 - 25
Al ₂ O ₃	4 - 10	1 - 3*
MgO	2 - 8	3 - 10
FeO + MnO	10 - 30	0.5 - 2
P ₂ O ₅	1 - 5	0.1 - 0.2
S	0.1 - 0.2	0.2 - 0.6
CaF ₂	0.5 - 1	2 - 5
CaC ₂	0	1 - 3*
อื่น ๆ		

* Much higher Al₂O₃ and zero CaC₂ in aluminous, noncarbide reducing slags

3.3.6 ปัญหาและแนวทางการจัดการกากตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก

ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ในภาคผนวกที่ 1 ท้ายประกาศหมวด 2 ข้อ 7.8 ได้กำหนดให้ สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุไม่ใช่แล้วจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า (iron and steel) ซึ่งได้แก่ กากและฝุ่นจากหน่วยควบคุมฝุ่นละออง (Emission control) ในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าปฐมภูมิ (Primary steel production) โดยใช้เตาไฟฟ้า (Electric furnace) และของเหลวสำหรับ pickle ที่ใช้งานแล้วจากกรรมวิธีทำสำเร็จ (Finishing) ของเหล็กกล้าซึ่งเกิดขึ้นในหน่วยการผลิตต่างๆ เป็นสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุไม่ใช่แล้วประเภทของเสียอันตรายจากแหล่งกำเนิดจำเพาะประเภทหรือจำเพาะชนิด (Specific sources) ซึ่งกระบวนการผลิตเหล็กกล้าปฐมภูมิ คือ การผลิตเหล็กกล้าจากการถลุงแร่เหล็ก ในประเทศไทยยังไม่มีโรงงานที่ผลิตเหล็กกล้าโดยวิธีการถลุงแร่เหล็ก มีแต่โรงงานที่ผลิตเหล็กโดยวิธีการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นการผลิตเหล็กทุติยภูมิ จากการพูดคุยกับผู้เชี่ยวชาญทางด้านโลหะการพบว่า ข้อกำหนดข้างต้นนี้ได้ครอบคลุมถึงกากตะกอนจากขั้นตอนหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าด้วย ดังนั้น กากตะกอนเหล่านี้ จึงต้องได้รับการจัดการตามภาคผนวกที่ 2 ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ในปัจจุบัน จากข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรมพบว่า มีโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทยทั้งสิ้นจำนวน 417 โรงงาน ในจำนวนนี้เป็นโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กเส้น 54 โรงงาน โดยมีโรงงานที่มีเตาหลอมจำนวน 7 โรงงาน ซึ่งทั้ง 7 โรงงาน มีกำลังการผลิตรวม 755,000 ตันต่อปี ซึ่งในขั้นตอนการหลอมเหล็กจะเกิดกากตะกอนประมาณร้อยละ 6 ของปริมาณการผลิต คิดเป็นปริมาณกากตะกอนทั้งสิ้น 45,300 ตันต่อปี หรือคิดเป็นอัตราการเกิดกากตะกอน 60 กิโลกรัม ต่อตันของปริมาณการผลิต

ในปัจจุบัน การจัดการกากตะกอนจากเตาหลอมเหล็กของโรงงานผลิตเหล็กเส้น ทำโดยการนำกากตะกอนนี้ไปกองทิ้งไว้ในที่ว่างเปล่า หรือนำเอาไปถมที่ ซึ่งการทิ้งในลักษณะเช่นนี้จะก่อให้เกิดปัญหาการแพร่กระจายของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมตามมา การกองทิ้งไว้มาก ๆ นาน ๆ กากตะกอนเหล่านั้น ก็จะเริ่มผุกร่อน ทำให้สารประกอบโลหะหนักต่าง ๆ ถูกลมพัดฟุ้งกระจาย ในที่สุดก็ตกลงสู่พื้นดิน และแหล่งน้ำ ซึ่งเป็นวงจรอาหารที่สำคัญของมนุษย์ หรือเมื่อฝนตกก็จะชะ สารเคมี เกลือโลหะหนัก ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส สารอาหาร และโลหะหนักลงสู่ชั้นน้ำบาดาล ซึ่งเป็นทรัพยากรน้ำที่สำคัญ ในการผลิตน้ำประปา หรือน้ำอุปโภค บริโภคของมนุษย์และสัตว์ และเป็นแหล่งน้ำที่สำคัญของพืช โลหะหนักเหล่านี้ ก็จะเริ่มส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เริ่มสะสมในวงจรอาหารของมนุษย์ เมื่อมนุษย์กินอาหารที่มีโลหะหนักเหล่านี้ปนเปื้อน ก็จะเริ่มสะสมในร่างกาย เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และเกิดโรคร้ายต่าง ๆ และหากเป็นการปนเปื้อนอย่างรุนแรง และสะสมนาน ก็จะมีผลต่ออายุขัยเฉลี่ยของคนในชุมชนนั้น ๆ ในที่สุด การนำกากตะกอนไปถมที่ก็จะทำให้โลหะหนักถูกน้ำชะละลายออกมาปนเปื้อนกับน้ำบาดาล

และสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาเกี่ยวกับการปลูกพืชบนหลุมฝังกากตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก ในประเทศออสเตรเลีย โดย W.Punz พบว่า กากตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก มีผลกระทบทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในดินชั้นล่าง และทำให้เกิดการขาดสารอาหาร และน้ำอย่างรุนแรง

แนวทางการจัดในต่างประเทศ จะทำโดยการทำเสถียรกากตะกอน หรือทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ หรือปูนขาว เพื่อให้โลหะหนักกลายเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ที่ไม่ละลายน้ำ หรือให้ผลึกซีเมนต์หุ้มสารพิษไว้ ไม่ให้มีโอกาสถูกน้ำชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย

พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับกิจการอุตสาหกรรม ได้กำหนดให้ การขออนุญาตตั้งหรือขยายอุตสาหกรรมถลุงแร่ หรือหลอมโลหะ ผู้ประกอบการจะต้องทำรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม เสนอต่อสำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อมด้วย เพื่อขอความเห็นชอบก่อนจัดตั้งโรงงาน

3.4 การบำบัดและกำจัดของเสียอันตราย (Hazardous Waste Treatment and Disposal)

การบำบัดของเสียอันตราย หมายถึง การจัดการกับของเสียอันตราย เพื่อลดความเป็นพิษ และทำให้มีสมบัติทั้งทางด้านกายภาพและเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดขั้นสุดท้ายต่อไป ทั้งนี้วิธีการบำบัดของเสียอันตราย อาจแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ

1. การบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) เป็นการแยกของแข็งและของเหลวออกจากกัน ซึ่งประกอบด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ การดูดซับด้วยคาร์บอน การกลั่น การเหวี่ยง โดยแรงหนีศูนย์กลาง และการตกตะกอน

2. การบำบัดทางเคมี (Chemical treatment) เป็นวิธีการทำลายฤทธิ์ของของเสียอันตราย ซึ่งประกอบด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ การทำสะเทิน การบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชัน การบำบัดด้วยวิธีรีดักชัน การตกตะกอนผลึก และการแลกเปลี่ยนประจุ

3. การบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment) ของเสียอันตรายที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ สามารถใช้การบำบัดทางชีวภาพได้ ซึ่งประกอบด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ แอคติเวเต็ดสลัดจ์ การย่อยสลายแบบแอนแอโรบิก การทำปุ๋ย ทั้งนี้หากมีปริมาณของเสียมากหรือมีสารที่เป็นพิษต่อระบบชีวภาพ ต้องทำการบำบัดก่อนที่จะใช้วิธีทางชีวภาพ

การกำจัดของเสียชนิดต่าง ๆ มีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับประเภทของเสียนั้น ๆ เช่น การกำจัดโดยนำไปทิ้งทะเล เมาในเตาเผา ฝังกลบ และอัดลงในชั้นมาดาล ทั้งนี้ของเสียนั้น ๆ จะต้องผ่านการบำบัดก่อน เพื่อให้มีความเหมาะสมในการกำจัดขั้นสุดท้าย (Rijal, 1990 อ้างจาก Cassell และ Walker, 1970)

ซึ่งการบำบัดแล้วฝังกลบ เป็นวิธีการที่ใช้กำจัดของเสียอันตราย ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย (Rijal,1990 อ้างจาก Peters,1987)

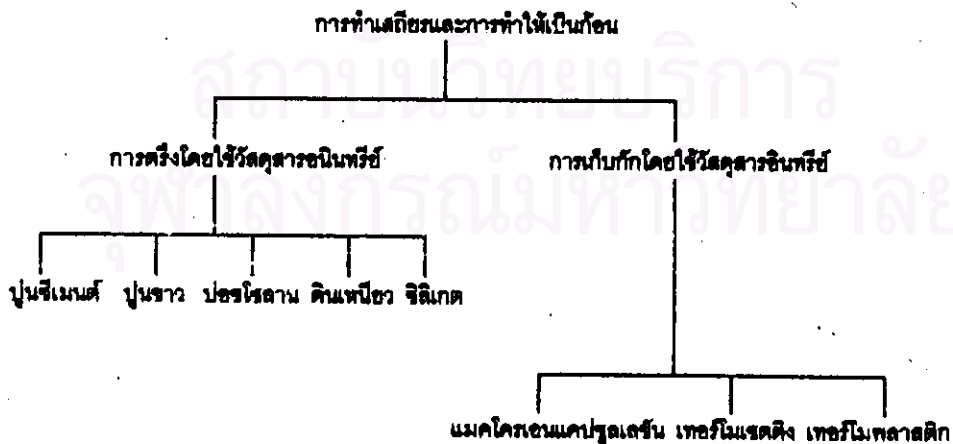
3.5 การทำเสถียรของเสียอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน (Solidification of Hazardous Wastes)

3.5.1 คำจำกัดความและที่มาของการทำให้เป็นก้อน

การทำเสถียร (Stabilization) หมายถึง กระบวนการในการลดความเป็นพิษของกากของเสีย โดยการเปลี่ยนรูปร่างเคมีของของเสีย ให้มีรูปแบบที่เสถียรยิ่งขึ้น ซึ่งอาจรวมถึง การสร้างสารประกอบที่ไม่ละลาย ซึ่งดักจับสารพิษเอาไว้ในโครงสร้างของผลึกที่เสถียร (Sollars และ Perry,1989 อ้างจาก Wiles,1987)

