

บทที่ 3

บททวนเอกสาร

3.1 ของเสียอันตราย(Hazardous waste)

Resource Conservation and Recovery Act.(RCRA) ประเทศสหรัฐอเมริกา กล่าวว่า ของเสียอันตราย คือ ของเสียหรือเป็นส่วนผสมของของเสีย ซึ่งด้วยปริมาณ ความเข้มข้นหรือลักษณะทางกายภาพทางเคมีหรือการติดเชื้อ ที่อาจก่อให้เกิด

1. การเพิ่มขึ้นของอัตราการตาย หรือการป่วยที่รักษาไม่หาย หรือการทุพพลภาพ
2. เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์หรือสิ่งแวดล้อม หากทำการบำบัด, การเก็บกัก, การขนส่ง, การทิ้งหรือการจัดการ ที่ไม่เหมาะสม

นอกจากนี้ The U.S. Environmental Protection Agency.(U.S. EPA) ยังกล่าวว่า ของเสียจะเป็นของเสียอันตรายภายใต้การควบคุมของกฎหมาย ถ้ามีลักษณะตรงกับข้อใดข้อหนึ่งหรือหลายข้อดังต่อไปนี้

1. มีสมบัติเช่นเดียวกับของเสียอันตราย คือ ติดไฟได้ง่าย, มีฤทธิ์กัดกร่อน, เกิดปฏิกิริยากับสารอื่นง่ายหรือเป็นพิษ
2. เป็นของเสียที่ไม่มีแหล่งที่มาเฉพาะ(non specific source) มักเกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม
3. เป็นของเสียที่มีแหล่งที่มาเฉพาะ(specific source) จากอุตสาหกรรมบางประเภท
4. เป็นผลิตภัณฑ์เคมีที่ใช้ในการพาณิชย์กรรมบางประเภท
5. เป็นส่วนผสมของสารที่ถูกระบุว่าเป็นของเสียอันตราย
6. เป็นสารที่ถูกกำหนดไว้ในบทบัญญัติภายใต้ RCRA, subtitle C, section 3001
หมายเหตุ RCRA, subtitle C, section 3001 ประกอบด้วยรายชื่อของเสียอันตราย

สำหรับประเทศไทย ของเสียที่เป็นอันตราย ตามคำจำกัดความ ของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ หมายถึง ของเสียหรือสิ่งที่เป็นอันตรายซึ่งมีความเข้มข้นหรือมีสมบัติด้านกายภาพเคมีหรืออื่น ๆ ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการตายหรือเจ็บป่วยทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ ตลอดจนทำให้เกิดหรือมีแนวโน้มจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้มีการจัดการในการบำบัดเก็บกัก ขนส่ง และกำจัด ที่เหมาะสม

ของเสียอันตรายสามารถแบ่งตามสมบัติได้เป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

1. สารไวไฟ คือ ของเสียที่ติดไฟได้ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน
2. สารเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย คือ ของเสียที่ไม่คงตัว สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว
3. สารกัดกร่อน คือ ของเสียที่มีพีเอช ≤ 2 หรือพีเอช ≥ 12.5
4. สารมีพิษ คือ ของเสียที่มีความเป็นพิษในตัวเอง ได้แก่ สารเคมีต่างๆ หรือสารกัมมันตรังสี
5. สารถูกชะละลายได้ง่าย คือ ของเสียที่สามารถถูกชะละลายสู่สิ่งแวดล้อม เช่น ดิน, แหล่งน้ำผิวดิน หรือน้ำใต้ดิน ได้ง่าย
6. สารที่ก่อให้เกิดโรค คือ ของเสียที่มีจุลินทรีย์ปะปนอยู่ เช่น ของเสียจากสถานพยาบาล หรือห้องปฏิบัติการเพาะเชื้อ

นอกจากนี้โลหะหนักบางชนิด เช่น อาร์เซนิก, แคดเมียม, ปรอท, ตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักประเภทที่มีพิษถาวร ซึ่งนอกจากจะไม่เปลี่ยนรูปไปตามกาลเวลาแล้วยังสามารถสะสมในร่างกายมนุษย์และสัตว์น้ำได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกจากของเสีย, น้ำเสียหรือตะกอน เพื่อป้องกันไม่ให้แพร่กระจายเข้าสู่วัฏจักรของน้ำหรือผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร

เนื่องจากในผงถ่านไฟฉายประกอบด้วยโลหะหนักหลายชนิด เช่น ปรอท, แคดเมียม, แมงกานีส และสังกะสี เป็นต้น ซึ่งเข้าข่ายของเสียอันตราย ประเภทสารมีพิษตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2531) เนื่องจากมีความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ และจัดเป็นสารที่ถูกชะล้างได้ง่ายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) จึงจำเป็นต้องทำลายฤทธิ์ก่อนนำไปฝังกลบขั้นสุดท้าย

3.2 ถ่านไฟฉาย

ถ่านไฟฉาย คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเคมีของสารที่บรรจุอยู่ในกระบอกถ่านไฟฉาย สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้หลายประเภท เช่น นาฬิกา, กล้องถ่ายรูป, วิทยุแท็บ, ไฟฉาย เป็นต้น ถ่านไฟฉายที่ใช้กันอยู่ทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. ถ่านไฟฉายแบบปฐมภูมิ(Primary battery) คือ ถ่านไฟฉายที่สามารถใช้ได้เพียงครั้งเดียว ไม่สามารถนำกลับมาบรรจุกระแสไฟฟ้าใหม่ได้ ได้แก่ ถ่านไฟฉายแบบคาร์บอน-สังกะสี, อัลคาไลด์-แมงกานีส, เมอร์คิวไรต์ออกไซด์ และซิลเวอร์ออกไซด์ เป็นต้น
2. ถ่านไฟฉายแบบทุติยภูมิ(Secondary battery) คือ ถ่านไฟฉายที่ใช้ได้หลายครั้ง โดยการบรรจุกระแสไฟฟ้าเข้าไปใหม่ ได้แก่ ถ่านไฟฉายแบบนิเกิล-แคดเมียม

ถ่านไฟฉายแต่ละชนิดจะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ ขั้วบวก, ขั้วลบ, และอิเล็กโทรไลต์ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบที่สำคัญในถ่านไฟฉายบางชนิด (Environment Canada, 1991)

ชนิดถ่านไฟฉาย	ขั้วบวก	ขั้วลบ	อิเล็กโทรไลต์
คาร์บอน-สังกะสี	แมงกานีสไดออกไซด์	สังกะสี	แอมโมเนียมคลอไรด์
อัลคาไลด์-แมงกานีส	แมงกานีสไดออกไซด์	ผงสังกะสี	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
เมอร์คิวรียอดออกไซด์	เมอร์คิวรียอดออกไซด์	ผงสังกะสี	โพแทสเซียมหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์
ซิลเวอร์ออกไซด์	ซิลเวอร์ออกไซด์	ผงสังกะสี	โพแทสเซียมหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์
นิกเกิล-แคดเมียม	นิกเกิลออกไซด์	แคดเมียม	โพแทสเซียมหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์

ถ่านไฟฉายแบบคาร์บอน-สังกะสี หรือถ่านไฟฉายแบบเลอคังเซ มักใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูง เช่น ไฟฉาย และวิทยุ เป็นต้น ประกอบด้วยสังกะสีทำหน้าที่เป็นขั้วลบ, แมงกานีสไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นขั้วบวก และแอมโมเนียมคลอไรด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยมีปรอทเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ทำหน้าที่ลดการผุกร่อนของสังกะสีและป้องกันเชื้อรา

ถ่านไฟฉายแบบอัลคาไลด์-แมงกานีส มักใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการกระแสไฟฟ้ามากและเป็นเวลานาน เช่น เครื่องบันทึกเสียง, กล้องถ่ายรูป และมอเตอร์ เป็นต้น ประกอบด้วยผงสังกะสีทำหน้าที่เป็นขั้วลบ, แมงกานีสไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นขั้วบวก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยมีปรอทเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

ถ่านไฟฉายแบบเมอร์คิวรียอดออกไซด์ เป็นถ่านไฟฉายแบบเม็ดกระดุมที่ให้พลังงานสูง และมีอายุการใช้งานยาวนาน มักใช้กับ นาฬิกา, เครื่องช่วยฟัง และเครื่องคิดเลข เป็นต้น ประกอบด้วยผงสังกะสีทำหน้าที่เป็นขั้วลบ, เมอร์คิวรียอดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นขั้วบวก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยมีปรอทเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก

ถ่านไฟฉายแบบซิลเวอร์ออกไซด์ โดยทั่วไปมีลักษณะและการใช้งานเหมือนกับถ่านไฟฉายแบบเมอร์คิวรียอดออกไซด์ ประกอบด้วยผงสังกะสีทำหน้าที่เป็นขั้วลบ, ซิลเวอร์ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นขั้วบวก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยมีปรอทเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

ถ่านไฟฉายแบบนิกเกิล-แคดเมียม เป็นถ่านไฟฉายแบบทุติยภูมิที่ผลิตออกมา 3 รูปแบบ คือ แบบกล่องสี่เหลี่ยม, แบบทรงกระบอก และแบบเม็ดกระดุม ประกอบด้วยนิกเกิลออกไซด์ทำหน้าที่เป็นขั้วลบ, แคดเมียมทำหน้าที่เป็นขั้วบวก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดย

มีนิกเกิล และแคดเมียมเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 12-32 และ 10-18 โดยน้ำหนักตามลำดับ แบบกล่องสี่เหลี่ยมมักใช้กับยานพาหนะและเป็นแหล่งพลังงานสำรอง ส่วนแบบทรงกระบอกและเม็ดกระดุมมักใช้กับวิทยุ, ไฟฉาย, เครื่องคิดเลข และของเล่น เป็นต้น

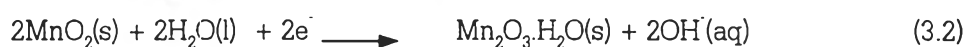
ถ่านไฟฉายแต่ละชนิดจะมีสารที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกันดังตารางที่ 3.2 โดยองค์ประกอบที่เหลือส่วนใหญ่เป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจมีสารมลทินอื่นๆ เจือปนอยู่บ้าง

ตารางที่ 3.2 ร้อยละโดยน้ำหนักของสารที่เป็นองค์ประกอบในถ่านไฟฉายบางชนิด

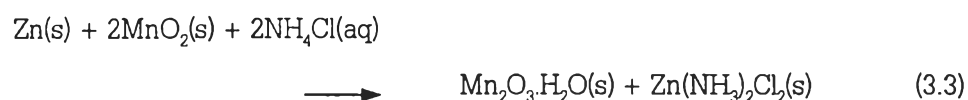
(Environment Canada, 1991)

ถ่านไฟฉาย	Zn	MnO ₂	Hg	Ag	C	Paper/ Plastic	Metal	Cd
คาร์บอน-สังกะสี	17	29	0.01	-	7	10	16	0.08
อัลคาไลด์-แมงกานีส	14	22	0.5-1	-	2	5	37	-
เมอร์คิวรียอดออกไซด์	11	-	33	-	-	7	22	-
ซิลเวอร์ออกไซด์	10	-	1	27	-	7	22	-

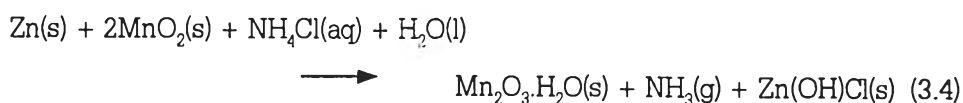
สำหรับถ่านไฟฉายแบบคาร์บอน-สังกะสี ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในถ่านไฟฉายขณะที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า ประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของสังกะสีที่ขั้วลบ และปฏิกิริยารีดักชันของแมงกานีสที่ขั้วบวก ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2



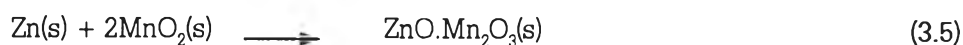
Zn^{2+} ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะทำปฏิกิริยากับ NH_4Cl ในอิเล็กโทรไลต์ และ OH^{-} จากปฏิกิริยารีดักชันของแมงกานีส เกิดเป็น $\text{Zn}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2$ โดยมีปฏิกิริยารวมดังสมการที่ 3.3



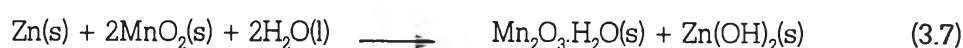
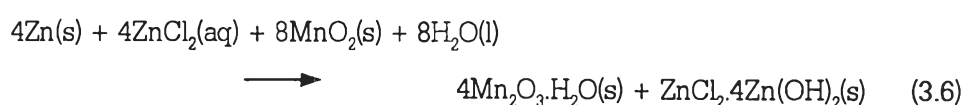
กรณีที่ถ่านไฟฉายถูกใช้งานหนัก จะมีน้ำเข้าร่วมปฏิกิริยาดังกล่าว และมีก๊าซแอมโมเนียเกิดขึ้นด้วย ดังสมการที่ 3.4



กรณีที่ถ่านไฟฉายถูกใช้งานโดยมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าอย่างเบาบาง ผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน จะทำปฏิกิริยากันดังสมการที่ 3.5



นอกจากนี้ ขณะเริ่มต้นใช้งาน ที่ความเข้มข้นของ NH_4^+ ต่ำๆ Zn^{2+} จะตกผลึกกลายเป็นสารประกอบออกซิดคลอไรด์ หรือไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 3.6 และ 3.7



จากสมการที่ 3.3-3.7 จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในถ่านไฟฉายที่ใช้งานจนหมดอายุแล้ว น่าจะประกอบด้วย $\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และสารประกอบของสังกะสี ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเกลือคลอไรด์, ออกซิดคลอไรด์ หรือไฮดรอกไซด์

การเสื่อมคุณภาพของถ่านไฟฉายขณะที่ไม่ถูกใช้งาน เกิดจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนของสังกะสีที่ช้าลง โดยเกิดจากสังกะสีทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนภายนอกที่เข้ามาในถ่านไฟฉาย หรือทำปฏิกิริยากับสารมลทินในอิเล็กโทรไลต์ ก่อให้เกิดการผุกร่อนและรั่วซึมของถ่านไฟฉาย ปัจจุบันสารเคมีที่ใช้ในการป้องกันการผุกร่อนของสังกะสีคือ HgCl_2 โดยนำมาผสมกับอิเล็กโทรไลต์ประมาณร้อยละ 0.01 เพื่อให้ผิวของสังกะสีเรียบ เป็นการลดการผุกร่อนและยืดอายุการใช้งานของถ่านไฟฉาย

จากข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรมปี 2538 พบว่าปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานผลิตถ่านไฟฉายประมาณ 10 แห่ง ผลิตเฉพาะถ่านไฟฉายแบบคาร์บอน-สังกะสี ซึ่งโรงงานตั้งอยู่ที่กรุงเทพมหานคร 6 แห่ง, สมุทรปราการ 2 แห่ง, ชลบุรี 1 แห่ง และฉะเชิงเทรา 1 แห่ง รวมมีกำลังการผลิตถ่านไฟฉายขนาดใหญ่, ขนาดกลาง และขนาดเล็ก ประมาณ 300, 26 และ 103 ล้านก้อนต่อปี ตามลำดับ

ปริมาณการส่งออกในแต่ละปีก่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณการผลิต พบว่าในปี 2538 ส่งออกประมาณ 40 ล้านก้อนต่อปี โดยส่งไปจำหน่ายในประเทศเพื่อนบ้าน เช่น พม่า และลาว

ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะสามารถผลิตถ่านไฟฉายเองได้ แต่ก็ยังต้องมีการนำเข้าถ่านไฟฉายบางประเภทที่ไม่สามารถผลิตเองได้ เช่น อัลคาไลน์-แมงกานีส, เมอร์คิวไรต์, ซิลเวอร์ออกไซด์ และนิเกิล-แคดเมียม จากข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรมพบว่าปี 2538 มีการนำเข้าประมาณ 130 ล้านก้อนต่อปี

