

บทที่ 3

ทบทวนเอกสาร

3.1 ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่วเป็นโลหะชนิดหนึ่งในบรรดาโลหะชนิดแรกๆที่มนุษย์รู้จักนำมาใช้ประโยชน์ ตามประวัติศาสตร์พบว่ามีภาคนำตะกั่วมาทำเครื่องใช้ไม่สอยตั้งแต่ 5000 ปีก่อนคริสตกาล ซึ่งพบครั้งแรกในดินแดนรัสเซีย การใช้ประโยชน์ของตะกั่วในสมัยก่อน ได้แก่ ใช้แต่งหน้าโดยชาวอียิปต์ ใช้ทำเครื่องปั้นดินเผาโดยชาวสุเมเรียน ใช้ทำเหรียญโดยชาวจีน ใช้ทำท่อโดยชาวโรมัน และอื่นๆอีกมากมาย ปริมาณความต้องการตะกั่วมีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งประมาณ 2300 ปีก่อนคริสตกาล จึงได้มีการทำเหมืองตะกั่วขึ้นในไซปรัส(Cyprus) ซาร์ดีเนีย(Sardinia) และสเปน(Spain) โดยชาวฟินิเชีย(Phoenician) ในศตวรรษที่ 1 เหมืองตะกั่วในอาณาจักรโรมันเป็นเหมืองที่ใหญ่ที่สุดเท่าที่เคยมีมา ซึ่งมีการจ้างงานถึง 40,000 คน ในปัจจุบันพบว่าตะกั่วมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตมนุษย์จึงได้พยายามลดปริมาณการใช้ตะกั่วลงแต่ตะกัวยังมีความสำคัญในอุตสาหกรรมปริมาณการใช้ตะกั่วบริสุทธิ์ของโลกเฉลี่ยปีละกว่า 4 ล้านเมตริกตันสูงเป็นอันดับ 5 รองจาก เหล็ก ทองแดง อลูมิเนียม และสังกะสี (Ullman's Encyclopidia of Industrial Chemistry,1990 และ Encyclopedia of Chemical Processing and Design,1988) สำหรับประเทศไทยมีความต้องการใช้ตะกั่วในกิจกรรมต่างๆประมาณ 20,000 เมตริกตันต่อปี(เดชณา, 2530)

3.1.1 คุณสมบัติของตะกั่ว

ตะกั่วเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งซึ่งมีสัญลักษณ์ธาตุคือ Pb มีเลขอะตอมเท่ากับ 82 มวลอะตอมเท่ากับ 207.21 อยู่ในหมู่ IVA ของตารางธาตุ ตะกั่วมีคุณสมบัติเด่นคือ จุดหลอมเหลวต่ำ ความถ่วงจำเพาะสูง ความต้านแรงดึงต่ำ มีความอ่อนตัวมากหล่อขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถทนการกัดกร่อนของกรดได้ดี (Ullman's Encyclopidia of Industrial Chemistry,1990และ Encyclopedia of Chemical Processing and Design,1988) คุณสมบัติต่างๆของตะกั่วแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

3.1.2 การใช้ประโยชน์

การใช้ประโยชน์ตะกั่วมีทั้งในรูปโลหะ โลหะผสม และสารประกอบ อุตสาหกรรมที่ใช้ประโยชน์ตะกั่วมากที่สุดคืออุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ ประโยชน์ที่สำคัญอื่นๆได้แก่ การใช้ทำสี เคลือบเซรามิกซ์ กระสุน โลหะบัดกรี หุ้มสายเคเบิล นอกจากนี้ยังอาจใช้สกัดกันการแผ่รังสีอะตอม และลดการสิ้นสعهเนื่องจกแรงกลให้น้อยลงด้วย

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของโลหะตะกั่ว

| คุณสมบัติของโลหะตะกั่ว | | |
|-------------------------|--------|--------------------------|
| จุดหลอมเหลว | 327.43 | องศาเซลเซียส |
| จุดเดือด | 1740 | องศาเซลเซียส |
| ความหนาแน่น ที่ 20°C | 11.336 | กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร |
| ความถ่วงจำเพาะ ที่ 20°C | 11.336 | กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร |
| ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน | 0.112 | โวลต์ |
| ความต้านแรงดึง ที่ 20°C | 14,000 | กิโลปาสคาล |
| ค่า Young's Modulus | 16.5 | จิกะปาสคาล |

ที่มา: Encyclopedia of Chemical Technology, 1967 และ Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 1990 .

การใช้ประโยชน์ และความต้องการของตะกั่วในแต่ละกิจกรรม สามารถสรุปได้ดังนี้

1) แบตเตอรี่

ตะกั่วบริสุทธิ์จะนำไปใช้ในการทำแบตเตอรี่ประมาณร้อยละ 60 ของปริมาณตะกั่วบริสุทธิ์ทั้งหมด และความต้องการใช้ตะกั่วในส่วนยังมีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทุกขณะ ใน Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 1990 กล่าวไว้ว่าอัตราความเจริญเติบโตของความต้องการตะกั่วในการทำแบตเตอรี่จากปี ค.ศ. 1984-1989 มีค่าประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพิ่มตามจำนวนรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น แบตเตอรี่แบ่งเป็นแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ (automotive batteries) แบตเตอรี่สำหรับลากจูง (traction batteries) และแบตเตอรี่ที่ใช้สำรองไฟในสถานที่ต่างๆ (stationary batteries) แบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ (automotive batteries) ใช้เพื่อสตาร์ท ให้แสงสว่าง และจุดระเบิด เรียก เอสแอลไอ แบตเตอรี่ (SLI batteries) ซึ่งเป็นชนิดของแบตเตอรี่ที่ใช้มากที่สุด ในปี ค.ศ. 1987 ใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้ประมาณ 160 ล้านอันสำหรับรถใหม่ และประมาณ 500 ล้านอันสำหรับรถเก่าที่มีการเปลี่ยนแบตเตอรี่ จำนวนรถยนต์เพิ่มขึ้นทุกวันนี้การที่ใช้แบตเตอรี่จึงเพิ่มขึ้นด้วย

แบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับลากจูงเป็นแบตเตอรี่ที่ใช้กับรถไฟฟ้าซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการวิ่งต่ำ เจียบปราศจากมลพิษ รถไฟฟ้านี้มักใช้ในการพาณิชย์ การส่งของในระยะทางสั้นๆ และในสนามบิน เพราะแบตเตอรี่ชนิดนี้มีน้ำหนักมาก และมีความจุไฟฟ้าต่ำจึงมีข้อจำกัดเรื่องความเร็วและต้องมีการประจุไฟบ่อย แบตเตอรี่ที่ใช้สำรองไฟฟ้าสำหรับสถานที่ต่างๆ (stationary batteries) นอกจากจะใช้สำหรับไฟฉุกเฉินในอาคารแล้วยังใช้ในเครื่องบิน รถไฟ และ ระบบควบคุมโดยคอมพิวเตอร์

ตลาดของแบตเตอรี่ชนิดนี้เติบโตขึ้นเรื่อยๆ และได้รับการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงเพื่อใช้ในคอมพิวเตอร์กระเป๋าหิ้ว

2) สีและสารประกอบตะกั่ว

สี และสารประกอบที่เกิดจากตะกั่วจะนำไปทำ แก้ว เคลือบเซรามิก ตัวทำเสถียรพลาสติก (plastic stabilizer) ซึ่งจะมีปริมาณความต้องการประมาณร้อยละ 14 ของตะกั่วบริสุทธิ์ทั้งหมด รองลงมาจากความต้องการเพื่อทำแบตเตอรี่

กระจกที่ประกอบด้วยตะกั่ว(lead glass) จะมีคุณสมบัติทางแสง ทางไฟฟ้า และการป้องกันรังสีซึ่งนิยมใช้ในการทำเครื่องแก้วคริสตัลมาก ถึงแม้ว่าปริมาณการใช้สารประกอบตะกั่วเป็นสารเคลือบในการทำกระเบื้อง ภาชนะบนโต๊ะอาหาร เครื่องปั้นดินเผาของจีน จะน้อยลงเนื่องจากตระหนักถึงพิษของตะกั่วแต่ปริมาณการใช้ในส่วนนี้ก็ยังเป็นส่วนแบ่งตลาดที่สำคัญ สารประกอบตะกั่วที่ใช้กับพลาสติกนั้นก็เพื่อให้พลาสติกสามารถทนต่ออนุมูลอิสระและแสงได้

3) ผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (semi-finishing product)

ผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปของตะกั่วคือตะกั่วที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นแผ่น และเป็นท่อซึ่งคิดเป็นปริมาณความต้องการร้อยละ 8 ของตะกั่วบริสุทธิ์ทั้งหมด ก่อนนี้จะใช้ตะกั่วทำท่อน้ำในปริมาณมากแต่ในปัจจุบันหันมาใช้ทองแดงและพลาสติกแทน เพราะทราบว่าตะกั่วเป็นอันตราย แต่ก็ยังใช้ตะกั่วฆ่าเชื้อหลังคา ซ่อมแซมอาคารเก่า ทำฉนวนกันเสียง ป้องกันรังสี และสารเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อนทางเคมี

4) ปลอกหุ้มสายเคเบิล

การใช้ตะกั่วทำปลอกหุ้มสายเคเบิลจะใช้ในรูปแผ่นตะกั่วบางๆ ร่วมกับพลาสติกโดยตะกั่วจะทำหน้าที่ป้องกันความชื้น ปริมาณการใช้ในส่วนนี้คิดเป็นร้อยละ 5 ของการใช้ตะกั่วบริสุทธิ์ทั้งหมด

5) ตะกั่วอัลลอยด์

ตะกั่วอัลลอยด์ที่นิยมใช้กันมากคือโลหะบัดกรี(solder) ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 4 ของการใช้ตะกั่วบริสุทธิ์ทั้งหมด

6) อากูธและลูกปืน

คิดเป็นร้อยละ 2 ของการใช้ตะกั่วทั้งหมด ซึ่งเป็นความต้องการที่ค่อนข้างคงที่

7) สารเติมแตงน้ำมันเบนซิน

ในปัจจุบัน ทั่วโลกพยายามที่จะเลิกใช้ตะกั่ว ในการเป็นสารเติมแตงน้ำมันเบนซิน(gasoline additive) เพราะทำให้เกิดมลภาวะอากาศ

3.1.3 ความเป็นพิษ

ตะกั่ว และสารประกอบของตะกั่วทุกชนิดเป็นสารพิษที่มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต พิษภัยอันเกิดจากตะกั่วเรียกว่าโรคพิษตะกั่ว โรคพิษตะกั่วเป็นภาวะผิดปกติที่เกิดเนื่องจากร่างกายได้รับสารตะกั่วปริมาณมากจนถึงขีดที่เป็นอันตรายต่ออวัยวะต่างๆ เมื่อมีปริมาณมากพอก็จะทำให้เกิดอาการพิษขึ้น ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง ทางที่พบบ่อยได้แก่การกิน การหายใจ ทางผิวหนัง และจากการถ่ายทอดทางกระแสเลือดจากมารดาสู่ทารกในครรภ์ หลังจากการดูดซึมเข้ากระแสเลือดแล้วตะกั่วจะถูกลำเลียงไปยังอวัยวะต่างๆของร่างกาย

เมื่อตะกั่วเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ส่วนใหญ่จะถูกสะสมเอาไว้ในกระดูก นอกนั้นก็ถูกส่งไปสะสมในสมอง ไต และอวัยวะส่วนอื่นๆ จากตะกั่วที่กระจายอยู่ในกระแสเลือด เมื่อร่างกายได้รับตะกั่วเป็นจำนวนไม่มากนัก(ไม่เกินวันละ 428.57 ไมโครกรัม) ตะกั่วส่วนใหญ่จะถูกขับออกจากร่างกายได้ทาง ปัสสาวะ น้ำดี และเหงื่อ แต่ถ้าร่างกายได้รับตะกั่วอยู่เรื่อยๆเป็นเวลานานในปริมาณที่ค่อนข้างมาก ส่วนหนึ่งของตะกั่วจะถูกสะสมเพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับที่เป็นพิษได้ อาการเป็นพิษเนื่องจากตะกั่วแบบเฉียบพลันมีอยู่หลายแบบด้วยกัน เช่น อ่อนเพลีย คลื่นไส้เวียนศีรษะ กล้ามเนื้อกระตุก และอาการอื่นๆ สำหรับพิษแบบเรื้อรังของตะกั่วที่สำคัญ ได้แก่ โรคโลหิตจาง ระบบประสาทและสมองถูกทำลาย ในทารกและเด็กตะกั่วจะมีผลของความเป็นพิษมากกว่าผู้ใหญ่ โดยมีผลทำลายระบบประสาท หยุดยั้งการพัฒนาระบบประสาท ทำให้ผลที่เกิดขึ้นคือ การด้อยพัฒนาการทางด้านสติปัญญา เคยมีรายงานการปลดปล่อยตะกั่ว จากหัวกระสุนที่ฝังอยู่ในร่างกายก็สามารถทำให้เกิดพิษได้ พิษของตะกั่วที่มีผลต่ออวัยวะต่างๆในร่างกายของมนุษย์(มลภาวะอากาศ,2538) สามารถสรุปได้ดังนี้

1) พิษต่อระบบทางเดินอาหาร

ตะกั่วจะเกิดฤทธิ์โดยตรงต่อกล้ามเนื้อเรียบของลำไส้ทำให้ลำไส้หดเกร็ง ผู้ป่วยจะเกิดอาการปวดท้องแบบปวดบิด(colic) อย่างรุนแรง อาการนี้พบได้ทั้งในรายที่เกิดเฉียบพลัน(acute lead poisoning) และพิษเรื้อรัง(chronic lead poisoning) ในกรณีพิษตะกั่วเรื้อรังมักเริ่มต้นด้วยอาการเบื่ออาหาร อาหารไม่ย่อย ท้องผูก แล้วจึงเกิดอาการปวดท้อง

2) พิษต่อไต

ไตเป็นทางหลักสำหรับกำจัดตะกั่วที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายออกจากร่างกาย และไตก็เป็นอวัยวะหนึ่งที่ได้รับผลกระทบจากพิษตะกั่วเช่นกัน ตะกั่วมีผลทำลายท่อในไตซึ่งทำหน้าที่กรองของเสียแล้วดูดซึมสารบางอย่างกลับเข้ามาใช้ก่อนจะระบายออกจากร่างกายในรูปของปัสสาวะ หากร่างกายรับสารตะกั่วอย่างต่อเนื่องจะเกิดมีการหดตัวของไตอย่างช้าๆ เซลล์ไตแข็ง หลอดเลือดแข็งตัว และเซลล์ต่างๆผิดปกติจัดเป็นโรคไตเรื้อรัง และอาจเกิดไตวายได้

3) พิษต่อระบบหัวใจและระบบเลือด

ตะกั่วสามารถยับยั้งขั้นตอน การสังเคราะห์ทางชีวภาพของฮีโมโกลบิน และโกบูลิน ได้เกือบทุกขั้นตอน ทำให้เกิดภาวะเลือดจาง เม็ดเลือดแดงแตกง่าย ผู้ป่วยมีอาการซีดซึ่งมักพบในภาวะต้นของภาวะพิษสารตะกั่ว เกิดภาวะกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือด

4) พิษต่อระบบประสาท

พิษต่อระบบประสาทเกิดได้ทั้งระบบประสาทส่วนปลายและระบบประสาทส่วนกลาง พิษต่อระบบประสาทส่วนปลายจะแสดงออกทางระบบความรู้สึกซึ่งจะเกิดอาการภาวะผิวหนังที่มีความรู้สึกไวเกิน(hyeraesthesia) และอาการชาหลงอน(paraesthesia) อาการที่สำคัญได้แก่ความผิดปกติของระบบเคลื่อนไหวทำให้เกิดอัมพาตเฉพาะส่วน

5) ผลต่อระบบสืบพันธุ์

ระดับความเป็นพิษของตะกั่วสามารถทำให้ผู้ชายเป็นหมัน สำหรับผู้หญิงอาจทำให้แท้งหรือคลอดก่อนกำหนด ตัวอ่อนจะได้รับผลกระทบมากที่สุดเพราะตะกั่วสามารถส่งผ่านสายรกได้ ผู้ชายที่มีระดับตะกั่วในเลือดเกิน 60-70 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร อาจทำให้จำนวนสเปิร์มลดลงและลดการเคลื่อนไหวของสเปิร์มด้วย

ในหลายๆสถาบันได้มีการจัดตะกั่วไว้ในกลุ่มสารก่อมะเร็งด้วย เช่น

- EPA กำหนดว่า ตะกั่วและสารประกอบตะกั่วได้รับการพิจารณาว่าน่าจะเป็นสารก่อมะเร็ง

- International Agency for Research on Cancer (IARC) ได้มีการกำหนดให้ สารประกอบตะกั่วอินทรีย์ อยู่ในกลุ่ม 2B คือ สารที่อาจทำให้มนุษย์เป็นมะเร็งได้

3.1.4 เหตุการณ์พิษตะกั่วในประเทศไทย

ในปี พ.ศ. 2514 เกิดการระบาดของโรคพิษสารตะกั่วที่ตำบลครุใน อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ จากการใช้เปลือกแบตเตอรี่เป็นเชื้อเพลิงเคี้ยวน้ำตาลมะพร้าว ทำให้คนในหมู่บ้านเกิดอาการพิษสารตะกั่วทางระบบประสาท

ในปี พ.ศ. 2521 มีการระบาดครั้งใหญ่เกิดขึ้นที่จังหวัดระนอง สาเหตุจากการใช้น้ำบ่อซึ่งปนเปื้อนด้วยสารตะกั่วจากขยะที่มีหม้อแบตเตอรี่เก่าจำนวนมาก ในคราวนี้มีผู้เสียชีวิตจากอาการพิษทางสมอง ชักเพ้อคลั่งและหมดสติไปไม่น้อยกว่า 4 คน

3.2 การถลุงแร่ตะกั่ว (Lead Smelting)

โลหะตะกั่วได้จากการถลุงสินแร่ตะกั่ว สินแร่ตะกั่วมี 3 รูปแบบได้แก่ แร่กาลีน่า(galena) หรือตะกั่วซัลไฟด์ แร่เซอร์ไซต์(ce-rusite) หรือตะกั่วคาร์บอเนต และแร่แองกลีไซต์(anglesite)

หรือตะกั่วซัลเฟต แร่กาลีนาเป็นชนิดที่พบมากที่สุดบนเปลือกโลก ส่วนแร่สองชนิดหลังเป็นผลมาจากการแปรสภาพของแร่กาลีนาโดยธรรมชาติ ในที่นี้เราจะกล่าวเฉพาะการถลุงแร่เชิร์ตเท่านั้น

เหมืองแร่ตะกั่วที่นิยมทำในประเทศไทยจะมีลักษณะเป็นเหมืองเปิด เมื่อได้ก้อนแร่จากเหมืองแล้ว ก่อนที่เราจะนำผ่านกรรมวิธีการผลิต เราจะต้องผ่านกระบวนการลอยแร่ก่อนเพื่อแยกสารมลทินทำให้แร่ตะกั่วสะอาดขึ้น การลอยแร่ทำได้โดยบดก้อนแร่เพื่อลดขนาดจากนั้นจึงนำไปผสมกับน้ำยาลอยแร่ในบ่อที่มีการเป่าอากาศขึ้นจากด้านล่าง ผงแร่ก็จะลอยติดขึ้นมากับฟองอากาศแล้วใช้ใบปิดแยกออกมาส่วนเศษดินก็จะตกตะกอนที่ก้นบ่อ ผงแร่ตะกั่วมีองค์ประกอบดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบโดยประมาณของผงแร่เชิร์ต

| ส่วนประกอบ | ปริมาณ (ร้อยละ) โดยน้ำหนัก |
|--------------------------------|----------------------------|
| Pb | 64.15 |
| FeO | 2.45 |
| BaO | 3.94 |
| CaO | 0.089 |
| K ₂ O | 0.24 |
| As | 0.02 |
| SiO ₂ | 3.78 |
| Al ₂ O ₃ | 1.28 |
| MgO | 3.78 |
| CO ₂ | 12.93 |
| S-Total | 1.65 |
| อื่นๆ | 8.5 |

* ส่วนประกอบ อื่นๆ ดังแสดงในตาราง ได้แก่ สังกะสี ทองแดง ดีบุก เงิน และพลวง ที่มา : โลหะตะกั่วไทย, 2531

เมื่อได้ผงแร่ตะกั่วเชิร์ตแล้ว จึงนำมาผ่านกระบวนการผลิตตะกั่วแห่งบริษัทฯ ขั้นตอนการผลิตมี 2 ขั้นตอนคือ การถลุง(smelting) และการทำให้บริสุทธิ์(refining)

3.2.1 การถลุง(Smelting)

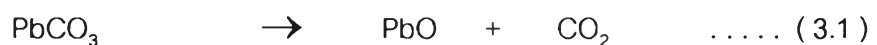
วัตถุดิบของการถลุงประกอบด้วยผงแร่ ซึ่งผ่านการลอยแร่แล้วมีเปอร์เซ็นต์ตะกั่วไม่ต่ำกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ผุนจากเครื่องกรองที่ยังมีตะกั่วปนอยู่ ถ่านโค้ก และฟลักซ์(flux) ได้แก่ หินปูน เหล็กออกไซด์ และซิลิกา ในปริมาณดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณของวัตถุดิบในการถลุงตะกั่ว

| วัตถุดิบ | ปริมาณ (ร้อยละ) โดยน้ำหนัก |
|--------------------|----------------------------|
| ผงแร่ตะกั่ว | 85 |
| ถ่านโค้ก | 7 |
| แร่เหล็ก | 3 |
| ซิลิกา | 1.25 |
| ปูนขาว | 1.25 |
| กากตะกั่วหมุนเวียน | 1.25 |
| ฝุ่นหมุนเวียน | 1.25 |
| รวม | 100 |

* ปริมาณวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ใช้เป็นส่วนประกอบโดยประมาณ ที่มา : โลหะตะกั่วไทย, 2531

นำวัตถุดิบเหล่านี้ผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม ป้อนเข้าเตาถลุงซึ่งเป็นเตาแบบหมุนแนวนอน(rotary furnace) หลอมที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7-8 ชั่วโมง โดยที่เตาถลุงจะหมุนตัวเองไปรอบๆอย่างช้าๆ อุณหภูมิในการถลุงต้องควบคุมมิให้สูงถึงจุดเดือดของตะกั่ว เพราะจะทำให้ระเหยเป็นไอ ในเตานี้แร่เชิร์ตไซด์จะละลายตัวเป็นตะกั่วออกไซด์ที่ถูกลดออกซิเจนด้วยถ่านโค้กหรือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในเตา ดังปฏิกิริยา



เหล็กออกไซด์จะถูกลดออกซิเจนโดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กลายเป็นเหล็ก ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อดังสมการ



เมื่อแร่ตะกั่วละลายจะแยกและจมตัวลงสู่ด้านล่างของเตา เพราะมีความถ่วงจำเพาะสูง โลหะตะกั่วที่ถลุงได้นี้ยังไม่บริสุทธิ์เพราะอาจมีมลทิน เช่น ทองแดง สารหนู พลวง เจือปนอยู่ จำเป็นต้องทำให้บริสุทธิ์ในขั้นต่อไป สารเชื้อหรือฟลักซ์(flux)เติมลงไปเพื่อทำหน้าที่รวมตัวกับมลทินต่างๆในวัตถุดิบที่ไม่ถูกกลดออกซิเจนเป็นโลหะในระหว่างการถลุง ให้กลายเป็นตะกั่วปนเหล็ก ตะกั่วที่เกิดขึ้นอาจประกอบด้วย เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆ อีกด้วย

3.2.2 การทำให้บริสุทธิ์ (Refining)