การทำให้เป็นก้อน (Solidification) เป็นกระบวนการซึ่งนำวัสดุประสานมาเติมลงในของเสีย ซึ่งของเสียนั้นอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือตะกอน แล้วทำให้กากของเสียนั้นเป็นก้อนแข็งมีคุณสมบัติทางกายภาพดีขึ้น สามารถเคลื่อนย้ายขนส่งได้สะดวก ในระหว่างการทำให้เป็นก้อนมักเกิดการทำให้เสถียรพร้อมกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น โดยสารมลพิษถูกทำให้เสถียรและถูกจับดักไว้ในโครงสร้างโมเลกุลของก้อนมวลแข็งที่แข็งตัว (Sollars และ Perry,1989 อ้างจาก Wiles,1987) ดังนั้น การทำให้เป็นก้อนจึงเป็นทั้งการบำบัดกายภาพและการบำบัดทางเคมี

Sollars และ Perry (1989) กล่าวว่า การทำให้เสถียรและการทำให้เป็นก้อน สามารถแบ่งได้อย่างกว้าง ๆ คือ การตรึงโดยใช้วัสดุสารอนินทรีย์ (Inorganic fixation) และการเก็บกักโดยใช้วัสดุสารอินทรีย์ (Organic encapsulation) ซึ่งจะแบ่งกระบวนการทั้ง 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การแบ่งกระบวนการทำให้เสถียรและการทำให้เป็นก้อน (Sollars และ Perry,1989)

วิธีการเก็บกักโดยวัสดุสารอินทรีย์ (Organic encapsulation) ทำโดยการใช้วัสดุประเภท เทอร์โมพลาสติก หรือออร์แกนิกโพลีเมอร์ มาห่อหุ้มของเสียเพื่อเก็บกักสารพิษมิให้หลุดออกมา วิธีนี้จะใช้ในกรณีเฉพาะเมื่อมีความจำเป็น และไม่คำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย เช่น การกำจัดของเสียที่เป็นกัมมันตภาพรังสี เพราะวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูง อันเนื่องมาจากราคาค่าวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ มีราคาแพง และต้องใช้พลังงานสูงมาก ส่วนวิธีการตรึงโดยใช้วัสดุสารอนินทรีย์ (Inorganic fixation) จะประยุกต์ใช้กับของเสียอนินทรีย์ โดยเฉพาะของเสียที่ประกอบด้วย โลหะที่มีประจุบวก

การทำให้เป็นก้อนถูกออกแบบขึ้นมา เพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้ (Cheng และ Bishop, 1992 อ้างจาก Cullinane และ คณะ, 1986)

1. ปรับปรุงลักษณะสมบัติทางกายภาพของของเสียและสามารถขนส่งได้สะดวก
2. ลดพื้นที่ผิวของของเสีย ซึ่งก็คือ การลดการแพร่กระจายออกไปของสารพิษ
3. จำกัดความสามารถในการละลายขององค์ประกอบที่เป็นพิษในของเสีย

การทำให้เป็นก้อนมีการใช้วิธีการต่าง ๆ 7 วิธี คือ วิธีการใช้ปูนซีเมนต์ (Cement-based techniques) วิธีการใช้ปูนขาว (Lime-based techniques) วิธีการใช้เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic techniques) โดยใช้วัสดุประเภทบิทูเมน พาราฟิน หรือโพลีเอทิลีน วิธีการใช้ออร์แกนิกโพลีเมอร์ (Organic polymers) วิธีการเอนแคปซูเลชัน (Encapsulation) วิธีการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งตัวเหมือนซีเมนต์ (Self-cementing techniques) วิธีการหลอมให้เป็นแก้ว (Glassification) (Bishop, 1988 อ้างจาก U.S. EPA) รายละเอียดของแต่ละกระบวนการแสดงในตารางที่ 3.2

Shuckrow และคณะ (1982) ได้สรุปข้อดี และข้อเสียของการทำให้เป็นก้อน ทั้ง 7 วิธีการ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ในการศึกษาการทำเสถียรภาคตะก้นจากเตาหลอมเหล็ก จะใช้วิธี Cement-based techniques เพราะมีข้อดี คือ วัสดุที่ใช้หาได้ง่าย มีราคาถูก และสามารถกำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดีมาก แต่ข้อเสียก็คือ เพิ่มน้ำหนักและปริมาณของเสียทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งและฝังกลบเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 แสดงกระบวนการกำจัดของเสียอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน (Engineering – Science, 1989)

กระบวนการการทำให้เป็นก้อน (Solidification Process)	รายละเอียด
1. Cement Based	ของเสียจะถูกผสมลงไปในซีเมนต์ น้ำ และส่วนผสมอย่างอื่น ๆ และปล่อยให้แห้งจนแข็งตัวเป็นก้อนซีเมนต์
2. Pozzolanic (Lime Based)	ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาว และวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย, ผงซีเมนต์ที่เผาเผา เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งตัวได้เมื่อผสมน้ำแล้วปล่อยให้แห้งตัว
3. Thermoplastic	นำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น Bitumen, Paraffin หรือ Polyethylene ปล่อยให้ส่วนผสมเย็นตัวลงและแข็งตัว
4. Organic Polymer	ของเสียในขั้นแรกจะถูกผสมกับสารโพลิเมอร์ (Gelli agents หรือ Urea formaldehyde) และเติมสารคะตะลิสต์ผสมให้เข้ากันก่อนที่โพลิเมอร์แข็งตัว
5. Surface Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวแน่น แล้วเคลือบผิวของของเสียที่ถูกบดด้วยสารเชื่อม เช่น Polyethylene หรือ Organic resins
8. Self-cementing	สารที่มีคุณสมบัติเป็นซีเมนต์ เช่นแคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมซิลิไฟต์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สามารถนำมาใช้ผสมกับกากตะกอนของเสีย เพื่อหล่อให้แข็งตัวได้ โดยวัสดุที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย และมีความสามารถให้น้ำซึมได้น้อย
7. Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics	สารที่เป็นอันตรายมาก เช่น ทากกัมมันตรังสี สามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็นส่วนผสมของแก้วหรือ Synthetic Silicate Mineral เพื่อป้องกันการไม่ให้สารอันตรายนี้ถูกชะล้างด้วยน้ำ สามารถนำไปกำจัดต่อไปโดยไม่มีกระบวนการหุ้ม หรือบรรจุครั้งที่ 2

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทำให้เป็นก้อนในแง่วิธีการ (Stuckow และ คณะ 1982)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Cement and Silicate Based Solidification/Fixation	Chemical Fixation/ Solidification	แฉกหรือเมือก (โดยทั่วไปเหมาะสำหรับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ราคาถูก - มีความยืดหยุ่นต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี - กำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดีมาก - เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาอย่างดีแล้ว 	<ul style="list-style-type: none"> - สารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการก่อตัวของคอนกรีต - ส่วนผสมของซีเมนต์ และการของเสียที่ไม่ได้ก่อตัวสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะละลายได้ ภายใต้ภาวะที่มีพีเอชต่ำ - ต้นทุนค่าหนักและปริมาณของเสียทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งและฝังกลบเพิ่มขึ้น
2. Lime Based Solidification/Fixation	Chemical Fixation/ Solidification	แฉกหรือเมือก (เหมาะสำหรับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ราคาถูก - เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาอย่างดีแล้ว - การใช้มีค่าออกมาเป็นส่วนผสม เป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิด โดยกระบวนการเดียวกัน 	<ul style="list-style-type: none"> - ผสมผสานกับกระบวนการประเภท Cement Based
3. Thermoplastic Based Solidification/Fixation	Physical Fixation	แบบแข็ง (เหมาะสำหรับสารอินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีได้เป็นอย่างดี - สารละลายที่ระเหยง่ายมีผลต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความเชี่ยวชาญ - ของเสียชนิดเมือกลดประสิทธิภาพของกระบวนการ - ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวก Strong Oxidants, dehydrated salts
4. Organic Polymer Process	Physical Fixation	แบบแข็งหรือเมือก (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิดโครงสร้างของโพลีเมอร์ - ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นต่ำลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียถูกยึดไว้ในโพลีเมอร์อย่างหลวม ๆ - สารที่มีพิษต่ำจะทำไปโดยละลายออกมา - การย่อยสลายทางชีวของสารโพลีเมอร์บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ

ตารางที่ 3.3 (ต่อ) เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทำให้เป็นก้อนในแต่ละวิธีการ (Shuckrow และ คณะ 1982)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
5. Encapsulation	Chemical Containment	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> - ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถบดจนกินน้ำได้ดี - ไม่มีการระเหยของของเสียออกมาเมื่อสารที่จับอยู่ไม่ถูกทำลาย - ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีการอื่น ๆ 	<ul style="list-style-type: none"> - การระเหยของของเสียจะเกิดขึ้นหากสารที่จับถูกทำลาย - 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 - ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการจับกันสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะล้างได้ภายใต้ภาวะที่มีพีเอชต่ำ
7. Classification (Vitrification)	Physical Fixation	แบบแห้ง	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียที่ถูกหลอมด้วย แก้วจะถูกชะละลายได้น้อยมาก - การบรรจุอยู่ในภาชนะได้ - ใช้วัสดุที่มีราคาถูก 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิสูงอาจทำให้องค์ประกอบของเสียระเหยออกมาก่อนที่จะถูกตรึงไว้ - ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับการให้ความร้อน อุปกรณ์มีราคาแพงและต้องการผู้ชำนาญงานเฉพาะ - ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการกำจัดของเสียทุกชนิด ยกเว้นสารกัมมันตรังสีและสารที่มีพิษมาก ๆ

3.5.2 การทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ (Cement-based technique)

การทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ส่วนใหญ่จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน ทั้งนี้ อาจมีการใช้วัสดุประสานเดิมเพิ่มประสิทธิภาพบางประเภท เช่น ฝ้าลอยลิกไนต์ ซิลิเกตซิลไฟด์ เป็นต้น เพื่อช่วยเสริมประสิทธิภาพในการทำให้แข็งตัวและยึดจับความเป็นพิษ โดยของเสียที่เป็นของเหลว หรือของเหลวในสัจจะจะเป็นส่วนหนึ่งของน้ำในปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเมื่อเจลโตขึ้น และเกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งตัว ในภาวะแวดล้อมที่เป็นต่างสูงของซีเมนต์เพสต์ มีผลทำให้โลหะหนักในของเสียเปลี่ยนแปลงเป็นโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซิลิเกตที่ไม่ละลาย และถูกจับติดอยู่ภายในโพรงของเนื้อซีเมนต์ โลหะบางชนิดอาจถูกกักอยู่ภายในโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อนของซีเมนต์ (Bishop, 1988)