3.2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านไฟฉายแบบคาร์บอน-สังกะสี

3.2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตขั้วบวก

- แเมงกานีสไดออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นดีโพลารไรเซอร์(depolarizer) คือช่วยลดก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาของแอมโมเนียมคลอไรด์ ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนจะไปเกาะที่แท่งคาร์บอน ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไม่สะดวก แเมงกานีสไดออกไซด์ที่ใช้ส่วนใหญ่ได้จากแร่ธรรมชาติ คือ แร่ไพโรลูไซต์ ซึ่งมีแเมงกานีสไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์

- ผงถ่าน เป็นผงถ่านที่บดละเอียด มีขนาดประมาณ 65-70 ไมครอน ใช้ผสมลงในแเมงกานีสไดออกไซด์เพื่อช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้า

- แท่งถ่าน เป็นแกนกลางของถ่านไฟฉาย ทำจากถ่านโค้ก ทำหน้าที่นำกระแสไฟฟ้าสู่วงจรภายนอก

3.2.1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตขั้วลบ ได้แก่ กระบอกสังกะสี ในโรงงานขนาดใหญ่จะผลิตกระบอกสังกะสีเอง ส่วนโรงงานขนาดเล็กจะใช้กระบอกสังกะสีสำเร็จรูป

3.2.1.3 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่

- แอมโมเนียมคลอไรด์
- เมอร์คิวรียคลอไรด์ ใช้ผสมลงในอิเล็กโทรไลต์ เพื่อลดการผุกร่อนของสังกะสีและป้องกันเชื้อรา

- เจลลิงเอเจนต์ ใช้ผสมลงไปเพื่อทำให้อิเล็กโทรไลต์ มีลักษณะเป็นแป้งเปียก ได้แก่ น้ำแป้งมันหรือน้ำแป้งสาลี

3.2.1.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ กระดาษรองกันและปิดหัวถ่านไฟฉาย ซึ่งเป็นกระดาษแข็งหรือกระดาษบางเคลือบไข, หัวจุกทองเหลือง, ปลอกกระดาษหรือปลอกเหล็ก, แผ่นฉลาก และยางมะตอย

3.2.2 กระบวนการผลิตถ่านไฟฉายแบบคาร์บอน-สังกะสี

โดยทั่วไปการผลิตถ่านไฟฉาย สามารถดำเนินการโดยใช้แรงคนหรือเครื่องจักร การผลิตที่ใช้แรงคน ส่วนใหญ่ใช้สำหรับการผลิตถ่านไฟฉายที่ผลิตออกมาน้อย เช่น ขนาดกลางหรือขนาดเล็ก ส่วนการผลิตที่ใช้เครื่องจักร ใช้สำหรับการผลิตถ่านไฟฉายขนาดใหญ่ ซึ่งผลิตออกมามาก กระบวนการผลิตถ่านไฟฉายโดยทั่วไป ประกอบด้วยแผนกต่างๆ ดังรูปที่ 3.1

3.2.2.1 แผนกบดและแยกแร่ แร่ไพโรลูไซต์ ซึ่งมีแเมงกานีสไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์ จะถูกคัดเลือกและตบแต่งให้ได้ตามมาตรฐานที่ต้องการ แล้วส่งเข้าไปบดหยาบและบดละเอียด จากนั้นแยกขนาดด้วยตะแกรงลม ส่วนที่มีขนาดใหญ่ จะถูกนำกลับมาบดใหม่เพื่อให้ได้ผงแเมงกานีสไดออกไซด์ตามขนาดที่ต้องการ

3.2.2.2 แผนกผสมดีโพลาริเซอร์ ผงเมงกานีสไดออกไซด์จะถูกนำมาผสมกับผงถ่านหลังจากนั้นเติมน้ำลงไปประมาณ 15% ของส่วนผสมทั้งหมด เพื่อเพิ่มความชื้นให้ส่วนผสมป้องกันการแตกร้าวหลังจากที่อัดเป็นก้อน

3.2.2.3 แผนกผสมอิเล็กโตรไลต์ แบ่งเป็น 2 แบบ คือ

- แบบแป้งเปียก(paste-line) : ได้จากการผสมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์, เมอคิวริกคลอไรด์และน้ำแป้งเข้าด้วยกัน แล้วใส่ลงในกระบอกลังกะสีซึ่งรองกันด้วยกระดาษจนวนชนิดหนา
- แบบกระดาษ(lining-paper) : ซึ่งอาจเป็นกระดาษเคลือบอิเล็กโตรไลต์แบบสำเร็จรูปที่สามารถนำมาประกอบได้ทันที หรือเป็นแบบที่นำอิเล็กโตรไลต์ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ได้จากการผสมแบบแป้งเปียก นำมาเคลือบบนกระดาษแล้วตากให้แห้ง กระดาษรองกันกระบอกลังกะสีก็จะถูกนำมาเคลือบในลักษณะเดียวกัน

3.2.2.4 แผนกผลิตกระบอกลังกะสี นำสังกะสีบริสุทธิ์(ความบริสุทธิ์มากกว่า 99%) มาหลอมละลายที่อุณหภูมิประมาณ 400-500°C แล้วรีดให้เป็นแผ่นแล้วตัดหรือเจาะเป็นแผ่นกลมหรือแผ่นทกเหลี่ยมขนาดเล็กให้พอเหมาะกับขนาดของถ่านไฟฉายที่จะประกอบ จากนั้นนำเข้าเครื่องดึงออกมาเป็นกระบอกลังกะสีรูปทรงกระบอกลังกะสี

3.2.2.5 แผนกประกอบถ่านไฟฉาย แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การประกอบถ่านไฟฉายที่ใช้อิเล็กโตรไลต์แบบแป้งเปียกและแบบกระดาษ แบบแรกนิยมใช้ในการประกอบถ่านไฟฉายขนาดใหญ่ แบบหลังใช้สำหรับการประกอบถ่านไฟฉายขนาดกลางและขนาดเล็ก ดูรูปที่ 3.2 ประกอบ

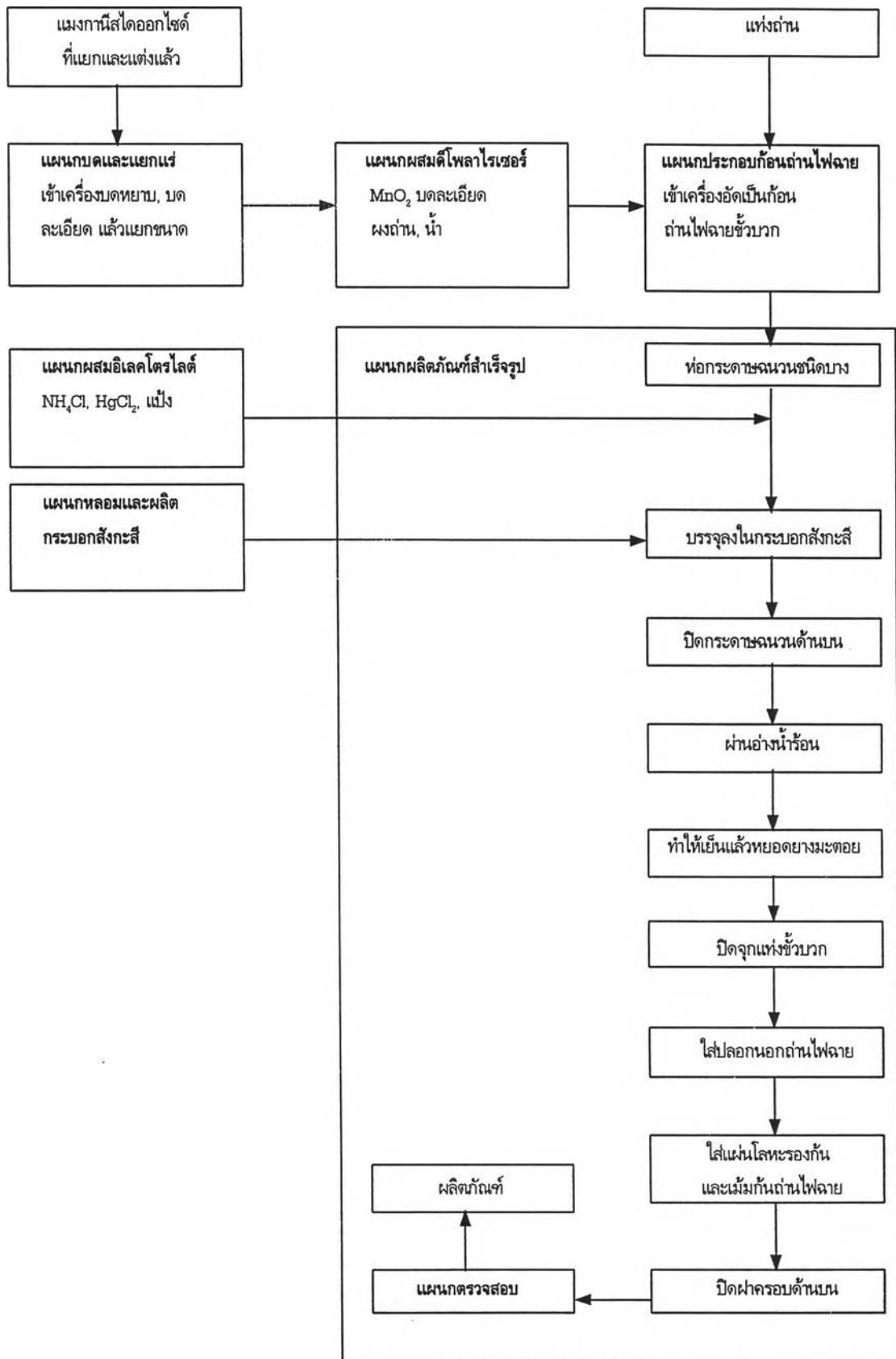
1. ขั้นตอนการประกอบถ่านไฟฉายที่ใช้อิเล็กโตรไลต์แบบแป้งเปียก มีดังนี้
 - ใส่อิเล็กโตรไลต์จำนวนหนึ่งลงไปในกระบอกลังกะสี
 - นำส่วนผสมของดีโพลาริเซอร์มาอัดเป็นก้อนรอบแท่งคาร์บอน แล้วใส่ลงไปในกระบอกลังกะสีโดยมีกระดาษแข็งรองกันเพื่อป้องกันไม่ให้ดีโพลาริเซอร์สัมผัสกับกันของกระบอกลังกะสี
 - นำกระบอกลังกะสีดังกล่าว แช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิ 70-80°C เป็นเวลา 2-3 นาที เพื่อให้อิเล็กโตรไลต์หลอมตัวเกาะติดกับดีโพลาริเซอร์
 - นำกระบอกลังกะสีที่ผ่านน้ำร้อนแล้ว มาใส่ฝากระดาษ หยอดยางมะตอยด้านบน แล้วปิดจุกซึ่งทำด้วยทองเหลืองตรงปลายข้างขวาก
 - หุ้มกระบอกลังกะสีด้วยเปลือกกระดาษหรือเปลือกเหล็ก ซึ่งมีเครื่องหมายการค้าของบริษัทติดอยู่ ปิดหัวและท้ายพร้อมทั้งนม้ขอบเพื่อความเรียบร้อยและเป็นการช่วยป้องกันการรั่วของกระแสไฟฟ้า
2. ขั้นตอนการประกอบถ่านไฟฉายที่ใช้อิเล็กโตรไลต์แบบกระดาษ มีดังนี้
 - ตัดกระดาษเคลือบอิเล็กโตรไลต์ให้ได้ขนาดโดยรอบของกระบอกลังกะสีและกันกระบอกลังกะสี นำกระดาษทั้งสองใส่ในกระบอกลังกะสี

- นำแท่งดีโพลาริเซอร์ที่อัดรอบแท่งถ่านใส่ลงไปเ็นกระบอกลังกะสี จากนั้นนำกระดาษแข็งเคลือบไขปิดทับบน ตามด้วยกระดาษเคลือบอิลเลคโตรไลต์
- ปิดหัวด้วยแผ่นพลาสติก และหัวจุกของเหล็องจากนั้นเิ่มขอบพลาสติกให้เรียบร้อย

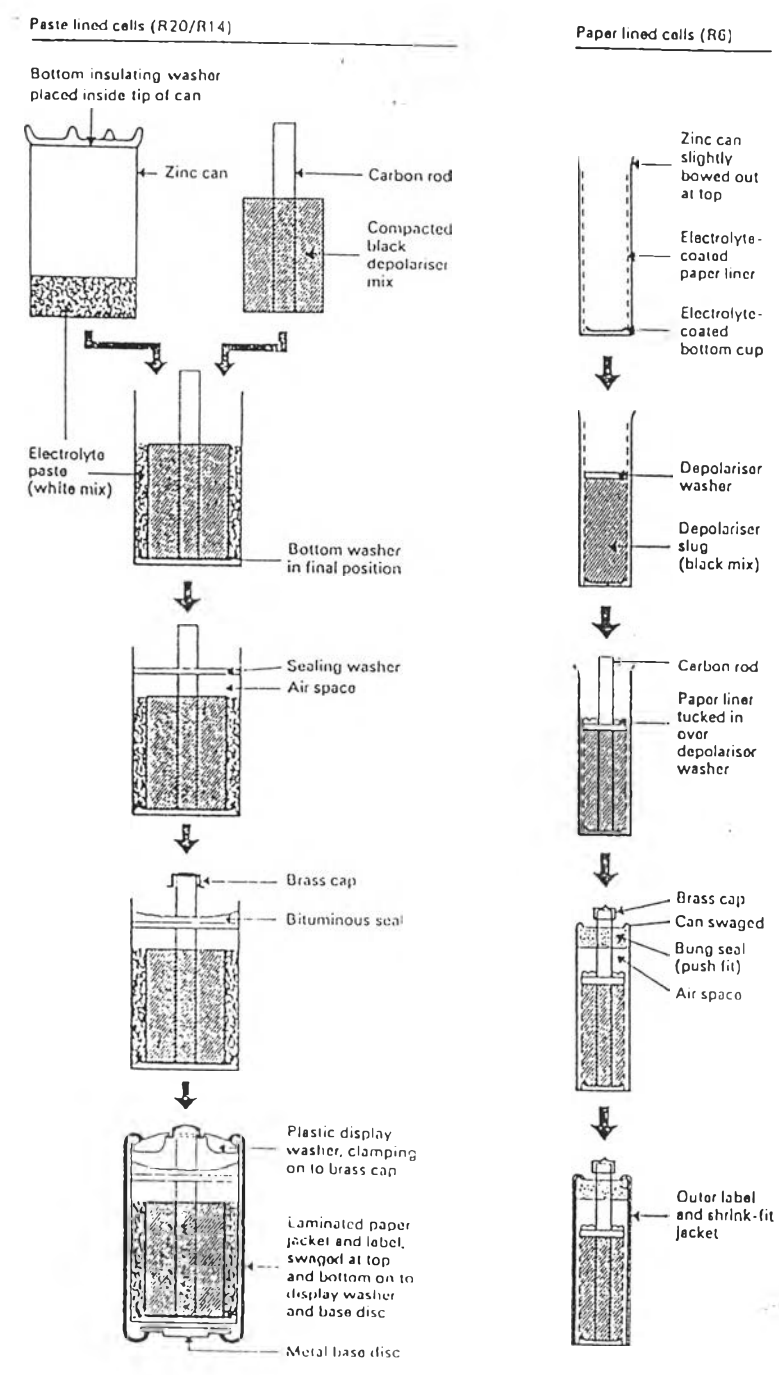
3.2.2.6 แผนกตรวจสอบ นำถ่านที่ประกอบเรียบร้อยแล้วมาผ่านเครื่องตรวจสอบ โดยวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ถ่านไฟฉายที่ไม่ได้มาตรฐานจะถูกแยกออกก่อนส่งจำหน่ายตามท้องตลาด ขั้นตอนการตรวจสอบมีเฉพาะในโรงงานขนาดใหญ่ และมีเพียง 1-2 โรงงานที่ตรวจสอบถ่านทุกก้อนก่อนส่งออกจำหน่าย