ตะกั่วที่ได้จากการถลุงนี้ยังไม่บริสุทธิ์ จึงต้องนำไปขจัดมลทินออกเพื่อให้มีความบริสุทธิ์ตามมาตรฐานสากล เช่น มาตรฐานของ ASTM B 29-79 และมาตรฐานของ JIS H 2105 การทำให้โลหะตะกั่วให้บริสุทธิ์จะใช้วิธีทางความร้อนซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1) การทำดรอซซิง (drossing)

การทำดรอซซิงทำได้โดย ถ่ายโลหะตะกั่วเหลวจากเตาถลุงมาไว้ในกะทะเหล็ก(เตาที่ 1) กวนน้ำโลหะและควบคุมอุณหภูมิให้สูงกว่าจุดหลอมเหลวของตะกั่วเล็กน้อย โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 ชั่วโมง กวาดและตักโลหะออกไซด์ ตะกั่ว และแมตต์ (พวกซิลไฟด์ของโลหะ) ที่ลอยอยู่บนผิวน้ำโลหะออก

2) การกำจัดทองแดง (decoppering)

ถ่ายตะกั่วจากเตาที่ 1 มาไว้เตาที่ 2 ลดอุณหภูมิน้ำโลหะลงมาใกล้จุดแข็งตัวที่ 340 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ประมาณ 6 ชั่วโมงเพื่อให้มลทินต่างๆโดยเฉพาะทองแดงแยกตัวออกมาอีก จากนั้น กวนกำมะถันลงไปน้ำโลหะ วิธีนี้จะสามารถขจัดทองแดงให้เหลือเพียง 0.004-0.04 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

3) การกำจัดเงิน (desilvering)

การกำจัดเงินใช้กรรมวิธีของParkes ทำในเตาที่3 โดยผสมสังกะสีลงไปน้ำโลหะตะกั่วที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส สังกะสีจะจับกับเงินลอยขึ้นผิวน้ำ เมื่อลดอุณหภูมิของน้ำโลหะลงเหลือประมาณ 320 องศาเซลเซียสแล้ว จึงตักผลึกสังกะสี/เงินออกจากน้ำโลหะ ผลึกดังกล่าวสามารถนำไปถลุงเอาโลหะเงินได้ต่อไปอีก

4) การกำจัดสังกะสี (dezincing)

โลหะตะกั่วที่ขจัดเงินออกไปแล้ว จะมีสังกะสีเป็นองค์ประกอบเหลือตกค้างอยู่ในปริมาณ 0.5-0.6 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็สามารถขจัดออกได้โดยใช้สุญญากาศเพื่อทำให้สังกะสีระเหยออกไปจากน้ำโลหะตะกั่วที่อุณหภูมิประมาณ 520-580 องศาเซลเซียสได้ใช้เวลาในเตานี้ประมาณ 4.3 ชั่วโมง

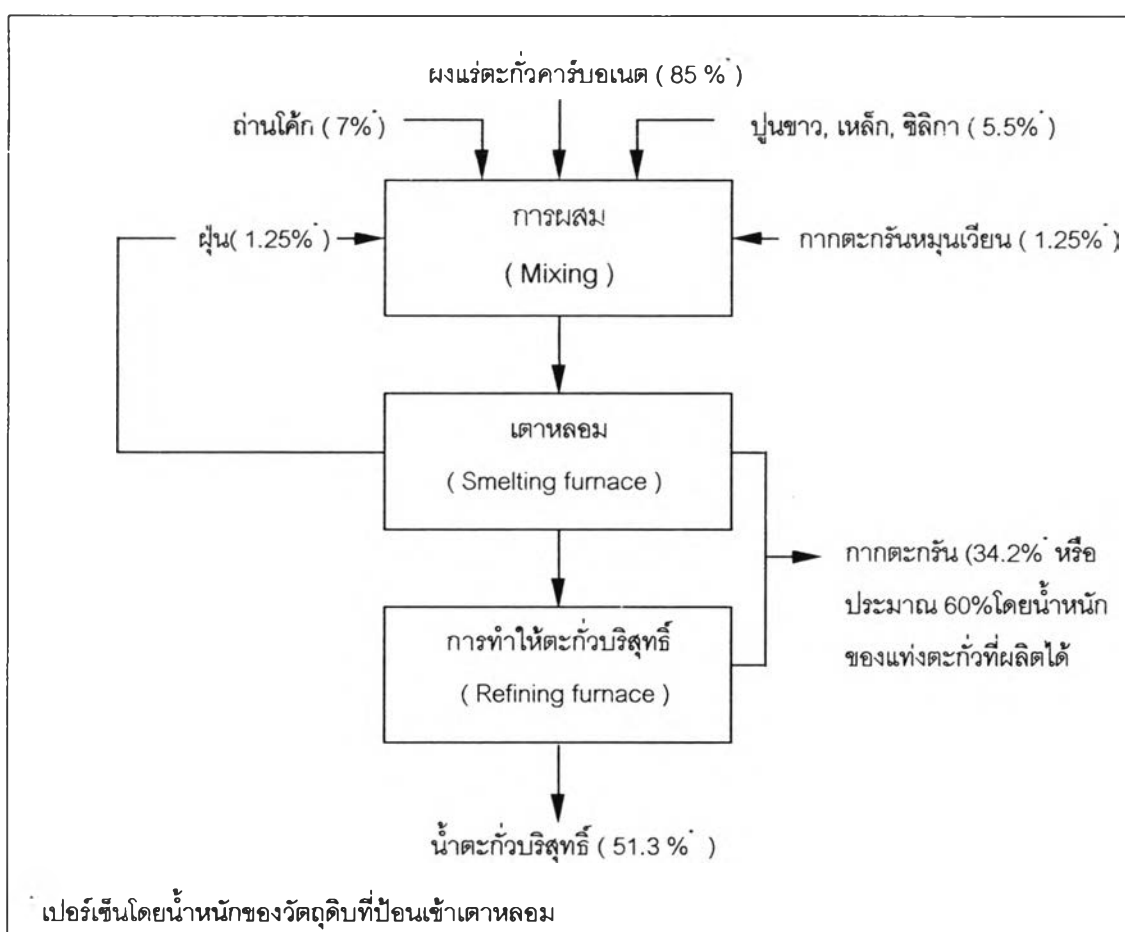
5) การทำซอฟเทนนิ่ง (softening)

การทำซอฟเทนนิ่ง เป็นขั้นตอนต่อไปสำหรับขจัดฟลวง สารหนูและดีบุกออกจากโลหะตะกั่ว การทำซอฟเทนนิ่งมีหลายวิธีแต่ในที่นี้จะใช้วิธีของHarris ทำได้โดยใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไนเตรดลงไปเพื่อทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะที่อุณหภูมิ 400-460 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำให้มลทินต่างๆแยกตัวจากน้ำโลหะเข้าไปอยู่ในเกลือโซดาเหลว

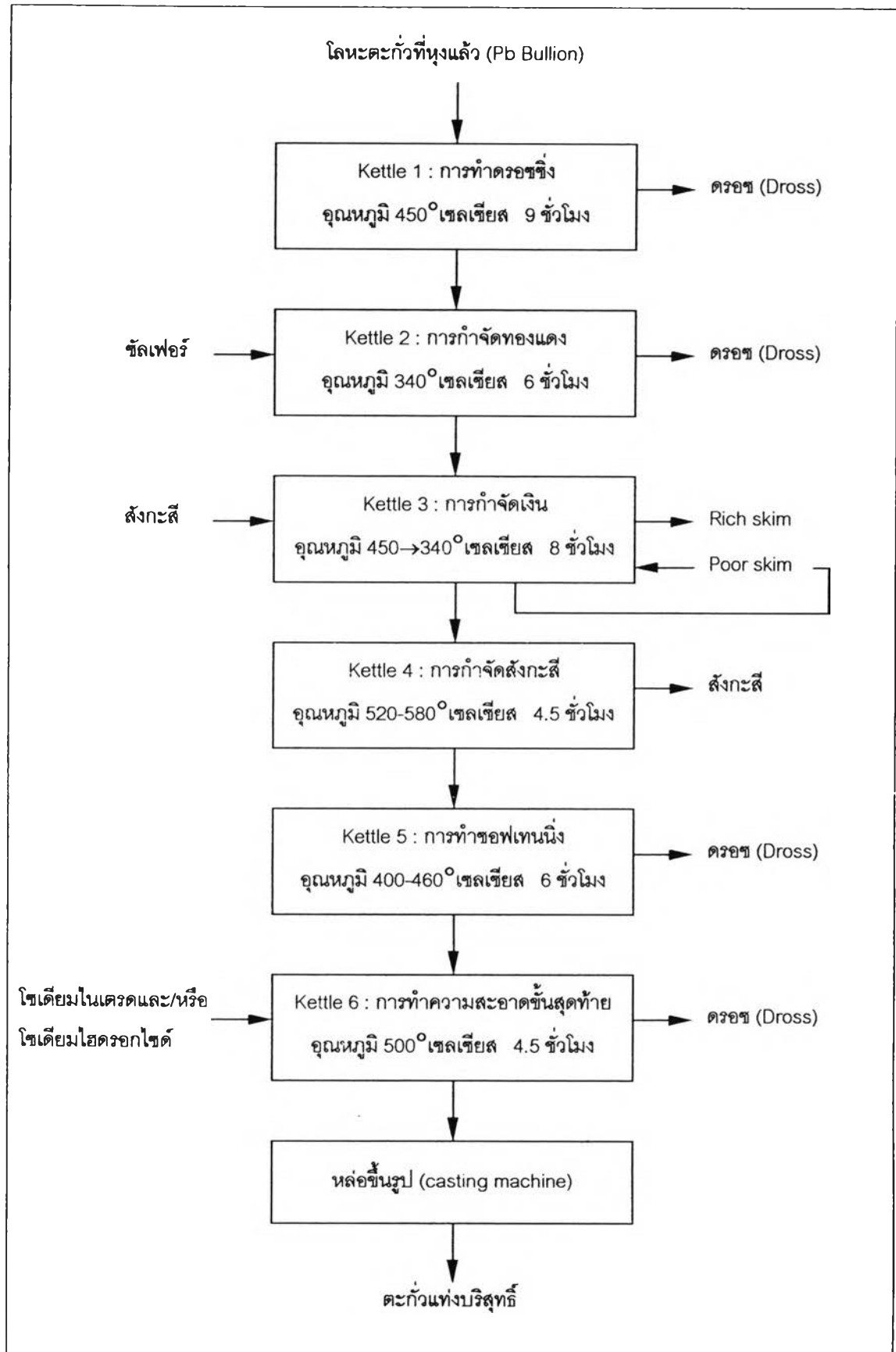
6) การทำความสะอาดขั้นสุดท้าย

การทำความสะอาดขั้นสุดท้ายเป็นขั้นตอนก่อนจะหลอมตะกั่วเป็นแท่ง ขั้นตอนนี้จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และหรือโซเดียมไนเตรดควนลงไปใต้น้ำโลหะตะกั่วที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียสจะได้กากโลหะลอยขึ้นมา

โลหะตะกั่วหลอมเหลวที่สะอาดได้มาตรฐานจะถูกหล่อเป็นแท่งกลายเป็น แท่งโลหะตะกั่วที่บริสุทธิ์ พร้อมทั้งจะนำไปใช้งาน หรือส่งจำหน่ายต่อไป



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการถลุงตะกั่ว



รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำตะกั่วให้บริสุทธิ์

3.3 ของเสียอันตราย (Hazardous Wastes)

องค์การปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency) ได้ให้ความหมายโดยรวมๆ ของคำว่าของเสียอันตรายไว้ดังนี้ "ของเสียอันตราย หมายถึง สารหรือวัสดุที่ไม่ใช้หรือใช้ไม่ได้หรือขยะมูลฝอย ที่มีองค์ประกอบทั้งหมดหรือบางส่วนที่เป็นสารหรือวัตถุอันตรายและเสี่ยงอันตรายอันเนื่องมาจาก ความเข้มข้น ลักษณะทางเคมี การติดเชื้อ หรืออันตราย หรือความเสียหายที่จะมีต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อม"

ประเทศเยอรมันได้ให้ความหมายของคำว่าของเสียอันตรายไว้ว่า "ของเสียอันตราย คือ ของเสียที่หากจัดการแบบขยะชุมชนแล้ว จะเสี่ยงอันตรายต่อสุขภาพและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นั่นคือไม่สามารถจัดการแบบขยะชุมชนได้ "

สำหรับประเทศไทย พระราชบัญญัติโรงงานอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 ออกความตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 ได้มีการกำหนดประเภทของของเสียที่จำเป็นต้องได้รับการกำจัดอย่างถูกวิธี หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นของเสียอันตรายไว้ดังนี้

1) สารไวไฟ ที่มีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้ เป็นสารที่มีจุดวาบไฟต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส ก๊าซอัดความดัน และตัวออกซิไดซ์ต่างๆ

2) สารกัดกร่อน เป็นสารที่มีค่าความเป็นกรดต่างพีเอช(pH)เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า สารที่มีค่าความเป็นกรดต่างพีเอช(pH)เท่ากับ 12.5 หรือสูงกว่า และของเหลวที่กัดกร่อนเหล็กในอัตราที่มากกว่า 6.35 มิลลิเมตรต่อปี ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

3) สารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย เป็นสารที่มีสภาพไม่คงตัวสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและอย่างรุนแรงโดยไม่มีภาวะระเบิดขึ้น สารซึ่งทำปฏิกิริยารุนแรงกับน้ำ หรือรวมกับน้ำจะได้ของผสมที่จะระเบิด หรือทำให้เกิดก๊าซพิษ ไอพิษ หรือควันพิษขึ้น ในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพบุคคลและสิ่งแวดล้อมได้

4) สารพิษอื่นๆ เป็นสารที่เมื่อนำไปผ่านการทดสอบการชะตามวิธีที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดแล้ว สามารถถูกชะแล้วมีปริมาณโลหะหนักหรือวัตถุมีพิษในน้ำสกัดเท่ากับหรือมากกว่าค่าความเข้มข้นมาตรฐานที่กำหนดไว้ในกฎหมายฉบับนี้

นอกจากนี้ยังได้กำหนดชนิดของของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรมจำเพาะประเภท เช่น กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมการผลิตสี ชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เสื่อมคุณภาพแล้ว กากสีจากห้องพ่นสีของโรงงานผลิตรถยนต์ และ ฝุ่นจากระบบกำจัดตะกั่วในอากาศของโรงงานหลอมตะกั่ว เป็นต้น นอกจากนี้ของเสียที่กล่าวไปแล้ว ในกฎหมายฉบับนี้ยังรวมถึง เศษวัสดุที่อยู่ในหรือที่ขุดลอกได้จากสวนผักผิวน้ำ(Surface impoundment) ในหน่วยการหลอมของอุตสาหกรรมผลิตตะกั่วปฐมภูมิซึ่งเป็นของเสียที่ใช้ในงานวิจัยนั่นเอง

3.4 การบำบัดของเสียอันตราย (Hazardous Waste Treatment)

ก่อนที่เราจะนำของเสียอันตรายไปทิ้งโดยการฝังกลบได้นั้น จะต้องผ่านการบำบัดเสียก่อน ซึ่งการเลือกใช้วิธีการบำบัดจะต้องพิจารณาจากหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิด และปริมาณของของเสีย ความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม กฎหมายที่เกี่ยวข้อง และค่าใช้จ่ายในการบำบัด

โดยทั่วไปเราจะแบ่งการบำบัดของเสียอันตรายเป็น 6 วิธีใหญ่ๆ คือ

1. การบำบัดโดยวิธีทางกายภาพ(Physical method) เหมาะสำหรับการแยกของแข็งออกจากของเหลว วิธีเหล่านี้ได้แก่ การเหวี่ยงแยก(centrifugation) การกรอง(filtration) และการแยกด้วยแรงโน้มถ่วง(gravity thickening) เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการบำบัดทางกายภาพจะต้องใช้ร่วมกับวิธีอื่นด้วย

2. การบำบัดโดยวิธีทางเคมี-ฟิสิกส์(Physical/chemical treatment) การบำบัดด้วยวิธีนี้ได้แก่ การดูดซับ(adsorption) การจับตัวตกตะกอน(precipitation/flocculation) และการแลกเปลี่ยนประจุ(ion exchange) เป็นต้น

3. การบำบัดโดยวิธีบำบัดทางเคมี(Chemical method) เหมาะที่จะใช้เพื่อทำลายฤทธิ์ของของเสียอันตราย การบำบัดวิธีนี้ได้แก่ การทำให้เป็นกลาง(neutralization) การออกซิเดชัน หรือรีดักชัน(oxidation/reduction) และการทำให้เกิดตะกอน(precipitation) เป็นต้น

4. การบำบัดโดยวิธีทางชีวภาพ(Biological treatment) เป็นวิธีที่ใช้ในการบำบัดของเสียสามารถใช้ได้ดีกับฟีนอล น้ำมันเก่า และโลหะหนัก ถ้าของเสียมีความเป็นพิษมากต้องมีการสร้างความเคยชินให้แก่แบคทีเรียก่อน

5. การบำบัดโดยวิธีทางความร้อน(Thermal treatment) เป็นวิธีที่สามารถลดปริมาตรของของเสียลงได้มาก วิธีนี้เหมาะกับของเสียประเภท น้ำมันเก่า ยาฆ่าแมลง สีสังเคราะห์ และตัวทำละลายต่างๆ สารเหล่านี้ไม่สามารถทำปฏิกิริยาจึงต้องเผาที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้ถูกออกซิไดส์ไปเป็นสารที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน

6. การบำบัดโดยกระบวนการทำให้เสถียรและการทำให้เป็นก้อน(Stabilization and solidification) เป็นกระบวนการบำบัดที่เหมาะสมสำหรับกากตะกอนโลหะหนัก หรือของแข็งโลหะหนัก เพื่อลดความสามารถในการชะละลายสารอันตรายเหล่านี้สู่สิ่งแวดล้อม

เมื่อของเสียอันตรายประเภทต่างๆผ่านการบำบัดหรือการทำลายฤทธิ์ด้วยวิธีที่เหมาะสมจนมีคุณสมบัติที่ไม่อันตรายและผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 แล้วจะต้องมีการกำจัดขั้นสุดท้ายโดยการฝังกลบที่ถูกต้องต่อไป

3.5 การบำบัดกากของเสียอันตรายโดยวิธีการทำให้เสถียรและการทำให้เป็นก้อน

(Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes)

3.5.1 คำจำกัดความ

การทำให้เป็นก้อน(Solidification) คือกระบวนการที่ทำให้ของเสียใดๆ กลายเป็นก้อนของแข็ง เพื่อลดโอกาสไม่ให้โลหะหนักถูกชะละลายสู่สิ่งแวดล้อม โดยการเติมวัสดุประสาน (binder) ลงไปผสมกับของเสียนั้นๆ ซึ่งอาจเกิดพันธะเคมีระหว่างวัสดุประสาน(binder) กับของเสียหรือไม่ก็ได้

การทำให้เสถียร(Stabilization) คือกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงลักษณะของกากของเสียให้มีความคงตัวมากขึ้น อาจจะทำหรือไม่ทำเป็นก้อนแข็ง(Solidification)ก็ได้ การทำให้เป็นก้อนเป็นส่วนหนึ่งของการทำให้คงตัว แต่การทำให้คงตัวจะรวมไปถึงการใช้ปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนแปลงลักษณะของของเสียที่ก่อให้เกิดอันตรายเป็นลักษณะใหม่ที่เป็นสารหรือสารประกอบซึ่งมีลักษณะไม่เป็นอันตราย ทั้งนี้การทำให้คงตัวจะไม่พิจารณาถึงกระบวนการทางชีวภาพเลย

คำสองคำนี้มักใช้ควบคู่กันไปโดยอาจเรียกรวมกันว่า " ฟิเซชัน(fixation) " จากคำจำกัดความดังกล่าวเราพอสรุปได้ว่า การทำให้เป็นก้อนและทำให้เสถียร(solidification and stabilization; s/s) เป็นกระบวนการที่ใช้บำบัดกากของเสียอันตราย ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 1) ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของของเสียให้อยู่ในรูปที่สามารถจัดการได้ง่ายขึ้น
- 2) ลดพื้นที่ผิวที่มลสารนั้นสามารถถูกชะหรือถ่ายเทออกมาได้
- 3) จำกัดความสามารถในการละลาย(solubility) หรือการทำของเสียอันตรายให้หมดฤทธิ์ เพื่อให้มีสภาพเหมาะสมที่จะนำไปบรรจุไว้เป็นระยะเวลานาน (long-term containment)

3.5.2 เทคนิคการทำให้เป็นก้อน (Solidification Techniques)

เทคนิคการทำให้เป็นก้อนสามารถแบ่งได้หลายวิธีตามชนิดของวัสดุประสาน โดยทั่วไปแบ่งเป็น 5 วิธีคือ การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ซีเมนต์(Cement - based technique) การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนขาว(Lime-based technique) การทำให้เป็นก้อนโดยใช้เทอร์โมพลาสติก(Thermoplastic technique) การทำให้เป็นก้อนโดยใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์(Organic polymer technique) และเอนแคปซูลเลชันเทคนิค(Encapsulation technique) เราจะเห็นว่าทำให้เป็นก้อนสามารถทำได้หลายวิธี การเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ความยากง่ายในการปฏิบัติการและการหาเครื่องมือเครื่องใช้ ราคาการบำบัดต่อหน่วยของเสีย แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรกคือ ลักษณะสมบัติของกากของเสีย(waste characteristics) ความเข้ากันได้(compatibility) ระหว่างของเสียกับวัสดุประสาน(binder) และสภาวะที่ใช้

ตารางที่ 3.4 แสดงความเข้ากันได้ของกากของเสียอนินทรีย์ชนิดต่างๆกับกระบวนการทำให้เป็นก้อน

| ชนิดของของเสีย | เทคนิคการทำให้เป็นก้อน | | | | |
|-----------------------|---|---|--------------------------------------|--|--------------------------------|
| | Cement-based | Lime-based | Thermoplastic | Organic polymer | Encapsulation |
| 1. กรด | เกิดการสะเทินกับกรด | สามารถเข้ากันได้ | สามารถถูกสะเทินก่อนที่จะรวมกัน | สามารถเข้ากันได้ | สามารถถูกสะเทินก่อนที่จะรวมกัน |
| 2. ตัวออกซิไดส์ | สามารถเข้ากันได้ | สามารถเข้ากันได้ | | | |
| 3. ซัลเฟต | ของเสียอาจหน่วงการก่อตัวและต้องใช้ซีเมนต์ชนิดพิเศษ | สามารถเข้ากันได้ | อาจจะถูกขจัดน้ำออกและเติมน้ำอีกครั้ง | สามารถเข้ากันได้ | สามารถเข้ากันได้ |
| 4. แอลด์(หมู่ 7) | อาจหน่วงการก่อตัวและสามารถถูกชะออกจากซีเมนต์ได้ง่าย | อาจหน่วงการก่อตัวและสามารถถูกชะออกจากซีเมนต์ได้ง่าย | อาจจะถูกขจัดน้ำออก | สามารถเข้ากันได้ | สามารถเข้ากันได้ |
| 5. โลหะหนัก | สามารถเข้ากันได้ | สามารถเข้ากันได้ | สามารถเข้ากันได้ | พี เอ ซ ที่ เป็น กร ด สามารถละลายโลหะไฮดรอกไซด์ได้ | สามารถเข้ากันได้ |
| 6. กากกัมมันตภาพรังสี | สามารถเข้ากันได้ | สามารถเข้ากันได้ | สามารถเข้ากันได้ | สามารถเข้ากันได้ | สามารถเข้ากันได้ |