3.5.2.1 สารเจือปนที่เป็นอุปสรรคต่อการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์

สารเจือปนหลายประเภทที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์

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

สารประกอบบางชนิด เช่น เกลือของแมงกานีส ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี มีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น และกำลังรับแรงยึดเปลี่ยนแปลงไป เกลือโซเดียม เช่น อารีซีเนต โบเรต ฟอสเฟต ไฮโอเดต และซิลไฟด์ มีผลหน่วงการแข็งตัวของซีเมนต์

สารประกอบประเภทซัลเฟต มีผลหน่วงการแข็งตัวของซีเมนต์ นอกจากนี้ยังจะทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เกิดเป็นยิปซัม และสารประกอบซัลโฟลูมิเนต (Sulfoaluminate compound) ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวของวัสดุสาร ยังผลให้ก้อนวัสดุแตกสลายได้ (วัชพล, 2538 อ้างจาก Thompson และคณะ, 1979)

ของเสียที่เป็นอันตรายที่มีประจุ เช่น โซเดียมไนต์ ไครเมต และอารีซีเนต จะต้องทำการบำบัดก่อนหน้าการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ (Rijal, 1990 อ้างจากรายงานของ Barnes และ คณะ, 1979)

Sollars และ Perry กล่าวถึงประเภทของของเสียที่ไม่เหมาะสม สำหรับการบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตาราง 3.4 ประเภทของของเสียที่ไม่เหมาะสม ในการทำเสถียรและทำให้เป็นก้อน (Sollars และ Perry,1989)

ประเภทของของเสีย	เหตุผลที่ไม่สมควรใช้
1. ของเสียอินทรีย์ 1.1 มีส่วนประกอบแก๊สที่ละลายได้สูงมาก 1.2 มีส่วนประกอบสารพิษประจุลบสูงมาก เช่น โบเรต 1.3 มีส่วนประกอบของสารหน่วงการก่อตัวของซีเมนต์ เช่น ซิลิเกต ในปริมาณที่มาก 1.4 ผลตกตะกอนที่เป็นพิษ 1.5 ผลิตภัณฑ์เมื่อสัมผัสกับน้ำหรือด่าง เช่น โดเดคาไรโบต	มีผลต่อการก่อตัวของซีเมนต์ สามารถระเหยละลายได้ง่ายกว่าพวกประจุบวก มีผลต่อการกำลักรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เป็นอันตรายต่อสุขภาพ เป็นอันตรายต่อสุขภาพ
2. ของเสียอนินทรีย์ 2.1 มีวัสดุที่ติดไฟ หรือเกิดระเบิดได้ 2.2 มีสารประกอบพวงขาด่างแอมมอเนีย 2.3 มีสารประกอบที่หน่วงการก่อตัว เช่น น้ำตาล	เป็นอันตรายต่อสุขภาพ สามารถระเหยละลายออกมาได้ง่าย มีผลต่อการกำลักรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้

3.5.2.2 ข้อดีและข้อเสียของการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์

ข้อดีของการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ มีดังนี้

1. สารที่เติมในส่วนผสมทำได้ง่ายในราคาที่สมเหตุสมผล
2. เทคนิคการผสมซีเมนต์ได้มีการพัฒนาอย่างดี
3. อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทำได้โดยทั่วไป
4. ใช้กับของเสียที่มีสมบัติแปรเปลี่ยนได้เป็นอย่างดี
5. สามารถควบคุมคุณภาพความแข็งแรง หรือลดความชื้นได้ของผลิตภัณฑ์ โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม

ข้อเสียของการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ สรุปได้ดังนี้ คือ

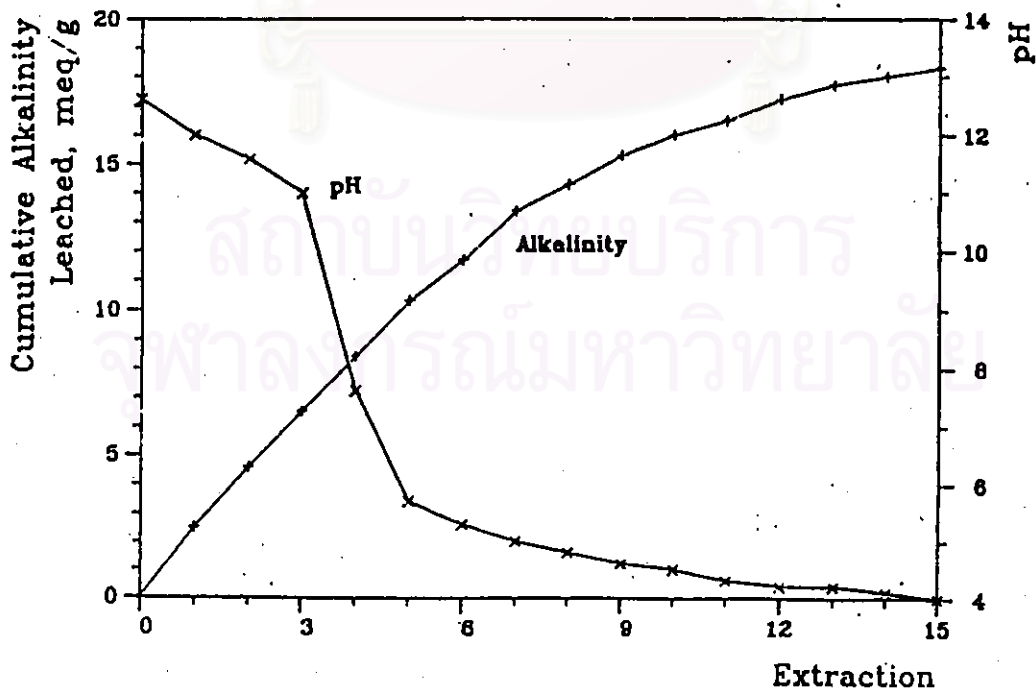
1. ผลิตภัณฑ์ที่มีกำลังรับแรงอัดต่ำอาจถูกชะละลายได้โดยสารละลายที่เป็นกรด
2. การบำบัดก่อนอาจจำเป็นต้องทำในกรณีของเสียมีสารเจือปนที่มีผลต่อการก่อตัวของซีเมนต์
3. ปูนซีเมนต์และสารที่เติมในส่วนผสมทำให้เกิดการเพิ่มขนาดและน้ำหนักของของเสีย

3.5.3 กลไกการยึดจับโลหะหนัก (Heavy Metal Binding Mechanisms)

Bishop ศึกษากลไกการยึดจับโลหะหนักจากกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ โดยใช้โลหะหนักสังเคราะห์เป็นโลหะหนักไฮดรอกไซด์ ของแคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

3.5.3.1 ความจุบัฟเฟอร์ (Waste Form Buffering Capacity)

จากการทดสอบการสกัด 15 ครั้ง โดยใช้วิธีการสกัดสารของ U.S.EPA ผลการตรวจวัดพีเอชและความเป็นด่าง เขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3.4 จากกราฟพบว่า ความเป็นด่างสะสมมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนครั้งของการสกัด โดยที่ความเป็นด่างในการสกัดครั้งที่ 15 มีค่าเพียงร้อยละ 1.7 ของความเป็นด่างสะสมทั้งหมดตลอดการสกัดในครั้งที่ผ่านมา ซึ่งแสดงว่า อาจจะมีความเป็นด่างเพียงเล็กน้อยที่เหลือค้างอยู่ในอนุภาค ความเป็นด่างสะสมของการสกัดทั้ง 15 ครั้ง มีค่าประมาณ 18.3 มิลลิสมมูล/กรัม ซึ่งถือว่าเป็นค่าความจุบัฟเฟอร์ของของเสียที่ทำให้เป็นก้อน ความเป็นด่างที่ถูกสกัดออกมาจากของเสียที่ถูกทำให้เป็นก้อน จะเป็นตัวควบคุมพีเอชของน้ำที่ผ่านการสกัด น้ำสกัดก่อนที่จะใช้สกัดอนุภาคของของเสียมีค่าพีเอช 3.4 ในการสกัด 3 ครั้งแรก น้ำสกัดที่เป็นกรดจะถูกสะเทินให้เป็นกลาง โดยมีค่าพีเอชสูงเกิน 10 ในการสกัด 3 ครั้งต่อมา น้ำสกัดมีค่าพีเอชต่ำกว่า 6 พีเอชของการสกัดอีก 9 ครั้งต่อมา ลดลงอย่างสม่ำเสมอจนมีค่าประมาณ 4 ความเป็นด่างที่ถูกสกัดออกมามีค่าลดลงในการสกัดทุกครั้ง



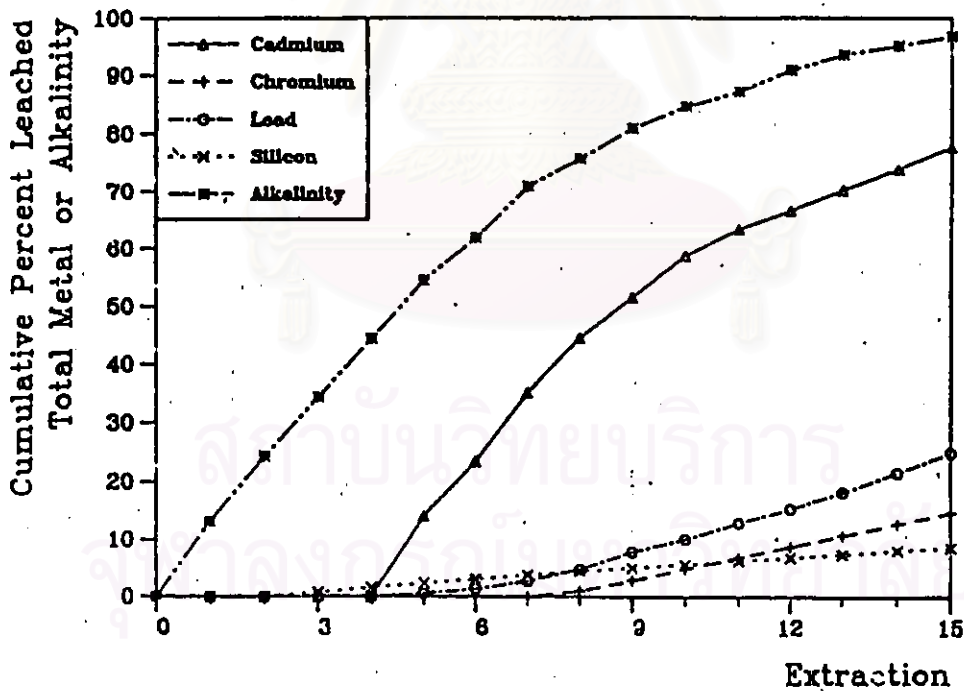
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงพีเอชและความเป็นด่างสะสมจากการสกัด 15 ครั้ง (Bishop, 1988)