3.2.3 วัตถุที่เป็นสารอันตรายหรือสารพิษ

1. แมงกานีสไดออกไซด์ สามารถเข้าสู่ร่างกายโดยการกินและการหายใจในระหว่างการผสมดีโพลาริเซอร์ ถ้าหายใจเอาฝุ่นของแมงกานีสเข้าไปในปริมาณมากหรือกินเข้าไปจะก่อให้เกิดอาการเฉียบพลัน มีอาการคลื่นไส้ อาเจียร เป็นไข้ ปวดศีรษะ ส่วนอาการแบบเรื้อรัง เนื่องจากหายใจเอาฝุ่นของแมงกานีสติดต่อกันเป็นเวลานาน จะส่งผลต่อระบบประสาทส่วนกลางและระบบทางเดินหายใจ โดยเริ่มจากอาการเป็นไข้ ปวดศีรษะ กล้ามเนื้อไม่มีแรง เบื่ออาหาร พุดน้อย อาการจะรุนแรงมากขึ้นจนกระทั่ง กล้ามเนื้อกระตุก เป็นตะคริวบ่อยขึ้น ทรงตัวไม่ได้ จนอาจเป็นอัมพาต ส่วนอาการที่เกิดขึ้นระบบทางเดินหายใจ จะทำให้เกิดอาการปอดบวม เจ็บคอ ไอมีเสมหะ ต่อมาเริ่มมีไข้สูงขึ้น ไอมากขึ้น แน่นอึดอัดหายใจไม่ออก
2. แอมโมเนียมคลอไรด์ สามารถเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจและการกินโดยปนเปื้อนกับอาหารหรือจากวัสดุที่ใช้ห่อหุ้มอาหาร ถ้าได้รับเข้าไปในปริมาณมากจะทำให้เกิดการคลื่นเหียน อาเจียร
3. ผงถ่าน สามารถเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ ก่อให้เกิดการระคายเคืองที่จมูกและปอดได้ ถ้าสัมผัสเป็นติดต่อกันเป็นเวลานานๆ อาจก่อให้เกิดมะเร็งที่ผิวหนังได้
4. ซิงค์ออกไซด์ สามารถเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจเอาไอของซิงค์ออกไซด์เข้าไปในระหว่างการหลอมสังกะสี ถ้ารับเข้าไปในปริมาณมากจะก่อให้เกิดโรค metal-fume fever โดยจะมีอาการหนาวสั่น มีไข้ คลื่นไส้ อาเจียร คอแห้ง ไอ ปวดเมื่อย อ่อนเพลีย และปวดศีรษะ ตลอดจนปวดตามลำตัว หลังจากนั้น 2 - 3 ชั่วโมง เหงื่อจะออกมาก อุณหภูมิภายในร่างกายลดลง อาการที่เกิดขึ้นจะหายไปเ็นระยะเวลาสั้นๆ



รูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตถ่านไฟฉาย (ขรรค์ เกரியงไกรอุดม, 2527)



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการประกอบถ่านไฟฉายที่ใช้เซลล์โรลล์แบบแบ่งเปียก และแบบกระดาษ (Robbins, 1970)

5. เมอร์คิวริคคลอไรด์ สามารถเข้าสู่ร่างกายโดยการกิน มีอาการแสบท้อง คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง มีผลต่อกระเพาะและลำไส้ ถ้าสัมผัสผิวหนัง จะทำให้เป็นผื่นแดง แสบ เป็นแผลพุพอง ส่วนอาการแบบเรื้อรัง จะส่งผลกระทบต่อระบบประสาท และอาจเป็นอันตรายต่อสมองและไตได้

6. แคดเมียม สามารถเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจเอาไอของแคดเมียมเข้าไปในระหว่างที่เผาพร้อมกับแท่งสังกะสี จะทำให้เกิดโรค metal-fume fever มีอาการเช่นเดียวกับอาการที่เกิดขึ้นจากการหายใจเอาไอของซิงค์ออกไซด์เข้าไป

3.3 การบำบัดและกำจัดของเสียที่เป็นอันตราย

การบำบัดของเสียที่เป็นอันตราย หมายถึง การจัดการกับของเสียที่เป็นอันตรายเพื่อลดความเป็นพิษและทำให้มีสมบัติทางด้านกายภาพและทางเคมีที่เหมาะสม ก่อนนำไปกำจัดขั้นสุดท้ายแบ่งออกเป็น 4 วิธี คือ

1. การบำบัดทางกายภาพ(Physical treatment) เป็นการแยกของแข็งและของเหลวออกจากกันด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การดูดซับด้วยคาร์บอน, การกรอง, การเหวี่ยงด้วยแรงหนีศูนย์กลาง, และการตกตะกอน เป็นต้น

2. การบำบัดทางเคมี(Chemical treatment) เป็นวิธีการทำลายฤทธิ์ของเสีย ประกอบด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การทำสะเทิน, การบำบัดด้วยวิธีออกซิเดชัน, การบำบัดด้วยวิธีรีดักชัน, การทำเสถียร/การทำให้เป็นก้อนแข็ง, การตกตะกอนผลึก และการแลกเปลี่ยนประจุ เป็นต้น

3. การบำบัดทางชีวภาพ(Biological treatment) เหมาะกับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ ประกอบด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ ระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์, การย่อยสลายแบบแอนแอโรบิค และการหมักทำปุ๋ย เป็นต้น

4. การบำบัดด้วยความร้อน(Thermal treatment) ได้แก่การเผา

การกำจัดของเสียมีด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับประเภทของเสียนั้นๆ เช่น การกำจัดโดยการนำไปทิ้งในทะเล, การฝังกลบ และการอัดลงชั้นบาดาล เป็นต้น โดยที่ของเสียนั้นๆ จะต้องผ่านการบำบัดก่อน เพื่อให้มีความเหมาะสมในการกำจัดขั้นสุดท้าย (Youn, 1990 อ้างถึง Cassell และ Walker, 1970)

การฝังกลบเป็นวิธีการที่ใช้กำจัดของเสียที่เป็นอันตราย ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ของเสียที่เป็นของเหลวหรือสลัดจ์ ไม่เหมาะสมที่จะกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ ทั้งนี้เนื่องจากของเหลวที่อยู่ในของเสียหรือเมื่อถูกน้ำชะละลาย อาจปนเปื้อนลงสู่ดินและน้ำใต้ดินได้ง่าย (Youn, 1990 อ้างถึง Peter และ Ferg, 1987)

3.4 การทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็ง

การทำเสถียร(Stabilization) หมายถึง กระบวนการที่ของเสียถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่มีความคงตัวทางเคมีมากขึ้น รวมถึงการทำให้อยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งธาตุหรือสารประกอบที่เป็นพิษจะถูกกักด้วยโพลิเมอร์หรือโครงสร้างผลึกของสารที่ทำให้เกิดความคงตัว (Sollars และ Perry, 1989 อ้างถึง Wiles, 1987)

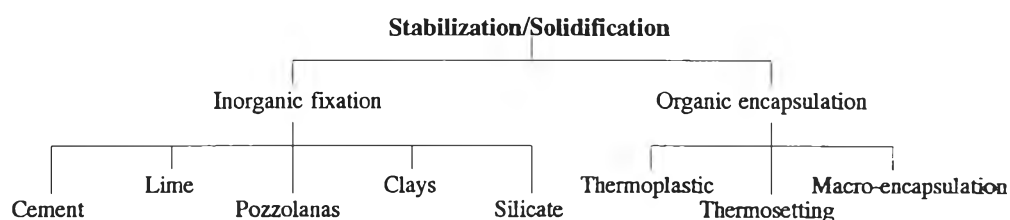
การทำให้เป็นก้อนแข็ง(Solidification) หมายถึง กระบวนการที่มีการเติมวัสดุบางชนิดลงในของเสีย เพื่อให้ได้ของแข็งที่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีความคงตัวทางโครงสร้าง และสมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้นพร้อมที่จะถูกหีบจับ และขนส่งต่อไป (Sollars และ Perry, 1989 อ้างถึง Wiles, 1987) ซึ่งอาจมีการเกิดพันธะเคมีระหว่างของเสียกับวัสดุที่เติม

Sollars และ Perry (1989) กล่าวถึงวัตถุประสงค์ของการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็ง ไว้ 4 ประการ คือ

1. เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง
2. เพื่อปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ ให้สะดวกในการหีบจับ และขนส่ง
3. เพื่อลดพื้นที่ผิว ลดการรั่วไหลของสารมลพิษ
4. เพื่อลดความสามารถในการละลายของสารมลพิษ

Sollars และ Perry (1989) แบ่งการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็ง ออกเป็น 2 ประเภท ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ ดังนี้

1. การจับยึดด้วยสารอนินทรีย์(Inorganic fixation) เช่น ปูนซีเมนต์, ปูนขาว, วัสดุปอซโซลาน, ดินเหนียว และซิลิเกต มักใช้กับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์
2. การเก็บกักด้วยสารอินทรีย์(Organic encapsulation) เช่น บิโพลีเมอร์, พาราฟิน และโพลิเอทิลีน มักใช้กับของเสียกัมมันตภาพรังสี



รูปที่ 3.3 กระบวนการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็ง (Sollars และ Perry, 1989)

Shuckrow, Pajak และ Touhill (1982) กล่าวว่า การทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็งมีด้วยกัน 7 วิธี คือ วิธีการใช้ปูนซีเมนต์(Cement-based techniques), วิธีการใช้ปูนขาว(Lime-based techniques), วิธีเทอร์โมพลาสติก(Thermoplastic techniques), วิธีออร์แกนิกโพลิเมอร์(Organic polymer techniques), วิธีเอนแคปซูลเลชัน(Encapsulation techniques), วิธีการใช้วัสดุที่มีสมบัติแข็งตัวเหมือนซีเมนต์(Self-cementing techniques) และวิธีหลอมให้เป็นแก้ว(Glassification) โดยแต่ละวิธีมีรายละเอียด และข้อดีข้อเสียดังแสดงในตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งแบบต่างๆ
(Shuckrow และคณะ, 1982)

กระบวนการ	รายละเอียด
1. Cement based	ผสมซีเมนต์ลงในของเสีย และ/หรือเติมส่วนผสมอื่นๆทิ้งไว้ให้แข็งตัว
2. Lime based	ผสมของเสียลงในปูนขาว หรือวัสดุที่เป็นปอซโซลาน พร้อมกับเติมน้ำ ทิ้งไว้ให้แข็งตัว
3. Thermoplastic based	นำของเสียมาทำให้แห้ง และให้ความร้อน จากนั้นผสมให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน (เช่น Bitumen, Parafin หรือ Polyethylene) ทิ้งไว้ให้แข็งตัว
4. Organic polymer	นำของเสียมาผสมกับโพลิเมอร์ จากนั้นเติมสารเร่งปฏิกิริยาให้กระจายอย่างสม่ำเสมอ ทิ้งไว้ให้แข็งตัว กากของเสียจะถูกกักไว้ภายในมวลอย่างหลวมๆ
5. Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันแน่น จากนั้นห่อหุ้มด้วยวัสดุเฉื่อย เช่น Polyethylene หรือ Organic resin
6. Self cementing	สารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน เช่น แคลเซียมซิลเฟต และแคลเซียมซิลไฟด์ สามารถนำมาผสมกับกากของเสีย ทำให้เป็นก้อนแข็ง สะดวกในการขนส่ง และมีอัตราซีเมนต์ต่ำ
7. Glassification	กากของเสียที่เป็นอันตรายสูง เช่น กากสารกัมมันตภาพรังสี นำมาผสมกับทราย หลอมให้เป็นซิลิเกตสังเคราะห์ แก้วหรือซิลิเกตจะป้องกัน การชะละลายได้เป็นอย่างดี กากของเสียที่ทำให้แข็งตัวด้วยวิธีนี้ จัดว่าเป็นวัสดุที่ปลอดภัย สามารถนำไปทิ้งได้โดยไม่ต้องห่อหุ้ม

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งแต่ละวิธี (Shuckrow และคณะ, 1982)

กระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Cement and Silicate Based	Chemical Fixation/Solidification	แห้งหรือเปียก (เหมาะกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ราคาถูก - มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี - กำจัดของเสียพวกโลหะได้ดีมาก - เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนามาอย่างดีแล้ว 	<ul style="list-style-type: none"> - สารอินทรีย์บางชนิดอาจทำลายการแข็งตัวของคอนกรีต - ส่วนผสมของซีเมนต์ และกากของเสียที่ไม่ถูกห่อหุ้มสามารถถูก ย่อยสลาย และถูกชะละลายได้ ภายใต้สภาวะที่มีพีเอชต่ำ - เพิ่มน้ำหนัก และปริมาตรของเสีย ทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และฝังกลบเพิ่มขึ้น
2. Lime Based	Chemical Fixation/Solidification	แห้งหรือเปียก (เหมาะกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ราคาถูก - เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนามาอย่างดีแล้ว - การใช้เถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมเป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิดในกระบวนการเดียวกัน 	<ul style="list-style-type: none"> - เหมือนกับกระบวนการ Cement Based
3. Thermoplastic Based	Physical Fixation/Solidification	แบบแห้ง (เหมาะกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีได้ เป็นอย่างดี - สารละลายที่ชะละลายมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - เครื่องมือมีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความเชี่ยวชาญสูง - ของเสียชนิดเปียกลดประสิทธิภาพของกระบวนการ - ไม่สามารถกำจัดสารพวก Strong Oxidants, Dehydrated Salt

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งแต่ละวิธี (Shuckrow และคณะ, 1982)

กระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
4. Organic Polymer Process	Physical Fixation/Solidification	แห้งหรือเปียก (เหมาะกับของเสียอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิดโครงสร้างของโพลิเมอร์ - ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นต่ำ ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียจะถูกยึดไว้ในโพลิเมอร์อย่างหลวมๆ - สารที่มี pH ต่ำ ทำให้โลหะถูกชะละลายออกมาได้มากขึ้น - การย่อยสลายทางชีวภาพของโพลิเมอร์บางชนิดอาจทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ
5. Encapsulation	Chemical Containment	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> - ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี - ไม่มีการชะละลายของของเสีย เมื่อสารที่ห่อหุ้มไม่ถูกทำลาย - ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีอื่น 	<ul style="list-style-type: none"> - การชะละลายของของเสียจะเกิดขึ้นหากสารที่ห่อหุ้มถูกทำลาย - ไม่เหมาะกับการกำจัดของเสียจำนวนมาก
6. Self Cementing Techniques	Chemical Fixation/Solidification	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้วัสดุเติม (additive) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - สารอินทรีย์บางชนิดอาจทำลายการแข็งตัวของคอนกรีต - ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการห่อหุ้มสามารถถูกย่อยสลาย และถูกชะละลายได้ภายใต้ภาวะที่มีพีเอชต่ำ
7. Glassification	Physical Fixation/Solidification	แบบแห้ง	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียที่ถูกห่อหุ้มด้วยแก้วจะถูกชะละลายน้อยมาก - การบรรจุอยู่ในแกนที่ดี - ใช้วัสดุที่มีราคาถูก 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิสูงอาจทำให้องค์ประกอบของของเสียระเหยออกมาก่อนที่จะถูกตรึงไว้ - ค่าใช้จ่ายสูง อุปกรณ์มีราคาแพง และต้องการผู้ชำนาญเฉพาะ - ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับของเสียทุกชนิด ยกเว้นสารกัมมันตรังสี และสารที่มีพิษมากๆ