ที่มา : Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal., 1990

ในตารางที่ 3.4 ได้สรุปถึงความเข้ากันได้ของกากของเสียอินทรีย์กับกระบวนการทำให้เป็นก้อน(solidification) ในแต่ละวิธี ของเสียที่ต้องการบำบัดในที่นี้คือตะกอนที่ประกอบด้วยตะกั่ว ซึ่งเหมาะสมที่จะบำบัดโดยการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ซีเมนต์ และการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนขาว เนื่องจากสามารถเข้ากันได้ ปฏิบัติการง่ายกว่าวิธีอื่น และมีราคาถูกกว่าวิธีอื่นด้วย ในที่นี้จึงขอกล่าวเฉพาะการทำให้เป็นก้อนเพียง 2 วิธีนี้เท่านั้น

3.5.3 การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ (Cement-based Technique)

เดิมทีการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ นิยมใช้กับกากกัมมันตภาพรังสีระดับต่ำ(low-level radioactive waste) ต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีนี้เพื่อนำมาใช้กับกากของเสียอันตรายประเภทอื่นที่มีปริมาณมากๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกากตะกอนโลหะหนัก

การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ทำได้โดย ผสมกากของเสียและน้ำเข้ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อให้กลายเป็นก้อนของแข็ง และอาจเติมสารเติมแต่งอื่นๆด้วยก็ได้ การปฏิบัติการอาจทำเป็นแบบทีละเท(batch) หรือแบบต่อเนื่อง(continuous)ก็ได้ เนื่องจากซีเมนต์เป็นสารที่มีค่าพีเอชสูงจึงทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปสารประกอบไฮดรอกไซด์ หรือคาร์บอเนตซึ่งเป็นรูปที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำมาก

ไอออนของโลหะจะถูกกักไว้ในก้อนซีเมนต์ ส่วนคุณสมบัติของก้อนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปริมาณของเสียกับปริมาณซีเมนต์ สารเติมแต่ง(additives)เติมลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแข็งแรง(strength) และความเสถียร(stability) สารเติมแต่ง(additives) ที่เพิ่มความแข็งแรง(strength) และความเสถียร(stability) ได้แก่ สารพวกแอสเบสตอส ยาง พลาสติก และซีตะไบโลหะ

สารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์บางประเภทที่ปนเปื้อนมาในกากของเสีย อาจทำให้เกิดอุปสรรคต่อการบ่มตัว(curing) และแข็งตัว(setting) ของของผสมระหว่างซีเมนต์กับของเสีย สารปนเปื้อนเหล่านี้ เช่น สารอินทรีย์ ดินร่วน ดินเหนียว ถ่านหิน หรือลิกไนต์ ซึ่งเป็นตัวหน่วงการแข็งตัว(setting) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ต้องใช้เวลาเพิ่มจากเดิมหลายวัน

เกลือของโลหะที่ต่างชนิดกัน ก็สามารถทำให้ก้อนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันอย่างมากในด้านเวลาแข็งตัว(setting time) และค่าความแข็งแรง(strength) ที่ได้ เกลือของโซเดียม(sodium) เช่น อาร์ซีเนต(arsenate) บอเรต(borate) ฟอสเฟต(phosphate) ไอโอดेट(iodate) และซัลไฟด์(sulfide) ก็เป็นตัวหน่วงการแข็งตัวของของผสมระหว่างของเสีย และปูนซีเมนต์ด้วย กากของเสียที่มีปริมาณซัลเฟต(sulfate)สูง ก็ยากต่อการบำบัด เพราะซัลเฟต(sulfate) จะทำให้เกิดสารประกอบซัลโฟลูมินาต(sulfoaluminate)ในของผสมระหว่างซีเมนต์กับของเสีย จึงต้องใช้วิธีที่

พิเศษกว่าปกติ นั่นคืออาจต้องมีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการหรือเติมสารเติมแต่ง(additives) ชนิดพิเศษลงไป สารเติมแต่ง(additives)ที่เติมลงไปนี้เพื่อลดปริมาณของของเสียที่จะสามารถหลุดออกมาจากก้อนซีเมนต์ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าดินเหนียวเป็นสารดูดซับที่ดีในโครงสร้างของซีเมนต์ที่ผสมของเสีย ส่วนโซเดียมซิลิเกต(sodium silicate) ก็ใช้เป็นสารป้องกันการหลุดออกของของเสีย ในกระบวนการนี้ได้ดีด้วย สิ่งที่ควรปฏิบัติเป็นขั้นตอนต่อไปคือการเคลือบผิวก้อนซีเมนต์ที่ผสมของเสียด้วยแอสฟัลต์(asphalt) และแอสฟัลต์อิมัลชัน(asphalt emulsion) หรือไวนิล(vinyl) เพื่อป้องกันการหลุดของของเสียออกจากก้อนซีเมนต์อีกชั้นหนึ่งแต่ในขั้นตอนนี้มีค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่นิยมปฏิบัติ

ข้อดี

- สารที่ใช้ในกระบวนการเป็นสารที่หาง่ายและราคาถูก
- กระบวนการเป็นแบบง่ายไม่ซับซ้อน และสามารถประยุกต์เพื่อให้เหมาะสมกับของเสียชนิดต่างๆได้โดยไม่ยุ่งยากนัก
- สามารถหาอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการปฏิบัติได้ง่าย
- ความแข็งแรง(strength) และอัตราการซึมผ่าน(permeability) ของก้อนซีเมนต์ที่ได้สามารถปรับปรุงได้โดยการควบคุมอัตราส่วนของซีเมนต์ต่อของเสีย

ข้อเสีย

- ก้อนซีเมนต์ที่ได้มีความแข็งแรงต่ำ(low-strength) และของเสียในก้อนซีเมนต์สามารถถูกชะได้ด้วยกรดได้มากกว่าการทำให้เป็นก้อนโดยวิธีอื่น
- ของเสียในก้อนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นสามารถถูกชะออกมาได้มากกว่าวิธีอื่นเพราะไม่มีพันธะเคมีระหว่างปูนซีเมนต์และของเสีย
- ผลิตภัณฑ์มีปริมาตรสุดท้ายเพิ่มขึ้น
- ถ้าของเสียมีสารปนเปื้อนที่เป็นอุปสรรคต่อการบ่มตัว(curing) และการแข็งตัว(setting) ก็จำเป็นต้องผสมสารเติมแต่ง(additives) หรือใช้ซีเมนต์พิเศษซึ่งทำให้ราคาในการบำบัดสูงขึ้น
- ต้องการการบรรจุเพื่อความปลอดภัยอีกครั้งหนึ่ง(secondary containment)

3.5.4 การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนขาว (Lime-based Technique)

การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนขาวสามารถทำได้โดยนำ ปูนขาว วัสดุซิลิกา(silicious material)ชนิดละเอียด ของเสีย และนำมาทำปฏิกิริยากันเพื่อให้เกิดวัสดุแข็ง สารที่เกิดขึ้นเรียกว่า คอนกรีตปอซโซลาน(pozzolanic concrete) วัสดุซิลิกา(silicious material) ที่นิยมใช้คือ ขี้เถ้าลอย(fly ash) ฝุ่นผงซีเมนต์(cement klin dust) ซึ่งสารทั้งสองนี้ก็เป็นสารที่ต้องการกำจัดเช่น

เดียวกัน ดังนั้นการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนขาวจึงสามารถใช้กำจัดของเสียได้ที่ละหลายชนิดไปพร้อมๆกัน วัสดุซิลิกา(silicious material) ที่นอกเหนือจากขี้เถ้าลอย(fly ash) และฝุ่นผงซีเมนต์(cement klin dust) แล้วได้แก่ ตะกอนสลัดจ์(sludge)บางชนิด ซึ่งใช้เป็นตัวเพิ่มความแข็งแรง(strength) และยังเป็น การช่วยบำบัดสารที่อยู่ในตะกอนสลัดจ์(sludge) อีกด้วย ในการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนขาวจะมีปัญหาเรื่องสารรบกวน เช่นเดียวกับการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ซีเมนต์ การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนขาวเหมาะกับสารอนินทรีย์มากกว่าสารอินทรีย์ เพราะเมื่อสารอินทรีย์มีการย่อยสลายต่อภายหลังจากการบ่มตัวแล้ว จะทำให้มีอัตราการซึมน้ำผ่าน(permeability)เพิ่มขึ้น และมีความแข็งแรง(strength) ลดลง

ข้อดี

- สารที่ใช้ในกระบวนการเป็นสารที่หาง่ายและราคาถูก
- สามารถหาอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการปฏิบัติได้ง่าย
- ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย

ข้อเสีย

- ของเสียสามารถถูกชะได้ด้วยกรดได้
- ผลิตภัณฑ์มีปริมาตรสุดท้ายเพิ่มขึ้น
- ปัญหาการบ่มตัว(curing) และการแข็งตัว(setting) ขึ้นอยู่กับสารปนเปื้อนของสารอนินทรีย์ที่อยู่ในตะกอนสลัดจ์(sludge)
- ต้องการการบรรจุเพื่อความปลอดภัยอีกครั้งหนึ่ง(secondary containment)

3.5.5 วัสดุประสาน (Binder)

วัสดุประสาน(binder) คือสารที่เติมลงไปเพื่อผสมกับของเสียแล้วทำให้ของเสียนั้นมีลักษณะเป็นก้อน และมีความคงตัวมากขึ้น วัสดุประสานเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดในการทำให้เป็นก้อนโดยทั่วไปเราสามารถแบ่งวัสดุประสานได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1) วัสดุประสานที่เป็นสารอนินทรีย์(inorganic binders) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ปอชโกลาน ยิปซัม และซิลิเกต

2) วัสดุประสานที่เป็นสารอินทรีย์(organic binders) ได้แก่ อีพอกซี โพลีเอสเตอร์ แอสฟัลท์ โพลีเอเลฟินส์(2 ชนิด คือโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีน-บิวตะไดอิน) และยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์

จากที่กล่าวมาแล้วว่า ในการบำบัดของแข็งที่ปนเปื้อนโลหะหนักจะใช้วิธีการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็ง ซึ่งมีวัสดุประสานคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนขาวโดยอาจผสมสารเติมแต่งด้วยก็ได้ ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวัสดุประสานเพียง 2 ชนิดนี้เท่านั้น

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์(cement) เป็นวัสดุยึดเกาะมีความสามารถในการสร้างพันธะ ทำให้วัสดุที่เป็นอนุภาคกระจัดกระจายกลายเป็นวัสดุที่เป็นก้อนเดียวซึ่งมีลักษณะแข็งอัดแน่น คำจำกัดความนี้ครอบคลุมถึงวัสดุต่างๆมากมาย แต่ในทางวิศวกรรม และการก่อสร้าง วัสดุนี้จะหมายถึงซีเมนต์ที่ประกอบด้วยหินปูน(calcareous cements) ซึ่งมีสารองค์ประกอบหลักคือแคลเซียม โดยทั่วไปซีเมนต์จะแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ซีเมนต์ที่ไม่สามารถก่อหรือแข็งตัวในน้ำได้ และ ซีเมนต์ที่สามารถก่อตัวหรือแข็งตัวในน้ำได้ให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีความคงตัวในน้ำ ซีเมนต์ชนิดหลังนี้เรียกว่าไฮดรอลิกซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นไฮดรอลิกซีเมนต์ชนิดหนึ่ง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือสารซีเมนต์ที่ได้มาจากการผสมกันของสารจำพวกแคลเซียมหรือวัสดุจำพวกหินปูนกับดินเหนียวและ/หรือ ซิลิกา อลูมินา หรือสารจำพวกออกไซด์ของเหล็กตามอัตราส่วนที่ต้องการ แล้วนำไปเผาด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมจนทำปฏิกิริยาเป็นเนื้อเดียว จากนั้นจึงนำไปบดให้ละเอียด ของผสมที่เกิดจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำเรียกว่า ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพสต์(portland cement paste) หรือนีตซีเมนต์เพสต์(neat cement paste) ถ้านำปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพสต์มาผสมกับวัสดุผสมชนิดละเอียด(ลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 4) เช่น หวาย จะเรียกปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มอร์ตาร์(portland cement mortar) และถ้าใส่วัสดุชนิดหยาบ เช่น หิน กรวด ลงไปด้วยจะเรียกปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต(portland cement concrete) เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียมและเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ดรูปของผลึกละเอียดมาก สารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิดที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลังจากการเผาแล้ว ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอลูมิเนตและเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆอีกที่ได้หลังจากการเผา เช่น แมกเนเซียมออกไซด์ โปแตสเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์มีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆของปูนซีเมนต์ดังนี้

-ไตรแคลเซียมซิลิเกตทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดได้เร็วในระยะแรก(ประมาณ 14 วัน หลังจากการผสม) มีอัตราการทำปฏิกิริยากับน้ำปานกลาง ก่อตัวภายในไม่กี่ชั่วโมง เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะให้ความร้อนปานกลาง(ประมาณ120 แคลอรีต่อกรัม) และทนต่อการกัดกร่อน ของซัลเฟต

-ไดแคลเซียมซิลิเกตทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในระยะหลัง(ตั้งแต่14-28 วัน และเรื่อยไปเมื่อได้รับการบ่มชื้น) ทำปฏิกิริยากับน้ำค่อนข้างช้า เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะให้ความร้อนค่อนข้างน้อย(ประมาณ60แคลอรีต่อกรัม) มีความทนทานสูงต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต

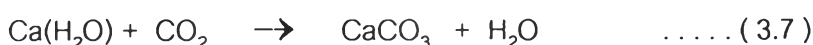
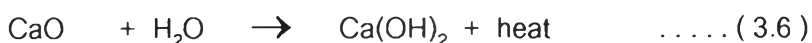
-ไตรแคลเซียมออกไซด์ ทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดได้เร็วมากในระยะแรก(ประมาณ 1 วันหลังจากการผสม) เพราะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที แต่ไม่ช่วยให้มีกำลังรับแรงอัดในระยะหลัง ก่อตัวและแข็งตัวเร็ว เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะให้ความร้อนมาก(ประมาณ 210 แคลอรีต่อกรัม) และไม่ทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต

-เตตระแคลเซียมออกไซด์ในเฟอร์ไรต์ ไม่ค่อยมีส่วนในการพัฒนากำลังรับแรงอัดในระยะแรกและหลัง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะให้ความร้อนน้อย(ประมาณ 100 แคลอรีต่อกรัม) สารประกอบนี้ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทาดำ

สมาคมทดสอบแห่งสหรัฐอเมริกา(American Standard Testing Material) แยกประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์(ASTM C 150) ออกเป็น 5 ชนิด แต่ละชนิดแตกต่างกันที่ส่วนผสมและการใช้งาน สำหรับประเทศไทยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (สมอ.) ก็ได้มีการอ้างตาม ASTM C 150 ด้วย รายละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 3.5 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่ละชนิดจะมีปริมาณของสารประกอบต่างๆไม่เท่ากัน จำนวนของสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์จะทำให้คุณสมบัติของซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไป ในการทำให้เป็นก้อนจะนิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา(Ordinary Portland Cement) เพราะเป็นชนิดที่มีราคาถูกที่สุด และสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพกับของเสียหลายประเภทโดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะหนัก

2) ปูนขาว

ปูนขาวมีชื่อทางเคมีว่าแคลเซียมออกไซด์(CaO) เป็นวัสดุที่ได้จากการเผาหินปูนจนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์แยกตัวออกมา ประเภทของปูนขาวขึ้นอยู่กับส่วนผสมของหินปูนและขั้นตอนการเผา ถ้าทำการเผาหินปูนอย่างสมบูรณ์จะได้ปูนขาวดิบ(Quick lime,CaO) ปูนขาวดิบนี้เมื่อได้รับความชื้นองค์ประกอบออกไซด์จะรวมตัวกับน้ำกลายเป็นรูปไฮดรอกไซด์ ซึ่งเรียกว่า ปูนขาวสุก(Hydrate lime,Ca(OH)₂) ดังสมการที่ (3.5) และ (3.6) เมื่อนำไปใช้เป็นวัสดุซีเมนต์ ปูนขาวสุกจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เกิดเป็นหินปูนดังสมการที่ (3.7)



ปูนขาวดิบตามท้องตลาดมีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์ประมาณร้อยละ 61 และคิดเป็นปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 81.61

ตารางที่ 3.5 แสดงประเภท ส่วนประกอบ และคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

| ประเภท | ส่วนประกอบ (%) | | | | | คุณสมบัติ |
|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------|---|
| | C ₃ S ⁽¹⁾ | C ₂ S ⁽²⁾ | C ₃ A ⁽³⁾ | C ₄ AF ⁽⁴⁾ | Total ⁽⁵⁾ | |
| I ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) | 55 | 20 | 12 | 9 | 96 | เป็นชนิดที่มีการผลิตมากที่สุดและใช้กันมากที่สุดในการก่อสร้าง |
| II ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดดัดแปลง (Modified Portland Cement) | 45 | 30 | 7 | 12 | 94 | ใช้ในงานก่อสร้างที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานต่อม่อสะพาน |
| III ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดแข็งตัวเร็ว (High-Early Strength Portland Cement) | 65 | 10 | 12 | 8 | 95 | แข็งตัวเร็ว มักเรียกว่า high early ใช้ในงานก่อสร้างหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการกำลังรับแรงอัดสูงในเบื้องต้น |
| IV ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) | 25 | 50 | 5 | 13 | 93 | เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีความร้อนต่ำ มักใช้ในโครงสร้างขนาดใหญ่ที่อาจเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความร้อนได้ |
| V ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดทนซัลเฟต (Sulfate-resistant Portland Cement) | 40 | 35 | 3 | 14 | 92 | มีความต้านทานซัลเฟตสูง มักใช้ในพื้นที่ที่ต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตสูง |

⁽¹⁾ C₃S คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต หรือแร่ Alite มีสูตรเคมีว่า 3CaO.SiO₂ ⁽²⁾ C₂S คือ ไดแคลเซียมซิลิเกต หรือแร่ Belite มีสูตรเคมีว่า 2CaO.SiO₂

⁽³⁾ C₃A คือ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต หรือแร่ Celite มีสูตรเคมีว่า 3CaO.Al₂O₃ ⁽⁴⁾ C₄AF คือ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์หรือแร่ Iron มีสูตรเคมีว่า 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃

⁽⁵⁾ ไม่ครบ 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากยังไม่ได้รวมสารประกอบบางชนิด เช่น แคลเซียมซัลเฟต แมกเนเซียมออกไซด์ และอื่นๆ

ที่มา : Concrete Admixture, 1990

3.5.6 สารเติมแต่ง (Additives)

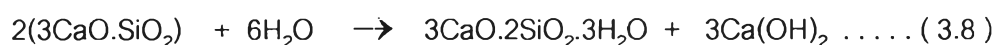
สารเติมแต่ง(additives) หมายถึงสารอื่น ๆ นอกเหนือจากปูนซีเมนต์ วัสดุผสมและน้ำที่เติมลงไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของซีเมนต์หรือคอนกรีต สารเติมแต่งมีมากมายหลายชนิด เช่น สารเพิ่มฟองอากาศ(Air Entraining Admixture) สารลดปริมาณน้ำ(Water-Reducing Admixture) และสารเร่งการก่อตัว(Accelerators) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำสารเติมแต่งมาผสมเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆในการบำบัดของเสีย สารเติมแต่งที่ใช้คือ สารลดความสามารถในการซึมน้ำ หรือ Permeability Reducer สารนี้มีคุณสมบัติในการลดการซึมผ่านของน้ำภายใต้ความดันน้ำที่สูง โดยจะเข้าไปแทรกอุดรูเล็กๆในซีเมนต์ หรือคอนกรีตทำให้วัสดุมีความทึบน้ำ สารชนิดนี้เป็นพวกอัลคาไลซิลิเกต(Alkaline Silicates) เช่น โซเดียมซิลิเกต เป็นต้น โดยสารลดการซึมน้ำน่าจะมีส่วนในการปรับปรุงการลดการถูกชะละลายของของเสียได้

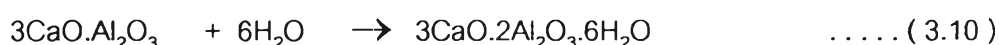
3.5.7 ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้อง

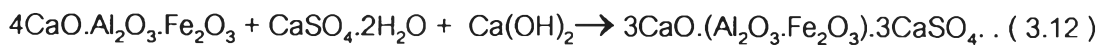
1) ปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction)

ปฏิกริยาไฮเดรชัน คือ ปฏิกริยาระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์ เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ น้ำจะทำปฏิกริยากับไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกต ให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และความร้อน ดังสมการที่ (3.8) และ(3.9)



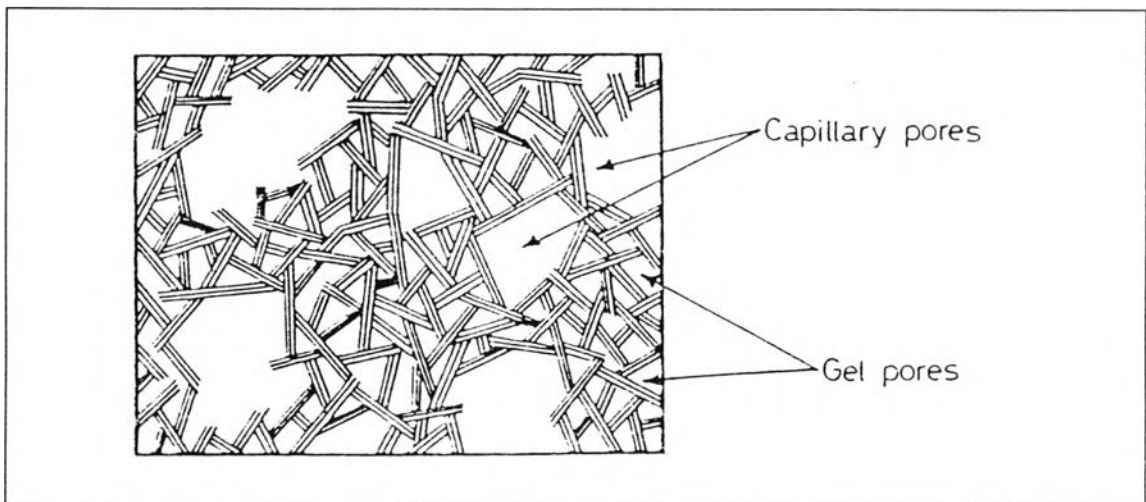
สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำให้ซีเมนต์เฟสเกิดเป็นเจล มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน มีลักษณะเหนียวคล้ายกาว ก่อตัวแข็งตัวและยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นตัวเพิ่มสภาพความเป็นด่างให้ปูนซีเมนต์ ทำให้มีสภาพแวดล้อมเหมาะสมในการตกตะกอนและดูดซับโลหะหนัก แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้ยังสามารถกับสารปอซโซลานได้อีกด้วย นอกจากนี้แคลเซียมซิลิเกตเองก็มีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักด้วย สารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะทำปฏิกริยากับน้ำเร็วมาก ซึ่งอาจทำให้เกิดการก่อตัวผิดปกติ(false set) จึงต้องมีการผสมยิปซัมลงไปเพื่อหน่วงปฏิกริยา ดังสมการที่ (3.10) และ(3.11) เติตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์จะทำปฏิกริยากับยิปซัมในน้ำโดยยิปซัมจะหน่วงให้ปฏิกริยาช้าลงมากปฏิกริยาจะให้ของแข็งแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ ดังสมการที่ (3.12)





ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะสิ้นสุดลงก็ต่อเมื่อน้ำที่เติมลงไป ลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำที่มีอยู่นั้นเหมือนเป็นการบอกว่า ปฏิกิริยานี้จะเกิดได้เมื่อน้ำที่ผสมอย่างน้อยเป็นสองเท่าของน้ำที่ต้องการสำหรับปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นความต้องการอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ประมาณ 0.5 โดยน้ำหนัก