3.5.3.2 การยึดจับโลหะหนัก

จากการทดลองที่ผ่านมาหลายครั้งทำให้ทราบว่า โลหะหนักอาจอยู่ในโพรงของโครงสร้างของเสี้ยที่แข็งตัว ดูดติด (Adsorption) บนผนังโพรง และทำปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อนกับสารประกอบของซีเมนต์เพสต์

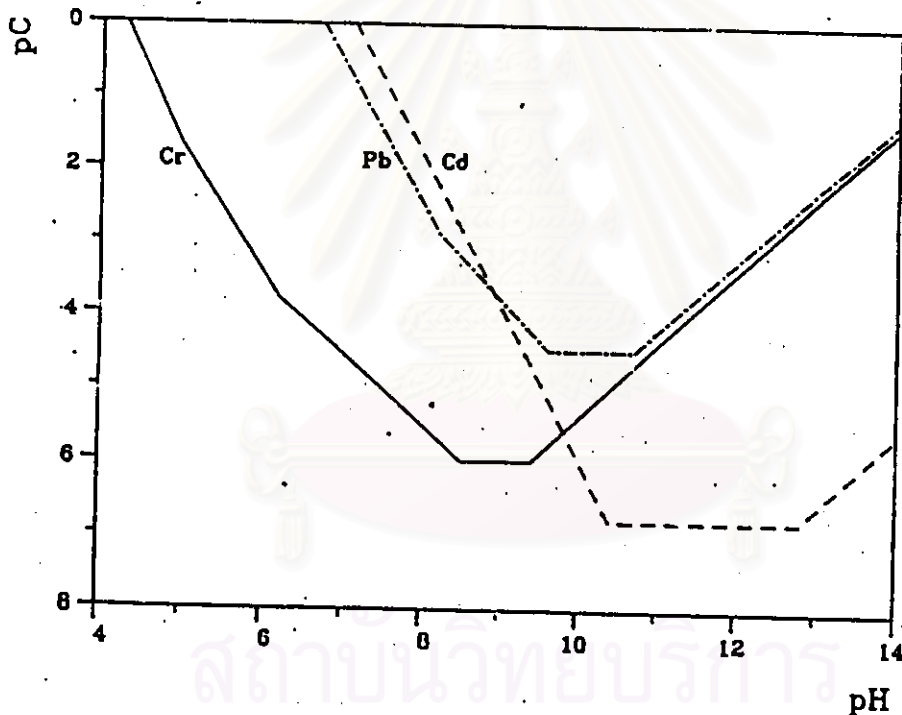
ถ้าโลหะหนักถูกติดไปในโครงสร้างแข็งในโพรง หรือถูกดูดติดบนพื้นผิวโพรงโลหะหนักเหล่านั้น ควรถูกชะละลายออกคล้ายกับการชะละลายของความเป็นต่าง จากรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่า มีความคล้ายคลึงกันของเส้นกราฟความเป็นต่างสะสม และแคดเมียมสะสม ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่า แคดเมียมควรอยู่ในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ และเกาะติดอยู่ตามผนังโพรง

โครเมียมและตะกั่ว น่าจะถูกยึดติดอยู่ในโครงสร้างของซิลิกามากกว่าอยู่ในโพรง ถ้าเป็นดังที่กล่าวไว้ โลหะหนักเหล่านี้ควรถูกชะละลายออกมา เมื่อโครงสร้างของซิลิกาถูกทำลาย และจากรูปที่ 3.5 พบว่า เส้นกราฟสะสมของโครเมียมและตะกั่วคล้ายกับของซิลิกอน ดังนั้นโครเมียมและตะกั่ว ควรอยู่ในรูปซิลิเกตที่ไม่ละลายมากกว่าที่จะอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสะสมที่โลหะหนักถูกชะละลาย ความเป็นต่าง ถูกชะละลาย และซิลิกอนถูกชะละลาย จากการสกัด 15 ครั้ง (Bishop, 1988)

รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพ pC-pH สำหรับไฮดรอกไซด์ของตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม ในสารละลายที่มีค่ากำลังประจุ (Ionic strength) 0.75 โมลาร์ ในขณะที่เริ่มผสมซีเมนต์ ที่เฮกซ์สูงของซีเมนต์พลัสประมาณ 11-12 ทำให้โครเมียมและตะกั่วอยู่ในรูปละลาย และกลายเป็นส่วนหนึ่งของปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ ซึ่งเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิเกต สำหรับแคดเมียมอยู่ในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นของแข็งที่ค่าที่เฮกซ์ของนี้ และไม่มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการแข็งตัว จึงถูกดูดซับในรูปพูน จากสาเหตุดังกล่าวนี้ จึงอธิบายได้ว่า โครเมียมและตะกั่วถูกชะละลายออกมา โดยขึ้นกับการละลายของซิลิเกต สำหรับแคดเมียมถูกชะละลายออกมาตามการชะละลายของความเป็นต่าง



รูปที่ 3.6 แผนภาพ pC-pH สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว (Bishop, 1988)

3.6 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้ว สามารถแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าว เรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration)

3.7 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในรูปของออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชีวารลย์, 2536)

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 – 67
SiO ₂	17 – 25
Al ₂ O ₃	3 – 8
Fe ₂ O ₃	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 – 5.5
Na ₂ O + K ₂ O	0.5 – 1.3
TiO ₂	0.1 – 0.4
P ₂ O ₆	0.1 – 0.2
SO ₃	1 – 3

ออกไซด์หลัก จะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ซีรเวลล์, 2536)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ดิแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

ในงานวิจัยนี้จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง (Ordinary Portland cement) เป็นวัสดุประสาน เพราะหาได้ง่าย ราคาไม่แพง มีคุณสมบัติในการยึดเกาะทำให้เป็นก้อนแข็งได้ดี และจากการศึกษาที่ผ่านมานิยมใช้ ในการทำเสถียรโลหะหนัก โดยทำให้เป็นก้อนแข็ง

3.8 ปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ (Hydration of Cement)

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำก็จะเริ่มขึ้น เรียกปฏิกริยานี้ว่า ไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งผลให้เกิดความเหนียว และเกาะแน่นกับวัสดุผสม

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมรวมกันกับน้ำ จะได้ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) มีลักษณะนุ่มเหลว บั้นง่าย การทำปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ จะหยุดเมื่อน้ำหนีออกเพสต์ทั้งหมดแล้ว

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกริยานี้ เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

1) อนุภาคละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด ions ในสารละลายและ ions นี้จะผสมกัน ทำให้เกิดสารประกอบใหม่อื่น

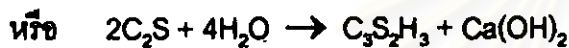
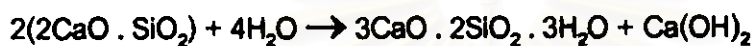
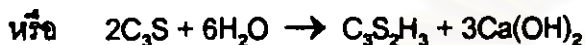
2) การเกิดปฏิกริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกริยา ประเภทนี้เรียกว่า "Solid State Reaction"

ปฏิกริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S)

คัลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน และสมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

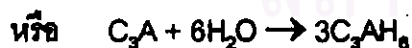
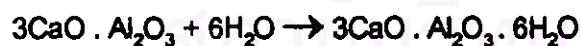


จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิด Gel ซึ่งเมื่อแห้งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ และมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทน Calcium Silicate Hydrate ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

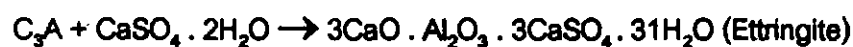
$Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือ มี p.H. ประมาณ 12.5

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ



เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิบซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เข้าไปในระหว่างขั้นตอนการบดซีเมนต์ ยิบซั่มจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค ดังสมการ



ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียม อลูมิโนเฟอไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้เกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิบซัม และ $Ca(OH)_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการ

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + CaSO_4 \cdot 2H_2O + Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaO(Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3) \cdot 3CaSO_4$$

3.9 ปูนขาว

ปูนขาวเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาหินปูน จนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์แยกตัวออกมา ประเภทของปูนขาวขึ้นกับส่วนประกอบของหินปูน และขั้นตอนการเผา ถ้าหินปูนถูกเผาอย่างสมบูรณ์ ปูนขาวที่ได้ก็เป็นพวกปูนขาวดิบ (Quick lime) แต่ถ้าได้รับความชื้น องค์ประกอบออกไซด์จะรวมตัวกับน้ำ กลายเป็นรูปของไฮดรอกไซด์ ซึ่งเรียกว่า ปูนขาวสุก (Hydrated lime) ตามท้องตลาดปูนขาวดิบ มีส่วนประกอบแคลเซียมออกไซด์ประมาณร้อยละ 61.1 และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 24 สำหรับปูนขาวดิบ มีเฉพาะแคลเซียมไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 81.6

สำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้ปูนขาวเป็นวัสดุผสมเพิ่ม เพื่อลดปริมาณของปริมาณของปูนซีเมนต์ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ปูนขาวมีความสามารถในการยึดเกาะโลหะหนักไม่ให้ถูกชะละลายออกมาได้ (รักษพล,2538)

3.10 โซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate)

โซเดียมซิลิเกต หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า น้ำแก้ว (Water glass) มีรูปอื่น เช่น Sodium metasilicate anhydrous, Sodium metasilicate pentahydrate, Sodium sesquisilicate, Sodium orthosilicate โดยมีสูตรแปรผันได้หลายสูตรตั้งแต่ $Na_2O \cdot 3.75 SiO_2$ ถึง $2Na_2O \cdot SiO_2$ และแปรผันกับสัดส่วนต่าง ๆ ของน้ำที่ผสมอยู่