3.5 การทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์

การทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยการใช้วัสดุซีเมนต์ ประกอบด้วย การผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และสารผสมเพิ่มอื่นบางประเภท เช่น แก้วลอย, ซิลิกาเกต และซิลไฟด์ เป็นต้น กับของเสีย ของเสียที่เป็นของเหลวหรือของเหลวในสัจจะกลายเป็นส่วนหนึ่งของน้ำสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเกิดแคลเซียมซิลิกาเกตไฮเดรตเจล ซึ่งจะแข็งตัวกลายเป็นผลึกแหลมๆ อย่างหนาแน่น โลหะหนักในของเสียจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซิลิกาเกต ในสภาวะที่มีความเป็นด่างสูง และถูกจับไว้ภายในโครงสร้างของซีเมนต์ โลหะบางชนิดอาจถูกกักอยู่ภายในโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อนของซีเมนต์ (Bishop, 1988)

3.6 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดเม็ดปูน ซึ่งประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุแคลเซียม, ซิลิกอน, อะลูมิเนียม และเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 3.5 แล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเกิดเป็นสารประกอบอยู่ในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก สารประกอบหลักที่สำคัญ 4 ชนิดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลังจากการเผา ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิกาเกต(tricalcium silicate), ไดแคลเซียมซิลิกาเกต(dicalcium silicate), ไตรแคลเซียมอลูมิเนต(tricalcium aluminate) และเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์(tetracalcium aluminoferrite) ดังแสดงในตารางที่ 3.6 โดยชื่อย่อที่แสดงเป็นชื่อย่อที่ใช้เฉพาะอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เท่านั้น โดยให้ $\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$

ตารางที่ 3.5 ออกไซด์ของธาตุต่างๆ ในเม็ดปูน (Poon, Peters และ Perry, 1983 อ้างถึง Lee, 1970)

สารประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	60-65
SiO ₂	20-24
Al ₂ O ₃	4-8
Fe ₂ O ₃	2-5

ตารางที่ 3.6 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	สูตรทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

วินิต ช่อวิเชียร (2539) กล่าวถึงอิทธิพลของสารประกอบทั้ง 4 ชนิดต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไว้ดังนี้

ไตรแคลเซียมซิลิเกต ทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดเร็วในระยะแรก เกิดความร้อนปานกลาง และหนการกักความร้อนของซัลเฟต

ไดแคลเซียมซิลิเกต ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในระยะหลัง เกิดความร้อนน้อย และหนต่อการกักความร้อนของซัลเฟตได้สูง

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดได้เร็วมาก ก่อและแข็งตัวทันทีที่ผสมกับน้ำ เกิดความร้อนมาก ไม่หนต่อการกักความร้อนของซัลเฟต

เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ไม่ค่อยมีส่วนในการพัฒนากำลังรับแรงอัด เป็นสารที่ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทาดำ

ในปูนซีเมนต์จะมีสารประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกตรวมกันประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ และเป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากตารางที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ CaO และ SiO_2 รวมกันมากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งสารประกอบทั้งสองนี้เป็นองค์ประกอบสำคัญของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตซึ่งทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์รับกำลังได้สูง

ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม(มอก. 15) แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

ประเภท 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา(Ordinary portland cement) สำหรับใช้ในงานก่อสร้างหรือผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา ไม่อยู่ในสภาวะอากาศรุนแรงหรือในที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ เป็นต้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง, ตราพญานาคสีเขียว และตราเพชรเม็ดเดียว

ประเภท 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง(Modified portland cement) ใช้ในงานก่อสร้างหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมก่อสร้างใดๆ ที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานเขื่อนคอนกรีต ตอม่อสะพาน เป็นต้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร

ประเภท 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว(High-Early-Strength portland cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะให้กำลังสูงในระยะแรก ใช้ในงานก่อสร้างหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความสามารถในการรับกำลังอัดได้เร็ว เช่น งานเสาเข็ม คาน พื้นที่ต้องการถอดแบบเร็ว เป็นต้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเอราวัณ, ตราพญานาคสีแดง และตราสามพรวน

ประเภท 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดความร้อนต่ำ(Low-Heat portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำสุด ใช้ในงานคอนกรีตหยาบ เช่น เขื่อน ซึ่งเป็นโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่เกิดความร้อนสะสมมาก

ประเภท 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตสูง(Sulfate-Resistant portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ทนซัลเฟตได้สูง ใช้สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น ในน้ำหรือดินที่มีต่างสูง มีระยะเวลาในการแข็งตัวช้ากว่าประเภท 1 ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม และปูนซีเมนต์ตราช้างฟ้า

นอกจากปูนซีเมนต์ 5 ประเภทนี้แล้วยังมีปูนซีเมนต์ประเภทอื่นๆ เช่น ปูนซีเมนต์ผสมหรือปูนซีเมนต์ซิลิกา เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่มีทรายผสมอยู่ร้อยละ 25-30 การแข็งตัวช้ากว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ไม่ยัดหรือหดตัวมาก เหมาะกับงานก่ออิฐหรืองานที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดมากได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเสือ, ตรานกอินทรี และตรางูเห่า

3.7 ปูนขาว

ปูนขาวเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาหินปูนจนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์แยกตัวออกมา ประเภทของปูนขาวขึ้นกับส่วนประกอบของหินปูนและขั้นตอนการเผา ถ้าทำการเผาหินปูนอย่างสมบูรณ์ จะได้ปูนขาวดิบ (Quick lime) เมื่อได้รับความชื้น องค์ประกอบออกไซด์จะรวมตัวกับน้ำกลายเป็นรูปของไฮดรอกไซด์ ซึ่งเรียกว่าปูนขาวสุก (Hydrated lime) ปูนขาวดิบตามท้องตลาด มีส่วนประกอบแคลเซียมออกไซด์ประมาณร้อยละ 61 และคิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 81.6 (สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2532)

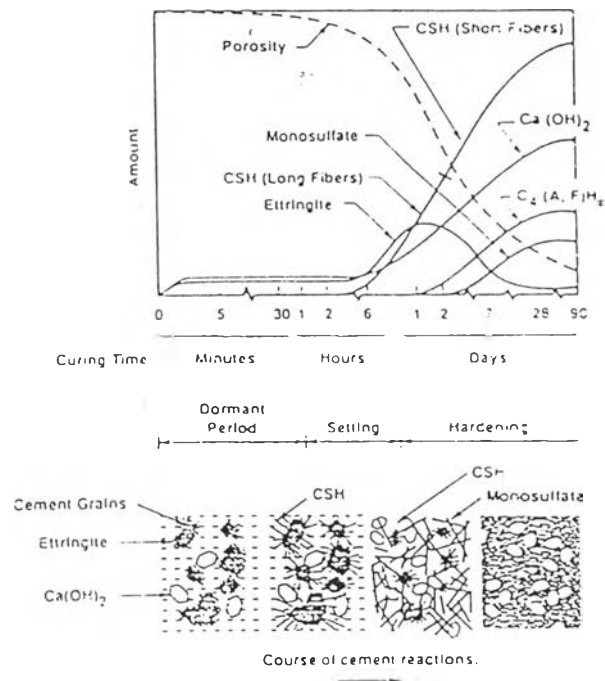
3.8 ปฏิกริยาไฮเดรชัน

ปฏิกริยาไฮเดรชัน คือ ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างสารประกอบในปูนซีเมนต์กับน้ำ เป็นผลทำให้เกิดการแข็งตัว ผลิตภัณฑ์ของปฏิกริยาไฮเดรชันประกอบด้วย

แคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต (calcium-silicate-hydrate, $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) มีชื่อย่อเป็น $\text{C}_3\text{H}_2\text{S}_3$ ประมาณร้อยละ 50-90 โดยปริมาตร มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ $\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$) มีชื่อย่อเป็น CH ประมาณร้อยละ 20-25 โดยปริมาตร แสดงความจุบัพเฟอร์

น้ำจะทำปฏิกริยากับแคลเซียมซิลิเกต และอลูมินेट ในซีเมนต์เกิดเป็น แคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต ผลึกที่แหลมและหนาแน่นของซิลิเกต จะเติบโตออกจากอนุภาคของซีเมนต์เชื่อมโยงเป็นโครงร่างแข็ง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การก่อตัวของซีเมนต์ (Jeffrey และคณะ, 1995 อ้างถึง Dole, 1985)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นแสดงในสมการที่ 3.8-3.11 (Shively และคณะ, 1986 อ้างถึง Neville, 1983)



จากสมการที่ 3.8-3.11 จะเห็นได้ว่า ความเป็นด่างที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวแสดงความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ของซีเมนต์ ส่วนแคลเซียมซิลิเกตจะตกผลึกกลายเป็นโครงสร้างของซีเมนต์ เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมมากกว่า 100 mg/l. และ pH สูงกว่า 11 (Shively และคณะ, 1986 อ้างถึง Batchelor และ McDevitt, 1984)

ซีเมนต์ มีความเป็นด่างสูง ประกอบกับ ซิลิกา และพื้นผิวออกไซด์ไฮดรอกไซด์ จะเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกผลึก และการดูดซับ amphoteric metal (Shively และคณะ, 1986)

ในการชะละลายอย่างต่อเนื่อง น้ำจะทำลายซีเมนต์เพสต์ โดยการละลายปูนขาวและอลูมินาบางส่วน ออกมา หากปฏิกิริยาดำเนินไปเรื่อยๆ จะเหลือกาบไฮเดรตของซิลิกา, เหล็กออกไซด์ และอลูมินา ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดช้ามากในน้ำธรรมชาติ และจะเกิดได้เร็วในสารละลายกรด (Shively และคณะ, 1986 อ้างถึง Lea และ Desch 1956)

3.9 กลไกการทำเสถียรโลหะหนัก

Poon และคณะ (1985) ทำการศึกษากลไกการทำเสถียรโลหะหนัก 2 ชนิด คือ Zn และ Hg โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ Na_2SiO_3 เป็นวัสดุประสาน พบว่า

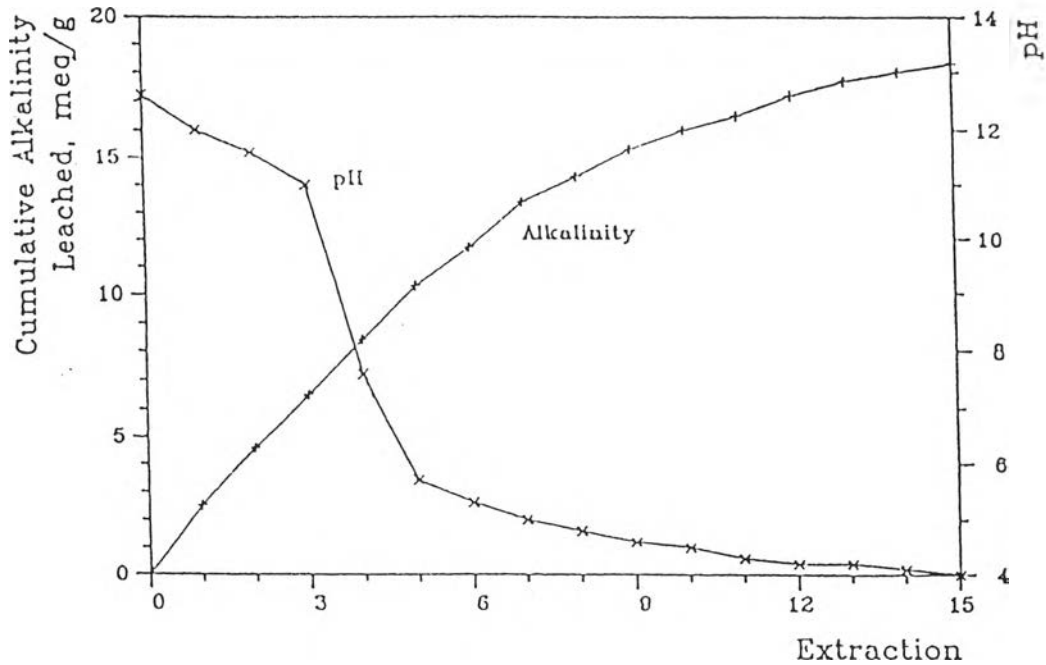
ก้อนตัวอย่างที่มี Zn ผสมอยู่ ผลการทดสอบ SEM, XRD และ Porosimetry พบว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์หายไป เกิดการขยายตัวของผลึก ettringite ทำให้ความพรุนสูงและรูพรุนมีขนาดใหญ่ แต่เมื่อนำมาทดสอบชะละลาย ค่าความสามารถในการถูกชะละลายของ Zn กลับมีค่าต่ำ ซึ่งให้เห็นว่าความพรุนไม่ใช่ปัจจัยที่สำคัญในการชะละลายของ Zn ออกจากโครงสร้าง กลไกการทำเสถียรของ Zn น่าจะเป็นแบบ Chemical stabilization มากกว่า Physical encapsulation แต่จากผลการทดสอบ SEM และ XRD ไม่ได้แสดงให้เห็นว่ามี Zn-silicate เกิดขึ้น การหายไปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งให้เห็นว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์น่าจะเป็นตัวการสำคัญในการทำเสถียร Zn

ก้อนตัวอย่างที่มี Hg ผสมอยู่ ผลการทดสอบ SEM, XRD และ Porosimetry พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน รวมทั้งความพรุน คล้ายกับตัวอย่างที่ไม่มี Hg ผสมอยู่ แสดงว่า Hg ไม่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน การก่อตัวของแคลเซียม-ซิลิเกต-ไฮเดรต, แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียม-ซิลิเกต เจล คล้ายกับตัวอย่างที่ไม่มี Hg ผสมอยู่ ซึ่งให้เห็นว่าไม่มีปฏิกิริยาระหว่าง Hg กับซีเมนต์หรือ Na_2SiO_3 เลย กลไกการทำเสถียรของ Hg น่าจะเป็นแบบ Physical encapsulation โดยยึดติดกับโครงสร้างซีเมนต์อย่างหลวมๆ ทำให้เมื่อทดสอบชะละลาย Hg จึงถูกชะละลายออกมามาก

Bishop (1988) ศึกษาการสกัดสารจากของเสียที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์ โดยใช้โลหะหนักสังเคราะห์เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม, โครเมียม และตะกั่ว โดยศึกษาถึงความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) และกลไกการจับยึดโลหะหนักในซีเมนต์ ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

ความจุบัฟเฟอร์

โดยการทดสอบการสกัดสารของ U.S. EPA, ติดต่อกัน 15 ครั้ง นำสารสกัดที่ผ่านกระดาษกรองมา วัดพีเอชและความเป็นด่าง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงค่าพีเอช และค่าความเป็นด่างจากการทดสอบการชะละลาย

(Bishop, 1988)

จากรูปพบว่า ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ค่าความเป็นด่างจากการสกัดครั้งที่ 15 เหลือแค่ 1.7 เปอร์เซ็นต์ของความเป็นด่างสะสมทั้งหมด ความเป็นด่างที่เหลืออยู่จะถูกย่อยสลายโดยใช้กรดเข้มข้น 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก, กรดไนตริก และกรดไฮโดรฟลูออริก จนกระทั่งความเป็นด่างหมดไป