ซีเมนต์เจลเป็นสารที่ประกอบด้วย อนุภาคที่มีขนาดคอลลอยด์ และมีความพรุนประมาณร้อยละ 28 โฟรงในซีเมนต์ประกอบด้วยโฟรงวุ้น(gel pore) และโฟรงชักน้ำ(capillary pore)ซึ่งมีปริมาณขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของโฟรงในซีเมนต์

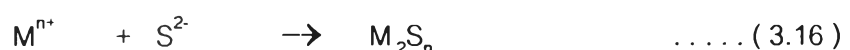
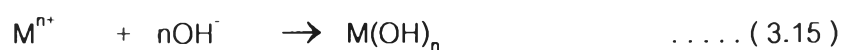
2) ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction)

ปฏิกิริยาปอซโซลาน คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และวัสดุปอซโซลานซึ่งประกอบด้วยซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตตามสมการที่ (3.13) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตตามสมการที่ (3.14)



3) ปฏิกิริยาการเกิดตะกอน (Precipitation reaction)

ปฏิกิริยานี้เป็นการเกิดตะกอนของโลหะหนัก จากรูปที่ความสามารถในการละลายน้ำสูง ให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ สารประกอบโลหะหนักเหล่านี้ ได้แก่ โลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์



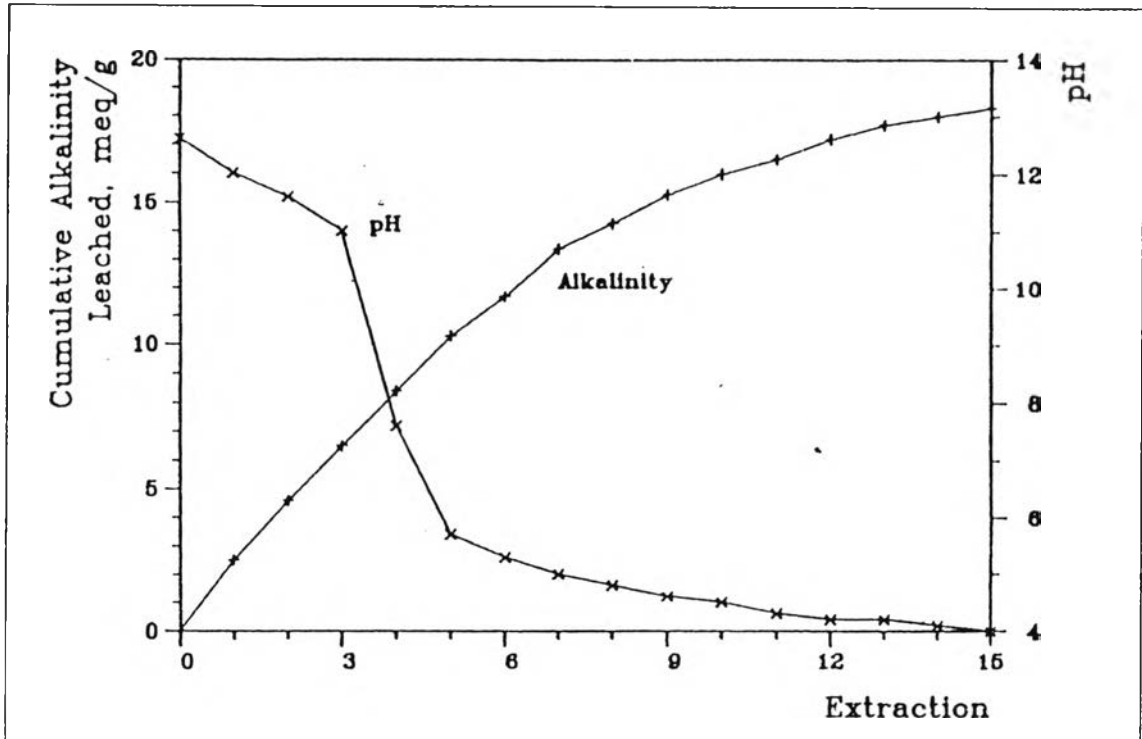
3.5.8 กลไกการจับยึดโลหะหนัก(Heavy Metal Binding Mechanisms)

Bishop,1988 กล่าวว่า กลไกในการยึดจับโลหะหนักโดยวิธีทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์อาจจะเป็นดังนี้

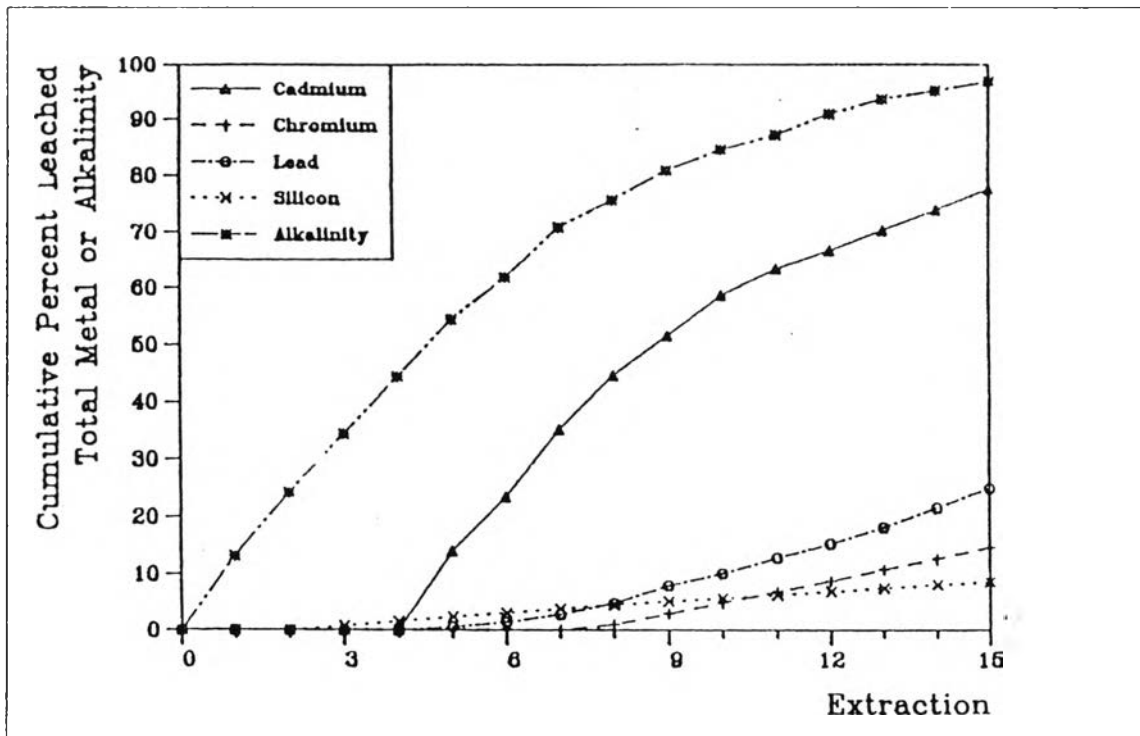
- 1) โลหะหนักอาจถูกกักอยู่ในโพรงของก้อนซีเมนต์
- 2) โลหะหนักอาจถูกดูดซับอยู่บนผิวในโพรงของก้อนซีเมนต์
- 3) โลหะหนักอาจเกิดสารประกอบทางเคมีกับส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์

โดยที่โลหะต่างชนิดกันก็จะมีกลไกในการยึดจับที่แตกต่างกัน

Bishop ได้ทำการทดลองเพื่อหาข้อเท็จจริงโดยทำการทดสอบการชะโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม และตะกั่วที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ซีเมนต์ จากการทดลองชะก้อนตัวอย่างแบบ multiple batch พบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำชะ มีปริมาณมากกว่าโครเมียมและตะกั่วอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโลหะเหล่านี้ถูกจับอยู่ในก้อนซีเมนต์ในลักษณะที่แตกต่างกัน ถ้าโลหะถูกกักอยู่ในโพรงหรือถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวในโพรง การปลดปล่อยโลหะก็ควรจะเป็นไปตามค่าความเป็นด่างของซีเมนต์ที่ถูกปลดปล่อย แต่ถ้าโลหะทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ การปลดปล่อยโลหะหนักก็ควรจะเป็นไปตามความเข้มข้นของซิลิกาในน้ำชะ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำสกัดหลังจากผ่านการชะก้อนตัวอย่างแล้ว กับค่าความเป็นด่างสะสมที่ถูกชะจากก้อนตัวอย่าง และรูปที่ 3.5 กราฟแสดงความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งสาม ซิลิกอน และค่าความเป็นด่างสะสมเมื่อชะก้อนตัวอย่างด้วยวิธี multiple batch พบว่าหลังจากที่มีการปลดปล่อยค่าความเป็นด่างเพียงไม่นานแคดเมียมก็เริ่มถูกชะ แต่สำหรับตะกั่วและโครเมียมแล้วจะพบในน้ำชะได้ก็ต่อเมื่อซิลิกาถูกชะออกมา ซิลิกาจะถูกชะออกมาได้ก็ต่อเมื่อค่าพีเอชของน้ำชะต่ำมากนั่นคือก้อนซีเมนต์ไม่ค่อยจะมีค่าความเป็นด่างมาสะเทินกรดแล้ว ซึ่งทำให้ค่าพีเอชของน้ำสกัดหลังจากผ่านการชะต่ำลงกว่าในการ ชะครั้งแรกๆ แนวโน้มเส้นกราฟของแคดเมียมและค่าความเป็นด่างมีความคล้ายคลึงกัน แต่จะพบแคดเมียมช้ากว่าเนื่องจากในตอนแรกก้อนซีเมนต์ยังมีความเป็นด่างสูงมากสามารถสะเทินน้ำชะได้แต่เมื่อความเป็นด่างที่มีในก้อนซีเมนต์ลดลงแล้วทำให้ไม่สามารถสะเทินฤทธิ์กรดของน้ำสกัดได้เท่าในตอนแรกค่าพีเอชของน้ำสกัดหลังจากการชะจึงลดลง จนกระทั่งถึงจุดที่แคดเมียมสามารถละลายได้ ส่วนแนวโน้มเส้นกราฟของซิลิกาทะกั่วและโครเมียมก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เขาสรุปว่า โครเมียมและตะกั่วน่าจะอยู่ในรูปสารประกอบซิลิเกตมากกว่าที่จะอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นรูปเบื้องต้นที่เติมลงไป ส่วนแคดเมียมที่ถูกชะออกมาได้มากที่สุดและถูกชะออกมาตามค่าความเป็นด่างนั้นคาดว่าน่าจะอยู่ในรูปสารประกอบไฮดรอกไซด์ และถูกกักไว้ในโพรงของก้อนซีเมนต์หรือถูกดูดซับอยู่บนผิวในก้อนซีเมนต์



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของน้ำสกัดกับความแตกต่างสะสมของซีเมนต์ที่ถูกชะออกมา (ที่มา : Bishop,1998)



รูปที่ 3.5 แสดงค่าความแตกต่าง ความเข้มข้นของโลหะหนัก และความเข้มข้นของซิลิกอนเมื่อผ่านการชะแบบ multiple batch (ที่มา : Bishop,1998)

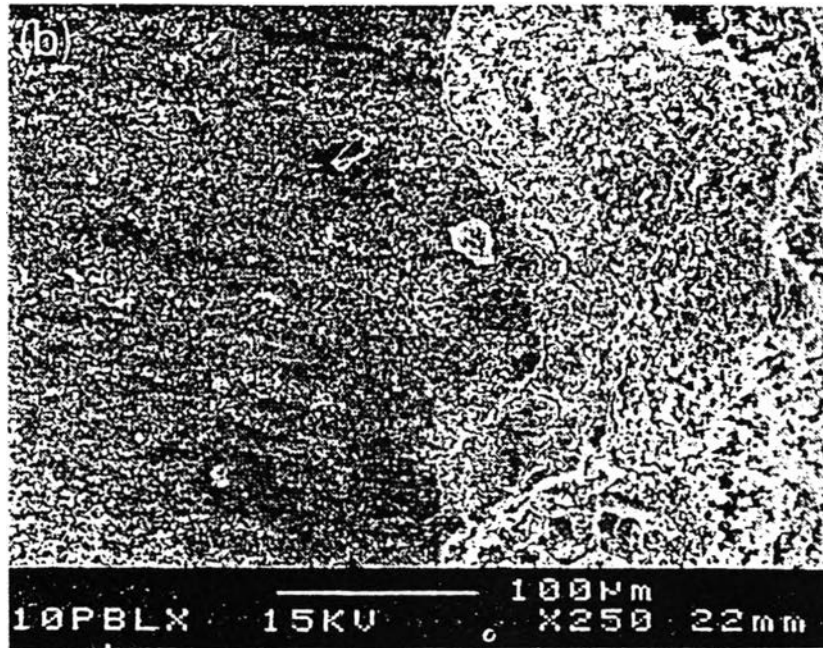
Cartledge และคณะ, 1990 ได้ทำการศึกษาถึงกลไกการจับยึด การบ่มตัว และการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยซีเมนต์ เมื่อบำบัดของเสียประเภทโลหะหนักโดยใช้วิธีทำให้เป็นก้อน ตัวอย่างโลหะหนักที่เลือกใช้ได้แก่ ตะกั่ว และแคดเมียม ซึ่งโลหะหนัก 2 ชนิดนี้เป็นตัวแทนของของเสียอนินทรีย์ที่มีลักษณะสมบัติแตกต่างกันมาก

จากการทดสอบการสกัดพบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำชะมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำชะมาก เขาให้เหตุผลว่าแคดเมียมไฮดรอกไซด์เป็นสารที่มีนิวคลีโอชันไฮดรัสที่เหมาะสมสำหรับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังนั้นเมื่อเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตรอบๆ แล้ว การชะละลายจึงน้อย ในขณะที่ตะกั่วจะเกิดเป็นสารประกอบได้หลายชนิดกับซีเมนต์เฟสที่ซึ่งสารเหล่านี้จะไปหุ้มเม็ดปูนทำให้ไม่สามารถสัมผัสกับน้ำได้เท่าที่ควร จึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่เต็มที่ นั่นคือตะกั่วสามารถหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ได้

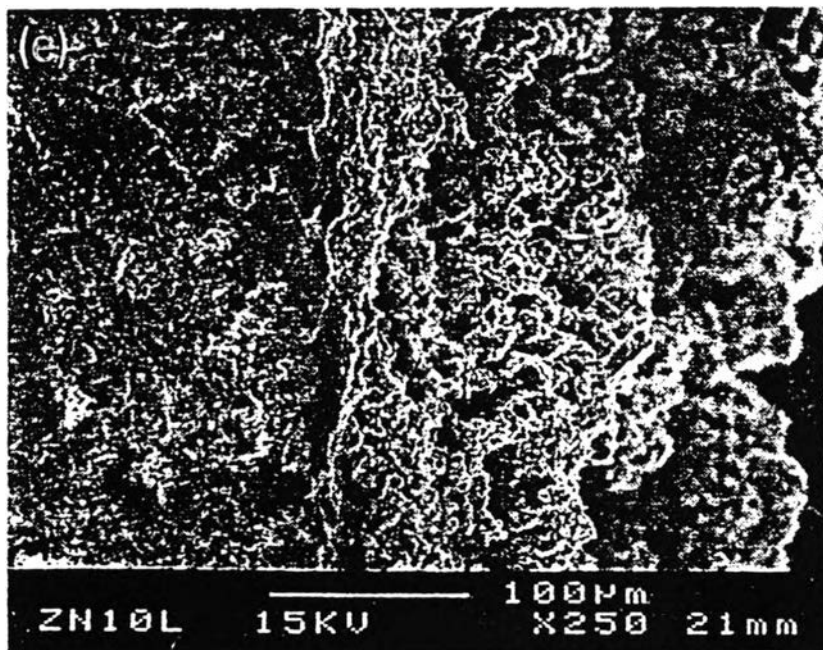
Cocke และคณะ, 1992 ได้ทำการศึกษากลไกการชะของก้อนตัวอย่างที่เกิดจากการบำบัดตะกั่วและสังกะสีด้วยวิธีทำให้เป็นก้อนโดยใช้ซีเมนต์ จากการศึกษาโครงสร้างของซีเมนต์ก่อนชะกับหลังชะด้วย SEM จะให้ผลดังรูปที่ 3.6 ถึงรูปที่ 3.11 ซึ่งจะเห็นว่าก้อนตัวอย่างที่ประกอบด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียวจะมีโครงสร้างภายในที่ต่อเนื่องกัน แต่เมื่อผ่านการชะด้วยกรดแล้วโครงสร้างจะมีลักษณะเป็นโพรงใหญ่ คล้ายรังผึ้ง โครงสร้างเป็นแบบcross-linked และมีความเป็นผลึกไม่สมบูรณ์ สำหรับก้อนตัวอย่างที่ประกอบด้วยซีเมนต์ผสมตะกั่ว ก่อนการชะด้วยกรด และหลังการชะด้วยกรด ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ เราจะเห็นว่าโครงสร้างของก้อนซีเมนต์ที่ประกอบด้วยตะกั่วก่อนผ่านการชะด้วยกรดจะมีลักษณะเป็นพื้นที่สีดำ ที่ถูกล้อมรอบด้วยแผ่นบางๆ ที่มีสีขาว และมีผลึกรูปเข็มกระจายอยู่ทั่วไป แต่เมื่อผ่านการชะแล้วโครงสร้างจะมีความต่อเนื่องน้อยลง แผ่นบางๆ สีขาวก็จะแตกหัก และในโครงสร้างมีลักษณะจับกันแบบหลวมๆ ส่วนสังกะสีก็จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับตะกั่ว จากการทดลองนี้เขาสรุปรว่า ทั้งตะกั่วและสังกะสีมักจะสะสมอยู่ที่ผิวของซีเมนต์ เมื่อผ่านการชะ สารสกัดจะเข้าไปทำลายโครงสร้างของซีเมนต์โดยจะเข้าไปดึงแคลเซียมออกจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นการเปิดโครงสร้างเพิ่ม branching และ cross-linked ให้ซิลิเกตสัมผัสกับกรดมากขึ้น ทำให้เกิดโครงสร้างของแข็งที่มีรูพรุน แตกหักง่าย มีกำลังรับแรงอัดต่ำ และมีความสามารถในการถูกชะละลายโลหะหนักเพิ่มขึ้น

3.5.9 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อน

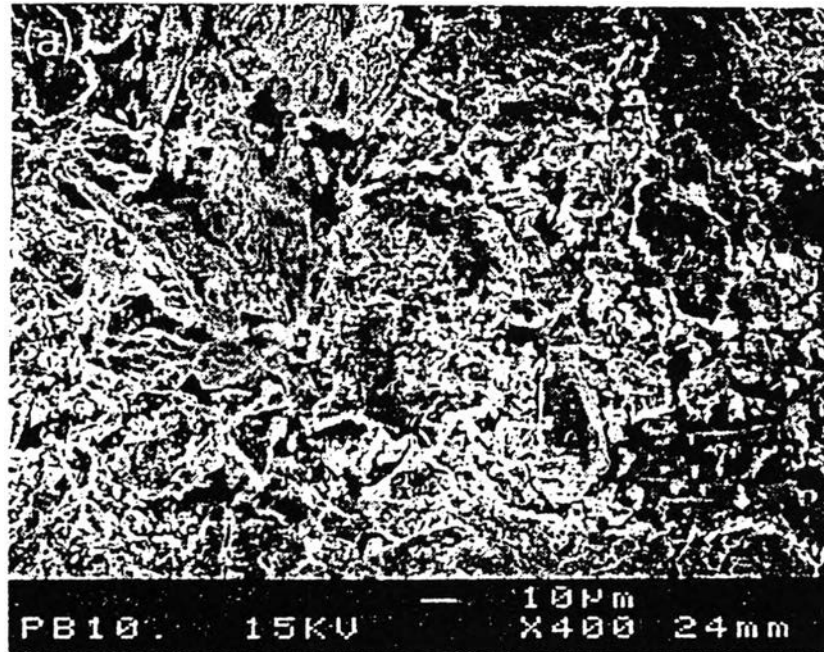
Vander Sloot และคณะ, 1989 กล่าวว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดของเสียโดยวิธีทำให้เป็นก้อน ซึ่งแสดงผลทางความสามารถในการชะละลาย แบ่งได้เป็น ปัจจัยทางกายภาพ ปัจจัยทางชีวภาพ และปัจจัยทางเคมี รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.6



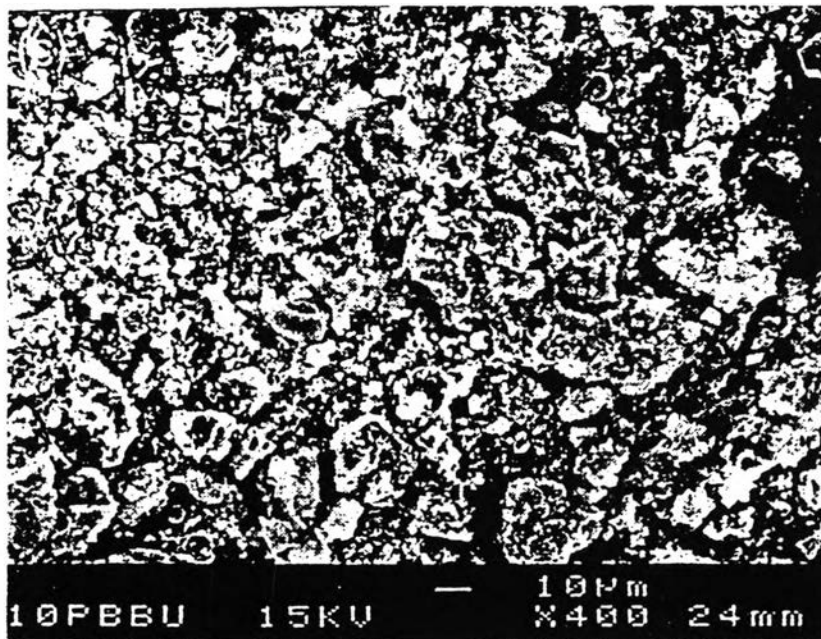
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์ก่อนผ่านการชะละลาย (ที่มา : Cocke และคณะ,1992)



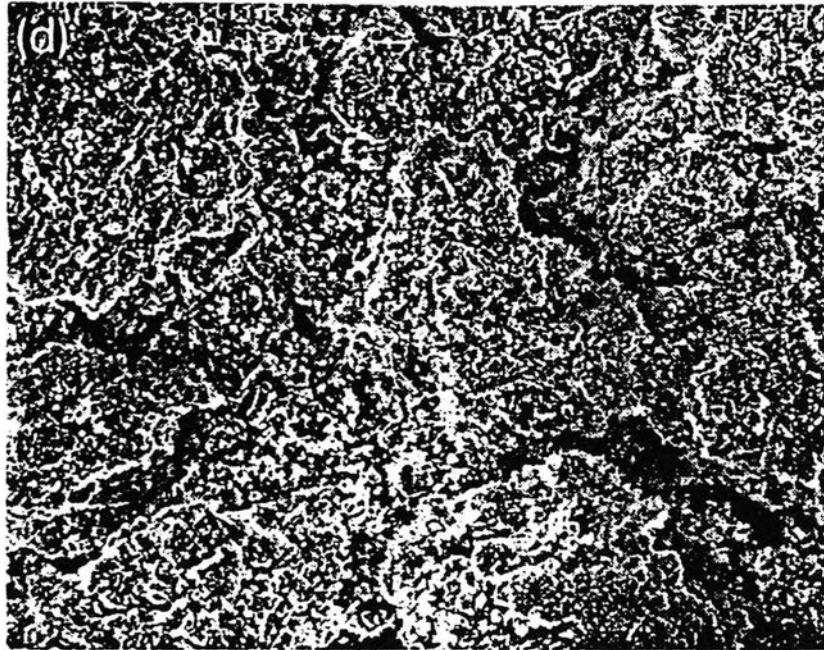
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์หลังผ่านการชะละลาย (ที่มา : Cocke และคณะ,1992)