ลักษณะสมบัติ ลักษณะเป็นก้อนแก้วสีออกเขียว ละลายได้ในไอน้ำที่มีแรงดัน เป็นผงสีขาว ที่มีความสามารถในการละลายได้แตกต่างกันหลายระดับ หรือเป็นของเหลวสีขุ่นหรือใสและมีสภาพเป็นของเหลวไหลง่าย จนถึงของเหลวที่มีความหนืด (viscosity) สูง โดยมีความหนืดตั้งแต่ 0.4 – 600,000 poises มีจุดแข็งตัวต่ำกว่าน้ำเล็กน้อย สามารถรวมตัวได้กับ Polyhydrate alcohol บางตัว รวมตัวได้บ้างกับ primary alcohol และ ketones รวมตัวกับกรดระหว่าง pH 3–9 เป็น gels สามารถ

coagulate โดยน้ำเกลือ สามารถตกตะกอนโดย alkaline earth และไอออนของโลหะหนัก ไม่ถูกไหม้ และมีความเป็นพิษต่ำ

การทำไซเดียมซิลิเกต ใช้ทรายที่หลอมตัวและโซดาแอช

การใช้งาน เป็นคะตะลิสต์ และ silica gels ในการทำสบู่และผงซักฟอก เป็น adhesive โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการ sealing และ laminating กล่องกระดาษ ore treatment การทำให้ดินเป็นก้อนแข็ง glass foam เป็น binder สำหรับทำ mold หล่อโลหะ ทำ mortar และ cement กั้นน้ำ (Hawley, 1981)

การใช้ไซเดียมซิลิเกตเป็น Additive ในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากไซเดียมซิลิเกตมีคุณสมบัติใช้ในการทำให้วัสดุที่มีสภาพคล้ายดิน (soil - like) เปลี่ยนเป็นสภาพคล้ายคอนกรีต (concrete - like) มีลักษณะเป็นก้อนแข็ง รับน้ำหนักได้มาก (Poon และ คณะ, 1983 อ้างจาก U.S. EPA) นอกจากนี้การเติมไซเดียมซิลิเกตหรือสารผสมเพิ่มประเภทซิลิเกต ในกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ ทำให้เพิ่มและเร่งปฏิกิริยาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ (Poon และ คณะ, 1983) ซึ่งทำให้ลดการเยิ้ม (Bleeding) และการแยกตัวของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตแข็งตัวเร็วขึ้น และเพิ่มความหนาแน่นทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นส่งผลให้มีความทนทานสูง การซึมผ่านของน้ำและอากาศเป็นไปได้ยาก (ชัชวาล, 2536)

3.11 การทดสอบการชะละลาย (Leaching test)

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ได้กำหนดวิธีการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) และ การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ extraction fluid) ดังนี้

1. บดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูกรง 9.5 มิลลิเมตร

2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1.หนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด (Leachant) หรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic acid rain extraction fluid) ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนกว่าค่าความเป็นกรดต่างพีเอช (pH) ของส่วนผสม (Mixture) มีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง

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

4. กรองสารละลายจากการสกัด (Leachant) ด้วยแผ่นกรองใยแก้ว ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน

5. นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์หาค่าสารอันตรายต่าง ๆ ตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง

ในการวิจัยครั้งนี้ จะใช้วิธีการทดสอบการระละลายน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ในการทดสอบการระละลายนของก้อนตัวอย่าง

3.12 การประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็ง

วิธีการประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็ง ต้องมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์เบื้องต้นของการบำบัด ได้แก่ การปรับปรุงโครงสร้างของกากของเสียให้แข็งแรง เป็นก้อนแข็งลดพื้นที่สัมผัส และจำกัดการละลายได้ของสารมลพิษ เมื่อสัมผัสกับของเหลวที่มาชะล้าง (Sollars และ Perry, 1989)

Sollars และ Perry (1989) ได้รายงานลักษณะสมบัติที่ต้องการของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ด้วยวิธี Sealosafe จากโรงงานบำบัดของเสียที่เมือง West Thurrock ประเทศอังกฤษ แสดงดังตารางที่ 3.7 ซึ่ง Sealosafe เป็นเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นในประเทศอังกฤษ เมื่อปี ค.ศ. 1970 ใช้ในการบำบัดของเสียอันตราย โดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีการนี้ มีชื่อเรียกว่า Stablex

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ได้กำหนดสมบัติของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ดังนี้

1. สามารถรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-1633 และ D-2166 ได้ ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบ (Secured landfill) ได้อย่างปลอดภัย
2. มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
3. มีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ extraction fluid) เป็นไปตามเกณฑ์ในการสกัดสาร (Leachate extraction procedure)

ตารางที่ 3.7 ลักษณะสมบัติที่ต้องการของเสียอันตรายที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยวิธี Sealosafe
(Sollars และ Perry,1989)

ลักษณะสมบัติ	เกณฑ์กำหนด	ค่าเปรียบเทียบ
ความไม่ไหม้ได้ (28 วัน)	น้อยกว่า 1×10^{-7} ม./วินาที	ทราย: $1 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-6}$ ม./วินาที ดินตะกอน: $1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-7}$ ม./วินาที คอนกรีต: 1×10^{-8} ม./วินาที
กำลังรับแรงอัด (28 วัน)	มากกว่า 0.34 เมกกะนิวตัน/ตร.ม.	คอนกรีต: 30 เมกกะนิวตัน/ตร.ม. มอร์ตาร์: 20 เมกกะนิวตัน/ตร.ม. Grouts: 0.5 - 4 เมกกะนิวตัน/ตร.ม.
คุณภาพน้ำระเหย	พีเอช 8 - 11 COD น้อยกว่า 280 ก./ลบ.ม. Total CN น้อยกว่า 1 ก./ลบ.ม. Total Sulfide น้อยกว่า 5 ก./ลบ.ม. Total Phenol น้อยกว่า 5 ก./ลบ.ม. NH ₃ น้อยกว่า 40 ก./ลบ.ม. โลหะหนักที่เป็นพิษ: Zn น้อยกว่า 10 ก./ลบ.ม., Hg น้อยกว่า 0.5 ก./ลบ.ม.; อื่น ๆ (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Ba, Co, Mb, Sn, As, Se, Sb): น้อยกว่า 5 ก./ลบ.ม. ม. รวมทั้งหมด Pesticides น้อยกว่า 0.1 ก./ลบ.ม. Supernatant: ไม่มีหลังจาก 24 ชม.	- - - - - - - - - - - - -

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.13 เกณฑ์มาตรฐานในการระบุของเสียอันตราย

U.S. EPA (1992) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับของเสียที่สามารถนำไปฝังกลบโดยวิธีการทดสอบเรียกว่า Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ซึ่งวิธีการทดสอบมีดังนี้ สำหรับของเสียที่มีปริมาณของแข็งน้อยกว่าร้อยละ 0.5 กรองแยกของเหลวออกจากของแข็ง ด้วยกระดาษกรองใยแก้ว 0.6 – 0.8 ไมครอน นำของเหลวไปวิเคราะห์ และนำสภาวะของแข็งไปสกัดสาร

สารสกัดที่ใช้ มี 2 ชนิด ได้แก่

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

สารสกัดชนิดที่ 2 เป็นสารสกัดที่ได้จากการทำกรดเกลืออะซิติก 5.7 มิลลิลิตร ให้เจือจางโดยเติมน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตร

นำตัวอย่างของเสียชิ้นเล็ก ๆ 5 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตร แล้วกวนอย่างแรงเป็นเวลา 5 นาที

ถ้าพีเอชน้อยกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดแรก

ถ้าพีเอชมากกว่า 5 เติม 3.5 มิลลิลิตร ของกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล แล้วให้ความร้อน 500 °C เป็นเวลา 10 นาที เมื่อทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ถ้าพีเอชน้อยกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดแรก ถ้าพีเอชมากกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดที่ 2

นำตัวอย่างประมาณ 100 กรัม และใช้สารสกัดปริมาณ 20 เท่า ของน้ำหนักตัวอย่าง ถ้ามีสารระเหยง่ายต้องใช้ภาชนะบรรจุพิเศษ เพื่อป้องกันการระเหยของสารมลพิษอินทรีย์

เขย่าด้วยการหมุนรอบ 30 ± 2 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ± 2 ชั่วโมง

กรองแยกของเหลวออกจากของแข็ง ด้วยกระดาษกรองใยแก้ว 0.6 – 0.8 ไมครอน

นำของเหลวไปวิเคราะห์ค่าสารมลพิษ

ถ้าเป็นไปได้ให้นำของเหลวที่อยู่ในของเสียตุนแรก มาเติมรวมกับน้ำสกัด และทำการวิเคราะห์ของเหลวผสมรวมที่ได้ต่อไป

จากวิธีทดสอบหาปริมาณสารมลพิษในน้ำสกัด ถ้าความเข้มข้นของสารมลพิษที่ได้มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.8 ของเสียก็ถือว่าเป็นของเสียอันตราย

ตารางที่ 3.8 ค่ามาตรฐานของสารพิษต่าง ๆ จากการทดสอบด้วยวิธี TCLP (U.S. EPA, 1992)

สารพิษ	ระดับมาตรฐาน (มก./ล.)	สารพิษ	ระดับมาตรฐาน (มก./ล.)
อาร์เซนิก	5.0	Hexachlorobenzene	0.13
แบเรียม	100.0	Hexachlorobutadiene	0.5
เบรซิน	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	8.0	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	เซเลเนียม	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

สำหรับประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับสมบัติของสารพิษ (นำมาพิจารณาเฉพาะค่าโลหะหนัก) ซึ่งเมื่อนำมาทำการสกัดด้วยวิธีการสกัดสารและวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดแล้ว ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดเท่ากับหรือมากกว่าค่าใดค่าหนึ่งดังต่อไปนี้

อาร์เซนิก	มากกว่า	5	มก./ล.
แบเรียม	มากกว่า	100	มก./ล.
แคดเมียม	มากกว่า	1	มก./ล.
โครเมียม	มากกว่า	5	มก./ล.
ตะกั่ว	มากกว่า	5	มก./ล.
ปรอท	มากกว่า	0.2	มก./ล.

ซีลีเนียม มากกว่า 1 มก./ล.

เงิน มากกว่า 5 มก./ล.