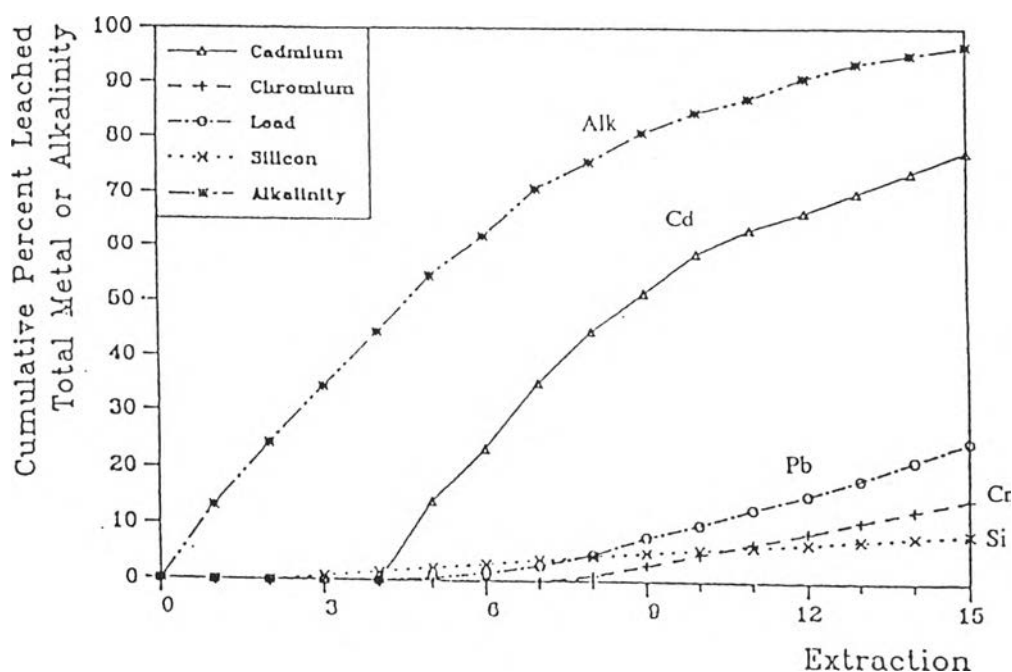
พบว่าค่าความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ทั้งหมดเท่ากับ 18.3 meq/g ความเป็นด่างที่ถูกชะละลายออกมาจากตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็งจะเป็นตัวควบคุมพีเอชของน้ำสกัด โดยสะท้อนกรดอะซิติกให้เป็นกลาง จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นด่างจะลดลงตามจำนวนครั้งของการสกัดที่เพิ่มขึ้น

กลไกการจับยึดโลหะหนัก

จากการทดลองที่ผ่านมาหลายครั้งทำให้ทราบว่า โลหะหนักอาจถูกดูดติดบนผนังโพรงภายในโครงสร้างของซีเมนต์หรืออาจทำปฏิกิริยาเคมีที่ซับซ้อนกับซีเมนต์เพสต์

กรณีที่โลหะหนักถูกกักในโครงสร้าง หรือเกาะติดในรูพรุนแล้ว โลหะหนักเหล่านั้นควรถูกชะละลายออกมาคล้ายกับการชะละลายของความเป็นต่าง จากรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟของแคดเมียมผสมที่ถูกระบายออกมาคล้ายคลึงกับเส้นกราฟความเป็นต่างผสม ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่า แคดเมียมน่าจะอยู่ในรูปของแคดเมียมไฮดรอกไซด์และเกาะติดอยู่ตามผนังโพรงของซีเมนต์

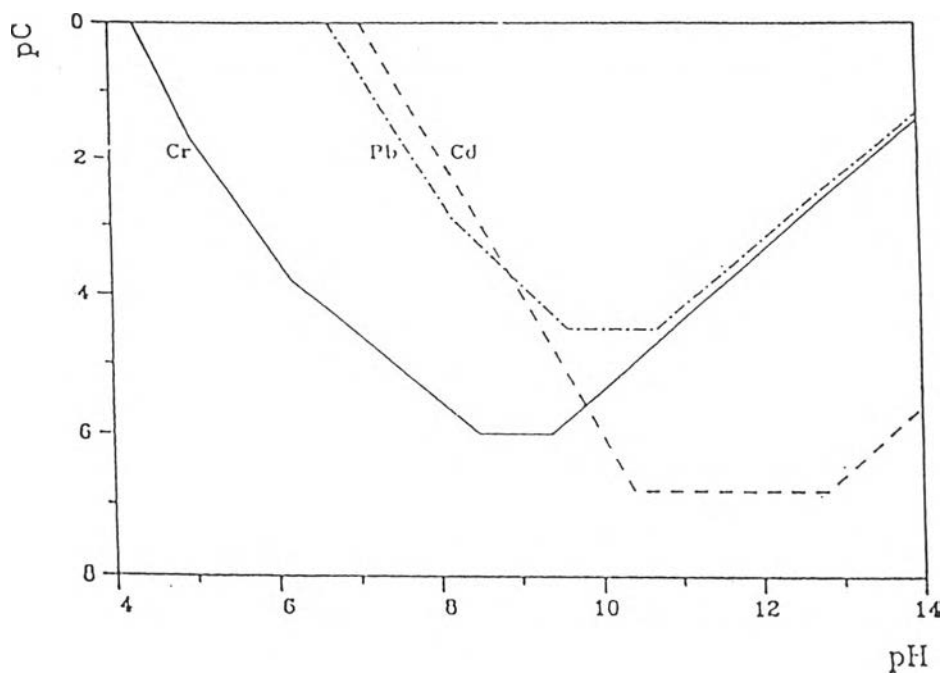
สำหรับโครเมียมและตะกั่ว จากรูปที่ 3.6 พบว่าเส้นกราฟผสมของโครเมียมและตะกั่วที่ถูกชะละลายออกมาคล้ายกับการชะละลายของซิลิกา ซึ่งเป็นส่วนประกอบของซีเมนต์ ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่า โครเมียมและตะกั่วควรอยู่ในรูปซิลิเกตที่ไม่ละลายมากกว่าที่จะอยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ การชะละลายของโครเมียมและตะกั่วจะเกิดขึ้นที่พีเอชต่ำ และต่ำกว่าพีเอชที่แคดเมียมถูกชะละลายออกมา อัตราการชะละลายของโลหะทั้งสองมีค่าต่ำกว่าอัตราการชะละลายที่คาดคะเนจากโลหะไฮดรอกไซด์ แสดงว่าโลหะทั้งสองอยู่ในรูปซิลิเกต และจะถูกชะละลายออกมาเมื่อโครงสร้างของซิลิกาถูกทำลาย



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผสมโลหะหนัก, ความเป็นต่าง และซิลิกอนที่ถูกชะละลาย (Bishop, 1988)

รูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพ pC-pH สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม, โครเมียม และตะกั่ว ในสารละลายที่มีค่า Ionic strength 0.75 โมลาร์ พบว่าในขณะที่เริ่มผสมซีเมนต์ พีเอชที่สูงของซีเมนต์เพสต์ประมาณ 12-13 ทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นของแข็งอยู่ในโครงสร้างของซีเมนต์ สำหรับโครเมียมและตะกั่วอยู่ในรูปละลายและกลายเป็นส่วนหนึ่งของปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ ซึ่งเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกา จากสาเหตุดังกล่าวนี้จึง อธิบายได้ว่า แคดเมียมถูกชะละลายออกมาเช่นเดียวกับการชะละลายของความเป็นต่าง สำหรับโครเมียมและตะกั่วถูกชะละลายออกมาโดยขึ้นกับการละลายของซิลิกา

ภายหลังการทดสอบการสกัดสาร ทำการวิเคราะห์น้ำหนักแห้งของสารทั้งหมด พบว่าปริมาณสารที่ถูกชะละลายออกไปประมาณ 50-70 % ของปริมาณทั้งหมดก่อนการทดสอบ แต่ยังมีแคดเมียม, โครเมียม และตะกั่วเหลืออยู่ 50, 85 และ 75 % ตามลำดับ สำหรับอะลูมิเนียม, เหล็ก, ซิลิกอน และแคลเซียม ซึ่งเป็นส่วนประกอบในซีเมนต์เหลืออยู่ 90, 98, 80 และ 8 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า การทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการยึดจับโลหะหนักในของเสีย



รูปที่ 3.7 กราฟแสดง pC-pH diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม, โครเมียม และตะกั่ว (Bishop, 1988)

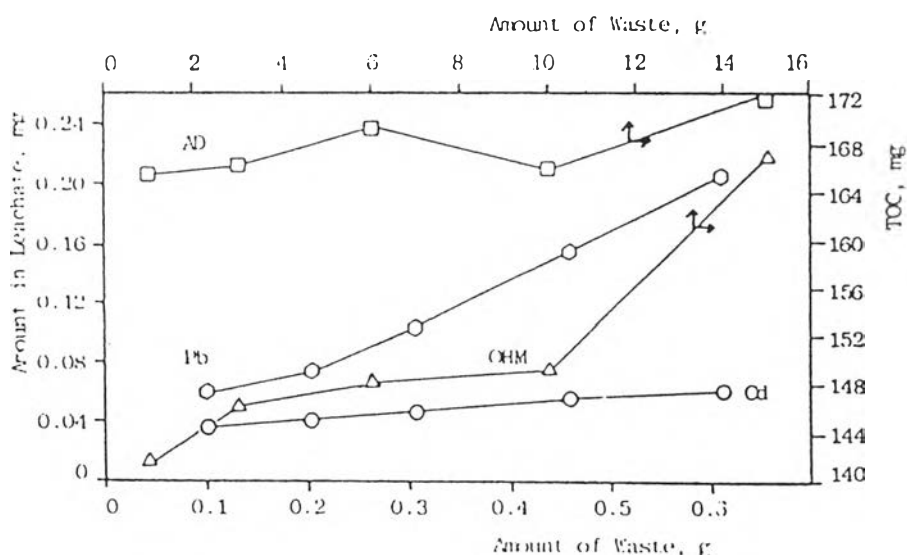
3.10 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง

Shin และ Sujjwatthana (1988) ทำการศึกษาปัจจัย 5 ประการที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อนแข็ง ด้วยวิธี cement-silica based กับของเสีย 4 ชนิด คือ แคลเซียม, ตะกั่ว, อัลตรีน และคลอเดน ผลการศึกษาพบว่า

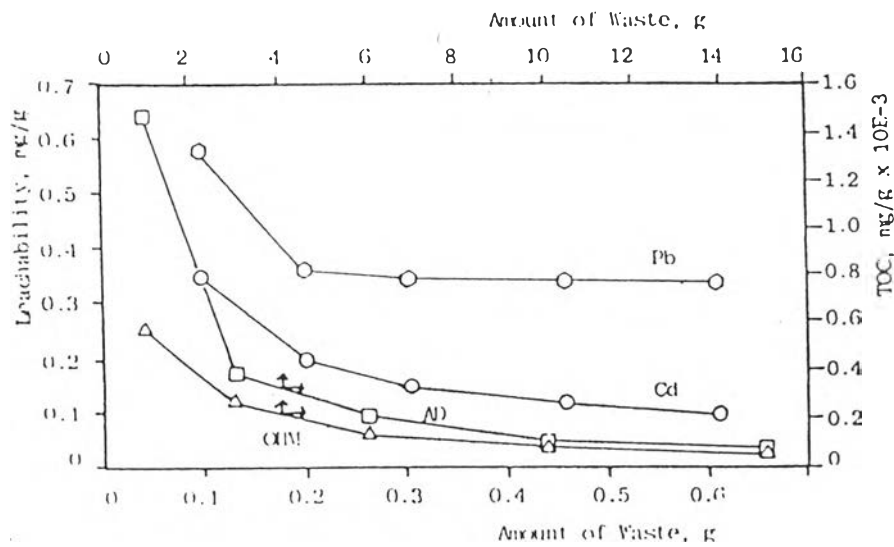
1. ปริมาณของเสีย

จากการทดสอบการสกัดด้วยกรดอะซิติก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก และปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในสารสกัด ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 พบว่าปริมาณแคลเซียม, ตะกั่ว, อัลตรีน และคลอเดน ที่ถูกชะละลายออกมาเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเสียที่อยู่ในก้อนตัวอย่าง ในขณะที่ความสามารถในการถูกชะละลาย (อัตราส่วนของปริมาณของเสียที่ถูกชะละลายต่อปริมาณของเสียในก้อนตัวอย่าง) มีค่าลดลง และพบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมและตะกั่วในสารสกัดมีค่าน้อยกว่าอัลตรีนและคลอเดน ซึ่งอาจเป็นเพราะความเป็นด่างที่สูงของซีเมนต์เพสต์ ประกอบกับ ซิลิกา, ออกซีไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกต มีความสามารถในการดูดติดโลหะหนักได้ดีกว่าสารอินทรีย์

อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณของเสียในสารสกัด มีค่าน้อยกว่าอัตราการเพิ่มของปริมาณของเสียในก้อนตัวอย่าง ทำให้ค่าความสามารถในการถูกชะละลายของของเสียในก้อนตัวอย่างลดลง

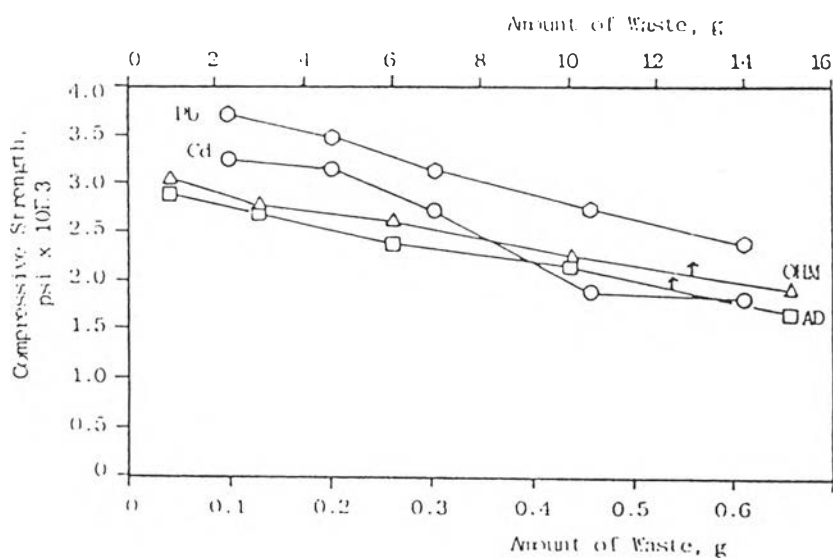


รูปที่ 3.8 ผลของปริมาณของเสียต่อการถูกชะละลาย (Shin และ Sujjwatthana, 1988)



รูปที่ 3.9 ผลของปริมาณของเสียต่อความสามารถในการถูกชะละลาย
(Shin และ Sujiwatthana, 1988)

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของเสียในซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง

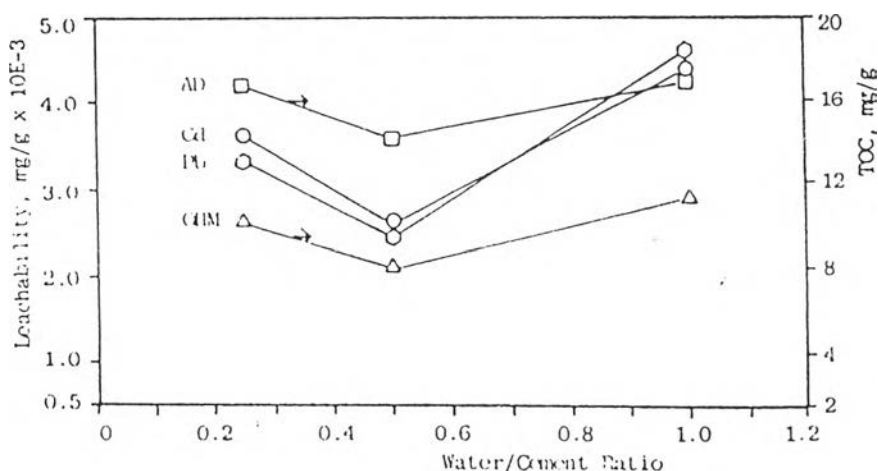


รูปที่ 3.10 ผลของปริมาณของเสียต่อค่ากำลังรับแรงอัด (Shin และ Sujiwatthana, 1988)

2. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

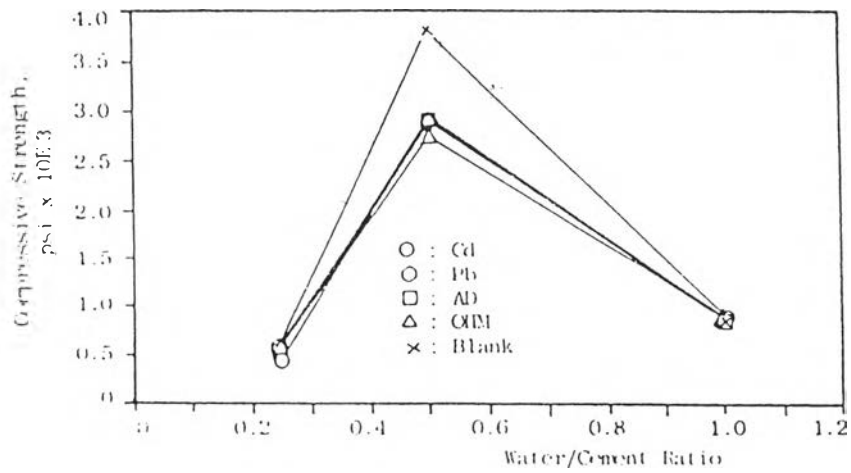
จากการทดสอบการสกัดสาร ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.11 พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 จะทำให้ความสามารถในการถูกชะละลายต่ำสุด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อความพรุนของซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และระดับการบดอัด (compaction) มีผลต่อปริมาตรของรูพรุนในซีเมนต์ คือ เมื่อระดับการบดอัดและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่เพียงพอ เป็นผลให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเกิดผลึกไม่ดีของเสียจึงถูกชะละลายออกมามาก แต่ถ้าปริมาณน้ำมากเกินไป จะส่งผลให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเกิดผลึกสูง แต่ก็เพิ่มรูพรุนในเนื้อซีเมนต์ เป็นการเพิ่มโอกาสให้ของเสียถูกชะละลายออกมามาก

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด รูปที่ 3.12 จะเห็นว่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด โดยที่ปริมาณน้ำที่มากหรือน้อยเกินไป จะมีผลต่อระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและความพรุน ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง



รูปที่ 3.11 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อความสามารถในการถูกชะละลาย

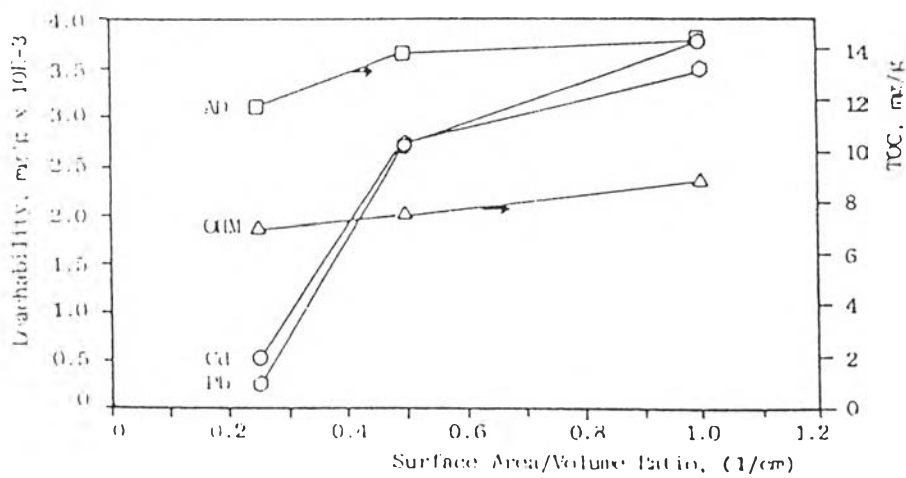
(Shin และ Sujiwatthana, 1988)



รูปที่ 3.12 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อกำลังรับแรงอัด
(Shin และ Sujawatthana, 1988)

3. อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร

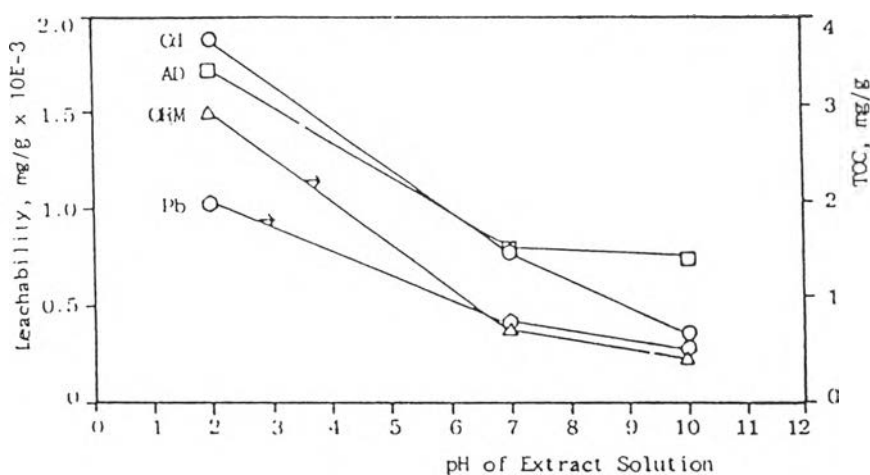
จากการทดสอบการสกัด รูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่า ค่าอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงๆ จะทำให้ของเสียถูกชะละลายออกมา



รูปที่ 3.13 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่อความสามารถในการถูกชะละลาย
(Shin และ Sujawatthana, 1988)

4. พีเอชของสารละลายที่ใช้ในการสกัด

จากผลการทดสอบการสกัด โดยใช้สารละลายพีเอช 2, 7 และ 10 ผลการทดสอบดังรูปที่ 3.14 พบว่า ของเสียจะถูกชะละลายออกมามากที่สุดเมื่อใช้สารสกัดพีเอชเท่ากับ 2 สำหรับสารสกัดพีเอชเท่ากับ 7 ความสามารถในการถูกชะละลายมีค่าประมาณ 25-45 % ของสารสกัดที่เป็นกรด ขณะที่ใช้สารสกัดพีเอชเท่ากับ 10 ความสามารถในการถูกชะละลายมีค่าต่ำมาก

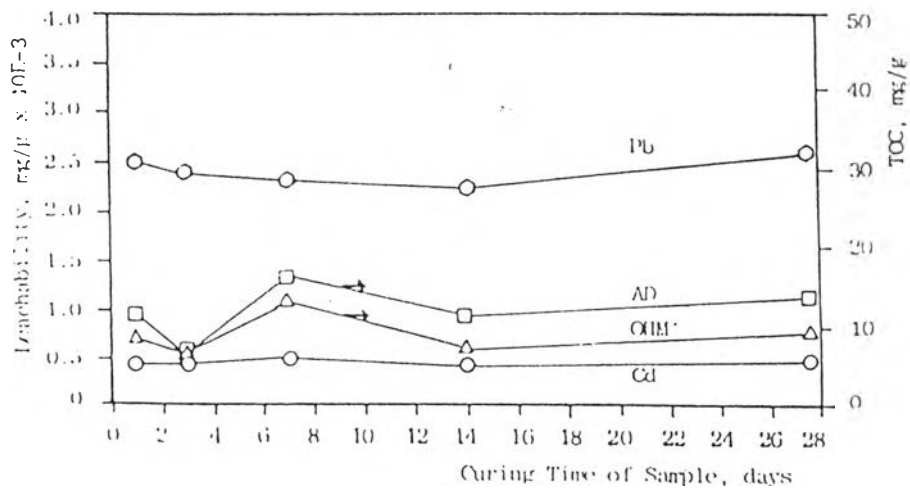


รูปที่ 3.14 ผลของค่าพีเอชของสารสกัดต่อความสามารถในการถูกชะละลาย

(Shin และ Sujjwatthana, 1988)

5. ระยะเวลาในการบ่ม

จากผลการทดสอบการชะละลาย รูปที่ 3.15 พบว่า ระยะเวลาบ่มไม่มีผลต่อการถูกชะละลายของของเสีย ระยะเวลาบ่มที่ยาวนาน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการถูกชะละลายไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน การถูกชะละลายของแคดเมียม, ตะกั่ว, อลด์ริน และคลอเดน น่าจะสัมพันธ์กับกลไก 2 แบบ กับซีเมนต์เพสต์ คือ การดูดติด-การตกผลึก และขีดจำกัดการละลายได้ของโครงสร้างซีเมนต์



รูปที่ 3.15 ผลของระยะเวลาบ่มต่อความสามารถในการถูกชะละลาย
(Shin และ Sujiwatthana, 1988)

3.11 สารมลทินที่มีผลต่อการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์

สารมลทินในของเสี้ยว อาจมีผลต่อการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็งได้หลายลักษณะ เช่น

- ขัดขวางการยึดจับระหว่างของเสี้ยวกับซีเมนต์
- เพิ่มความสามารถในการถูกชะละลายของของเสี้ยว
- หน่วงการแข็งตัวของซีเมนต์
- ลดกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้

Jeffrey และคณะ (1995) กล่าวถึง สารมลทินบางชนิดที่มีผลต่อการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ ไว้ดังนี้

ตารางที่ 3.7 ตัวอย่างสารมลทินที่มีผลต่อการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็ง
ด้วยปูนซีเมนต์ (Jeffrey และคณะ, 1995)

สารมลทิน	ผลต่อการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็ง
1. โลหะหนัก เช่น อาร์เซนิก, แคดเมียม, โครเมียม, ปรอท, ตะกั่ว	- ทนต่อการแข็งตัวของซีเมนต์ - ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์
2. เกลือของโลหะหนัก	- ทนต่อการแข็งตัวของซีเมนต์
3. เกลือที่ละลายได้ของแมกนีสิ, สังกะสี และทองแดง	- ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวแปรผันในช่วงกว้าง - กำลังรับแรงอัดลดลง - เพิ่มความสามารถในการถูกชะละลายของของเสีย - ก่อให้เกิดการบวมและแตกตัวของผลิตภัณฑ์
4. สารประกอบของแอมโมเนียม	- เกิดก๊าซแอมโมเนียในระหว่างการทำให้เป็นก้อนแข็ง
5. สารอินทรีย์ เช่น แป้ง, น้ำมัน และน้ำตาล	- ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวนานขึ้น - ชัดขวางการยึดจับระหว่างของเสียกับซีเมนต์
6. คลอไรด์	- ทนต่อการแข็งตัวของซีเมนต์ - ถูกชะละลายได้ง่าย
7. อนุภาคขนาดเล็ก(ผ่านตะแกรงเบอร์ 200)	- ทนต่อการแข็งตัวของซีเมนต์ - อนุภาคขนาดเล็กจะไปเคลือบอนุภาคขนาดใหญ่กว่า ทำให้การยึดจับกับซีเมนต์ไม่ดี

ของเสียที่มีปริมาณซัลเฟตมาก จะทำให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบซัลโฟลูมิเนต ทำให้เกิดการขยายตัว ส่งผลให้ก้อนซีเมนต์แตกสลายได้ (Thomson, Malone และ Jones, 1979)

Sollars และ Perry (1989) กล่าวถึงประเภทของเสียที่ไม่เหมาะสมสำหรับการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์ไว้ดังนี้

ตารางที่ 3.8 ลักษณะของเสียที่ไม่เหมาะสมสำหรับการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์

(Sollars และ Perry, 1989)

ลักษณะของเสีย	เหตุผลที่ไม่ควรใช้
<p>ของเสียอินทรีย์</p> <ol style="list-style-type: none"> มีส่วนประกอบเกลือที่ละลายได้ปริมาณสูง มีส่วนประกอบสารพิษประจุลบ เช่น โบเรต ปริมาณสูง มีส่วนประกอบของสารหน่วงการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ เช่น ซัลเฟต ในปริมาณมาก มีกลิ่นที่เป็นพิษ เกิดก๊าซพิษเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือด่าง เช่น โลหะคาร์ไบด์ 	<p>มีผลต่อการแข็งตัวของปูนซีเมนต์</p> <p>ถูกชะละลายออกมาได้ง่ายกว่าประจุบวก</p> <p>มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้</p> <p>เป็นอันตรายต่อสุขภาพ</p> <p>เป็นอันตรายต่อสุขภาพ</p>
<p>ของเสียอนินทรีย์</p> <ol style="list-style-type: none"> วัสดุที่ติดไฟหรือเกิดระเบิดได้ สารประกอบยาฆ่าแมลง สารประกอบของสารหน่วงการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ เช่น น้ำตาล 	<p>เป็นอันตรายต่อสุขภาพ</p> <p>ถูกชะละลายออกมาได้ง่าย</p> <p>มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้</p>

3.12 การทดสอบการชะละลาย

Poon และคณะ (1983) แบ่งวิธีการทดสอบการชะละลายออกเป็น 2 วิธี คือ

1. batch test เป็นการทดสอบการชะละลายโดยที่ตัวอย่างจะสัมผัสกับของเหลวที่ใช้ในการสกัดในภาชนะอย่างต่อเนื่อง ตลอดช่วงเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

2. column test เป็นการทดสอบการชะละลายในคอลัมน์ ซึ่งบรรจุตัวอย่างสารที่จะทดสอบจนแน่นและป้อนของเหลวที่ใช้ในการสกัดผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

สำหรับข้อดีและข้อเสียของการทดสอบแบบ batch test และ column test แสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการทดสอบแบบ batch test และ column test (Poon และคณะ,1983)

batch test	column test
<p>ข้อดี</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่มีขีดจำกัดด้านขอบเขต 2. ใช้เวลาการทดสอบน้อย 3. สามารถให้ผลการทดลองจำนวนมาก <p>ข้อเสีย</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่เป็นการจำลองสภาพจริงในสถานที่ฝังกลบ 2. ไม่สามารถวัดผลการถูกชะละลายของโลหะหนักออกมาได้จริง 3. ต้องมีขั้นตอนการกรองที่เป็นมาตรฐาน 	<p>ข้อดี</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นการจำลองให้เห็นสภาพการถูกชะละลายของของเสีย ซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้าๆ 2. สามารถทำนายรูปแบบการรั่วไหลได้ดี <p>ข้อเสีย</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. อาจเกิดการไหลลัดทาง 2. อาจเกิดการอุดตัน 3. อาจเกิดการเจริญเติบโตของจุลชีพ 4. เกิดขีดจำกัดด้านขอบเขต 5. ใช้เวลาการทดสอบนาน 6. ไม่สามารถให้ผลการทดลองจำนวนมาก

การทดสอบการชะละลายมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับขนาดตัวอย่าง, ชนิดของสารที่ใช้ชะละลาย, อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง, จำนวนครั้งที่ชะละลาย และระยะเวลาที่ใช้ชะละลาย เป็นต้น แสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ตัวอย่างวิธีการทดสอบการชะละลาย (Jeffrey และคณะ, 1995)

วิธีการทดสอบ	ขนาดตัวอย่าง	สารที่ใช้ชะละลาย	อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง	จำนวนครั้งที่ชะละลาย	เวลาที่ใช้ชะละลาย
TCLP (U.S.EPA)	9.5 มม.	กรดอะซิติก pH = 3	20:1	1	18 ชม.
EP Toxicity (U.S.EPA)	9.5 มม.	กรดอะซิติก 0.04M pH = 5	20:1	1	24 ชม.
Shake Extraction Test (ASTM D3987-85)	-	น้ำกลั่น	20:1	1	18 ชม.
Equilibrium Leach Test (อังกฤษ)	150 ไมครอน	น้ำกลั่น	4:1	1	7 วัน
Sequential Extraction Test (Bishop, 1986)	9.5 มม.	กรดอะซิติก 0.04M	50:1	15	24 ชม./ครั้ง
การสกัดสาร ตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (พ.ศ.2531)	0.5-5 มม.	น้ำกลั่นผสมกรดไฮโดรคลอริก pH = 5.8-6.3	10:1	1	6 ชม.
การสกัดสาร ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)	9.5 มม.	น้ำกลั่นผสมกรดซัลฟูริก และกรดไนตริก (80:20) pH = 5	20:1	1	18 ชม.