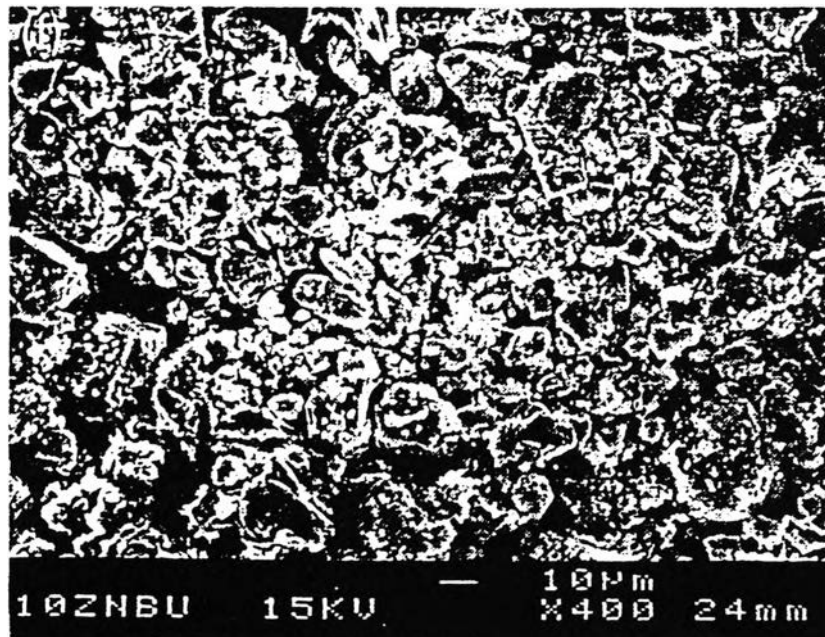
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์ที่ประกอบด้วยตะกั่วก่อนผ่านการชะละลาย
(ที่มา : Cocke และคณะ, 1992)



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์ที่ประกอบด้วยตะกั่วหลังผ่านการชะละลาย
(ที่มา : Cocke และคณะ, 1992)



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์ที่ประกอบด้วยสังกะสีก่อนผ่านการชะละลาย
(ที่มา : Cocke และคณะ, 1992)



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะโครงสร้างของซีเมนต์ที่ประกอบด้วยสังกะสีหลังผ่านการชะละลาย
(ที่มา : Cocke และคณะ, 1992)

ตารางที่ 3.6 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดของเสียโดยวิธีทำให้เป็นก้อน

| ปัจจัยทางเคมี | ปัจจัยทางกายภาพ | ปัจจัยทางชีวภาพ |
|---|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. ความเป็นต่าง 2. chemical speciation ในก้อนซีเมนต์ 3. อันตรกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในโพรงและพื้นที่ผิวในโพรงของก้อนซีเมนต์ 4. การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทางเคมี เช่น ค่าพีเอช และศักย์ไฟฟ้าเคมี เมื่อเวลาผ่านไป 5. การละลายของผิวก้อนซีเมนต์ 6. chemical speciation ใน pore water 7. จลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี 8. ส่วนประกอบทางเคมีของสารชะละลาย(leachant) เช่น น้ำใต้ดิน และน้ำผิวดิน เป็นต้น | <ol style="list-style-type: none"> 1. ความพรุน 2. โครงสร้างของโพรง 3. ความต่อเนื่องในการสัมผัสกับน้ำ 4. อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของก้อนซีเมนต์นั้น 5. อุณหภูมิ ที่สัมพันธ์กับอัตราการแพร่ และความคงทน 6. ความแตกต่างของความหนาแน่นใน product matrix เช่น gravel in concrete | <ol style="list-style-type: none"> 1. การเกิดกลุ่มของแบคทีเรีย (colonization) 2. การย่อยสลายของก้อนซีเมนต์โดยแบคทีเรีย 3. การอุดตันของโพรงโดยสารที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีววิทยา 4. การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทางเคมีเนื่องจากกิจกรรมทางชีววิทยา |

ที่มา : Vander Sloot และคณะ, 1989

Poon,1989 กล่าวว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อนสามารถแบ่งได้เป็น

- ปัจจัยภายนอก ซึ่งจะถูกกำหนดโดยสภาพของหลุมฝังกลบ ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อัตราการไหลของน้ำใต้ดิน สภาพทางธรณีวิทยา อุณหภูมิ และสภาพทางเคมี เช่นความเป็นกรดของฝน และความเป็นกรดของน้ำใต้ดิน เป็นต้น

- ปัจจัยภายใน ซึ่งเกี่ยวกับคุณสมบัติของของเสียและรูปแบบของของเสียที่อยู่ในก้อนซีเมนต์ ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ลักษณะทางเคมีของของเสียที่อยู่ในก้อนซีเมนต์ ความสามารถในการละลายของสารประกอบต่างๆที่เกิดขึ้นหรืออยู่ในก้อนซีเมนต์ ความพรุน การซึมผ่าน ความคงทน ความเป็นด่าง ศักย์ไฟฟ้าเคมี และความหนาแน่น เป็นต้น ปัจจัยต่างๆเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กัน

ในทางปฏิบัติมีเพียงปัจจัยภายในเท่านั้นที่สามารถควบคุมได้ โดยการออกแบบส่วนประกอบและสภาวะของการทำให้เป็นก้อนให้เหมาะสม ความเหมาะสมนี้จะพิจารณาจากความสามารถในการชะละลาย(leachability) และกำลังรับแรงอัด(compressive strength) การออกแบบส่วนประกอบและสภาวะของการทำให้เป็นก้อนทำได้โดยแปรค่าต่างๆดังนี้

1) ความสามารถในการรับของเสีย

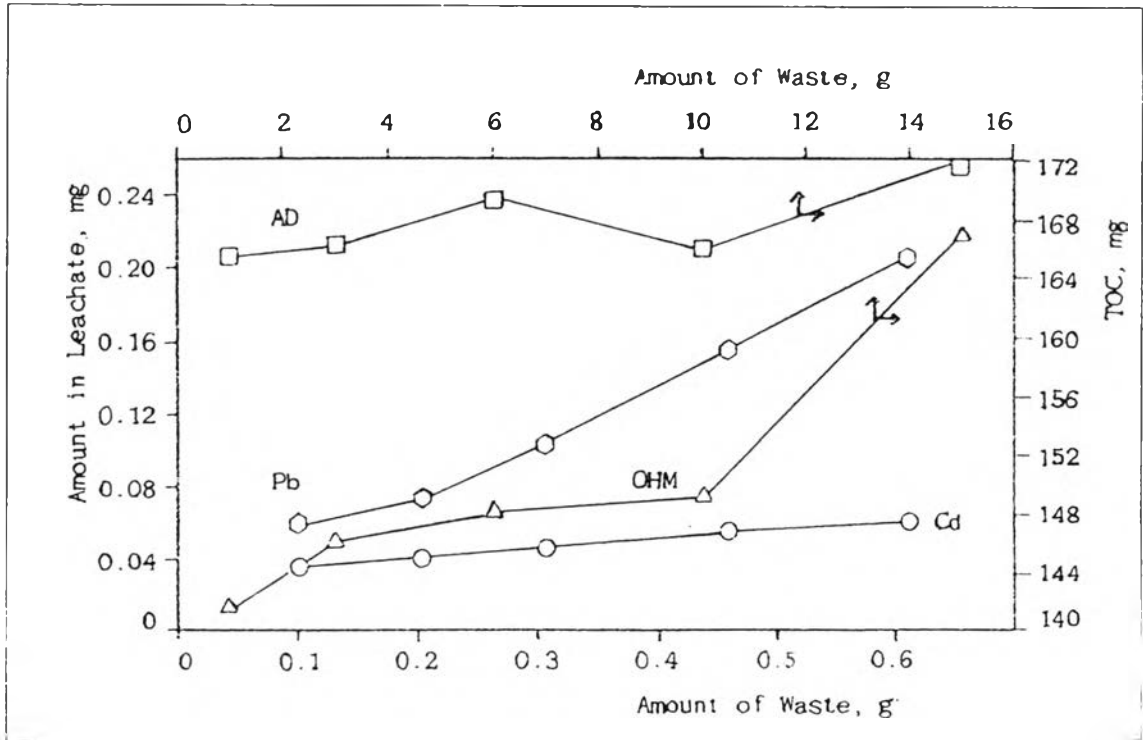
ความสามารถในการรับของเสีย หรืออัตราส่วนระหว่างของเสียต่อวัสดุประสาน(wastse/binder ratio) จะมีผลต่อความสามารถในการชะละลายและกำลังรับแรงอัดอย่างมาก จากการศึกษาของ Phothonng,1987 พบว่า เมื่ออัตราส่วนระหว่างของเสียที่ใช้ต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.12 และจะทำให้กำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์นั้นลดลงดังรูปที่ 3.13

2) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน

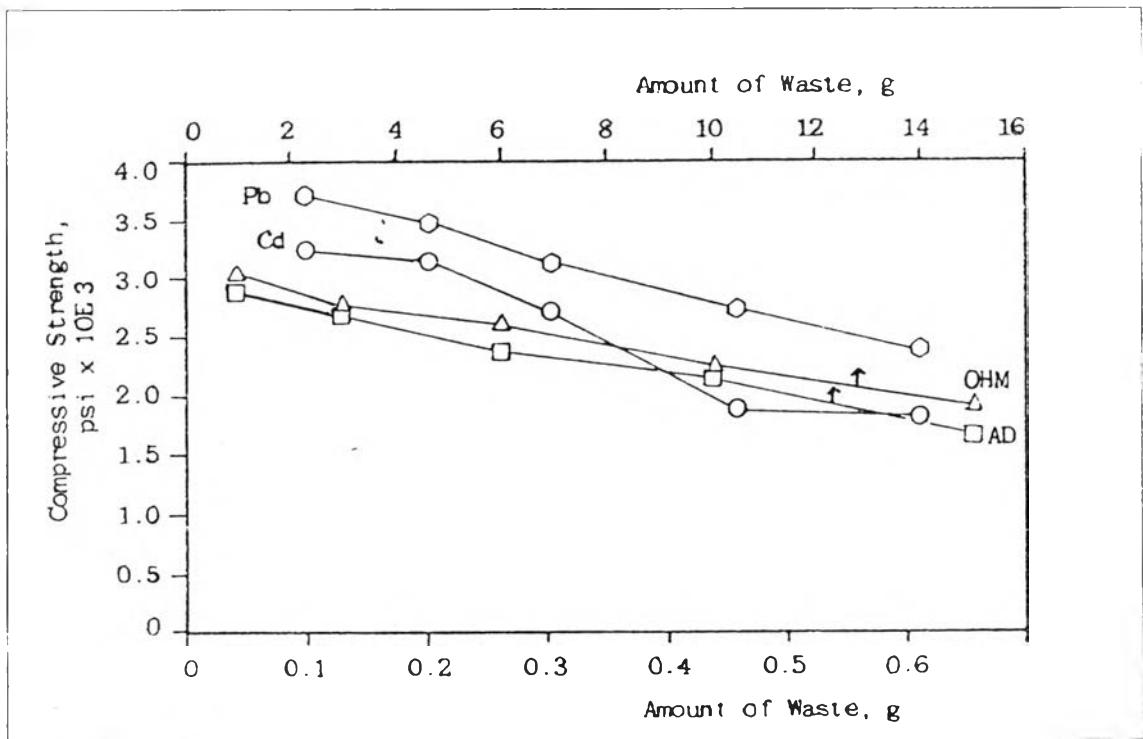
ถ้าเราใช้อัตราการส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสม จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่พอเหมาะซึ่งจะส่งผลถึงความพรุนของก้อนซีเมนต์ จากการศึกษาของ Photong,1987 พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 จะทำให้ความสามารถในการชะละลายของเสียต่างๆต่ำที่สุดและทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด ถ้าจำนวนน้ำที่เติมน้อยเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่ดีการเกิดผลึกจึงไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าจำนวนน้ำที่เติมมากเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดผลึกมากเกินไปเป็นผลให้โพรงซึมน้ำ(capillary pore)เพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดการชะเพิ่มขึ้น

3) อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของก้อนซีเมนต์

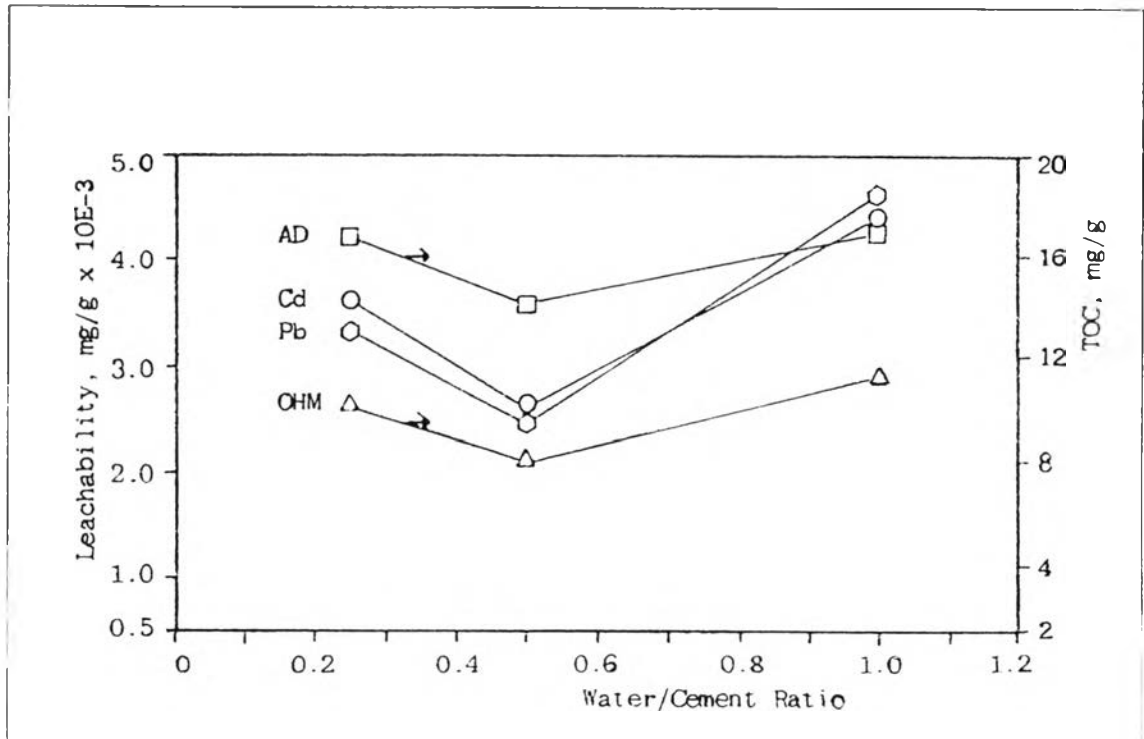
จากการวัดความสามารถในการถูกชะละลายพบว่า เมื่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของก้อนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะมีผลให้ความสามารถในการชะละลายของของเสียเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากสัมผัสระหว่างสารสกัดและ สารที่อยู่ในก้อนตัวอย่างมากขึ้นนั่นเอง



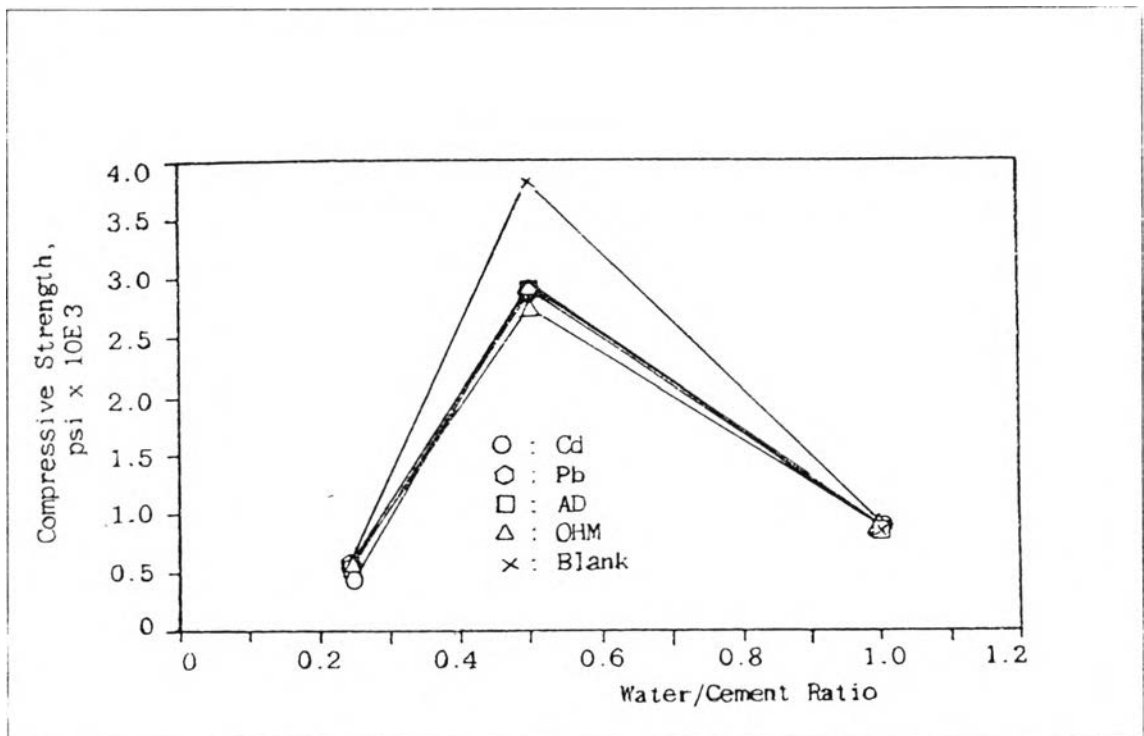
รูปที่ 3.12 แสดงผลของปริมาณของเสียที่มีต่อความเข้มข้นของของเสียในน้ำสกัด
(ที่มา : Shin และ Sujawatthana,1987)



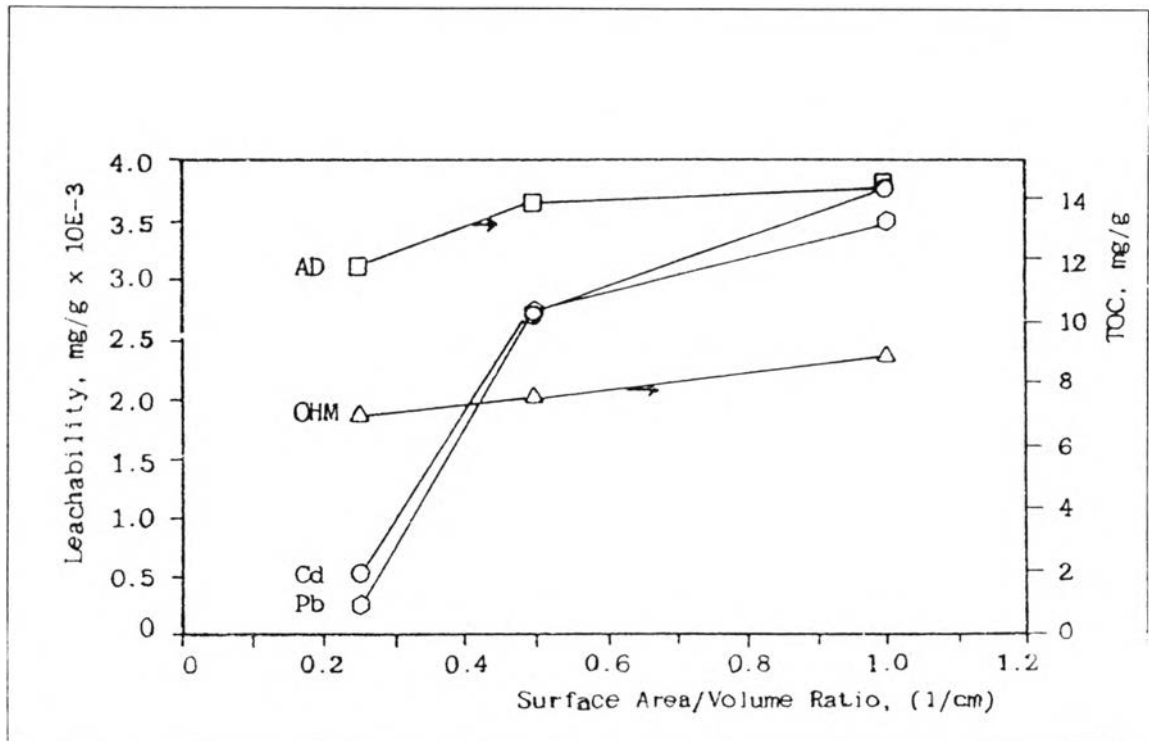
รูปที่ 3.13 แสดงผลของปริมาณของเสียที่มีต่อกำลังรับแรงอัด
(ที่มา : Shin และ Sujawatthana,1987)



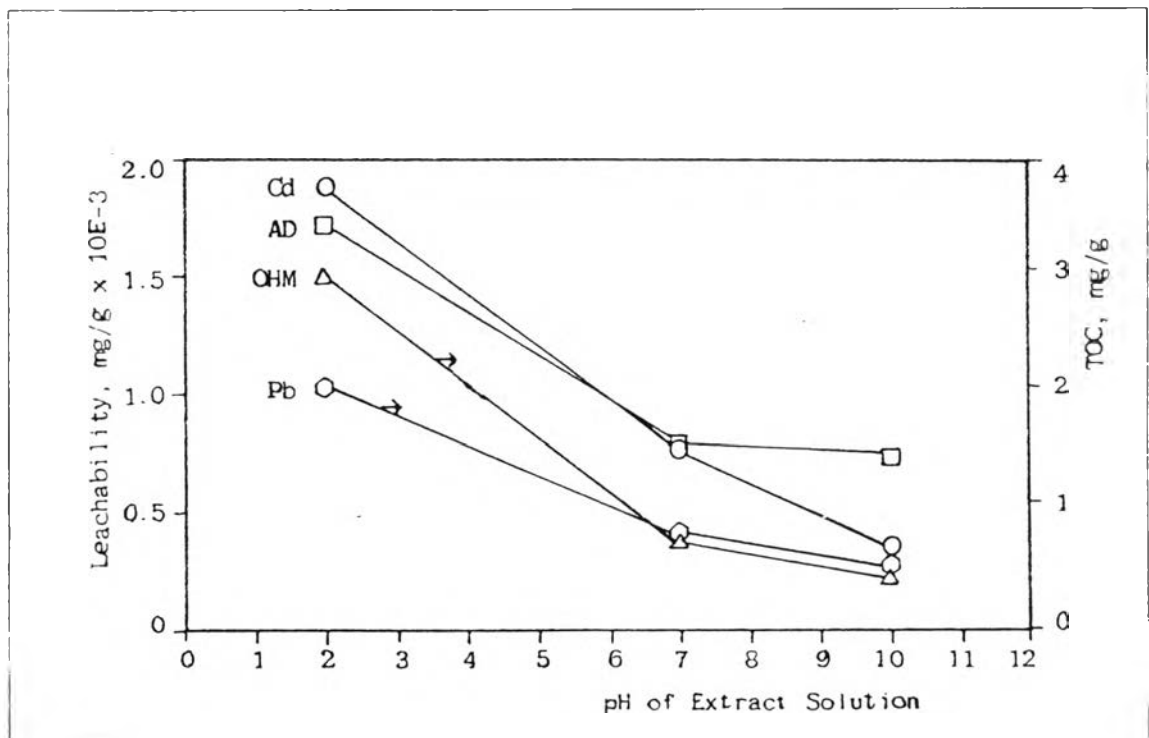
รูปที่ 3.14 แสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อความสามารถในการถูกชะละลายของของเสีย (ที่มา : Shin และ Sujjwatthana, 1987)