บุญยง โสฬวงศ์วัฒน์ (2539) รายงานว่า กลุ่มประเทศสมาชิกยุโรป ได้พิจารณาแยกสมบัติของของเสียอันตราย ตามลักษณะของหลุมฝังกลบ โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. สำหรับฝังกลบของเสียอันตราย
2. สำหรับฝังกลบของเสียเฉื่อย (Inert waste)
3. สำหรับฝังกลบขยะชุมชน และของเสียไม่อันตราย

ทั้งนี้ ในการวิเคราะห์ตัวอย่างของเสีย จะต้องพยายามคงรูปเดิมให้ได้มากที่สุด หากเป็นชิ้นใดต้องบดให้เล็กลง แล้วทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน DIN 38414-S4 ซึ่งใช้น้ำกลั่นเป็นน้ำสกัดและจะต้องเขย่าโดยการหมุนครั้งละ 180° ต่อนาที นาน 24 ชั่วโมง แล้วเหวี่ยงแยกหรือกรองน้ำไตกับตะกอนด้วยผ้ากรอง 0.45 ไมครอน

หากผลการวิเคราะห์น้ำสกัด พบว่า น้ำสกัดมีค่าอยู่ในช่วงของเสียอันตราย ต้องนำไปฝังกลบสำหรับของเสียอันตราย สำหรับน้ำสกัดที่มีค่าสูงเกินกว่าช่วงค่าที่ระบุไว้ ของเสียนั้นต้องส่งไปทำลายฤทธิ์ ก่อนที่จะนำไปฝังกลบสำหรับกากของเสียอันตราย หากทำลายฤทธิ์ไม่ได้ จะต้องฝังในที่ออกแบบพิเศษ เพื่อเก็บชั่วคราว หรืออาจให้ฝังกลบปนกับที่ฝังกลบขยะชุมชน

น้ำสกัดที่มีค่าไม่เกินค่าสูงสุดของของเสียเฉื่อยตามที่ระบุไว้ ก็ถือเป็นของเสียเฉื่อย สามารถทิ้งหรือฝังได้ทั่วไป

น้ำสกัดที่มีค่าอยู่ระหว่างค่าของเสียเฉื่อยและค่าต่ำสุดสำหรับฝังในที่ฝังกลบของเสียอันตราย ให้อถือว่าเป็นของเสียที่ไม่อันตราย

ค่าสารมลพิษในน้ำสกัด ที่ถือว่าเป็นช่วงของของเสียอันตรายที่สามารถฝังกลบในหลุมฝังกลบแบบของเสียอันตราย และของเสียเฉื่อย ตามการจำแนกของกลุ่มประเทศสมาชิกยุโรป แสดงดังตารางที่ 3.9

จากการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานในการระบุของเสียอันตรายของ U.S. EPA. มีการกำหนดของเสียอันตรายที่เป็นโลหะหนักไว้ เท่ากับเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทย และระดับมาตรฐานของปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด ที่ระบุไว้ในเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทย จะมีค่าเท่ากับระดับมาตรฐานของ U.S. EPA.

สำหรับการพิจารณาแยกสมบัติของของเสียอันตราย ตามกลุ่มประเทศสมาชิกยุโรป มีการแยกประเภทเป็นของเสียอันตรายและของเสียเฉื่อย โดยแตกต่างจากเกณฑ์ของประเทศไทย ซึ่งมีแต่มาตรฐานกำหนดของเสียอันตรายเพียงอย่างเดียว ในเกณฑ์ระบุช่วงของเสียอันตรายของกลุ่มประเทศสมาชิกยุโรป มีการกำหนดสารมลพิษที่เป็นโลหะหนักไว้ มากกว่าเกณฑ์ของประเทศไทย และช่วง

ระดับมาตรฐานของปริมาณโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด (ที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบตามการศึกษานี้ ได้แก่ อาร์เซนิก, แคดเมียม, โครเมียม, ตะกั่ว,ปรอท) ในน้ำสก๊ิด ยังกำหนดไว้ต่ำกว่าเกณฑ์ของประเทศไทย

ตารางที่ 3.9 แสดงช่วงของของเสียอันตราย และของเสียเฉื่อย (บุญยง โทห้วงศรีวัฒน์, 2539)

สารมลพิษ	ช่วงของเสียอันตราย	ช่วงของเสียเฉื่อย
ตะกั่ว	0.4 – 0.2 มก./ล.	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> สารพิษทุกตัวรวมกัน ไม่มากกว่า → 5 มก./ล. และไม่มี สารพิษตัวใดตัวหนึ่ง เกินค่าที่ระบุไว้ </div>
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.	
ฟิเชอร์	4 – 13	4 – 13
อาร์เซนิก(+3)	0.2 – 1.0 มก./ล.	น้อยกว่า 0.1 มก./ล.
ฟีนอล	20 – 100 มก./ล.	น้อยกว่า 10 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 – 8.0 ก./ล.	น้อยกว่า 0.5 มก./ล.
ไซยาไนด์	0.2 – 1.0 มก./ล.	น้อยกว่า 0.1 มก./ล.
ซัลเฟต*	0.2 – 1.0 มก./ล.	น้อยกว่า 1.0 มก./ล.
ไนเตรต	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 มก. Cl/ล.
Pesticides***	1 – 5 มก. Cl/ล.	น้อยกว่า 0.5 มก. Cl/ล.
Lipoph Sub	0.4 – 2.0 มก./ล.	น้อยกว่า 1 มก./ล.

หมายเหตุ * = ถ้าเป็นไปได้น้อยกว่า 500 มก./ล.

** = Adsorbed organically-bound halogens

*** = Chlorinated

3.14 การศึกษาที่ผ่านมา

Shively และคณะ (1986) ได้ทำการศึกษากาการละลายของโลหะหนักที่ทำเสถียรด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสอง ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ดัดแปลงเพื่อให้ทนซัลเฟตได้ปานกลาง โลหะหนักที่ใช้ทดสอบมี 5 ตัว ได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผลรวมกัน โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง ที่ระยะเวลาปม 14 วัน และหาปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด (Sequential extractions) ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาปม 14 วัน ของก้อนตัวอย่าง ซึ่งทดสอบ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 และ 1.0 อาร์เซนิก และ แคดเมียม ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ตะกั่วมีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของก้อนตัวอย่าง ช้าลง แต่ตะกั่ว และ โครเมียม ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

2. ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด 15 ครั้ง น้อยกว่า ความเข้มข้นที่ทำนายจากความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ ประมาณ 100 ถึง 10,000 เท่า ลักษณะการละลายของโลหะหนัก แบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรก แคดเมียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ จะทำลายฤทธิ์ของกรดที่ใช้ในการสกัด ทำให้พีเอชสุดท้ายมากกว่า 10.0 และมีการละลายของสารในซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ช่วงที่สอง จะมีการละลายของโลหะหนักสูงที่สุด พีเอชลดลงเหลือน้อยกว่า 6.0 ช่วงที่สาม พีเอชยังคงน้อยกว่า 6.0 โลหะหนักที่มีความสามารถในการละลายต่ำ เริ่มที่จะละลายออกมา และโลหะหนักที่ละลายออกมาจากการสกัดแต่ละครั้ง สัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในของเสีย

Tay (1987) ได้ทำการศึกษากาการเติมซีเฝ้าจากการเผาผลาญลงไปปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต ซีเฝ้าจากการเผาผลาญได้มาจากการนำสัจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนมานำน้ำออกให้แห้ง ด้วยวิธี filter press แล้วนำสัจจาที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ ซีเฝ้าที่ได้จะถูกนำมาบด และจะนำซีเฝ้าที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมครอน มาใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วน 5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำ ต่อปูนซีเมนต์ 0.6 แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาปมก้อนตัวอย่าง 3, 7, 14 และ 28 วัน ผลการทดลองพบว่า กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ 28 วัน จะลดลงตามเปอร์เซ็นต์ของซีเฝ้าที่ผสมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ที่อัตราส่วนผสม 10% กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะลดลงเพียง 10 % ของก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมซีเฝ้า และจะพัฒนากำลังจนเท่ากับคอนกรีตธรรมดา ที่อัตราส่วนผสม 20% กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะลดลงมากกว่า 30 % ของก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมซีเฝ้า

Bishop (1988) ได้ทำการศึกษา การชะละลายของสารอนินทรีย์อันตราย จากของเสียอันตรายที่ถูกทำให้เป็นก้อน โดยใช้ของเสียอันตรายที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งมีโลหะหนักเป็นส่วนผสมได้แก่ แคดเมียม, โครเมียม, ตะกั่ว, โลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ผสมกัน ทำให้เป็นก้อนโดยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สอง โดยทำการสกัด 15 ครั้ง (Sequential extractions) ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. จากการสกัด 15 ครั้ง ความเป็นต่างสะสมของการสกัด 15 ครั้ง มีค่าประมาณ 18.3 มิลลิกรัม/กรัม ซึ่งถือเป็นค่าความจุพเฟอรัลของของเสียที่ทำให้เป็นก้อน ความเป็นต่างที่ถูกสกัดออกมาจะมีค่าลดลงในการสกัดทุกครั้ง

2. กลไกในการยึดจับโลหะหนักเป็นดังนี้ คือ แคดเมียมอยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ ที่แทรกตัวอยู่ตามรูพรุน หรือเกาะติดกับผนังของรูพรุน ในซีเมนต์ที่แข็งตัว สำหรับโครเมียมและตะกั่ว จะทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์เกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนกับซิลิกา

การศึกษาของ Bishop สามารถนำมาใช้อธิบายกลไกในการยึดจับโลหะหนักประเภทอื่นได้ โดยพิจารณาจากลักษณะการชะละลายในน้ำสกัด

Shin, Her และ Koo (1988) ได้ทำการศึกษาปัจจัยในกระบวนการทำให้กากตะกอนจากอุตสาหกรรมรูปโลหะเป็นก้อนแข็ง โดยใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งในกากตะกอนประกอบด้วยโครเมียม, สังกะสี และเฮกเซน ปัจจัยที่ทำการศึกษามี 4 อย่าง ได้แก่ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณกากตะกอนเปียก และปริมาณสาร Precipitator ผลการศึกษสรุปได้ดังนี้

1. ความเข้มข้นของโครเมียม และสังกะสีในน้ำสกัดลดลง เมื่อลดอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และเพิ่มปริมาณสาร Precipitator

2. กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาปม 14 วัน เพิ่มขึ้น เมื่อลดอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาณกากตะกอนเปียก

3. จากการวิเคราะห์โดยวิธี ANOVA พบว่า อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ มีผลอย่างมากต่อการชะละลายของโครเมียม ในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ มีผลอย่างมากต่อการชะละลายของสังกะสี และกำลังรับแรงอัด