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีการทดสอบการสกัดสารตามประกาศของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2531) (เนื่องจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกมาภายหลัง) ซึ่งมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. บดตัวอย่างของเสียให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงให้มีขนาด 0.5-5 มิลลิเมตร
2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1. หนัก 50 กรัม ใส่ในตัวทำละลายซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งมีพีเอชอยู่ระหว่าง 5.8-6.3 ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายเป็น 10 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่างของเสีย
3. เขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบต่อนาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 5 เซนติเมตร
4. กรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรองใยแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 1 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่างๆ ตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการ วิเคราะห์น้ำทิ้ง

3.13 การประเมินคุณภาพของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็ง

Sollars และ Perry (1989) กล่าวว่า วิธีการประเมินคุณภาพของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็ง ต้องมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์เบื้องต้นของการบำบัด ได้แก่ การปรับปรุงโครงสร้างของกากของเสียให้เป็นก้อนแข็ง, การลดพื้นที่ผิว และการจำกัดการละลายได้ของสารมลพิษเมื่อสัมผัสกับของเหลวที่มาชะละลาย โดยใช้การทดสอบที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไป คือ การทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบไม่ปิดกัก, การทดสอบอัตราซึมน้ำ และการทดสอบการชะละลาย นอกจากนี้ได้รายงานลักษณะสมบัติที่ต้องการของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยวิธี Sealosafe ซึ่งใช้ซีเมนต์และวัสดุพอลิไซลัน เช่น แก้วลอย เป็นวัสดุประสาน แสดงในตารางที่ 3.11 (Sollars และ Perry, 1989 อ้างถึง Wilkinson, 1988)

สำหรับประเทศไทย ตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2531) ได้กำหนดสมบัติของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็งไว้ดังนี้

- อัตราซึมน้ำ น้อยกว่า 1×10^{-6} ซม./วินาที
- กำลังรับแรงอัด มากกว่า 14.0 กก./ตร.ซม.
- ความหนาแน่น มากกว่า 1.04 ตัน/ลบ.ม.
- ลักษณะแข็งคล้ายหิน ไม่ไหม้ไฟ ไม่มีกลิ่น

นอกจากนี้ เมื่อนำมาทดสอบการสกัดสาร ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ด้วย (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 พ.ศ. 2531) คือ

- อาร์เซนิก ไม่เกิน 5 มก./ล.
- แคดเมียม ไม่เกิน 1 มก./ล.
- โครเมียม ไม่เกิน 5 มก./ล.
- พรอท ไม่เกิน 0.2 มก./ล.
- ตะกั่ว ไม่เกิน 5 มก./ล.

ภายหลังได้มีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ได้กำหนดสมบัติของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็ง ซึ่งแตกต่างจากประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2531) ดังนี้

1. กำลังรับแรงอัด มากกว่า 3.5 กก./ตร.ซม.
2. ความหนาแน่น มากกว่า 1.15 ตัน/ลบ.ม.
3. ความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (แสดงในภาคผนวก ก.)

สำหรับการศึกษาครั้งนี้ จะยึดตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2531) เป็นหลัก เนื่องจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) มีผลบังคับใช้ภายหลังที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3.11 เปรียบเทียบคุณสมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแข็ง
ด้วยวิธี Sealosafe และของประเทศไทย

คุณสมบัติ	Sealosafe	ประเทศไทย *
กำลังรับแรงอัด (28 วัน)	มากกว่า 0.34×10^6 นิวตัน/ตร.ม.	มากกว่า 14.0 กก./ตร.ซม.
อัตราซีเมนต์ (28 วัน)	น้อยกว่า 1×10^{-7} ม./วินาที	น้อยกว่า 1×10^{-6} ซม./วินาที
ความหนาแน่น	-	มากกว่า 1.04 ตัน/ลบ.ม.
น้ำชะละลาย	พีเอช 8-11 COD น้อยกว่า 280 ก./ลบ.ม. Total CN น้อยกว่า 1 ก./ลบ.ม. Total Sulphide น้อยกว่า 5 ก./ลบ.ม. Total Phenol น้อยกว่า 5 ก./ลบ.ม. NH ₃ น้อยกว่า 40 ก./ลบ.ม. Zn น้อยกว่า 10 ก./ลบ.ม. Hg น้อยกว่า 0.5 ก./ลบ.ม. Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Ba, Co, Mb, Sn, As, Sb น้อยกว่า 5 ก./ลบ.ม. Total Pesticides น้อยกว่า 0.1 ก./ลบ.ม. Supernatant ต้องไม่มีหลังจาก 24 ชม.	As น้อยกว่า 5 มก./ล. Cd น้อยกว่า 1 มก./ล. Cr น้อยกว่า 5 มก./ล. Hg น้อยกว่า 0.2 มก./ล. Pb น้อยกว่า 5 มก./ล.
อื่นๆ		ลักษณะแข็งคล้ายหิน ไม่ไหม้ไฟ ไม่มีกลิ่น

* ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 พ.ศ. 2531 และ
ตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2531

3.14 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

จากการรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดของเสียอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยวัสดุซีเมนต์และวัสดุอื่นๆ สรุปได้ดังนี้

Shively และคณะ (1986) ศึกษาการชะละลายโลหะหนัก 4 ชนิด คือ อาร์เซนิก, แคดเมียม, โครเมียม และตะกั่ว ในของเสีย ที่ทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 2 โดยทำการชะละลายติดต่อกัน 15 ครั้ง พบว่า

- อาร์เซนิก และแคดเมียม ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง สำหรับตะกั่วและโครเมียมไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด
- ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกชะละลาย มีค่าต่ำกว่าค่าที่ทำนายจากค่าการละลายได้ของโลหะไฮดรอกไซด์ 100-10000 เท่า
- การชะละลายของโลหะหนักแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรก แคลเซียมไฮดรอกไซด์สะเทินกรดพีเอชของน้ำสกัดมากกว่า 10 การชะละลายของโลหะหนักถูกจำกัดโดยกลไก sorption-precipitation ช่วงที่สองเป็นช่วงที่โลหะหนักถูกชะละลายสูงสุด เนื่องจากเกิด desorption เมื่อพีเอชต่ำลง ช่วงที่สาม พีเอชของน้ำสกัดน้อยกว่า 6 โลหะหนักที่มีความสามารถในการละลายต่ำเริ่มจะละลายออกมา แต่ถูกจำกัดโดยกลไก diffusion

Jaggi (1988) ศึกษาประสิทธิภาพในการทำกากของเสียอันตรายให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ซีเมนต์แกลบ และผงซีเมนต์กันตะกั่ว กากของเสียอันตรายที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยกากของเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและโรงงานผลิตแบตเตอรี่ ซึ่งมีแคดเมียม และตะกั่วเจือปน และสลัดจ์จากโรงงานผลิตยาฆ่าแมลง ซึ่งมีสารอัลตรีนเจือปน เมื่อทำการทดสอบชะละลายและทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่า

- การชะละลายจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของกากของเสียในก้อนตัวอย่างและอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของก้อนตัวอย่าง แต่จะเป็นอัตราส่วนผกผันกับค่า pH แรกเริ่มของสารละลายที่ใช้ในการสกัด
- ปริมาณของเสียเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง
- อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 0.35 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับกากของเสียอินทรีย์ และกากของเสียอินทรีย์ตามลำดับ
- การใช้ซีเมนต์แกลบผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วน 1:1 เป็นวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกากของเสียจากโรงงานชุบโลหะ
- การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน ทำให้แคดเมียมถูกชะละลายออกมาน้อยที่สุด

- การใช้ซีเมนต์กันตายเป็นวัสดุประสาน ทำให้ค่าการชะละลายต่ำที่สุดและมีกำลังรับแรงอัดพอเพียง สำหรับการบำบัดของกากของเสียจากยาฆ่าแมลง

Shin, Her และ Koo (1988) ศึกษาปัจจัย 4 ประการที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 คือ อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์, อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, ปริมาณสลัดจ์ และปริมาณ precipitator ของเสียเป็นสลัดจ์ของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เมื่อนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดและทดสอบ การชะละลายด้วยวิธี EP toxicity พบว่า

- อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ทำให้การชะละลายของสังกะสีและโครเมียมลดลง

- อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์มีผลต่อการชะละลายของโครเมียมมากที่สุด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผล ต่อการชะละลายของสังกะสีมากที่สุด

- ปริมาณ precipitator ไม่ค่อยมีผลต่อกำลังรับแรงอัดและการชะละลายมากนัก

- ปริมาณสลัดจ์เพิ่ม ส่งผลให้สังกะสีและโครเมียมถูกชะละลายออกมามากขึ้น

- เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ทำให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเกิดผลึกสูง เมื่อผ่านการบ่ม น้ำจะระเหยออกไป คงเหลือแต่รูพรุนในตัวอย่าง ทำให้อัตราซีเมนต์น้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โลหะหนักถูกชะละลาย มาก

Chang (1989) ศึกษาการทำโลหะหนักให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์และเถ้าจากแกลบ โดยใช้โลหะหนัก สังกะสีของ โครเมียม, ทองแดง และปรอท จากผลการวิจัยพบว่า กลไกการยึดจับโลหะหนักเป็นปัจจัยสำคัญ ในการชะละลายของโลหะหนัก

- การชะละลายของโครเมียมในซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ (1:1) จะสูงกว่าใช้ซีเมนต์อย่างเดียว ในขณะที่ การชะละลายของทองแดงและปรอทในซีเมนต์อย่างเดียวสูงกว่าซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

- ทองแดงและปรอท จะยึดจับกับซีเมนต์โดยอยู่ในรูพรุนหรือติดกับซีเมนต์ การชะละลายจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่าง จากวิเคราะห์น้ำสกัดพบว่าค่าความเป็นด่างมีค่าสูงขึ้นตามค่าการชะละลายของทองแดงและ ปรอท

- การใช้ซีเมนต์เหมาะสำหรับโครเมียม และการใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเหมาะสำหรับทองแดงและ ปรอท

Youn (1990) ศึกษาการทำตะกอนน้ำเสีย COD จากห้องทดลองให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ เป็นวัสดุประสาน พบว่า

- อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 และ 0.9 เหมาะสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ โดยให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด
- เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในปูนซีเมนต์จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ จะมีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น
- เมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ ค่าการชะละลายจะมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบจะให้ค่าการชะละลายน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก
- อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะมีผลต่อกำลังรับแรงอัด ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ
- ค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สูงขึ้นตามเวลาบ่มก้อนตัวอย่าง ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้ปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นในช่วงแรกของการบ่มก้อนตัวอย่าง(ประมาณ 7 วัน) หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง
- ค่าการชะละลายมีค่าลดลงเมื่อทำการบ่มก้อนตัวอย่างนานขึ้น ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนขาวผสมซีเมนต์แก่กลบ

Rijal (1990) ศึกษาการทำตะกอนน้ำเสียจากห้องทดลอง(ประกอบด้วย Cr และ Zn) ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แก่กลบ(อัตราส่วน1:1) โดยทำการผสมตะกอนกับวัสดุประสานผสมทราย(1:2) ที่สัดส่วนผสมต่างๆ กัน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และ 0.65 สำหรับปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แก่กลบ ผลการทดสอบพบว่า

- ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง ลดลงตามปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม
- การชะละลายจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณตะกอนในก้อนตัวอย่าง
- การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน ทำให้ก้อนตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แก่กลบทุกตัวอย่าง
- ที่อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.2 ค่าการชะละลายของโครเมียมในก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต่ำกว่าตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์แก่กลบ แต่ที่อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุประสานสูงกว่า 0.5 ตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานจะให้ค่าการชะละลายของโครเมียมสูงกว่า

Shin, Koo, Kim และ Yoon (1990) ศึกษาการชะละลายของโลหะหนัก 3 ชนิด คือ แคดเมียม, โครเมียม และตะกั่ว ในของเสียที่ทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย โดยใช้สารสกัด 3 ชนิด คือ น้ำทะเล, น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรด และน้ำกลั่น พบว่า

- การเติมเถ้าลอยลงในส่วนผสม จะมีผลทำให้ค่าพีเอชของน้ำสกัดลดลง และการชะละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น
- ในช่วง 60 วันที่ทำการทดสอบการชะละลาย ปริมาณแคดเมียมที่ถูกชะละลายออกมาในน้ำทะเลมีค่าสูงขึ้นตามเวลา แต่โลหะหนักอื่นๆ มีค่าต่ำลง
- ภายหลังจากทดสอบ 60 วัน น้ำหนักของตัวอย่างลดลง เนื่องจากปูนขาวและโลหะหนักถูกชะละลายออกมา จากการวิเคราะห์ SEM และ XRD พบว่าปูนขาวถูกชะละลายออกมา ขณะที่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต, Ettringite และยิปซัมยังคงอยู่

Claudio (1991) ศึกษาการทำสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ปอซโซลานิกซีเมนต์ และซีเมนต์กันเตาเป็นวัสดุประสาน พบว่า

- การทำให้เป็นก้อนแข็งโดยใช้ซีเมนต์ เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการทำเสถียรโลหะ เช่น แคดเมียม, ปรอท, ตะกั่ว และโลหะอื่นๆ เช่น โครเมียม, นิกเกิล, ทองแดง และสังกะสี ซึ่งเจือปนอยู่ในสลัดจ์น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในปริมาณสูง
- ปริมาณโลหะต่างๆ ในน้ำสกัด (ยกเว้น Al^{3+}) มีปริมาณต่ำกว่ามาตรฐานน้ำดื่ม
- ส่วนผสมของสลัดจ์กับปูนซีเมนต์ที่อายุ 90 วันขึ้นไป จะมีความแข็งแรงคล้ายกับคอนกรีตโครงสร้าง

Cheng และ Bishop (1992) ศึกษาการกระจายของโลหะหนัก ตะกั่ว, แคดเมียม และอาร์เซนิก ในแท่งซีเมนต์ก่อนและหลังการทดสอบการชะละลายด้วยกรดอะซิติก ตัวอย่างจะถูกหล่อเป็นรูปทรงกลม โลหะหนักจะถูกวิเคราะห์ โดยวิธี SEM, EDX และ Wet Digestion/AA Method จากผลการวิจัยพบว่า

- บริเวณผิวของตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยกรดอะซิติก แคลเซียมส่วนใหญ่ในองค์ประกอบของซีเมนต์จะถูกชะละลายออกมา ในขณะที่ซิลิกอน, เหล็ก และอะลูมิเนียม ยังคงเหลืออยู่ และสารดังกล่าวมีคุณสมบัติในการดูดซับและดูดติดผิวได้ดี ดังนั้นโลหะหนักที่ละลายไปจะถูกดูดติดที่บริเวณชั้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งช่วยป้องกันการชะละลายของโลหะหนักได้

- จากการวิเคราะห์โลหะหนักในก้อนตัวอย่าง พบว่าการชะละลายของโลหะหนักจะเกิดเฉพาะที่บริเวณชั้นผิวหน้าเท่านั้น

Yang และคณะ (1993) ทำการศึกษาการทำกากตะกอนปรอทให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ และสารโพลีเมอร์ลาเทกซ์ ผลการทดลองพบว่า

- สารโพลีเมอร์ลาเทกซ์ มากกว่า 3% จะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของก้อนของเสีย
- จากการทดสอบ Freezing Thawing Test ก้อนของเสียที่ไม่เติมสารโพลีเมอร์ลาเทกซ์ จะเกิดการแตกร้าว ส่วนก้อนของเสียที่เติมสารโพลีเมอร์ลาเทกซ์ จะไม่เกิดการแตกร้าว
- จากการทดสอบด้วยวิธี TCLP พบว่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายลดลงมาก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติมกับไม่เติมสารโพลีเมอร์ ทั้งนี้จากการทดสอบด้วยวิธี SEM พบว่าโพลีเมอร์ลาเทกซ์จะทำให้เกิดโครงสร้างเชื่อมโยงเป็นตาข่ายในเนื้อของของเสียที่แข็งตัว ซึ่งจะช่วยยึดจับโลหะหนักไม่ให้ถูกชะละลายออกมา

Leangon (1993) ศึกษาหาวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับการทำให้เป็นก้อนแข็งของกากตะกอนจากโรงงานฟอกหนังและกากตะกอนจากโรงงานเซมิคอนดักเตอร์ โดยกากตะกอนจากโรงงานฟอกหนังจะมีโครเมียมและสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ส่วนกากตะกอนจากโรงงานเซมิคอนดักเตอร์ประกอบด้วย ทองแดง, ตะกั่ว และดีบุก วัสดุประสาน 5 ชนิดที่นำมาทดสอบ ได้แก่ ปูนซีเมนต์, ปูนขาว, เถ้าจากแกลบ, เถ้าลอยลิกไนต์ และซิลิกาฟูม จากการทำให้เป็นก้อนแข็งโดยใช้วัสดุประสานผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของก้อนของเสียที่แข็งตัว อาทิ กำลังรับแรงอัด, การชะละลาย และค่าใช้จ่ายในการบำบัด พบว่า

- วัสดุประสานที่เหมาะสมคือ ปูนซีเมนต์ : เถ้าจากแกลบ : เถ้าลอยลิกไนต์ เท่ากับ 0.7:0.2:0.1 และ 0.7:0.1:0.2 สำหรับกากตะกอนจากโรงงานฟอกหนัง และกากตะกอนจากโรงงานเซมิคอนดักเตอร์ ตามลำดับ
- สามารถกำจัดกากตะกอนได้สูงสุดในอัตราส่วน กากตะกอนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.64 และ 1.37 ตามลำดับ

นฤมิตร (2538) ศึกษาหาความสามารถในการทำละลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนัก จากการบำบัดน้ำเสียซีไอดี โดยการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยลิกไนต์ ผลการศึกษาสรุปได้ว่า

- การเพิ่มปริมาณตะกอนโลหะหนัก จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง การชะละลายของโลหะหนักสูงขึ้น
- การเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของเถ้าลอยลิกไนต์ระหว่าง 0-75 % ลงในวัสดุประสาน จะทำให้กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นลดลง, การชะละลายของปรอทสูงขึ้น แต่การชะละลายของโครเมียมลดลง และพบว่าอัตราส่วนตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับปรอทและโครเมียม เท่ากับ 0.25 (ไม่มีเถ้าลอย) และ 0.25 (มีเถ้าลอย 50 %) ตามลำดับ
- อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5
- การเพิ่มระยะเวลาบ่ม ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

- การใช้วัสดุประสานซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 50 % มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ปรอทมากกว่าใช้ซีเมนต์ล้วน
- การใช้วัสดุประสานซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 50 % มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์โครเมียมน้อยกว่าใช้ซีเมนต์ล้วน

3.15 การจัดการถ่านไฟฉายในต่างประเทศ

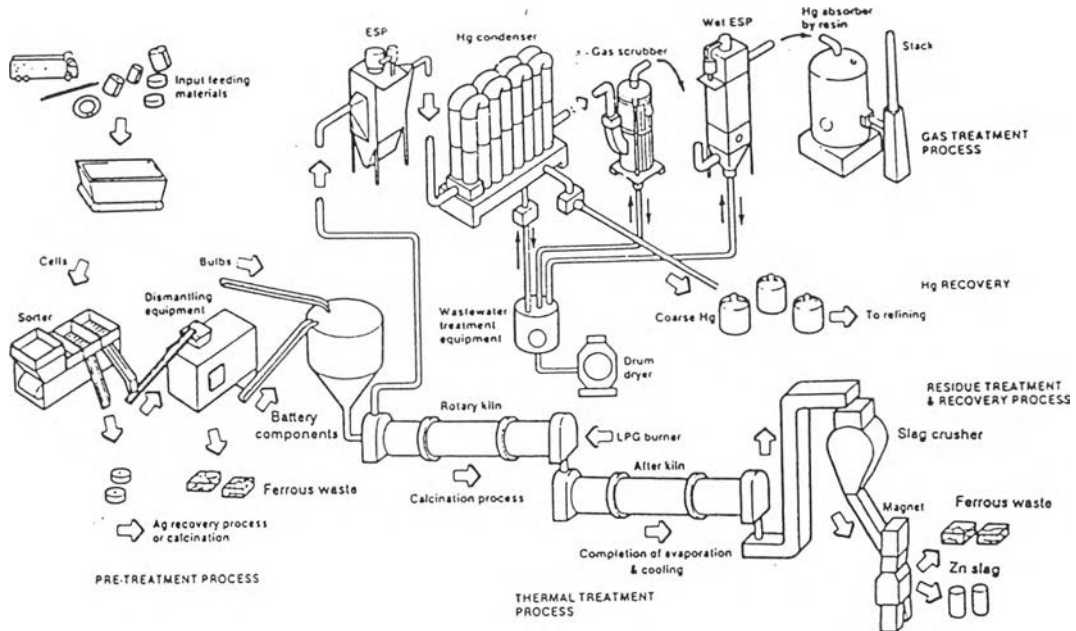
การจัดการถ่านไฟฉายในประเทศแถบยุโรป และสหรัฐอเมริกา จะประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ (Environment Canada, 1991)

1. การเก็บรวบรวมถ่านไฟฉายที่ใช้แล้ว โดยอาศัยความร่วมมือจากโรงงานผู้ผลิต, ร้านค้าย่อย และผู้ใช้ ซึ่งผู้ใช้มีหน้าที่ส่งคืนถ่านไฟฉายที่ใช้แล้วให้กับร้านค้า ทางร้านค้าจะทำการรวบรวมและส่งต่อไปยังศูนย์กลาง หลังจากนั้นจะถูกส่งไปกำจัดโดยการฝังกลบต่อไป ตัวอย่างประเทศที่ทำการเก็บรวบรวมถ่านไฟฉายเมอร์คิวรีออกไซด์และอัลคาไลด์-แมงกานีส ได้แก่ สวิตเซอร์แลนด์, เดนมาร์ค, เนเธอร์แลนด์, ออสเตรีย, ญี่ปุ่น, สหรัฐอเมริกาและแคนาดา เป็นต้น ส่วนประเทศที่ทำการเก็บรวบรวมถ่านไฟฉายเมอร์คิวรีออกไซด์ ได้แก่ สวีเดน, อังกฤษ, เบลเยียม และฝรั่งเศส เป็นต้น

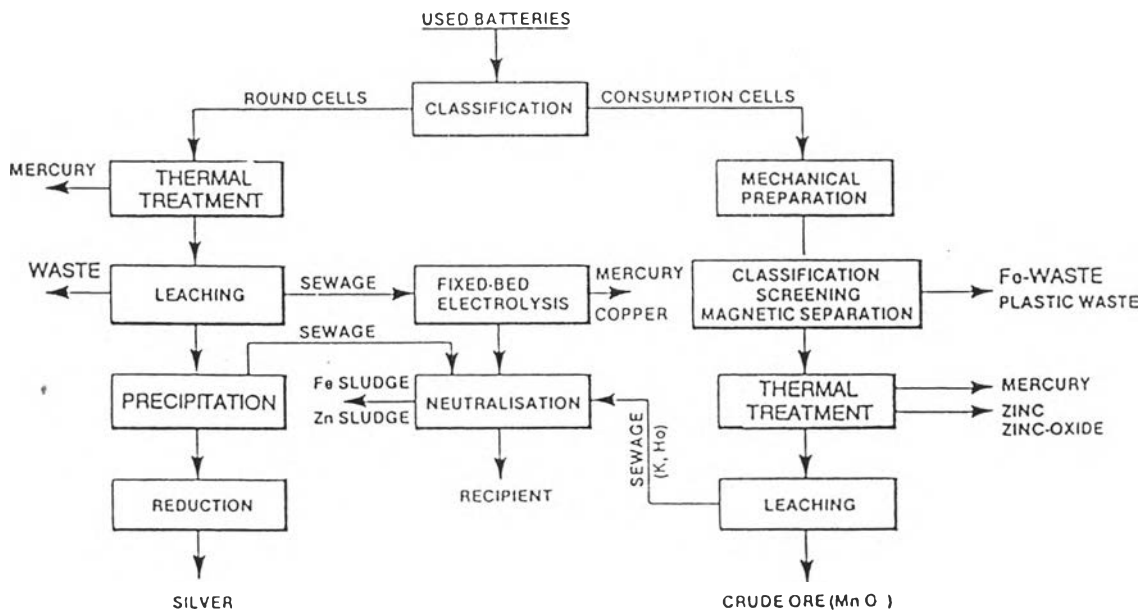
2. การกำจัดถ่านไฟฉายที่ใช้แล้ว ซึ่งส่วนมากจะถูกนำไปฝังกลบ มีเพียงบางประเทศที่นำมารีไซเคิลเอาวัสดุที่ค่า เช่น พรอท, สังกะสี, แมงกานีส, แคดเมียม กลับมาใช้ใหม่ เช่น โรงงาน Nomura Kosan ในประเทศญี่ปุ่น และโรงงาน Voest-Alpine ในประเทศออสเตรีย

โรงงาน Nomura Kosan ตั้งอยู่ที่ Hokkaido ทำการรีไซเคิลถ่านไฟฉายและหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งมีปรอทปนเปื้อน สามารถรีไซเคิลได้ประมาณ 6000 ตันต่อปี กระบวนการประกอบด้วย 3 ส่วน คือ กระบวนการขั้นต้น ถ่านไฟฉายและหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะถูกแยกออกเป็นขนาดต่างๆ ก่อนที่จะนำมาถอดปลอกโลหะกลับมาใช้ใหม่ หลังจากนั้นจะนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อน ของเสียจะถูกเผาจนปรอทกลายเป็นไอ และถูกควมแน่น ได้ปรอทมีความบริสุทธิ์ประมาณ 99.99 % ส่วนกากตะกอนที่เหลือจากการเผา จะถูกนำมาผ่านกระบวนการขั้นสุดท้าย เพื่อแยกสังกะสีออกอีกครั้งด้วยแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.16

โรงงาน Voest-Alpine ในประเทศออสเตรีย ทำการรีไซเคิลถ่านไฟฉายแบบเม็ดกระดุม และแบบอื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบคาร์บอน-สังกะสี สามารถรีไซเคิลได้ประมาณ 1000 ตันต่อปี ซึ่งในกระบวนการสามารถนำ พรอท, สังกะสี, เงินและแมงกานีส กลับมาใช้ใหม่ได้ ดังรูปที่ 3.17

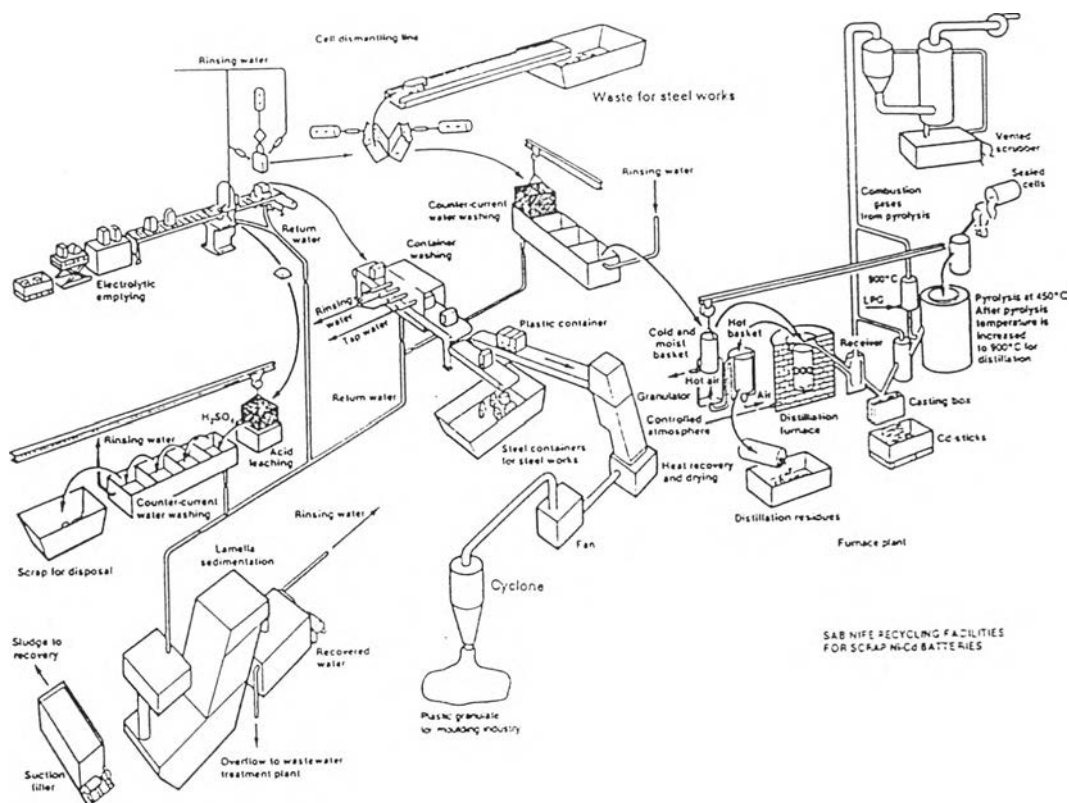


รูปที่ 3.16 กระบวนการรีไซเคิลถ่านไฟฉายของโรงงาน Nomura Kosan ในประเทศญี่ปุ่น
(Environment Canada, 1991)



รูปที่ 3.17 กระบวนการรีไซเคิลถ่านไฟฉายของโรงงาน Voest-Alpine ในประเทศออสเตรีย
(Environment Canada, 1991)

โรงงาน SAB Nife ในประเทศสวีเดน ซึ่งเป็นโรงงานผลิตถ่านไฟฉายแบบนิเกิล-แคดเมียม ได้ทำการติดตั้งระบบรีไซเคิลแคดเมียมจากถ่านไฟฉายแบบนิเกิล-แคดเมียมที่ใช้แล้วภายในประเทศ รวมทั้งที่ส่งมาจากประเทศอื่นๆ เช่น เนเธอร์แลนด์ โดยสามารถรีไซเคิลได้ประมาณ 1000 ตันต่อปี ได้แคดเมียมที่มีความบริสุทธิ์ประมาณ 99.5 % ส่วนนิเกิลยังคงอยู่ในกากตะกอนที่เกิดจากการขบวนการ ซึ่งจะถูกนำไปฝังกลบต่อไป กระบวนการรีไซเคิลแคดเมียมของโรงงานนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ การถอดแยกก้อนถ่านไฟฉาย, กระบวนการทางเคมี และการกลั่น ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กระบวนการรีไซเคิลถ่านไฟฉายของโรงงาน SAB Nife ในประเทศสวีเดน

(Environment Canada, 1991)

นอกจากนี้ประเทศฝรั่งเศส และสหรัฐอเมริกา ก็ทำการรีไซเคิลถ่านไฟฉายแบบเมอร์คิวไรต์, อังกฤษทำการรีไซเคิลถ่านไฟฉายแบบซิลเวอร์ออกไซด์ และประเทศที่มีแผนการที่จะจัดตั้งโรงงานรีไซเคิล ได้แก่ สวิสเซอร์แลนด์, สวีเดน, เยอรมัน, เนเธอร์แลนด์ และแคนาดา เป็นต้น