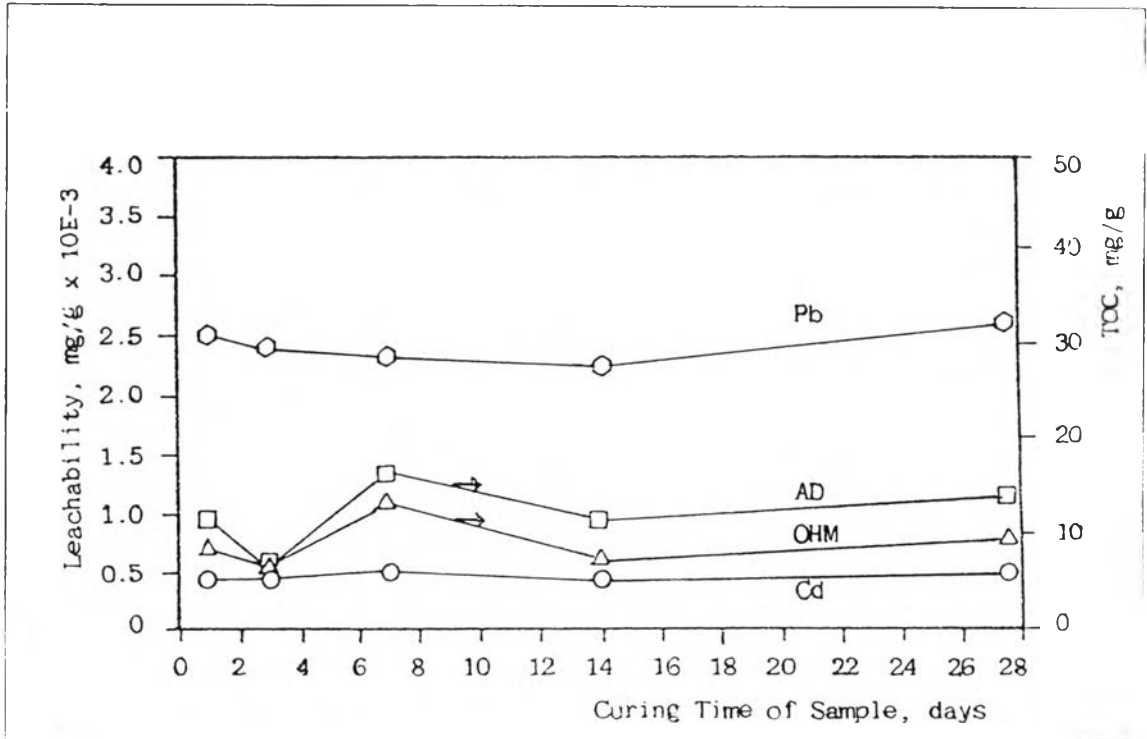
รูปที่ 3.15 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัด (ที่มา : Shin และ Sujjwatthana, 1987)



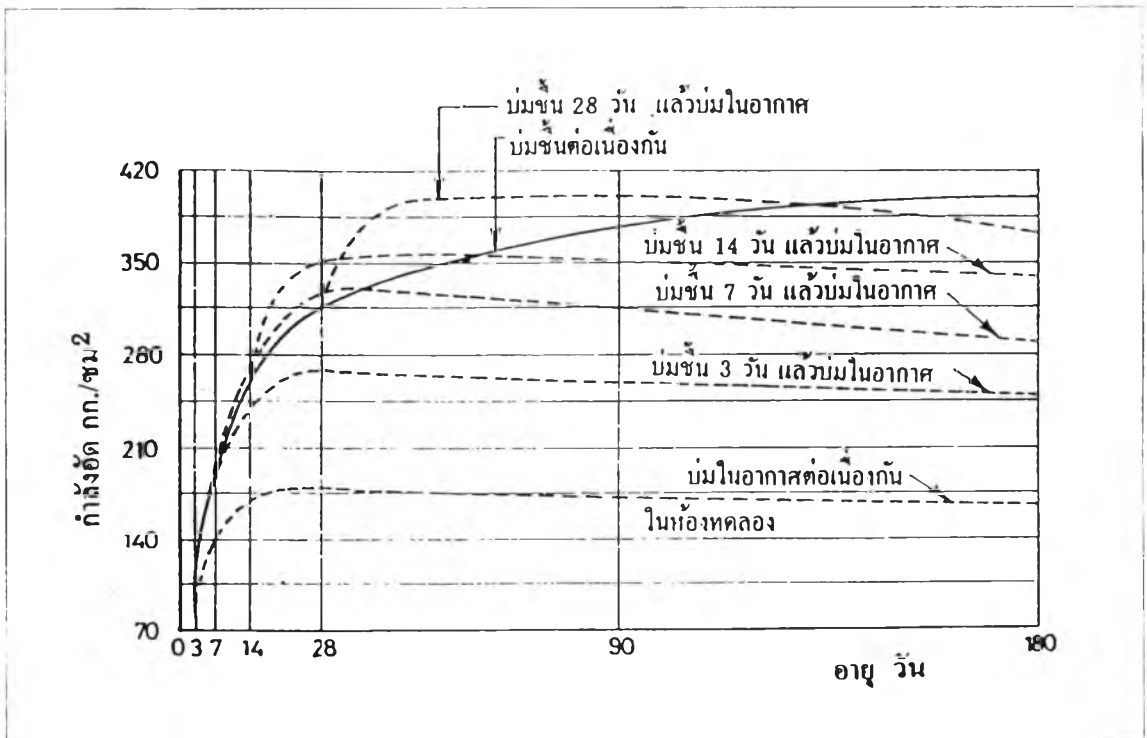
รูปที่ 3.16 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่มีต่อความสามารถในการถูกชะละลายของของเสีย (ที่มา : Shin และ Sujawatthana, 1987)



รูปที่ 3.17 แสดงผลของค่าพีเอชของสารสกัดที่มีต่อความสามารถในการถูกชะละลายของของเสีย (ที่มา : Shin และ Sujawatthana, 1987)



รูปที่ 3.18 แสดงผลของระยะเวลาบ่มที่มีต่อความสามารถในการถูกชะละลายของของเสีย (ที่มา : Shin และ Sujiwatthana,1997)



รูปที่ 3.19 แสดงผลของระยะเวลาบ่มที่มีต่อกำลังรับแรงอัด (ที่มา : คอนกรีตเทคโนโลยี,2530)

4) ค่าพีเอชของสารชะละลาย

ค่าความสามารถในการถูกชะละลายของของเสีย จะมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้สารชะละลาย หรือสารสกัดที่มีพีเอชเท่ากับ 2 ส่วนความสามารถในการชะละลายของสารชะละลายที่มีค่าพีเอช เป็นกลาง จะมีค่าประมาณ 25-45%ของความสามารถในการชะละลายของสารที่เป็นกรด ในขณะที่ เมื่อใช้สารชะละลายที่มีพีเอชเท่ากับ 10 แทบจะไม่มี การชะละลายของของเสียเลย

5) ระยะเวลาบ่ม

วินิต,2539 กล่าวว่า การบ่มเป็นการควบคุมและป้องกันมิให้น้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ระเหยออกจากคอนกรีตที่เทแล้วเร็วเกินไป กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทรายเท่าที่ยังมีความชื้นให้ซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ต่อไปอีก กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรกและค่อยๆช้าลงในเวลาต่อมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นที่พอเหมาะ ตามรูปที่ 3.19 จะเห็นว่าคอนกรีตจะให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น แต่จากในหลายๆงานวิจัยกล่าวว่าระยะเวลาบ่มไม่มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการชะละลายของของเสีย

3.5.10 การทดสอบคุณสมบัติและเกณฑ์มาตรฐาน

ในหลายประเทศ ได้มีการกำหนดวิธีทดสอบคุณสมบัติ และเกณฑ์มาตรฐานของของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยวิธีทำให้เป็นก้อนไว้ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วคุณสมบัติของของเสียอันตรายที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนที่ต้องทดสอบได้แก่ ความสามารถในการชะละลาย ค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และอัตราการซึมผ่านของน้ำ

1) ความสามารถในการชะละลาย (Leachability)

น้ำชะละลาย หรือน้ำสกัด(leachate) หมายถึง ของเหลวที่นำไปชะผ่านของเสีย และของเหลวนี้ได้สกัดเอาสารต่างๆออกจากก้อนของเสียนั้น

ความสามารถในการถูกชะละลาย(leachability) คืออัตราส่วนระหว่างจำนวนของของเสียทั้งหมดที่ถูกชะออกมา ต่อจำนวนของเสียเริ่มต้นที่อยู่ในตัวอย่าง ดังสมการ

$$L = W_t / W_0 \quad \dots \dots (3.15)$$

โดยที่ L คือ ความสามารถในการถูกชะละลาย (mg/g)

W_t คือ ความเข้มข้นหรือจำนวนของของเสียทั้งหมดที่ถูกชะออกมา (mg หรือ mg/l)

W_0 คือ ความเข้มข้นหรือจำนวนของของเสียทั้งหมดที่มีอยู่ในก้อนตัวอย่าง (gหรือg/l)

วิธีการสกัดสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ การสกัดแบบแบชต์(batch test) ทำได้โดยใส่ตัวอย่างลงในภาชนะที่มีสารละลายที่ใช้สกัดอยู่โดยตัวอย่างของเสียจะสัมผัสกับสารละลาย

ชนิดนั้นตลอดเวลา และการสกัดแบบคอลัมน์(column test) ทำได้โดยผ่านสารละลายที่ใช้สกัดลงไปสัมผัสกับของเสียที่อยู่ในคอลัมน์เป็นระยะๆ ในการสกัดแต่ละวิธีนี้ก็ทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีสรุปไว้ในตารางที่ 3.7 เนื่องจากการสกัดแบบคอลัมน์สามารถจำลองสภาวะการชะละลายได้ใกล้เคียงกับสภาพหลุมฝังกลบมากกว่าแบบแบชต์ จึงน่าจะใช้อ้างอิงได้ดีกว่า แต่ส่วนใหญ่แล้วจะใช้การทดสอบการสกัดแบบแบชต์ เพราะสามารถทำได้ง่าย มีความยุ่งยากน้อย และใช้เวลาน้อยกว่าแบบคอลัมน์ จึงทำให้การสกัดแบบแบชต์เป็นที่นิยม ในแต่ละประเทศได้มีการกำหนดวิธีการสกัดแบบแบชต์ไว้ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 แสดงข้อดีและข้อเสียของการสกัดแบบแบชต์และแบบคอลัมน์

| วิธีการสกัด | ข้อดี | ข้อเสีย |
|-----------------------------|---|--|
| แบชต์ (batch test) | <ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่เกิดผลของขอบ(edge effect) เหมือนในการทดสอบแบบคอลัมน์ 2. เวลาที่ใช้ในการทดสอบน้อยกว่าการทดสอบแบบคอลัมน์ 3. การทดสอบซ้ำสามารถทำได้ง่ายตาย | <ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่ได้เป็นการจำลองสภาพการชะที่แท้จริงของหลุมฝังกลบ 2. น้ำชะจะถูกทำลายฤทธิ์ลงไปเรื่อยๆ 3. ต้องการวิธีการกรองที่มาตรฐาน |
| คอลัมน์ (column test) | <ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นการจำลองการชะได้ใกล้เคียงกับสภาพการชะในหลุมฝังกลบ 2. สามารถใช้ทำนายถึงการปลดปล่อยของเสียตามเวลาได้ดี | <ol style="list-style-type: none"> 1. การบรรจุคอลัมน์ไม่สามารถทำให้สม่ำเสมอได้ 2. สามารถเกิดการอุดตันได้ 3. มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ 4. มีผลของขอบ(edge effect) เกิดขึ้น 5. ใช้เวลาในการทดสอบมาก |

ที่มา : วิชัย, 1995

2) ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

ค่ากำลังรับแรงอัด เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้ว และเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากอีกตัวหนึ่ง สำหรับการบำบัดของเสียอันตรายโดยวิธีทำให้เป็นก้อน เนื่องจากต้องนำไปฝังกลบต่อไป การทดสอบหาลำลังรับแรงอัดทำได้โดยกดหรืออัดแท่งทดสอบมาตรฐานซึ่งบ่มขึ้นตามระยะเวลาที่กำหนดด้วยเครื่องทดสอบตามวิธีมาตรฐานจนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก เมื่อนำน้ำหนักกดหรืออัดสูงสุดที่ได้มาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างจะได้เป็นค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตนั้น

ตารางที่ 3.8 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการสกัดของประเทศต่างๆ

| Test variable | ASTM | RCRA | Japan EPA | กรมโรงงานอุตสาหกรรม |
|-----------------------------------|--|---|---|--|
| ส่วนประกอบของสารสกัด | a. Water b. Sodium-acetate-acetic acid buffer | Water adjusted to pH 5 with 0.5 N acetic acid | Carbon/bicarbonate buffer pH 5.8 - 6.3 | Water adjusted to pH 5 with sulfuric/nitric acid |
| อัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อสารสกัด | 1 : 4 | 1:16 | 1:10 | 1:20 |
| เวลาของการกวน | 48 hour | 24 hour | 6 hour | 18 hour |
| จำนวนครั้งของการชะ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| การกวน | Yes | Yes | yes | yes |
| พื้นผิวในการสัมผัส | Sample not ground | Ground to pass through < 9.5 mm seive | Ground to between 0.5 mm and 5 mm seive | Ground to pass through < 9.5 mm seive |
| อุณหภูมิ | 20 °C | 20 - 40 °C | 20 °C | 20 °C |

ที่มา : เอกสารประกอบการสอนวิชาการจัดการของเสียอันตราย, บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน์ และ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ.2540

3) ความหนาแน่น (Density) และค่าการซึมน้ำ(Permeability)

ทั้งค่าความหนาแน่น และค่าการซึมน้ำเป็นตัวแปรทางกายภาพที่มีความสัมพันธ์กัน และค่าทั้งสองนี้ยังเป็นตัวแปรที่สามารถสะท้อนถึงคุณสมบัติอื่นๆในก้อนซีเมนต์ได้อีกด้วย เช่น ความคงทน(durability) ความสามารถในการชะละลาย(leaching potential) และความพรุน(porosity) ความหนาแน่นและการซึมน้ำของก้อนซีเมนต์เป็นค่าที่สามารถทดสอบได้อย่างไม่ยากนัก จึงมักถูกกำหนดอยู่ในมาตรฐานของการบำบัดของเสียด้วยวิธีทำให้เป็นก้อนเสมอ

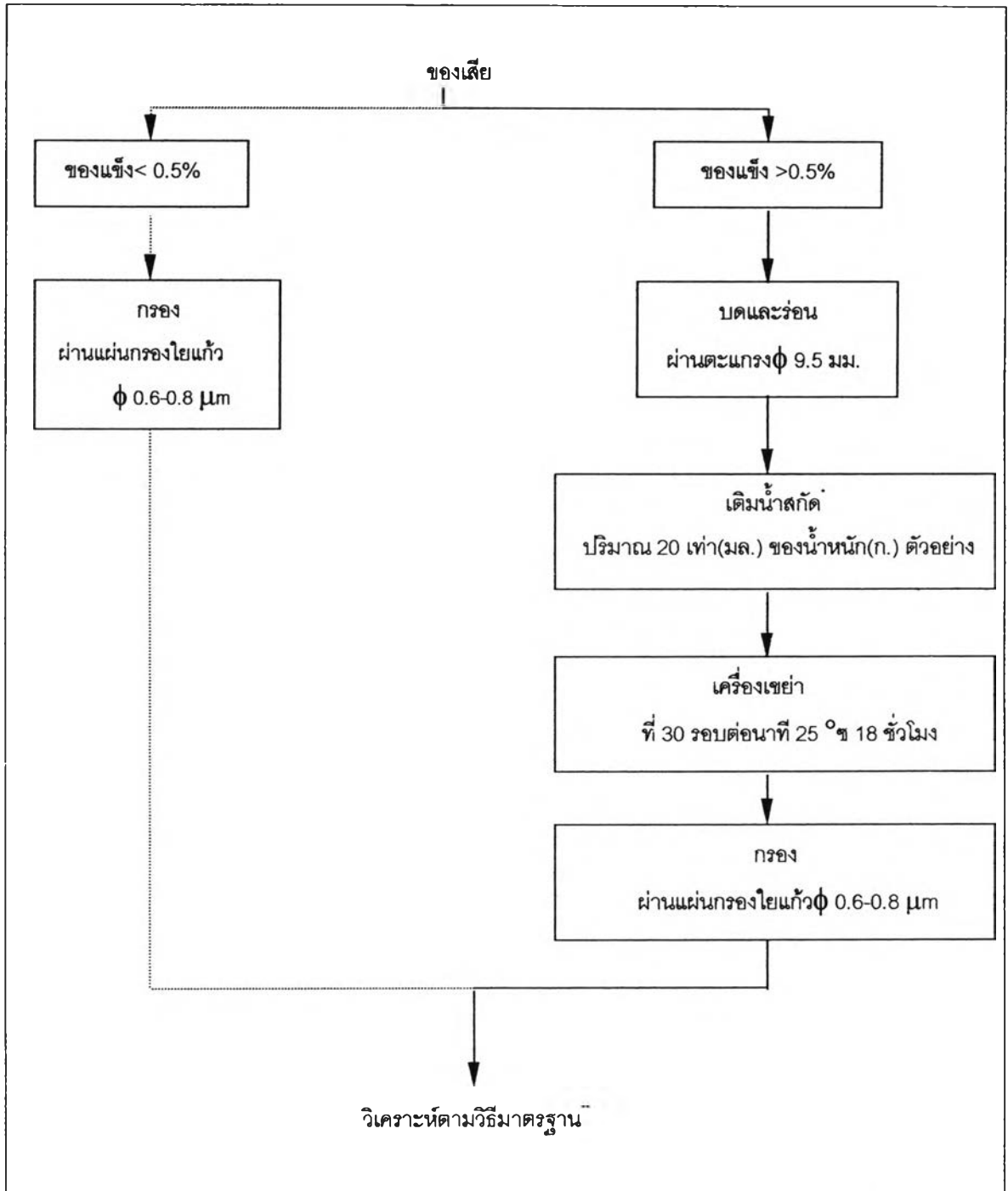
สำหรับในประเทศไทย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ในภาคผนวกที่ 2 หลักเกณฑ์และวิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด หึ่ง หรือฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว กำหนดไว้ว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ผ่านการปรับเสถียร(Stabilization) และการทำให้เป็นก้อนแข็ง(Solidification)แล้ว จะต้องมียุทธศาสตร์ดังต่อไปนี้

1) สามารถรับแรงอัด(Unconfined compressive strength) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-1633 และ D-2166 ได้ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบ(Secured landfill) ได้อย่างปลอดภัย

2) มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

3) มีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ extraction fluid) เป็นไปตามเกณฑ์ในการสกัดสาร(Leachate extraction procedure) เพื่อทดสอบว่าสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วได้ผ่านการทำลายฤทธิ์และปรับเสถียรอย่างสมบูรณ์ ตามวิธีที่กำหนด (ตามรูปที่ 3.20) ก่อนนำไปฝังกลบ

วิธีการสกัดสาร(Leachate extraction procedure) และการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดเป็นดังรูปที่ 3.20 ส่วนค่ามาตรฐานความเข้มข้นของสารอันตรายเป็นดังตารางที่ 3.9



* สารสกัดประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมกับสารละลายกรดกำมะถันและกรดไนตริก (อัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก) จนกระทั่งของผสมมีพีเอชเท่ากับ 5

** วิธีวิเคราะห์น้ำตามมาตรฐาน US EPA SW 846 หรือตามมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำทิ้งกรมโรงงานอุตสาหกรรม

รูปที่ 3.20 แสดงวิธีสกัดสาร (Leachate Extraction Procedure) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540

ตารางที่ 3.9 แสดงเกณฑ์มาตรฐานความเข้มข้นของโลหะหนักและวัตถุมีพิษในน้ำสกัด

| ชนิดของสาร | ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ (มิลลิกรัม/ลิตร) | ชนิดของสาร | ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ (มิลลิกรัม/ลิตร) |
|---------------------|---|----------------------|---|
| อาร์เซนิก (ทั้งหมด) | 5.0 | เฮกซาคอโรโบวิตาไดอิน | 0.5 |
| แบเรียม (ทั้งหมด) | 100.0 | เฮกซาคอโรอีเทน | 3.0 |
| เบนซีน | 0.5 | ตะกั่ว (ทั้งหมด) | 5.0 |
| แคดเมียม (ทั้งหมด) | 1.0 | ลินเดน | 0.4 |
| คาร์บอนเตตระคลอไรด์ | 0.5 | ปรอท (ทั้งหมด) | 0.2 |
| คลอเดน | 0.03 | เมรอกซิคลอร์ | 10.0 |
| คลอโรเบนซีน | 100.0 | เมธิล เอธิล คีโตน | 200.0 |
| คลอโรฟอร์ม | 6.0 | ไนโตรเบนซีน | 2.0 |
| โครเมียม (ทั้งหมด) | 5.0 | 2,4-ไนโตรโทลูอิน | 0.13 |
| ออร์โท-ครีซอล | 200.0 | เพนตาคลอโรฟีนอล | 100.0 |
| เมตา-ครีซอล | 200.0 | ไพรีดีน | 5.0 |
| พารา-ครีซอล | 200.0 | ซีลีเนียม | 1.0 |
| ครีซอล (ทั้งหมด) | 200.0 | เงิน | 5.0 |
| 2-4 ดี | 10.0 | เตทราคลอโรเอทธิลีน | 0.7 |
| 1,4-ไดคลอโรเบนซีน | 7.5 | ทอกซาฟิน | 0.5 |
| 1,2-ไดคลอโรอีเทน | 0.5 | ไตรคลอโรเอทธิลีน | 0.5 |
| 1,1-ไดคลอโรเอทธิลีน | 0.7 | 2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอล | 400.0 |
| เอลดริน | 0.02 | 2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล | 2.0 |
| เฮปตาคลอร์ | 0.008 | 2,4,5-พีที (ซิลเว็ก) | 1.0 |
| เฮกซาคอโรเบนซีน | 0.13 | ไวนิลคลอไรด์ | 0.2 |

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540

3.6 การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา

Shin และ Sujiwatthana, 1989 ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบำบัดของเสียอันตราย ด้วยวิธีทำให้เป็นก้อน วัสดุประสานที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งผสมทรายในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก ของเสียอันตรายที่ใช้ในการทดลองนี้มี 4 ชนิด สองชนิดแรกเป็นโลหะหนักอนินทรีย์ ได้แก่ แคดเมียมและตะกั่ว โดยเตรียมจากการตกตะกอนให้อยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ สองชนิดหลังเป็นยาฆ่าแมลงที่เป็นสารอินทรีย์ ได้แก่ อัลดริน(aldrin) และคลอเดน(clordane,OHM) ปัจจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษา 5 ปัจจัยได้แก่ จำนวนของเสียอันตรายที่ใช้ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ ระยะเวลาปม และ พีเอชของสารสกัด

เมื่อพิจารณาจำนวนของเสียอันตรายที่ใช้พบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักทุกตัวในน้ำสกัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้จำนวนของเสียอันตรายเริ่มต้นในตัวอย่างเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นในน้ำชะของแคดเมียมและตะกั่วจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นของอัลดรินและคลอเดน เนื่องจากสารอินทรีย์จะรบกวนปฏิกิริยาไฮเดรชันและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ ส่วนค่ากำลังรับแรงจะลดลงเมื่อใช้จำนวนของเสียเริ่มต้นเพิ่มขึ้น เมื่อแปรค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์พบว่าสำหรับของเสียทุกชนิดที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 จะให้ค่าความสามารถในการชะละลายต่ำที่สุดและให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เนื่องจากน้ำมีผลต่อความพรุนของซีเมนต์ ถ้าจำนวนน้ำที่เติมน้อยจนเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ไม่ดี การเกิดผลึกจึงไม่สมบูรณ์ ความสามารถในการชะจึงเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดจึงลดลง แต่ถ้าน้ำที่ใช้มีปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและผลึกมากเกินไปเป็นผลให้โพรงในซีเมนต์เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดการชะเพิ่มขึ้นและกำลังรับแรงอัดลดลงเช่นกัน ดังนั้นควรจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้เหมาะสม

เมื่อมีการทดลองแปรอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของก้อนซีเมนต์แล้วพบว่า เมื่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของก้อนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการชะละลายของของเสียอันตรายทั้ง 4 ชนิดเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อทดลองแปรค่าระยะเวลาปมโดยที่ค่าอื่นๆ คงที่พบว่า ระยะเวลาปมที่แตกต่างกันจะมีผลต่อความสามารถในการชะละลายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เนื่องจากระยะเวลาปมมีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันแสดงว่าความสามารถในการชะละลายของของเสียทั้ง 4 ชนิดนี้ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันเลย ดังนั้นการปลดปล่อยของเสียเหล่านี้ น่าจะสัมพันธ์กับกลไก 2 ชนิดที่เกิดขึ้นระหว่างของเสียกับซีเมนต์เพสต์ ได้แก่ การดูดซับและการตกตะกอนบนผิวของก้อนซีเมนต์(adsorption-precipitation of cement matrix) และความสามารถในการละลาย(limited dissolution of cement matrix) แต่เมื่อระยะเวลาปมที่ใช้เพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นด้วย

จากการแปรค่าพีเอชของสารสกัดเป็นจำนวน 3 ค่าได้แก่ 2 , 7 และ 10 โดยที่ค่าอื่นๆคงที่พบว่า ความสามารถในการชะละลายของของเสียอันตรายทั้ง 4 ชนิดจะมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้สารสกัดที่มีพีเอชเท่ากับ 2 ที่พีเอชของสารสกัดที่เท่ากับ 2 นี้ยังทำให้สีของซีเมนต์กลายเป็นสีเหลืองอ่อน และพบบางอนุภาคหลุดลงมาในสารละลายด้วยซึ่งเกิดจากการกัดเซาะชิ้นงาน เพราะกรดสามารถทำลายซีเมนต์เฟสได้โดยการละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และอลูมินา สารสกัดที่มีพีเอชเท่ากับ 7 จะให้ค่าการชะเพียง 25-45 เปอร์เซ็นต์ของการชะด้วยกรด ส่วนสารสกัดที่มีพีเอชเท่ากับ 10 แทบจะไม่มีการชะของของเสียอันตรายเลย

Ching-Lung, 1989 ศึกษาการทำให้เป็นก้อนโดยใช้วัสดุประสาน 2 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าแกลบ (Portland Rice Husk Ash Cement) ในอัตราส่วน 1:1 ของเสียอันตรายที่ใช้เป็นของเสียสังเคราะห์ 3 ชนิดได้แก่ โครเมียมทองแดง และปรอท ซึ่งอยู่ในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ และเมอร์คิวริซัลเฟตตามลำดับ ในการทดลอง Ching-Lung พิจารณา 4 ปัจจัยดังนี้

- ความสามารถในการรับของเสีย หรืออัตราส่วนระหว่างกากตะกอนต่อวัสดุประสาน จากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างกากตะกอนต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของโลหะทั้ง 3 ชนิดในน้ำชะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดของทุกอัตราส่วนของเสียต่อวัสดุประสานให้ค่าสูงกว่ามาตรฐานทั้งสิ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเถ้าแกลบแล้ว พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาให้ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชำน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเถ้าแกลบ แต่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเถ้าแกลบให้ความเข้มข้นของทองแดงและปรอทในน้ำชำน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดากว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดามีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเถ้าแกลบ

- อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม จากความสามารถในการชะละลายพบว่า ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาโดยมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.7 ส่วนความเข้มข้นของทองแดงในน้ำชะจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเถ้าแกลบ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ส่วนความเข้มข้นของปรอทในน้ำชะจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเถ้าแกลบโดยมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.35 ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดามีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.35 และสำหรับปูนซีเมนต์ซีเถ้าแกลบเท่ากับ 0.7 ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุประสานทั้งสองที่ทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่ามากกว่ามาตรฐานยกเว้นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.35 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเถ้าแกลบเนื่องจากการขาดน้ำจึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ไม่สมบูรณ์

พลัมเบท ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้มากกว่าตะกั่วออกไซด์และตะกั่วไฮดรอกไซด์ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเม็ดซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน สภาพของปฏิกิริยาไฮเดรชันจะไม่เหมาะต่อการเกิดสารประกอบไตรไฮดรอกซีพลัมเบท สำหรับแคลเซียมแล้วเมื่อพีเอชมีค่ามากกว่า 13 เท่านั้นจึงสามารถจะวัดจำนวน $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ได้ ดังนั้นสภาพที่เกิดขึ้นในโพรงช่องว่างของซีเมนต์จึงไม่เหมาะที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่แคลเซียมจะอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถละลายน้ำได้น้อยมาก ส่วนไอออนที่สามอันได้แก่ ซัลเฟต ซึ่งเป็นไอออนที่อยู่ในปูนซีเมนต์ โดยมีหน้าที่ควบคุมการก่อตัวนั้นไม่น่าที่จะเกิดตะกอนของสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตแข่งกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้มากนัก ทั้งแคลเซียมและแคลเซียมต่างก็เป็นสารที่มีประจุเดียวกันและมีรัศมีไอออนใกล้เคียงกันจึงน่าจะแทนที่กันได้อย่างดีในโครงสร้างของซีเมนต์ดังนั้น การเติมเกลือของแคลเซียมจะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ได้น้อยมาก นอกจากนี้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งที่เติมลงไปและที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ยังเป็นสารที่มีนิวคลีเอชันไซต์ให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมาเกิดรอบๆ ทำให้สารสกัดเข้าถึงแคลเซียมได้ยากขึ้นอีกระดับหนึ่ง

เมื่อเขาพิจารณาการทดลองของ Thomas และคณะ, 1981 ซึ่งได้ทำการทดลองไตเตรดสารละลายตะกั่วไนเตรดด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์และสารละลายผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งสารละลายผสมนี้เป็นการจำลองสภาพของปูนซีเมนต์ที่แท้จริงเนื่องจากมีอิทธิพลผสมอยู่ด้วย จากการทดลองของ Thomas และคณะ พบว่า ในการไตเตรด ด้วยสารละลายผสมจะเกิดสารประกอบตะกั่วไฮดรอกไซด์ ตะกั่วซัลเฟต และตะกั่วไนเตรดผสมกัน และไม่สามารถหาจุดยุติของการไตเตรดได้ ค่าพีเอชก็มีความแปรปรวนอยู่ในช่วง 8.5 - 10 ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการละลายของสารประกอบรูปเบื้องต้น และมีการเกิดสารประกอบชนิดนี้ขึ้นอีก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Dissolution-Precipitation

จากการทดลองของ Thomas และผลการทดลองของเขาเอง เขาจึงสรุปว่า การที่ตะกั่วถูกชะละลายมากกว่าแคลเซียมมากเนื่องจาก เกลือต่างๆของตะกั่วที่เกิดขึ้นจะไปหุ้มรอบๆเม็ดซีเมนต์ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำจึงน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดลองซึ่งได้ว่าที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ก้อนซีเมนต์ที่ประกอบด้วยตะกั่วยังมีปริมาณน้ำที่สามารถแลกเปลี่ยนได้สูง และมีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยกว่าก้อนซีเมนต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังมีสารประกอบตะกั่วที่อยู่ในรูปที่สามารถละลายน้ำได้ด้วย

Leagon, 1990 ได้ทำการศึกษาการบำบัดกากตะกอน 2 ชนิดได้แก่ กากตะกอนจากโรงฟอกหนัง และกากตะกอนจากอุตสาหกรรมการผลิตสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีทำให้เป็นก้อน กาก

ในบรรดาคอนกรีตทั้งหมด โดยอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 0.40 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนคอนกรีตที่ประกอบด้วยตะกั่วที่มีความละเอียดของอนุภาคประมาณ $786 \text{ m}^2/\text{kg}$ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.30 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าเมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40 อย่างเห็นได้ชัด ที่ระยะเวลาบ่ม 28 และ 91 วัน คอนกรีตนี้จะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่า คอนกรีตที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว

คอนกรีตที่ประกอบด้วยตะกั่วที่มีความละเอียดของอนุภาคประมาณ $453 \text{ m}^2/\text{kg}$ ที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.30 ก็จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่ 0.40 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 และ 7 วันคอนกรีตนี้จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเพียงอย่างเดียว แต่ที่ระยะเวลาบ่ม 28 และ 91 วัน จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดเกือบเท่ากัน

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของโพรงในคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้ตะกั่วที่มีขนาดอนุภาคละเอียดกว่าก็จะมีโพรงที่มีลักษณะละเอียด และเล็กกว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกั่วขนาดอนุภาคใหญ่ เมื่อใช้ระยะเวลาบ่มถึง 90 วันโพรงของคอนกรีตที่ประกอบด้วยตะกั่วขนาดอนุภาคต่างๆ ก็จะมีลักษณะและปริมาตรใกล้เคียงกัน และเล็กกว่าโพรงของคอนกรีตที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเพียงอย่างเดียว จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ยังพบอีกว่า คอนกรีตแต่ละชนิดจะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สัมพันธ์กับปริมาตรของโพรงเฉพาะตัว ซึ่งส่วนใหญ่แล้วความสัมพันธ์นี้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงไม่สามารถประมาณค่ากำลังรับแรงอัดได้จากปริมาตรทั้งหมดของโพรงเพียงอย่างเดียว ยังต้องพิจารณาปัจจัยอื่นๆประกอบด้วย เช่น ส่วนผสมของคอนกรีต เป็นต้น จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างยังพบอีกว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกั่วที่มีขนาดละเอียดที่สุดจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมากที่สุด และโครงสร้างก็มีลักษณะแน่นหนาที่สุด

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเพียงอย่างเดียว จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำสูงสุด ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้อนุภาคตะกั่วที่มีขนาดละเอียดที่สุดให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำต่ำที่สุด และความพรุนน้อยที่สุด

จากการทดลองของ Nakamura เราสามารถสรุปได้ว่าเมื่อนำตะกั่วจากเตาหลอมเหล็กมาผสมปูนซีเมนต์แล้วสามารถทำให้คอนกรีตที่ได้มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สามารถเทียบได้กับคอนกรีตที่เกิดจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง โดยคุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้นี้จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของอนุภาคตะกั่วที่ใช้

Sakai และคณะ, 1992 ทำการศึกษาในลักษณะที่คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Nakamura แต่ในการทดลองนี้จะใช้ปูนซีเมนต์ประเภทให้ความร้อนปานกลาง และมีการแปรปริมาณตะกั่วที่ใช้ในการทำคอนกรีตด้วย ในการทดลองได้มีการแปรความละเอียดของอนุภาคตะกั่ว 4 ค่า คือ 300 400 500 และ 600 m^2/kg และใช้ตะกั่วจากเตาถลุงเหล็กในปริมาณร้อยละ 50 60 70 และ 80 ของคอนกรีต ปริมาณซีเมนต์ต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีตที่ใช้มี 2 ค่า คือ 210 และ 300 kg/m^3 สารผสมคอนกรีตที่ใช้คือสารกระจายกักฟองอากาศ(Air-entainment admixture) เพื่อควบคุมค่าการยุบตัว และปริมาณอากาศในคอนกรีตให้อยู่ในช่วง 4 ± 1 และ 5 ± 1 เซนติเมตรตามลำดับ คุณสมบัติที่ทดสอบได้แก่ ระยะเวลาก่อตัว กำลังรับแรงอัด และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อใช้ตะกั่วปริมาณต่างๆกันในคอนกรีตพบว่า ระยะเวลาก่อตัวเริ่มแรกของคอนกรีตทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณตะกั่วในคอนกรีตเพิ่มขึ้น คอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 210 kg/m^3 จะให้ระยะเวลาก่อตัวที่สั้นกว่า คอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 300 kg/m^3 โดยที่ความละเอียดของตะกั่ว ไม่ได้มีผลมากนักต่อระยะเวลาก่อตัว

ปริมาณตะกั่วที่ใช้ในการผสมคอนกรีต จะมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อใช้ระยะเวลาบ่ม 3 และ 7 วัน แต่เมื่อใช้ระยะเวลาบ่มเพิ่มเป็น 28 และ 91 วัน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณตะกั่วที่ใช้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ปริมาณตะกั่วร้อยละ 80 คอนกรีตจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำมาก

เมื่อใช้ระยะเวลาบ่มสั้น ความละเอียดของอนุภาคตะกั่วมีผลไม่มากนักต่อค่ากำลังรับแรงอัด แต่เมื่อใช้ระยะเวลาบ่มนาน ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคตะกั่วที่ใช้มีความละเอียดมากขึ้น

จากการทดลองยังพบอีกว่า เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีต 300 kg/m^3 และความละเอียดของอนุภาคตะกั่ว 600 m^2/kg ในปริมาณ 60% ของคอนกรีต จะให้ความร้อนใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ชนิดให้ความร้อนต่ำตามมาตรฐาน ASTM C 150 ประเภทที่ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ(Low-Heat Portland Cement) การใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นนอกจากจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นแล้ว ยังทำให้ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าต่ำอีกด้วย

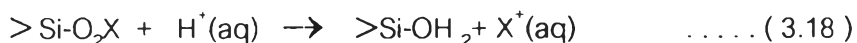
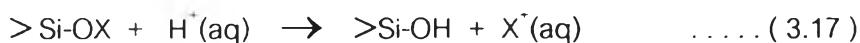
Cocke และคณะ,1992 ได้ทำการศึกษากลไกการชะงักงันตัวอย่างที่เกิดจากการบำบัดตะกั่วและสังกะสีด้วยวิธีทำให้เป็นก้อนโดยใช้ซีเมนต์ การศึกษาในครั้งนี้จะใช้วิธีการทางจุลภาค 2

วิธีได้แก่ การใช้ X-ray photoelectron spectroscopy(XPS), Scanning electron microscopy (SEM) ร่วมกับEnergy dispersive X-ray spectroscopy(EDS) การใช้ SEM/EDS เพื่อศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างทั้งก่อนและหลังการชะ ส่วน XPS จะให้รายละเอียดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเนื่องจากการชะ

ก่อนตัวอย่างเตรียมโดยเทสารละลายมาตรฐานที่ประกอบด้วยตะกั่วไนเตรด และสังกะสีไนเตรด 10%โดยน้ำหนักลงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง แล้วกวนอย่างต่อเนื่อง รักษาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไว้ที่ 0.4 ใช้ระยะเวลาบ่มตัว 28 วันที่ความชื้นประมาณ 85% จากนั้นก็นำตัวอย่างที่มีตะกั่ว และตัวอย่างที่มีสังกะสีไปทดสอบการชะละลายโดยใช้กรดอะซิติกและโซเดียมอะซิเตดบัฟเฟอร์(พีเอช 4.85) เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจากนั้นก็นำตัวอย่างไปเก็บไว้ในอากาศก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไปด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางจุลภาคดังกล่าวต่อไป

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างเนื่องจากการชะละลายด้วย SEM จะให้ผลดังรูปที่ 3.6 ถึง 3.11 เมื่อพิจารณารูปที่ 3.6 และ 3.7 ก่อนตัวอย่างที่ประกอบด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียวก่อนการชะด้วยกรด และหลังการชะด้วยกรดตามลำดับ พบว่ารูปทั้งสองนี้มีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ก่อนซีเมนต์ที่ยังไม่ได้ผ่านการชะด้วยกรดแล้วโครงสร้างจะมีลักษณะเป็นโพรงใหญ่ คล้ายรังผึ้ง โครงสร้างเป็นแบบ Cross-linked และมีความเป็นผลึกไม่สมบูรณ์ จากรูปที่ 3.8 และ 3.9 ก่อนตัวอย่างที่ประกอบด้วยซีเมนต์ผสมตะกั่ว ก่อนการชะด้วยกรด และหลังการชะด้วยกรดตามลำดับ เราจะเห็นว่าโครงสร้างของซีเมนต์ที่ประกอบด้วยตะกั่วก่อนผ่านการชะด้วยกรดจะมีลักษณะเป็นพื้นที่สีดำ ที่ถูกล้อมรอบด้วยแผ่นบางๆสีขาว และมีผลึกรูปเข็มกระจายอยู่ทั่วไป แต่เมื่อผ่านการชะแล้วโครงสร้างจะมีความต่อเนื่องน้อยลง แผ่นบางๆสีขาวจะแตกหัก และในโครงสร้างมีลักษณะจับกันอย่างหลวมๆ ส่วนสังกะสีก็จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับตะกั่ว

จากการทดลองสรุปว่าทั้งตะกั่วและสังกะสีมักจะสะสมอยู่ที่ผิวของซีเมนต์ เมื่อผ่านการชะสารสกัดจะเข้าไปทำลายโครงสร้างของซีเมนต์ โดยจะเข้าไปดึงแคลเซียมออกจากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามสมการที่ 3.17 และ 3.18 ซึ่งเป็นการเปิดโครงสร้างเพิ่ม branching และ cross-linkd ให้ซิลิเกต สัมผัสกับกรดมากขึ้น ทำให้เกิดโครงสร้างของแข็งที่มีรูพรุนแตกหักง่าย มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อย และมีความสามารถในการชะละลายโลหะหนักเพิ่มขึ้น



โดยที่ X แทน แคลเซียม โพแทสเซียม โซเดียม หรือไอออนของโลหะหนัก

กฤษณา,1994 ได้ทำการศึกษาการบำบัดกากตะกอนนิเกิล ที่เกิดจากกระบวนการชุบโลหะโดยวิธีทำให้เป็นก้อน วัสดุประสานที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง (Ordinary Portland Cement:OPC) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทผสมซีเมนต์แกลบ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทผสมเถ้าลอยลิกไนต์ อัตราส่วนระหว่างของเสียต่อวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 0.1 อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายมีค่าเท่ากับ 1:2 และอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 1:2 เช่นกัน ในขั้นแรกกฤษณาได้ทำการทดลองหาวัสดุประสานที่ดีที่สุดเพื่อนำไปทดลองในขั้นตอนต่อไปโดยพิจารณาจาก ค่ากำลังรับแรงอัดที่เวลาบ่ม 1 3 7 14 21 และ 28 วัน และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะโดยมีวิธีสกัด 2 วิธี คือ วิธีสกัดสารตาม US EPA และวิธีทดสอบตามสภาพการใช้งานจริง จากการทดลองในเบื้องต้นนี้พบว่าวัสดุประสานทั้งสามชนิดให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ามาตรฐานโดยที่ค่ากำลังรับแรงอัดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของปูนซีเมนต์ ร้อยละการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน และระยะเวลาบ่ม ค่ากำลังรับแรงอัดสำหรับวัสดุประสานทั้งสามชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาบ่ม 1 วัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียวจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด รองลงมาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แกลบตามลำดับ จนถึงเมื่ออายุ 14 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แกลบจะลดลง ในขณะที่ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุประสานทั้งสองก็ยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง กฤษณากล่าวว่าที่ค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แกลบลดลงนี้อาจเป็นเพราะซีเมนต์แกลบเป็นวัสดุหยาบมีความพรุนสามารถดูดซับน้ำได้ดี เมื่อถึงเวลาผ่านไปจนถึงจุดๆหนึ่งที่ความสามารถในการดูดซับน้ำสูงสุดอาจจะทำให้น้ำน้อยเกินไปเป็นผลต่อการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อถึง 28 วันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียวก็ยังเป็นวัสดุประสานที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเช่นเดิม รองลงมาคือปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แกลบตามลำดับ

เมื่อกฤษณาพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุประสานทั้งสามชนิด จากความสามารถในการชะละลาย จากการทดสอบการสกัดตามวิธีที่ 1 วิธีสกัดสารตามUS EPA พบว่าความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำชะของวัสดุประสานทั้งสามชนิดมีค่าน้อยกว่ามาตรฐานทั้งสิ้น ที่ระยะเวลาบ่ม 1 วัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ให้การรั่วซึมนิเกิลมากที่สุด รองลงมาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แกลบ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียวตามลำดับ แต่เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แกลบ จะให้การรั่วซึมนิเกิลลดลง จนกระทั่ง 28 วันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แกลบให้การรั่วซึมนิเกิลน้อยที่สุด ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียว กลับให้ค่าการรั่วซึมนิเกิลมากที่สุด กฤษณาให้เหตุผลว่า ทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์แกลบ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสม

ถ้าลดยลิกไนต์มีซิลิกาไดออกไซด์มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียว ซึ่งซิลิกาไดออกไซด์นี้สามารถตรึงนิเกิลได้โดยกระบวนการทั้งทางกายภาพ และเคมี ทั้งยังมีคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนของกรดได้ดี สำหรับการทดสอบการชะด้วยวิธีที่ 2 วิธีทดสอบตามสภาพการใช้งานจริงซึ่งทำได้โดยนำไปแช่ในน้ำกลั่นตามระยะเวลาที่กำหนดพบว่า ที่เวลาบ่ม 1 วันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าแกลบให้การรั่วซึมของนิเกิลมากที่สุด รองลงมาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียวและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมถ้าลดยลิกไนต์ตามลำดับ อาจเป็นเพราะอนุภาคถ้าลดยมีลักษณะกลมละเอียดมากจึงสามารถแทรกตัวเข้าไปในโพรงของซีเมนต์ทำให้โครงสร้างอัดแน่นขึ้น ค่าการรั่วซึมน้ำลดลงการรั่วซึมของนิเกิลจึงลดลง

จากการทดลองในเบื้องต้นนี้ศึกษาจึงเลือกซีเถ้าลอยเป็นวัสดุปอชโซลานที่จะใช้ จากนั้นจึงทดลองหาอัตราส่วนระหว่างถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เหมาะสม และความสามารถในการรับกากตะกอน โดยพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัด และความสามารถในการชะละลายทั้งสองวิธี พบว่าอัตราส่วนระหว่างถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.35 และความสามารถในการรับตะกอนเป็น 15% โดยที่เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงและทำให้ความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำชะเพิ่มขึ้น ที่ค่านั้นนอกจากจะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ามาตรฐานและการรั่วซึมของนิเกิลไม่เกินมาตรฐานแล้ว โครงสร้างของก้อนตัวอย่างจะอัดแน่นกว่าก้อน ตัวอย่างที่มีปริมาณถ้าลอย 20% โครงสร้างที่ไม่แน่นของก้อนตัวอย่างสามารถก่อให้เกิดปัญหาเมื่อฝังกลบนานได้ถ้าดินขึ้น นอกจากนี้ยังสรุปด้วยว่าระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้นไม่ได้มีผลต่อการรั่วซึมของโลหะหนักมากนักแต่จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเท่านั้น

คอนซิลแทนต์ ออฟ เทคโนโลยี, 1994 ทำการศึกษาการทำลายฤทธิ์กากตะกอนที่เกิดจากการผลิตตะกั่ว โดยวิธีการทำเสถียร (stabilization) ด้วยปูนขาว กากตะกอนตะกั่วที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกากตะกอนที่เกิดจากอุตสาหกรรมการผลิตตะกั่วทุติยภูมิ (secondary lead) หรือการผลิตโลหะตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า กากตะกอนนี้จะมีลักษณะอยู่ในรูปของก้อนแข็งหรือเป็นเม็ดมีตะกั่วปนอยู่ในปริมาณมาก จากการศึกษาพบว่า วิธีที่เหมาะสมในการทำเสถียรกากตะกอนนี้ ทำได้โดย นำกากตะกอนมาผสมกับปูนขาวผสมน้ำ(ปูนสุก) ในอัตราส่วน 1:1 ภายในโมบที่ใช้ผสมคอนกรีต แล้วรับค่าพีเอชด้วยปูนขาวอีกครั้งจนได้ค่าพีเอชประมาณ 11 ทิ้งไว้ให้แห้งแล้วจึงนำไปฝังกลบต่อไป

วิชัย, 1995 ได้ทำการศึกษาการบำบัดกากตะกอนโครเมียมด้วยวิธีทำให้เป็นก้อน วัสดุประสานที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง(Ordinary Portland Cement:OPC) ผสมซีเถ้าแกลบ(Rice Husk Ash:RHA) กากตะกอนโครเมียมเป็นกากตะกอนสังเคราะห์ที่ได้จากการรีดิวซ์โครเมียมไตรออกไซด์แล้วตกตะกอนให้กลายเป็นตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ ปูนซีเมนต์ซี

เถ้าแกลบ(Portland Rice Husk Ash Cement : PRHAC) มีอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาต่อซีเมนต์เถ้าแกลบเท่ากับ 1:1 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ในเบื้องต้นวิจัยได้ทำการศึกษาค่าผลของปริมาณกากตะกอนที่ใช้และระยะเวลาบ่มต่อค่ากำลังรับแรงอัดและความสามารถในการชะละลายโดยใช้วิธี 3 วิธี คือ การสกัดโดยวิธีตามมาตรฐาน US EPA การทดสอบการสกัดโดยใช้น้ำทะเล และการทดสอบการสกัดโดยใช้สารละลายต่างๆ

จากการศึกษาผลของระยะเวลาบ่ม และปริมาณกากตะกอนที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างส่วนใหญ่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม ยกเว้นที่อัตราส่วน 75 และ 100 กรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมวัสดุประสาน เมื่อหลัง 14 วันแล้วจะมีค่าลดลงซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากซิลเฟตในกากตะกอน ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเกิดเมื่อใช้ปริมาณกากตะกอน 10% เมื่อปริมาณกากตะกอนที่ใช้เพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลง เนื่องจากกากตะกอนจะเข้าขัดขวางปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ปริมาณกากตะกอนสูงสุดที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดยังสูงถึงค่ามาตรฐานได้มีค่าเท่ากับ 50%

การศึกษาค่าผลของระยะเวลาบ่ม และปริมาณกากตะกอน ที่มีต่อความสามารถในการชะละลายจะใช้การสกัด 3 วิธีคือ วิธีสกัดตาม US EPA การสกัดโดยใช้น้ำทะเล และการสกัดโดยใช้สารละลายต่างๆ ได้แก่ สารละลายที่มีซิลเฟตไอออนเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร สารละลายที่มีไฮโดรเจนคาร์บอเนตไอออนเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำปราศจากไอออน จากการทดลองพบว่า การทดสอบการสกัดตามวิธีมาตรฐานจะให้ค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะลดลงตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่ม ส่วนการทดสอบการสกัดในน้ำทะเลและสารละลายต่างๆพบว่าความเข้มข้นของโครเมียมและเหล็กจะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้กรดอะซิติก เนื่องจากกรดสามารถทำลายโครงสร้างของซีเมนต์ได้ รองลงมาคือน้ำทะเลสังเคราะห์ เนื่องจากซิลเฟตทำให้เกิดการบวมตัว ส่วนสถานะอื่นมีแนวโน้มคล้ายคลึงกันแต่ต่ำกว่าในสถานะสารละลายข้างต้นมาก

ศักดิ์ดา วรพิพัฒน์, 1995 ศึกษาการบำบัดกากตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอย่างแรงสังกะสี โลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอน ได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม ตะกั่วปรอท และสังกะสี วัสดุประสานที่ใช้มี 5 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง(Ordinary Portland Cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทห้า(Sulfate-Resistant Portland Cement) ปูนขาว ปูนซีเมนต์ซิลิกา และปูนซีเมนต์ซิลิกาผสมเถ้าลอยลิกไนต์ ในการทดลองได้มีการใช้สารเติมแต่ง คือ โซเดียมซิลิเกต ซึ่งเป็นตัวให้ซิลิเกตแก่แคลเซียมในวัสดุประสาน เพื่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและลดผลกระทบของซิลเฟตที่อยู่ในกากตะกอนซึ่งมีผลหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้า

จากการทดลองพบว่าวัสดุประสานที่ดีที่สุดสำหรับการบำบัดตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอย่างแร่สังกะสีคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง โดยใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 เทียบกับน้ำหนักตะกอนแห้ง ซึ่งจะให้ค่ากำลังรับแรงอัด และความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆในน้ำสกัดไม่เกินค่ามาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม โดยในการบำบัดกากตะกอนนี้ต้องคำนึงถึงความชื้นในตะกอนด้วย ระยะเวลาบ่มที่นานขึ้นจะไม่มีผลต่อการจับยึดโลหะหนักแต่จะมีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงอัด

รักษพล, 1995 ศึกษาการบำบัดกากตะกอนจาโรไซด์โดยวิธีทำให้เป็นก้อน กากตะกอนจาโรไซด์เป็นกากตะกอนที่เกิดจากการตกตะกอนผลึกเกลือด้วยกระบวนการจาโรไซด์ในระหว่างกระบวนการสกัดสังกะสีออกไซด์ กากตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้มี 2 ประเภท ได้แก่ กากตะกอนจาโรไซด์แบบธรรมดา ซึ่งมีสังกะสี เกลือ และแคลเซียม เป็นองค์ประกอบ และกากตะกอนซิลิโคจาโรไซด์ ซึ่งมี สังกะสี แคลเซียม แมงกานีส และตะกั่ว เป็นองค์ประกอบ วัสดุประสานที่ใช้ในการทดลองมี 5 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ปูนขาว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมปูนขาว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งผสมกากตะกอนซิลิโคจาโรไซด์

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การทดสอบสัดส่วนเบื้องต้น การทดสอบสัดส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด และการทดสอบการชะละลายระยะยาว วิธีที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการทำให้เป็นก้อน ได้แก่ กำลังรับแรงอัด และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด โดยโลหะหนักที่ศึกษาคือ อาร์เซนิก แคลเซียม โครเมียม ตะกั่ว พรอท และสังกะสี

ผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งให้ผลการบำบัดที่ดีที่สุด โดยสำหรับกากตะกอนจาโรไซด์แบบธรรมดาค่าจะใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 14 เทียบกับน้ำหนักกากตะกอนและสำหรับกากตะกอนซิลิโคจาโรไซด์จะใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 เทียบกับน้ำหนักกากตะกอน ซึ่งทำให้คุณสมบัติของก้อนตัวอย่างสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้

ผลการทดสอบสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดพบว่า อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกากตะกอนจาโรไซด์แบบธรรมดาค่าจะใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 11 เทียบกับน้ำหนักกากตะกอน และสำหรับกากตะกอนซิลิโคจาโรไซด์จะใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 เทียบกับน้ำหนักกากตะกอน สามารถทำให้คุณสมบัติของก้อนตัวอย่างผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้อย่างเหมาะสม

ผลการทดสอบการชะละลายในระยะยาว (90 วัน) เป็นการทดสอบแบบคอลัมน์ โดยใช้ น้ำประปาที่มีค่าพีเอชประมาณ 5.8-6.3 เป็นน้ำสกัด เมื่อกำหนดอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์เท่ากับ

ร้อยละ 10 เทียบกับน้ำหนักกากตะกอน พบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมตลอดช่วงระยะเวลาการชะละลาย

Lin และคณะ, 1996 ได้ทำการศึกษาการบำบัดดินที่ได้รับการปนเปื้อนด้วยตะกั่ว ซึ่งเก็บมาจากบริเวณโรงงานผลิตตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า วัสดุประสานที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ธรรมดา ซัลเฟอร์ และแอสฟัลต์ผสมซัลเฟอร์ (Sulphur Extended Asphalt: SEA) นอกจากนี้ยังได้มีการใช้โซเดียมซัลไฟด์ เป็นสารเติมแต่งลงในวัสดุประสานด้วย ซัลเฟอร์ที่จะอยู่ในรูปธาตุที่เป็นของแข็ง ที่อุณหภูมิปกติสารนี้จะอยู่ในรูป Orthorhombic(S_{α}) ซึ่งจะประกอบด้วย 8 อะตอม โดยโครงสร้างอะตอมจะมีลักษณะเป็นCrown-shaped rings(S_8) เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 119 องศาเซลเซียส ซัลเฟอร์จะเริ่มหลอม และเปลี่ยนเป็นรูป Monoclinic(S_{β}) ซึ่งเป็นรูปที่มีช่องว่างมากกว่าในรูปแบบแรก ไม่มีลักษณะเป็นRings แล้ว แต่ก็ยังประกอบด้วย S_8 ที่มีความเสถียร และไม่มีขั้วเช่นเดิม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่งสูงเกิน 159 องศาเซลเซียส ซัลเฟอร์จะซัลเฟอร์แต่ละเส้นที่ประกอบด้วย 8 อะตอมจะมาหลอมรวมกัน เป็นสายโซ่ยาว เรียกการรวมกันนี้ว่า โพลีเมอไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งจะให้ความหนืดมีค่าสูงขึ้นมา (ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 119-159 องศาเซลเซียส จะมีความหนืดต่ำมาก) จากคุณสมบัติในการเป็นสารเทอร์โมพลาสติกของธาตุซัลเฟอร์นี้ จึงได้นำมาทดลองเพื่อเป็นวัสดุประสานชนิดหนึ่ง

ตัวอย่างดินที่ศึกษามี 2 ชนิดได้แก่ ดินที่เก็บมาจากสถานที่จริง และดินที่สังเคราะห์ขึ้นจากทรายก่อสร้างผสมตะกั่วซัลเฟตกับน้ำมันซึ่งเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ จากการนำตัวอย่าง 2 ชนิดนี้มาเปรียบเทียบกันในเรื่องดินพบว่า อนุภาคตัวอย่างดินจริงจะมีความละเอียดกว่าอนุภาคตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้น เนื่องจากกลไกการบำบัดด้วยซัลเฟอร์เป็นการเอนแคปซูเลชันของเสียด้วยปฏิกิริยาทางเคมีของไฮดรอกไซด์และโซลซัลไฟด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวของอนุภาคดินจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการหาจำนวนวัสดุประสานที่ต้องการใช้ตัวอย่างดินจริงจากโรงหลอมแบตเตอรี่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ดังนั้นจึงต้องการซัลเฟอร์ที่ใช้เป็นวัสดุประสานมากกว่า ซึ่งเป็นจริงสำหรับซัลเฟอร์ผสมแอสฟัลต์ด้วย

จากการศึกษาทางกายภาพและทางวิศวกรรมพบว่า ทั้งความหนาแน่นและค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นงานที่ใช้ซัลเฟอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซัลเฟอร์ที่ใช้ เนื่องจากซัลเฟอร์เป็นของเหลว และมีความหนาแน่นต่ำที่อุณหภูมิปฏิบัติการ(120-140 องศาเซลเซียส) ซัลเฟอร์จึงง่ายต่อการเปียกอนุภาคของของเสีย ยิ่งเติมซัลเฟอร์เข้าไปมาก การเติมช่องว่างให้เต็มก็ยิ่งดีขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างจึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซัลเฟอร์ที่ใช้เพิ่มขึ้น สำหรับวัสดุประสานทั้งสองก็เป็นเช่นนี้เช่นกัน ในทางตรงกันข้ามหลังจากที่อนุภาคและสิ่งเจือปนถูกทำให้เปียก ซัลเฟอร์ที่เกิน

มากก็จะเป็นตัวเพิ่มแรงยึดจับอนุภาคไว้ ดังนั้นค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ซิลเฟอร์ในปริมาณที่มากขึ้น โดยที่การเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัดจะสัมพันธ์อย่างเป็นเส้นตรงกับค่าความหนาแน่น ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าความหนาแน่นประมาณค่ากำลังรับแรงอัดได้ซึ่งเป็นประโยชน์มากในภาคสนาม สำหรับแอสฟัลต์ผสมซิลเฟอร์จะเห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณวัสดุประสานเพิ่มขึ้นเป็น 25%โดยน้ำหนัก เนื่องจากสารจำพวกแอสฟัลต์ซีเมนต์ และแอสฟัลต์ผสมซิลเฟอร์เป็นสารที่มีความหนืดที่อุณหภูมิห้องการใช้ในปริมาณที่สูงเกินไป จะทำให้เป็นการเพิ่มความหนาของฟิล์มที่เคลือบอนุภาคเป็นผลให้สูญเสียค่ากำลังรับแรงอัด

ค่าการซึมน้ำของตัวอย่างที่ใช้ซิลเฟอร์มีค่าประมาณ 2.7×10^{-9} เมตรต่อวินาที ในขณะที่ความหนาแน่นมีค่าเท่ากับ 2.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการซึมน้ำน่าจะมีค่าน้อยกว่านี้ได้ถ้าใช้ซิลเฟอร์มากกว่านี้แต่ค่าการซึมน้ำเท่านี้ก็เพียงพอที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุปูพื้นได้แล้ว

จากการทดสอบความสามารถในการชะละลายตาม EPA TCLP พบว่า การใช้ซิลเฟอร์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวให้ผลการทดลองไม่เป็นที่น่าพอใจ เพราะความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำชะมีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้(5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) เมื่อเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไป 0.5% โดยน้ำหนักพบว่าผลก็ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามสำหรับแอสฟัลต์ผสมซิลเฟอร์สำหรับตัวอย่างสังเคราะห์สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้เมื่อเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงไป 0.16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากตัวอย่างดินสังเคราะห์มีอนุภาคที่หยาบ และมีความสามารถในการดูดซับต่ำทำให้สามารถถูกเอนแคปซูเลชันได้ดีกว่าตัวอย่างดินจริง ซึ่งมีอนุภาคละเอียดและโครงสร้างซับซ้อนจึงยากต่อการบำบัดด้วยซิลเฟอร์จึงต้องมีการใช้โซเดียมซัลไฟด์ร่วมด้วย เมื่อใช้แอสฟัลต์ผสมซิลเฟอร์ แอสฟัลต์ซีเมนต์จะช่วยในการเอนแคปซูเลชันตัวอย่างดินได้เนื่องจากคุณสมบัติในการเป็นสารโพลีเมอร์ของตัวเอง แต่ที่ปริมาณแอสฟัลต์น้อยๆก็ไม่สามารถบำบัดได้เช่นกัน ต้องใช้ที่ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับทุกตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานสามารถผ่านการทดสอบการชะได้ทั้งสิ้น

นอกจากนี้ยังได้มีการจำลองสภาวะฝนกรดด้วย ทดสอบเฉพาะชิ้นงานที่ผ่าน TCLP และมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด จากชิ้นงานที่เลือกมาของวัสดุประสานทั้ง 3 ชนิดผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งสิ้นและสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปูพื้นทางได้

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้มีการศึกษาผลกระทบของปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน ที่มีต่อการบำบัดด้วย เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่พบว่าไม่สามารถใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บำบัดได้ ถ้าของเสียนั้นมีสารอินทรีย์เพราะสารอินทรีย์จะไปหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การศึกษาของ Lin และคณะในครั้งนี้พบว่า ตัวอย่างดินที่มีน้ำมันปนอยู่ด้วยนั้นพบว่าที่ปริมาณน้ำมัน 4 เปอร์เซ็นต์ ไม่ได้มีผลอย่างมากต่อวัสดุประสานทั้งสามชนิดนี้ ทุกชิ้นงานให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ามาตรฐานและผ่าน

เกณฑ์ความเข้มข้นมาตรฐานทั้งสิ้น ซัลเฟอร์ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเราสามารถใช้อัลเฟอร์ในการบำบัดสารตะกั่วอนินทรีย์ผสม หรือไม่ผสมสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในดินได้ อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ก็สามารถใช้บำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน การใช้อัลเฟอร์ในการบำบัดจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกือบทั้งสิ้นซึ่งเป็นจุดสนใจที่น่าจะนำมาเป็นวัสดุก่อสร้าง นอกจากนี้อัลเฟอร์ยังสามารถใช้กับดินปนเปื้อนของเสียบางชนิดที่ปูนซีเมนต์ไม่สามารถบำบัดได้อีกด้วย

การนำอัลเฟอร์มาใช้ในการบำบัดของเสียด้วยวิธีนี้ เป็นการประหยัดมากเนื่องจากอัลเฟอร์เป็นของเสียจากกระบวนการกำจัดอัลเฟอร์ที่โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆมีความจำเป็นต้องใช้ ราคาเฉลี่ยของการนำอัลเฟอร์มาใช้ประมาณ 8-12 ดอลลาร์ต่อตัน เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แล้วราคาประมาณ 80-120 ดอลลาร์ต่อตัน

จากการทดลองของ Lin และคณะ สามารถสรุปได้ว่า การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อัลเฟอร์ และแอสฟัลต์ผสมอัลเฟอร์ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่วจากโรงงานหลอมแบตเตอรี่เก่าด้วยการทำให้เป็นก้อนล้วนแต่ใช้ได้มีประสิทธิภาพทั้งสิ้น สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำชะทั้งตามมาตรฐาน EPA และการจำลองฝนกรดพบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ถ้าใช้แอสฟัลต์ผสมอัลเฟอร์จะสามารถลดความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำชะลงได้ถึง 3.07 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ปริมาณวัสดุประสาน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่าการบำบัดโดยใช้อัลเฟอร์จะมีต้องการเพิ่มอุณหภูมิ แต่ก็ยังไม่สามารถบำบัดตัวอย่างดินทั้งที่เก็บจากสถานที่จริง และดินที่สังเคราะห์ขึ้นได้ เนื่องจากค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำชะไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามถ้ามีการปรับปรุงโดยการเติมโซเดียมซัลไฟด์เป็นสารเติมแต่ง จะสามารถทำให้ความสามารถในการชะตะกั่วน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานได้ และยังพบด้วยว่าจำนวนของโซเดียมซัลไฟด์ที่เติมจะมีผลอย่างมากต่อกระบวนการ จากการทดลองไม่พบว่าการแปรปรวนของวัสดุประสานจะมีผลต่อการทำให้เป็นก้อนด้วยวิธีนี้มากนัก

อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย, 1996 ได้ทำการศึกษาการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอดี โดยการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์ก่อนนำไปทำให้เป็นก้อน วัสดุประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อนได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งและเถ้าลอยลิกไนต์ ค่าที่ทำการวัดเพื่อพิจารณาผลของการบำบัด ได้แก่ ความสามารถในการชะละลาย พรอท โครเมียม และเหล็ก ค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และความสามารถในการซึมได้ของน้ำ เมื่อหาสัดส่วนของวัสดุประสาน อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน และระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมได้แล้ว ยังนำค่าเหล่านี้มาทดลองใช้กับกากตะกอนซีโอดีซึ่งได้มาจากโรงงานเคลือบแก้วและศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำด้วย

จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนผสมของกากตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.25 เนื่องจากถ้ามีค่าสูงกว่านี้แล้วจะไม่สามารถจับตัวกันเป็นก้อนได้ เมื่อเพิ่มโซเดียมซัลไฟด์ลงในตะกอนโลหะหนักแล้วจะทำให้ความสามารถในการชะละลายโลหะหนักลดลง แต่ทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงด้วย

ที่อัตราส่วนผสมของกากตะกอนโลหะหนักต่อตัวประสานเท่ากับ 0.25 เมื่อเติมโซเดียมซัลไฟด์ในปริมาณ 1.75 เท่าของปริมาณที่ต้องการตามสโตยคิโอเมตริก ประสิทธิภาพในการทำเสถียรโครเมียม และปรอทจะมีค่าเท่ากับ 60.01 และ 91.40%ตามลำดับ โดยมีค่าใช้จ่ายประมาณ 5,000 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนัก ในขณะที่เมื่อเติมโซเดียมซัลไฟด์ในปริมาณ 3.0 เท่าของความต้องการตามปริมาณมวลสารสัมพันธ์ ประสิทธิภาพในการทำเสถียรโครเมียม และปรอทมีค่าเท่ากับ 94.00 และ 99.49%ตามลำดับ โดยมีค่าใช้จ่ายประมาณ 5,790 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนัก ความเข้มข้นของโครเมียมและเหล็กในน้ำชะมีค่าต่ำมาก ถึงแม้ไม่มีการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์ แต่สำหรับปรอทแล้วจำเป็นต้องมีการเติมโซเดียมซัลไฟด์จึงจะสามารถทำให้ความเข้มข้นของปรอทในน้ำชะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ได้ อัตราส่วนต่างๆดังกล่าวข้างต้นยังสามารถใช้ได้กับกากตะกอนจริงจากโรงงานเคลือบพ่น และศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำด้วย

นฤมิตร, 1996 ได้ทำการศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์กากตะกอนโลหะหนักที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดี การบำบัดทำโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ วัสดุประสานที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งผสมกับเถ้าลอยลิกไนต์ในอัตราส่วนต่างๆ

จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนผสมตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดโลหะหนักมีค่าเท่ากับ 0.25 การเพิ่มปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ลงในวัสดุประสานจะมีผลทำให้ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัด และค่าความหนาแน่นลดลง ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดลดลง การใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วนผสมกากตะกอนต่อวัสดุประสาน 0.25 เหมาะสมที่สุดในการกำจัดปรอท การใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนผสมกากตะกอนต่อวัสดุประสาน 0.25 เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโครเมียม อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5 เมื่อใช้ระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ความชื้นน้ำและความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดมีค่าลดลง

เมื่อใช้ระยะเวลาบ่ม 28 วัน การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยไม่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ที่อัตราส่วนผสมกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 จะให้ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ปรอทมีค่าเพียง 26.4 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์โครเมียมมีค่าเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวัสดุประสานที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ 50 เปอร์เซ็นต์ของวัสดุประสานจะให้ประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ปรอท โครเมียม และเหล็ก มีค่าเท่ากับ 30.7, 50 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ค่าใช้จ่ายของวัสดุประสานที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน สำหรับวัสดุประสานที่ประกอบด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ 0 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 6,800 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนัก และวัสดุประสานที่ประกอบด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นวัสดุประสานและสัดส่วนที่เหมาะสมในการบำบัดกากตะกอนโลหะหนักนี้ มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 3,800 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนัก

ดวงสมร ผดุงเกียรติวงศ์, 1996 ได้ทำการศึกษาการทำตะกอนปรอทซัลไฟด์ให้เป็นก้อน ตะกอนปรอทซัลไฟด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียซีไอดี และตะกอนจากการชะล้างหลอดฟลูออเรสเซนต์ วัสดุประสานที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิดได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งผสมเถ้าลอยลิกไนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งผสมซิลิกาฟูม ในการศึกษาจะมีการแปรค่าอัตราส่วนผสมของโซเดียมซัลไฟด์กับกากตะกอน อัตราส่วนผสมของวัสดุประสาน และอัตราส่วนผสมของกากตะกอนต่อวัสดุประสานที่ใช้ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ค่าที่ทำการวัดเพื่อดูผลของการบำบัดได้แก่ ความเข้มข้นของปรอทในน้ำชะ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และค่าการซึมได้ของน้ำ