4. การใช้สาร Precipitator และทราย ในการทำให้เป็นก้อนแข็ง เป็นการไม่ประหยัด และไม่มี ความจำเป็นในการปฏิบัติ

การศึกษาของ Shin และคณะ ทำให้ทราบปัจจัยที่มีผลในการทำกากตะกอนให้เป็นก้อนแข็ง โดยใช้ปูนซีเมนต์

Ching-Lung (1989) ได้ทำการศึกษาการทำของเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วย โครเมียม เองแดง และปรอท ให้เป็นก้อนแข็ง โดยใช้วัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์น้ำแกลบ ทำการทดลองวัดค่าการชะละลายของโลหะหนัก และกำลังรับแรงอัด ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถยึดจับโครเมียมได้ดีกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์น้ำแกลบ ขณะที่ปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์น้ำแกลบ สามารถยึดจับ ทองแดง และปรอท ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
2. จากลักษณะการชะละลาย พบว่า ทองแดงและปรอท ถูกยึดจับโดยถูกดักไว้ในโครงสร้างแข็งในโพรง และถูกดูดติดบนพื้นผิวโพรง
3. การชะละลายของโลหะหนัก ทั้งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์น้ำแกลบ จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรดของน้ำสกัดเพิ่มขึ้น
4. การปรัก่อนตัวอย่าง 28 วัน พบว่า การชะละลายของโครเมียมลดลง ขณะที่ การชะละลายของทองแดงและปรอทเพิ่มขึ้น
5. ความสามารถในการถูกชะละลาย เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของเสียที่ผสมอยู่ในก้อนตัวอย่าง
6. การเพิ่มปริมาณของเสีย ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง
7. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม สำหรับกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ 0.5 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์น้ำแกลบ คือ 0.7

การศึกษาของ Ching-Lung เปรียบเทียบคุณสมบัติของก้อนตัวอย่างที่ใส่วัสดุผสมเพิ่ม คือ ซีเมนต์น้ำแกลบ และก้อนตัวอย่างที่ไม่ใส่ ทำให้ทราบว่า การใส่วัสดุผสมเพิ่มมีผลต่อการยึดจับโลหะหนัก ซึ่งจะช่วยให้การยึดจับดีขึ้น และลดลง ขึ้นอยู่กับประเภทของโลหะหนัก. นอกจากนี้ ผลการศึกษายังบอกถึงกลไกการยึดจับ ทองแดงและปรอท อีกด้วย

Youn (1990) ได้ทำการศึกษาการทำเสถียรภาคตะกอนน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นภาคตะกอนจากน้ำเสียซีโอไลต์ มาทำให้เป็นก้อนแข็ง โดยใช้วัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์น้ำแกลบ ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 0.5 และปูนขาวผสมซีเมนต์น้ำแกลบเท่ากับ 0.9
2. เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในปูนซีเมนต์ จะทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในปูนขาวผสมซีเมนต์น้ำแกลบ จะมีแนวโน้มให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

3. เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์ได้แก่กลบ ค่าการระคายจะมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ปูนขาวผสมซีเมนต์ได้แก่กลบ จะทำให้ค่าการระคายน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก

4. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ จะมีผลต่อกำลังรับแรงอัด โดยที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์ได้แก่กลบ

5. กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะสูงขึ้น ตามเวลาการบ่มก้อนตัวอย่าง ในทางตรงกันข้าม กำลังรับแรงอัดของปูนขาวผสมซีเมนต์ได้แก่กลบ จะสูงขึ้นในช่วงแรกของการบ่มก้อนตัวอย่าง (ประมาณ 7 วัน) หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง

6. ความสามารถในการถูกระคายของโลหะหนักมีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาการบ่มตัวนานขึ้น ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์ได้แก่กลบ

การศึกษาของ Youn ศึกษาคุณสมบัติของก้อนตัวอย่างที่ทำให้เป็นก้อนแข็ง ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์ได้แก่กลบ โดยผลการศึกษาบอกถึง ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของก้อนตัวอย่าง ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณตะกอน ระยะเวลาการบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่า ปูนขาวผสมซีเมนต์ได้แก่กลบ ทำให้ค่าการระคายต่ำกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นในการทำเสถียรกากตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก ให้ปูนขาวเป็นวัสดุผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์ จึงคาดว่าปูนขาวจะช่วยลดค่าการระคายของโลหะหนักในก้อนตัวอย่าง

Rujal (1990) ได้ศึกษาการทำเป็นก้อนของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยการบำบัดก่อนด้วยวิธีการตกตะกอนผลึก เพื่อให้ได้ กากตะกอนไฮดรอกไซด์ของโครเมียม และสังกะสี วัสดุประสานที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์ได้แก่กลบ (ในอัตราส่วน 1:1) ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในส่วนผสม
2. ความสามารถถูกระคายของโลหะหนัก จะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของตะกอนต่อวัสดุประสาน
3. กากตะกอนที่ทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถยึดจับโครเมียมได้ดีกว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์ได้แก่กลบ ที่อัตราส่วนของตะกอนต่อวัสดุประสานน้อยกว่า 0.2 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมมากกว่า 0.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์ได้แก่กลบ จะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า
4. เมื่อระยะเวลาบ่มตัวเพิ่มขึ้น การระคายของโลหะหนักลดลง

การศึกษาของ Rujal ทำให้ทราบว่าวัสดุผสมเพิ่ม คือ ซีเมนต์ได้แก่กลบ มีผลต่อประสิทธิภาพในการยึดจับโลหะหนัก แต่ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของตะกอนต่อวัสดุประสานด้วย

Shin และคณะ (1990) ได้ทำการศึกษาลักษณะการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนที่ทำเป็นก้อนแข็ง ภายใต้สภาวะน้ำทะเล กากตะกอนมี 4 ประเภท โดยเตรียมจากเกลือของแคดเมียม, โครเมียม, ตะกั่ว และโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ผสมกัน วัสดุประสานที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมแกลบย ตัวทำละลายที่ใช้สกัด มี 3 ประเภท ได้แก่ น้ำทะเล น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรด และน้ำกลั่น จากผลการศึกษา สรุปได้ดังนี้

1. จากการทดสอบการสกัด 24 ชั่วโมง พบว่า ชนิดของน้ำสกัดมีผลโดยตรงต่อ พีเอช และ ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด
2. ในน้ำทะเล แคดเมียมถูกชะละลายสูงที่สุด ส่วนโครเมียมและตะกั่ว ถูกตรวจพบเล็กน้อย
3. แกลบยที่ผสมในกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็ง ช่วยลดพีเอชของน้ำสกัด และเพิ่มการชะละลายของโลหะหนัก
4. ไม่สามารถตรวจพบการชะละลายของโลหะหนักในก้อนตัวอย่างลูกบาศก์
5. ปริมาณแคดเมียมสะสม ที่ถูกสกัดจากก้อนตัวอย่างที่แตกภายใต้ น้ำทะเล เพิ่มขึ้นตามเวลา แต่อัตราการชะละลายของโลหะหนักชนิดอื่นลดลง เมื่อเปลี่ยนน้ำสกัดใหม่
6. ตัวอย่างที่ผสมแกลบยจะมีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำทะเล
7. ภายใต้สภาวะน้ำทะเล โลหะหนักที่ละลายเกิดการตกผลึกขึ้นอีก ในรูปของอนุภาคละเอียด ขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร

การศึกษาของ Shin และคณะ ทำให้ทราบว่า เมื่อของเสียที่มีโลหะหนัก ถูกทำให้เป็นก้อนแข็งแล้ว โดยใช้ปูนซีเมนต์ และนำไปทิ้งในสภาวะที่ถูกน้ำทะเล น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรด ก้อนซีเมนต์ และโลหะหนักที่ถูกทำให้เสถียรในนั้น จะมีสภาพอย่างไร

Cheng และ Bishop (1992) ได้ทำการศึกษา การกระจายตัวของโลหะหนักในก้อนซีเมนต์ ก่อนและหลังการทดสอบการชะละลายโดยใช้กรดอะซิติก ก้อนซีเมนต์จะถูกหล่อปูนซีเมนต์ปลัฟต์ แลนด์ และกากตะกอนโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว, แคดเมียม และอาร์เซนิก โลหะหนักจะถูกวิเคราะห์โดยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) , Energy Dispersive X-ray (EDX) และ Wet Digestion/AA method จากผลการวิเคราะห์พบว่า บริเวณพื้นผิวของตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น โดยเกิดจากการตกตะกอนที่ไร้ชะละลาย ซึ่งแคลเซียมส่วนใหญ่ในองค์ประกอบของซีเมนต์ จะถูกชะละลายออกมา ในขณะที่ ซิลิกอน, เหล็ก และอะลูมิเนียม ยังคงเหลืออยู่ที่ผิว ซึ่งสารที่เหลืออยู่นี้ มีคุณสมบัติในการอุดรูซึมและอุดตติผิวได้ดี ดังนั้น โลหะหนักที่ละลายออกไป จะถูกอุดตติผิวที่บริเวณพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งจะช่วยป้องกันการชะละลายของโลหะหนักได้

จากการวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างยังพบว่า การชะละลายของโลหะหนัก จะเกิดเฉพาะที่บริเวณชั้นผิวหน้าเท่านั้น ปริมาณโลหะหนักในชั้นที่ไม่มีการชะละลาย ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วงก่อนการทดสอบการชะละลาย

Fuessle และ Taylor (1994) ได้ทำการศึกษาการทำลายฤทธิ์ฝุ่นจากเตาหลอมเศษเหล็กด้วยอาร์คไฟฟ้า (ของเสียอันตราย K061 จำแนกโดย U.S. EPA) ที่เก็บรวบรวมจากรถบรรทุกที่วิ่งเข้าไปในโรงฝังกลบ โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ และส่วนผสมอื่น ได้แก่ ฝ้ายลอย (fly ash) และ ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) โดยศึกษาเปรียบเทียบผลของการเติมฝ้ายลอยและซิลิกาฟุ้งที่อัตราส่วนผสมของวัสดุประสานต่อของเสีย 0.12 และ 0.2 และใช้ระยะเวลาปัม 60 วัน และ 335 วัน ทั้งนี้ฝุ่นจากเตาหลอมประกอบด้วยโลหะหนักอันตราย คือ แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และนิกเกิล ซึ่งจากการทดสอบการชะละลายฝุ่นดังกล่าวโดยวิธี TCLP พบว่า มีปริมาณ แคดเมียม และตะกั่ว ในน้ำสกัด เกินมาตรฐานประมาณ 70 เท่า และหลังจากผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ได้ผลการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP พบว่า ที่ระยะเวลาปัม 60 วัน และ 335 วัน ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายได้แก่ แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และนิกเกิล อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ยังพบว่าปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟุ้งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการใช้ฝ้ายลอย โดยเฉพาะการบำบัดแคดเมียม ตะกั่ว และนิกเกิล

Albino และคณะ (1996) ได้ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักที่ถูกทำเสถียรในโรงสร้าง 2 ประเภท ได้แก่ โรงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลตกตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก (Blast furnace slag) ผสมยิบซัม และโรงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมฝ้ายลอยผสมยิบซัมผสมปูนขาว โดยโลหะหนักที่ใช้ คือ แคดเมียม, โครเมียม, ทองแดง, นิกเกิล, ตะกั่ว และสังกะสี สำหรับตัวทำละลายที่ใช้สัปดาห์ 3 ชนิด คือ น้ำกลั่น, สารละลายบัฟเฟอร์ กรดอะซิติกหรือไฮเดียมอะซิเตด ที่มีค่าพีเอช 4.74 และสารละลายกรดไนตริก ที่ควบคุมค่าพีเอชที่ 4 ผลการศึกษารูปว่า

1. จากการทดสอบการชะละลายทางจลศาสตร์ (Dynamic leaching test) โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวชะละลาย พบว่า ความสามารถในการชะละลายขึ้นอยู่กับ สมบัติของโลหะหนัก ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มแรก และลักษณะของโรงสร้างที่ทำเสถียร การชะละลายของทองแดงขึ้นอยู่กับ ลักษณะของโรงสร้างที่ทำเสถียร และความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มแรก ส่วนการชะละลายของตะกั่ว

*ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) เป็นของเหลือ (by-product) จากกระบวนการผลิต Silicon metal หรือ Ferrosilicon alloy โดยการนำเอาวัตถุอินทรีย์ ได้แก่ ซินควอร์ต ผ่าน และซิลิก ฟลูออไรด์รวมกันในอัตราส่วนที่กำหนด เมื่อวัตถุอินทรีย์ได้รับความร้อน เกิดการหลอมตัวจะเกิดไอของซิลิกอนโมโนออกไซด์ลอยตัวขึ้น ไอเหล่านี้จะถูกดักจับไว้และทำให้เย็นตัว ใต้เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากของ Amorphous Silica

จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่ทำให้เสถียรเพียงอย่างเดียว โดยโครงสร้างที่มีกากตะกอนเหล็กผสมจะมีโลหะทั้งสองชนิดถูกชะละลายออกมาน้อยกว่าโครงสร้างที่มีแก้วลอยผสม

2. โครงสร้างทั้งสองประเภท สามารถนำไปพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพได้ เพื่อใช้ประโยชน์ต่อไปได้ สำหรับผลการชะละลายด้วยสารละลายกรดไนตริก พีเอช 4 พบว่ามีเพียงทองแดงและนิกเกิลจากโครงสร้างทั้งสองประเภท ที่ผลการทดสอบยังไม่เป็นที่น่าพอใจ

3. โครงสร้างที่มีตะกอนเหล็ก ให้ผลการทดลองที่ดีกว่าโครงสร้างที่มีแก้วลอย กล่าวคือ น้ำสกัดจากโครงสร้างผสมตะกอนเหล็กมีปริมาณโลหะหนักน้อยกว่าน้ำสกัดจากโครงสร้างผสมแก้วลอย ทั้งนี้เนื่องจาก โครงสร้างผสมตะกอนเหล็กมีอัตราส่วนระหว่างซิลิกาไฮดรต และแคลเซียม ไตรซิลไฟออลูมิเนต ไฮดรต ที่สูงกว่าในโครงสร้างผสมแก้วลอย

การศึกษาของ Albino และคณะ ยังใช้กากตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก เป็นวัสดุผสมเพิ่มในการทำให้เสถียรโลหะหนัก โดยใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียว ผลจากการศึกษา พบว่า กากตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก ช่วยทำให้สมบัติของก้อนซีเมนต์ดีขึ้น ทั้งในการลดการชะละลายของโลหะหนัก และความสามารถในการสะเทินกรด ดังนั้น การทำให้เสถียรกากตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงคาดว่าน่าจะประสบความสำเร็จ ทั้งทางด้านกำลังรับแรงอัด และการชะละลายของโลหะหนักในกากตะกอน

รักษพล (2538) ได้ทำการศึกษารัศดูประสานที่เหมาะสมที่สุด ในการทำให้เสถียรกากตะกอนจาโรไซด์ โดยการทำให้เป็นก้อน กากตะกอนมี 2 ประเภท ได้แก่ กากตะกอนจาโรไซด์แบบธรรมดา และกากตะกอนซิลโคจาโรไซด์ วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ปูนขาว, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมปูนขาว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกากแร่สังกะสีซิลิกา วิธีที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการทำให้เป็นก้อน ได้แก่ กำลังรับแรงอัด และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด ผลการทดสอบสรุปได้ว่า อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม ได้แก่ ร้อยละ 11 และร้อยละ 15 สำหรับกากตะกอนจาโรไซด์แบบธรรมดา และกากตะกอนซิลโคจาโรไซด์ ตามลำดับ สามารถทำให้สมบัติของก้อนตัวอย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ผลการทดสอบการชะละลายในระยะยาวเป็นการทดสอบในคอลัมน์โดยใช้น้ำประปา ที่มีพีเอช อยู่ระหว่าง 5.6 และ 6.3 เป็นน้ำชะละลาย เมื่อกำหนดอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ เท่ากับ ร้อยละ 10 พบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย ต่ำกว่า มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดช่วงระยะเวลาชะละลาย 90 วัน

การศึกษาของ รักษาพล ทดลองใช้วัสดุประสานหลายชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ปูนขาว, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมปูนขาว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกากแร่สังกะสีซิลิกา

การทดลองได้ผล คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้สมบัติที่ดีที่สุด แต่ในการทำเสถียรภาคตะกอนจากเดานลอมเหล็ก ส่วนประกอบของภาคตะกอนบางส่วนที่เป็นส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ จึงน่าจะช่วยในการเสริมสมบัติของก้อนซีเมนต์ให้ดีขึ้น ดังนั้น วัสดุประสานที่เหมาะสม ทั้งทางด้านสมบัติของก้อนตัวอย่างและเศรษฐศาสตร์ จึงอาจจะไม่ใช่เฉพาะแค่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว

ดวงสมร (2540) ได้ทำการศึกษาการทำตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีไอดี และกากหลอตฟลูออเรสเซนต์ให้คงตัวโดยการเติมโซเดียมซิลไฟด์ลงไปก่อนทำให้เป็นก้อน นอกจากนี้มีการทดสอบการชะละลายเพื่อหาความเข้มข้นของ โครเมียม โปรท และเหล็ก ซึ่งอยู่ในตะกอนรวม ทั้งหาประสิทธิภาพในการทำให้งอกตัวและประมาณค่าใช้จ่ายของตัวประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน โดยทำการศึกษาหาอัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน ปริมาณโซเดียมซิลไฟด์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำภาคตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีไอดีให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม การทำกากหลอตฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม การทำกากหลอตฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมแกลลอลิกไนต์

การทำตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีไอดีให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม (Silica fume) จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อซิลิกาฟูมเท่ากับ 1:0.4 ใช้ปริมาณโซเดียมซิลไฟด์เท่ากับ 0.5 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี และใช้ระยะเวลาปม 7 วัน มีประสิทธิภาพในการทำโปรทและโครเมียมคงตัวเท่ากับ 96.89 และ 94.32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดนี้ประมาณ 7,770 บาทต่อตันของตะกอน

การทำกากหลอตตะกอนฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม (Silica fume) จากผลการทดลอง พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อซิลิกาฟูมเท่ากับ 1:0.2 ใช้ปริมาณโซเดียมซิลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี และใช้ระยะเวลาปม 28 วัน มีประสิทธิภาพในการทำโปรทคงตัวเท่ากับ 97.72 เปอร์เซ็นต์ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดนี้ประมาณ 4,930 บาทต่อตันของตะกอน สำหรับการทำกากหลอตฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมแกลลอลิกไนต์ จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.50 โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อแกลลอลิกไนต์เท่ากับ 1:1 ใช้ปริมาณโซเดียมซิลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎีใช้ระยะเวลาปม 28 วัน ประสิทธิภาพในการทำโปรทคงตัวเท่ากับ 97.77 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้ซิลิกาฟูมเป็นวัสดุประสานค่าใช้จ่ายในการบำบัดโดยใช้แกลลอลิกไนต์เป็นวัสดุประสานมีค่าประมาณ 2,610 บาทต่อตันของตะกอนซึ่งมีค่าน้อยกว่าการใช้ซิลิกาฟูมเป็นวัสดุประสาน

ประเสริฐ (2541) ได้ทำการศึกษาการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีไอดี และกากหลอตฟลูออเรสเซนต์ โดยการเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไปก่อนการทำให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ และของเสียซิลิกา-อะลูมินา ในการทดลองนี้แสดงถึงผลกระทบต่างๆที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อน และแสดงสมบัติทางกายภาพของตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน คือ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และความชื้นได้ของน้ำ นอกจากนี้มีการทดสอบการชะละลายเพื่อหาความเข้มข้นของปรอท โครเมียม และเหล็ก

ผลการทดลองการทำตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีไอดีให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมของเสียซิลิกา-อะลูมินา พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อของเสียซิลิกา-อะลูมินา เท่ากับ 1:0.6 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 ใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี ใช้ระยะเวลาป่ม 7 วัน ประสิทธิภาพในการทำให้ปรอท และโครเมียมคงตัวเท่ากับ 88.39 และ 82.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดนี้ประมาณ 5,110 บาทต่อตันของตะกอนแห้ง

ผลการทดลองการทำกากหลอตฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมของเสียซิลิกา-อะลูมินา พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.75 อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อของเสียซิลิกา-อะลูมินา เท่ากับ 1:1 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 ใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี ใช้ระยะเวลาป่ม 3 วัน ประสิทธิภาพในการทำให้ปรอทคงตัว เท่ากับ 82.17 เปอร์เซ็นต์ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดประมาณ 5,620 บาทต่อตันของตะกอนแห้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย