บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตโลหะสังกะสีของบริษัทผาแดงอินดัสทรีจำกัด (มหาชน)

วัตถุดิบที่ใช้ป้อนกระบวนการผลิตของบริษัทมี 2 ประเภทคือ Zinc Concentrate ที่อยู่ในรูปของแร่สังกะสีซัลไฟด์ (Zinc Sulfide, ZnS) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เช่น ประเทศออสเตรเลียหรือประเทศจีน โดยหัวแร่สังกะสีซัลไฟด์นี้ต้องนำมาเผาย่างให้ได้เป็นแคลไซน์ (Calcine, $ZnO + ZnO.Fe_2O_3$) ที่โรงย่างแร่ จังหวัดระยองแล้วขนส่งด้วยรถบรรทุกมาทำการถลุงโลหะที่จังหวัดตาก วัตถุดิบอีกชนิดที่ใช้คือแร่สังกะสีซิลิเกต (Zinc Silicate Ore) แหล่งที่ใช้เป็นหลักคือแหล่งแร่ผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งเป็นเหมืองของบริษัทเอง นอกจากนี้แล้วยังซื้อแร่จากแหล่งอื่นเช่น แร่จากประเทศเวียดนามเข้ามาผสม โดยมีสัดส่วนการใช้สังกะสีจากสังกะสีซัลไฟด์ต่อสังกะสีซิลิเกตเท่ากับ 6:4 โดยน้ำหนัก

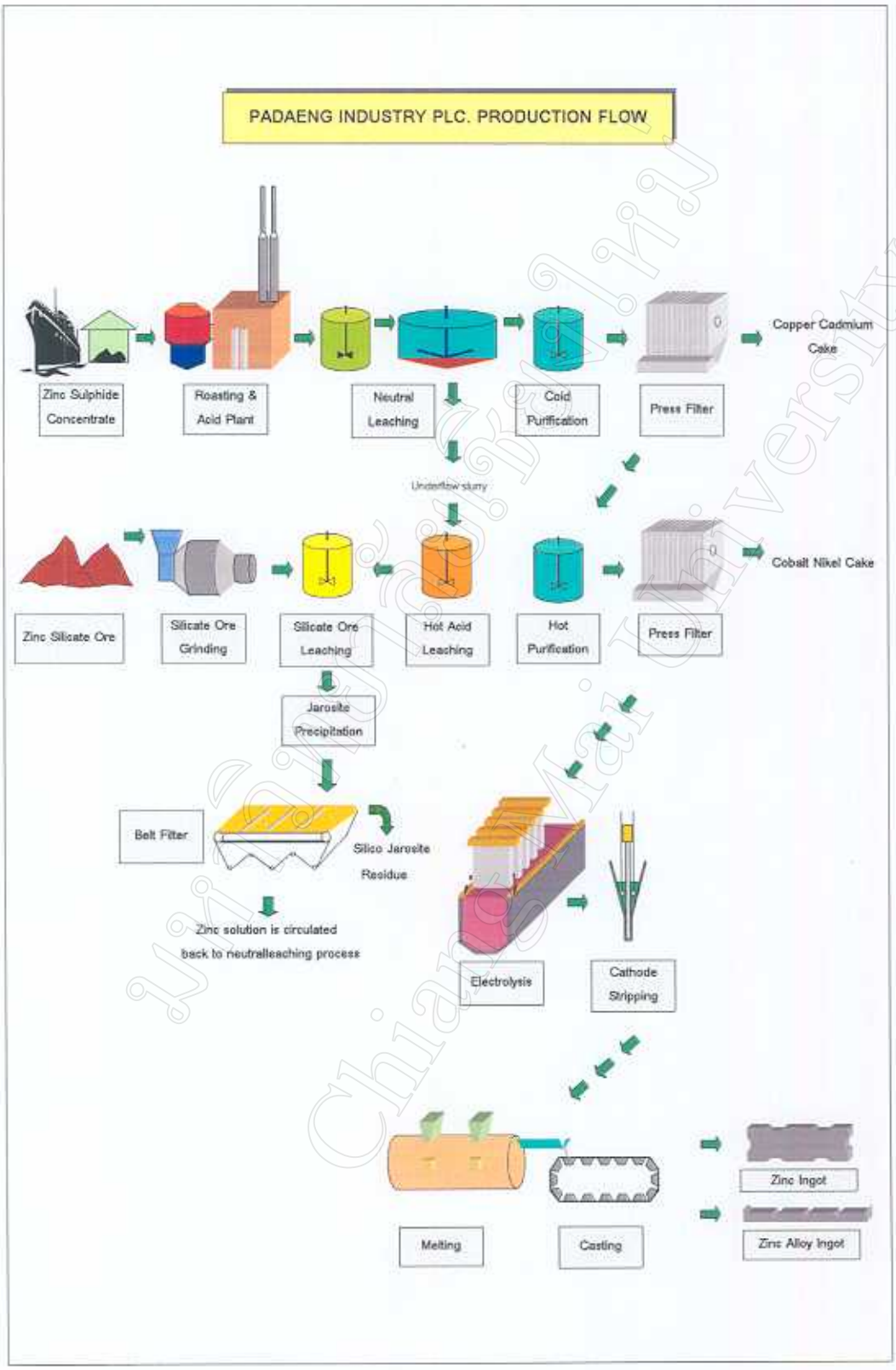
กระบวนการผลิตสังกะสีของบริษัทผาแดงเป็นแบบ Roasting-Leaching-Electrowinning ที่ประกอบไปด้วยกระบวนการต่างๆ ดังรูปที่ 2.1

2.1.1 การสกัดสังกะสีด้วยกรดซัลฟูริค

สำหรับการสกัดสังกะสีจากแคลไซน์ (Calcine) มี 2 ขั้นตอน คือ การสกัดสังกะสีที่อยู่ในรูปของสังกะสีออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) ในกระบวนการ Neutral Leaching และการสกัดสังกะสีในรูปของสังกะสีเฟอร์ไรท์ (Zinc Ferrite, $ZnO.Fe_2O_3$) ในกระบวนการ Hot Acid Leaching ส่วนการสกัดสังกะสีจากแร่สังกะสีซิลิเกตมี 1 ขั้นตอน คือกระบวนการ Silicate Leaching

ก) กระบวนการ Neutral Leaching

เป็นกระบวนการที่ต้องการละลายสังกะสีที่อยู่ในรูปของสังกะสีออกไซด์จากแคลไซน์ด้วยสารละลายกรดผสมระหว่างสารละลายอิเลคโตรไลต์จากโรงแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้า (Spent Electrolyte) กับกรดซัลฟูริคเข้มข้น (Fresh Acid) โดยเติมแคลไซน์ลงในสารละลายกรดผสมดังกล่าว ควบคุมพีเอชเป็น 1.5 และ 4.2 ตามลำดับ และควบคุมที่อุณหภูมิ 65 °ซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทำการแยกสารละลายและตะกอนด้วยถังตกตะกอน (Thickener) สารละลายส่วนที่ใสคือ Neutral Solution จะส่งต่อไปในกระบวนการทำสารละลายให้บริสุทธิ์ ในส่วนที่เป็นตะกอนซึ่งเรียก



รูป 2.1 กระบวนการผลิตโลหะสังกะสีของบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)

ว่า Neutral Leach Cake จะส่งต่อไปยังกระบวนการ Hot Acid Leaching เพื่อสกัดสังกะสีที่เหลืออยู่ในตะกอนต่อไป

ในกระบวนการนี้นอกจากจะเป็นการละลายสังกะสีที่อยู่ในรูปสังกะสีออกไซด์จากแคลไซน์แล้วยังเป็นการกำจัดเหล็กที่ละลายออกมาจากแคลไซน์ โดยการตกตะกอนในรูปของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ (Ferric hydroxide, $Fe(OH)_3$)และยังสามารถกำจัดสารมลทินอื่นๆ ที่ละลายออกมาจากแคลไซน์ได้ ด้วยการตกตะกอนร่วมกับเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ เช่น ดีบุก (Sn) อาร์เซนิก (As) และพลวง (Sb) ในกระบวนการนี้อาจมีการเติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2)หรือพ่นอากาศในถังปฏิกิริยาเพื่อออกซิไดซ์ (Oxidize) Fe^{2+} อิออนให้เป็น Fe^{3+} อิออนที่สามารถตกตะกอนได้ดี

ปฏิกิริยาเคมีหลักที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ Neutral Leaching มีดังนี้

Dissolution : $ZnO + H_2SO_4 \rightarrow ZnSO_4 + H_2O$ (2.1)

Oxidation : $2FeSO_4 + 2H_2SO_4 + MnO_2 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + MnSO_4 + 2H_2O$ (2.2)

$2FeSO_4 + \frac{1}{2} O_2 + H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + H_2O$ (2.3)

$MnO_2 + 2H_2SO_4 + Zn \rightarrow ZnSO_4 + MnSO_4 + 2H_2O$ (2.4)

Hydrolysis : $Fe_2(SO_4)_3 + 3ZnO + 3H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 3ZnSO_4$ (2.5)

Adsorption : $AsO_4H_3 + 4Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_4O_6(OH)_5As + 5H_2O$ (2.6)

$HSbO_2 + 4Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_4O_6(OH)_5Sb + 4H_2O$ (2.7)

ข) กระบวนการ Hot Acid Leaching

ในการเผาย่างแร่สังกะสีซัลไฟด์ (ZnS) นั้นพบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 650 °ซ สังกะสีออกไซด์จะรวมตัวกับสารประกอบของเหล็กพวกเฟอร์ริคออกไซด์ (Ferric Oxide) กลายเป็นสังกะสีเฟอร์ไรท์ (Zinc Ferrite, $ZnO.Fe_2O_3$) ที่ไม่สามารถละลายได้ด้วยสภาวะในกระบวนการ Neutral Leaching ดังนั้นตะกอนที่เหลือจากกระบวนการ Neutral Leaching จะมีสังกะสีที่อยู่ในรูปของสังกะสีเฟอร์ไรท์ และสังกะสีออกไซด์ที่ยังไม่ละลายบางส่วน ดังนั้นเพื่อลดการสูญเสียสังกะสีในกระบวนการผลิต จึงทำการสกัดสังกะสีด้วยสภาวะที่รุนแรงขึ้นในกระบวนการ Hot Acid Leaching เพื่อแยกสังกะสีจากสารประกอบสังกะสีเฟอร์ไรท์ โดยควบคุมความเข้มข้นของกรดซัลฟูริคให้มีค่าเท่ากับ 60-100 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 90-95 °ซ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง สารละลายที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีอุณหภูมิสูง มีความเข้มข้นของเหล็กอิออนและกรดสูงมาก ซึ่งจะถูกส่งไปยังกระบวนการ Silicate Leaching ต่อไป ปฏิกิริยาการละลายของสังกะสีเฟอร์ไรท์ด้วยกรดกำมะถันคือ

$ZnO.Fe_2O_3 + 4H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + ZnSO_4 + 4H_2O$ (2.8)

ค) กระบวนการ Silicate Leaching

ในการผลิตสังกะสีของบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) มีการใช้วัตถุดิบอีกชนิดหนึ่งคือแร่สังกะสีซิลิเกต (Zinc Silicate Ore) จากเหมืองแม่สอดและจากแหล่งอื่นๆ สารประกอบของสังกะสีในแร่จะอยู่ในรูปต่างๆ คือ Hemimorphite ($Zn_4Si_2O_7(OH)_2.H_2O$), Willemite (Zn_2SiO_4) หรือ Smithsonite($ZnCO_3$) แร่ที่ป้อนเข้ากระบวนการผลิตมีปริมาณสังกะสีเท่ากับ 15-20% และความชื้นเท่ากับ 10-13% ในกระบวนการ Silicate Leaching นี้เป็นการละลายสังกะสีจากแร่ซิลิเกตโดยใช้กรดที่เหลือในสารละลายจากกระบวนการ Hot Acid Leaching โดยการนำ Slurry ที่มาจาก Hot Acid Leaching ผสมกับแร่สังกะสีซิลิเกตที่ผ่านการบดเปียก (ขนาดน้อยกว่า 44 ไมโครเมตร ไม่ต่ำกว่า 40%) ให้มีความเข้มข้นของเนื้อแร่ 700 กรัมต่อลิตร ทำการควบคุมความเข้มข้นของกรดและอุณหภูมิที่เหมาะสมด้วยการเติมสารละลายอิเลคโตรไลต์ผสมกรดกำมะถันเข้มข้นในการควบคุมค่าพีเอช และใช้ไอน้ำร้อน (Steam) ควบคุมอุณหภูมิที่ 85-90 °ซ เป็นเวลา 7 ชั่วโมง แล้วส่งผ่าน Slurry ทั้งหมดไปยังกระบวนการกำจัดเหล็ก (Jarosite Precipitation) ต่อไป

ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องในกระบวนการคือ

$$ZnO.SiO_2.H_2O + H_2SO_4 \rightarrow ZnSO_4 + SiO_2.2H_2O \qquad (2.9)$$

$$ZnCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow ZnSO_4 + H_2O + CO_2 \qquad (2.10)$$

2.1.2 กระบวนการกำจัดเหล็ก (Jarosite Precipitation)

โดยทั่วไปแล้วแร่สังกะสีซัลไฟด์มีเหล็กเป็นมลทินปะปนอยู่เสมอประมาณร้อยละ 5-12 ในการย่างแร่ (Roasting) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 °ซ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโดยการใช้เตาฟลูอิดไดซ์จะทำให้เหล็กมลทินเหล่านี้รวมตัวกับสังกะสีเป็นสังกะสีเฟอร์ไรท์ ซึ่งไม่ละลายในสภาพกรดและอุณหภูมิในขั้นตอน Neutral Leaching แต่ละลายได้ดีในสภาพกรดและอุณหภูมิสูงประมาณ 90-95°ซ (Hot Acid Leaching) แต่ในสภาพนี้เหล็กก็จะละลายออกมาด้วยดังสมการ 2.8 จึงทำให้ต้องมีการกำจัดเหล็กออกไปก่อนที่จะส่งสารละลายสังกะสีไปรวมกับสารละลายส่วนใหญ่ที่ได้จากการละลายสังกะสีออกไซด์

กระบวนการกำจัดเหล็กมีหลายแบบคือ Ferric Oxide Precipitation, Jarosite, Geosite, Geothite, Hematite หรือ Magnetite วิธีแรกจะเหมาะสมกับแร่ที่มีเหล็กต่ำ เพราะจะเกิดสารประกอบของเหล็กไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นวุ้นที่กรองยากมาก

การตกตะกอนผลึกเหล็กออกจากสารละลายสังกะสีซัลเฟตในรูปของสารประกอบเหล็กที่เรียกว่าจาโรไซท์ แทนด้วยสูตรทางเคมีคือ $MFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ โดย M เป็นธาตุหรือประจุ

บวกในกลุ่มของ Na^+, NH_4^+, K^+, Ag^+, H_3O^+, Rb^{2+} และ Pb^{2+} จะได้ตะกอนที่สามารถกรองง่าย การตกตะกอนผลึกจาโรไซท์จะเกิดขึ้นได้ดี โดยการปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าอยู่ประมาณ 1.5–1.7 ที่อุณหภูมิ 95 °ซ และเติม Reagent M^+ ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้ NH_4^+ หรือ Na^+ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปเป็นตามสมการ 2.11

$$3Fe^{3+} + 2SO_4^{2-} + M^+ + 6H_2O \rightleftharpoons MFe_3(SO_4)_2(OH)_6 + 6H^+ \qquad (2.11)$$

ปฏิกิริยาการเกิดตะกอนจาโรไซท์จะเกิดไฮโดรเจนอิออนขึ้นเสมอ ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดไฮโดรเจนอิออนออกจากระบบเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางขวาให้มากและรักษาระดับพีเอชของสารละลายให้คงที่เอาไว้ตลอดเวลาโดยการเติม Neutralizing Agent ถ้า Neutralizing Agent ที่ใช้คือแร่สังกะสีซิลิเกต ตะกอนจาโรไซท์ที่ได้จะเรียกว่าซิลิโคจาโรไซท์ (Silico Jarosite) ปรกติสารละลายและตะกอนในรูปของ Slurry ที่ส่งมาจากกระบวนการ Hot Acid Leaching จะมีเหล็กเข้มข้นประมาณ 20-25 กรัมต่อลิตร แต่หลังจากผ่านกระบวนกำจัดเหล็กในรูปของจาโรไซท์จะเหลือเหล็กเข้มข้นประมาณ 2 กรัมต่อลิตร

กากซิลิโคจาโรไซท์ที่ได้นี้ยังสามารถดูดซับสารมลทินอื่นที่ไม่ต้องการในสารละลาย เช่น พลวง (Sb Ion) อาร์เซนิค (As Ion) และ เจอร์มาเนียม (Ge Ion) โดยการแทนที่อนุมูลซัลเฟต

2.1.3 การทำสารละลายให้บริสุทธิ์ (Purification)

ในการละลายสังกะสีจะมีสารมลทินเช่น แคดเมียม (Cd) นิเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) ทองแดง (Cu) ละลายออกมาด้วย จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการในการกำจัดสารมลทินเหล่านี้ก่อนที่จะส่งสารละลายที่ได้ไปโรงแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้า (Cell House) ในกระบวนการทำสารละลายให้บริสุทธิ์ทำโดยการเติมผงสังกะสี (Zinc Dust) ซึ่งจะสามารถกำจัดทองแดงอิออน (Cu Ion) แคดเมียมอิออน (Cd Ion) โคบอลต์อิออน (Co Ion) นิเกิลอิออน (Ni Ion) แอนติโมนีอิออน (Sb Ion) และเจอร์มาเนียมอิออน (Ge Ion) ซึ่งเป็นธาตุที่มีค่า Standard Reduction Potential (E^0) สูงกว่า Zn โดยที่ Zn จะให้อิเลคตรอน (Electron) ทำให้โลหะในกลุ่มนี้ตกตะกอนแยกตัวออก กระบวนการทำสารละลายให้บริสุทธิ์มี 2 ขั้นตอนคือ กระบวนการทำสารละลายบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cold Purification) และกระบวนการทำสารละลายบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิสูง (Hot Purification)

ก) กระบวนการทำสารละลายบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cold Purification)

จุดประสงค์เพื่อกำจัดแคดเมียมและทองแดงออกจากสารละลายสังกะสี โดยการเติมผงสังกะสีลงไปในสารละลายที่อุณหภูมิ 60-65 °ซ เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ทองแดงอิออนและแคดเมียมอิออน ฟอร์มตัวเป็นโลหะเกาะบนผิวสังกะสี จากนั้นจึงกรองแยกเอาตะกอนและสารละลายออกจากกัน สารละลายใสที่ได้จะส่งไปยังขั้นตอน Hot Purification ต่อไป

ข) กระบวนการทำสารละลายบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิสูง (Hot Purification)

จุดประสงค์เพื่อกำจัดโคบอลต์ นิเกิล แอนติโมนี และเจอร์มาเนียม ออกจากสารละลายโดยการเติมผงสังกะสี สารละลายของทองแดง ($CuSO_4$ Solution) แอนติโมนีไตรออกไซด์ (Sb_2O_3) และสารประกอบของตะกั่ว ($3PbO.PbSO_4$) ทำการควบคุมที่อุณหภูมิ 90 – 95 °ซ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นจึงกรองแยกเอาตะกอนและสารละลายออกจากกัน สารละลายใสที่ได้จะส่งไปยังกระบวนการแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้าต่อไป

2.1.4 การแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้า (Zinc Electrolysis)

ในโรงเซลล์ไฟฟ้า สังกะสีจะถูกแยกออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้า บ่อเซลล์ไฟฟ้าแต่ละเซลล์ประกอบด้วยขั้วบวก (Anode) ซึ่งเป็นโลหะผสมของตะกั่วและเงิน (Pb-Ag) และขั้วลบ (Cathode) ซึ่งเป็นโลหะอลูมิเนียม (Al) วางสลับกัน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการแยกสังกะสีเท่ากับ 450-490 $A/ม^2$ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.34-3.44 โวลต์

การแยกสังกะสีด้วยไฟฟ้าทำโดยนำสารละลายบริสุทธิ์จากกระบวน Hot Purification ไปลดอุณหภูมิด้วย Cooling Tower ก่อนแล้วจึงนำไปผสมกับสารละลายอิเลคโตรไลต์ที่ออกจากบ่อเซลล์เพื่อปรับความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายให้เท่ากับ 60-65 กรัมต่อลิตร จากนั้นจะถูกส่งไปลดอุณหภูมิของสารละลายอีกครั้งที่ Cooling Tower ก่อนที่จะส่งกลับเข้าไปในบ่อเซลล์เพื่อแยกสังกะสีโดยกระบวนการ Electrowinning สารละลายอิเลคโตรไลต์จะไหลวนเวียนอยู่เช่นนี้และมีบางส่วนส่งไปยังถังสำหรับใช้ผสมกับกรดเข้มข้นเพื่อใช้ในการสกัดสังกะสีแคลไซน์ อุณหภูมิของสารละลายในเซลล์ประมาณ 35–40 °ซ กระแสไฟฟ้าจะผ่านจากขั้วบวกเข้าสู่สารละลายไปยังขั้วลบ โลหะสังกะสีจะจับเกาะที่แผ่น Cathode และเกิดกาซออกซิเจนที่แผ่น Anode เวลาที่ใช้ในการทำ Zn Electrowinning รอบละ 36 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้มีโลหะสังกะสีจับเต็มแผ่นขั้วลบ จากนั้นจะใช้เครนยกแผ่นขึ้นจากเซลล์ และนำไปลอกสังกะสีออกด้วยเครื่องลอก (Stripping Machine) โลหะสังกะสีที่ได้จะถูกนำไปหลอมและหล่อเป็นก้อนสังกะสี (Zinc Ingot) ส่วนแผ่นขั้วลบที่ผ่าน

การลอกโลหะแล้วจะนำไปเข้าเครื่องขัดทำความสะอาดและตรวจข้อบกพร่องก่อนนำกลับไปใช้โรงเซลล์ไฟฟ้าต่อไป

2.1.5 การหลอมและการหล่อโลหะ (Melting and Casting)

แผ่นโลหะสังกะสี (Zinc Cathode) ที่ได้จากการแยกสังกะสีในสารละลายด้วยไฟฟ้าจะนำไปหลอมในเตาไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ (Inductive Furnace) ที่มีอัตราการหลอมโลหะ 15 ตันต่อชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมโลหะเท่ากับ 460-490 °ซ ในการหลอมโลหะสังกะสีจะเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium Chloride, NH_4Cl) เพื่อทำให้น้ำโลหะบริเวณผิวหน้ากลายเป็นขี้เถ้าสังกะสี (Dross) ปกคลุมผิวหน้าไว้ น้ำโลหะสังกะสีจะไหลออกจากเตาหลอมผ่านรางเหล็กเพื่อเข้าสู่เบ้าเพื่อหล่อให้เป็นก้อนที่มีน้ำหนักก้อนละ 25 กิโลกรัม จากนั้นนำมาจัดเรียงเป็นมัดให้มีน้ำหนักรวมเป็น 1 ตันต่อมัด โดยใช้ Zinc Ingot จำนวน 40 ก้อนต่อมัด ได้มีการนำ Zinc Ingot บางส่วนไปผลิตเป็นผงสังกะสี (Zinc Dust) เพื่อใช้ในกระบวนการทำสารละลายให้บริสุทธิ์ Zinc Ingot ส่วนที่เหลือจะถูกส่งเข้าโรงเก็บโลหะสังกะสี เพื่อรอการจำหน่ายต่อไป น้ำโลหะสังกะสีหลอมเหลวจากเตาหลอมส่วนหนึ่งจะนำไปผลิตเป็นโลหะสังกะสีผสม (Zinc Alloy)

2.1.6 การผลิตโลหะสังกะสีผสม (Zinc Alloy)

ชนิดของโลหะสังกะสีผสมที่ผลิตคือ Die Casting Alloy No.3 ที่มีชื่อการค้าคือ ZAMAK-3 ซึ่งเป็นสูตรที่พัฒนาโดย New Jersey Zinc ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1988 วิธีการผลิตคือ นำน้ำโลหะสังกะสี (Zn) มาผสมกับน้ำโลหะอลูมิเนียม (Al) และแท่งโลหะแมกนีเซียม (Mg) โดยมีอัตราส่วนผสมเป็น Al 3.9-4.3% และ Mg 0.02-0.5% จากนั้นนำน้ำโลหะสังกะสีผสมไปหล่อเป็นก้อนน้ำหนักก้อนละ 25 กิโลกรัม โลหะสังกะสีผสมนี้มีคุณสมบัติเด่นคือ จุดหลอมเหลวต่ำ มีความแข็งแกร่งมากกว่าโลหะสังกะสีล้วน เมื่อนำไปชุบชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานมีผิวเรียบ สวย เป็นเงางาม เหมาะสำหรับงานชุบที่ต้องการความละเอียดสูง

2.2 ของเสียอันตราย (Hazardous Waste)

ของเสียที่เป็นอันตราย ตามคำจำกัดความของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ หมายถึงของเสียหรือสิ่งเจือปนด้วยของเสียซึ่งมีความเข้มข้น หรือมีคุณสมบัติด้านกายภาพ เคมี หรืออื่นๆ ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการตาย หรือเจ็บป่วยทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ ตลอดจนทำให้เกิดหรือมีแนวโน้มจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้มีการจัดการในการบำบัด เก็บกัก ขนส่ง และกำจัดที่เหมาะสม (เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, 2536)

2.2.1 การจำแนกประเภทของเสียอันตราย

ตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ได้ทำบัญชีลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่จัดเป็นของเสียอันตรายไว้ 3 หมวดคือ

<u>หมวดที่ 1</u> สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทสารไวไฟ (Ignitable Substance) สารกัดกร่อน (Corrosive Substance) สารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive Substance) สารพิษ (Toxic Substance) และสารที่ถูกชะล้างได้ (Leachable Substance)

สารที่ถูกชะล้างได้ (Leachable Substance) เป็นสารซึ่งเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธีการสกัดสาร (Leachate Extractive Procedure) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดตามหลักเกณฑ์ที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด มีปริมาณโลหะหนักหรือวัตถุมีพิษในน้ำสกัดเท่ากับหรือมากกว่าค่าใดค่าหนึ่งดังต่อไปนี้

อาร์เซนิก (ทั้งหมด) (Arsenic (total))	5.0	มก./ล
แบเรียม (Barium)	100.0	มก./ล
เบนซีน (Benzene)	0.5	มก./ล
แคดเมียม (ทั้งหมด) (Cadmium (total))	1.0	มก./ล
คาร์บอนเตทตราคลอไรด์ (Carbon tetrachloride)	0.5	มก./ล
คลอเดน (Chlordane)	0.03	มก./ล
คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene)	100.0	มก./ล
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	6.0	มก./ล
โครเมียม (ทั้งหมด) (Chromium (total))	5.0	มก./ล
ออร์โธ-ครีซอล (ortho-Cresol)	200.0	มก./ล
เมทา-ครีซอล (meta-Cresol)	200.0	มก./ล
พารา-ครีซอล (para-Cresol)	200.0	มก./ล
ครีซอล (ทั้งหมด) (Cresol (total))	200.0	มก./ล

2-4 ดี (2-4 D)	10.0	มก./ล
1,4-ไดคลอโรเบนซีน (1,4-Dichlorobenzene)	7.5	มก./ล
1,2-ไดคลอโรเบนซีน (1,2-Dichlorobenzene)	0.5	มก./ล
1,1-ไดคลอโรเบนซีน (1,1-Dichlorobenzene)	0.7	มก./ล
เอลดริน (Endrin)	0.02	มก./ล
เฮปตาคลอร์ (Heptachlor and its epoxide)	0.008	มก./ล
เฮกซาคลอโรเบนซีน (Hexachlorobenzene)	0.13	มก./ล
เฮกซาคลอโรบิวตาอีน (Hexachlorobutadiene)	0.5	มก./ล
เฮกซาคลอโรอีเธน (Hexachloroethane)	3.0	มก./ล
ตะกั่ว (ทั้งหมด) (Lead (total))	5.0	มก./ล
ลินเดน (Lindane)	0.4	มก./ล
ปรอท (ทั้งหมด) (Mercury (total))	0.2	มก./ล
เมธอกซิคลอร์ (Methoxychlor)	10.0	มก./ล
เมธิล เอธิล คีโตน (Methyl ethyl ketone)	200.0	มก./ล
ไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene)	2.0	มก./ล
2,4-ไนโตรโทลูอีน (2,4-Nitrotoluene)	0.13	มก./ล
เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	100.0	มก./ล
ไพริดีน (Pyridine)	5.0	มก./ล
ซีลีเนียม (Selenium)	1.0	มก./ล
เงิน (Silver)	5.0	มก./ล
เตทตราคลอโรเอทธิลีน (Tetrachloroethlene)	0.7	มก./ล
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	0.5	มก./ล
ไตรคลอโรเอทธิลีน (Trichloroethylene)	0.5	มก./ล
2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,5-Trichlorophenol)	400.0	มก./ล
2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,6-Trichlorophenol)	2.0	มก./ล
2,4,5-ทีพี (ซิลเว็ก) (2,4,5-TP (Silvex))	1.0	มก./ล
ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl chloride)	0.2	มก./ล

หมวดที่ 2 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทของเสียอันตรายจากแหล่งกำเนิดไม่จำเพาะประเภทหรือไม่จำเพาะชนิด (Non-specific Sources) และจากแหล่งกำเนิดจำเพาะประเภทหรือจำเพาะชนิด (Specific Sources)

หมวดที่ 3 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะและคุณสมบัติเป็นเคมีภัณฑ์ที่ไม่ใช้แล้ว หรือเสื่อมสภาพ (Discard) หรือไม่ได้คุณภาพตามกำหนด (Off-Specification) หรือเป็นเศษเคมีภัณฑ์ในภาชนะบรรจุ หรือเป็นเศษวัสดุใดๆ ที่ใช้ทำความสะอาดและถูกปนเปื้อนด้วยเคมีภัณฑ์ที่หกหล่น (Container and Spill Residues)

กากซิลิโคจาโรไซท์มีส่วนประกอบที่เป็นโลหะหนักที่สำคัญคือ สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีส เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธีการสกัดสาร (Leachate Extractive Procedure) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดตามหลักเกณฑ์ที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด ถูกจัดว่าเป็นของเสียอันตรายประเภทสารที่ถูกชะล้างได้เนื่องจากมีปริมาณโลหะหนักคือแคดเมียมมากกว่า 1 มก./ล

2.2.2 ความเป็นพิษของโลหะหนักบางชนิด

ก) สังกะสี (Zn) สารประกอบในลักษณะเกลือไม่เป็นพิษมาก แต่สังกะสีคลอไรด์ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและระบบทางเดินอาหาร สังกะสีออกไซด์ทำให้มีอาการไข้สูง มึนงง เวียนศรีษะ คอแห้ง และปวดหัว

ข) ตะกั่ว (Pb) ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้โดยง่าย โดยเฉพาะกับเด็ก เนื่องจากเด็กมักชอบกลืนกินสารเคมีซึ่งมิใช่อาหารเข้าไป สารตะกั่วนี้สามารถรบกวนการสร้างเม็ดเลือดแดง ทำลายเยื่อหุ้มสมอง ระบบประสาทส่วนกลางสั่งการบกพร่องอาจถึงขั้นเสียสติ ระบบสืบพันธุ์ถูกรบกวน มีโอกาสที่ทำให้เด็กที่อยู่ในครรภ์ตายก่อนเกิด อาการทั่วไปจะเบื่ออาหาร ปากมีรสหวานของโลหะ อาการที่แสดงถึงความเป็นพิษของสารตะกั่วในระยะยาวได้แก่ อาการของโรคไตอักเสบ

ค) แคดเมียม (Cd) แคดเมียมเข้าสู่ร่างกายโดยการกลืนกินหรือซึมเข้าทางบาดแผลตามร่างกาย พิษของแคดเมียมจะเป็นแบบเฉียบพลัน ปวดหัวมึนงงอย่างรุนแรง ระบบทางเดินอาหารถูกรบกวน หายใจขัด เจ็บหน้าอก ไอ และมีไข้ เหงื่อออกมาก ปอดอักเสบ

ง) แมงกานีส (Mn) มีพิษมาก ทำให้ซึม ง่วงนอน ผิวหนังระคายเคือง ปอดและหลอดลมอักเสบ ถ้าได้รับนานๆ จะมีอาการเรื้อรัง ประสาทถูกรบกวน สับสน ไม่อยากพูดจา อยากเก็บตัวอยู่เงียบๆ มีอาการทางประสาทอย่างรุนแรง

2.3 การทำให้เป็นก้อนและการทำเสถียรของเสียที่เป็นอันตราย

(Solidification and Stabilization of Hazardous Waste)

การทำเสถียร (Stabilization) หมายถึง กระบวนการในการทำลายฤทธิ์ หรือลดความเป็นพิษของของเสียที่เป็นอันตราย โดยทำให้ของเสียที่เป็นอันตรายนั้นมีการเปลี่ยนรูปทางเคมีเพื่อให้มีสมบัติเป็นสารเฉื่อย (Inert Substance) มากขึ้น ทั้งนี้อาจอยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ละลาย (Insoluble Substance) ความเป็นพิษจะถูกจับยึดไว้ในโครงสร้างของผลึกที่เสถียร

การทำให้เป็นก้อน (Solidification) เป็นกระบวนการซึ่งนำวัสดุมาเติมลงในของเสีย ซึ่งของเสียนั้นอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือตะกอน แล้วทำให้กากของเสียนั้นเป็นก้อนแข็ง มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น สามารถเคลื่อนย้ายขนส่งได้สะดวก ในระหว่างการทำให้เป็นก้อนมักเกิดการทำเสถียรพร้อมกันเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น สารมลพิษจะถูกทำให้เสถียรและถูกจับดักไว้ภายในโครงสร้างโมเลกุลของก้อนมวลที่แข็งตัว

วัตถุประสงค์ของการทำให้เป็นก้อนคือลดความเป็นพิษ หรือเก็บกักความเป็นพิษของของเสียที่เป็นอันตราย เพื่อป้องกันไม่ให้ความเป็นพิษแพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อม โดยได้มีการตั้งข้อกำหนดที่สำคัญไว้ 4 ประการ ดังนี้

ก) ทำให้ของเสียเป็นของแข็ง

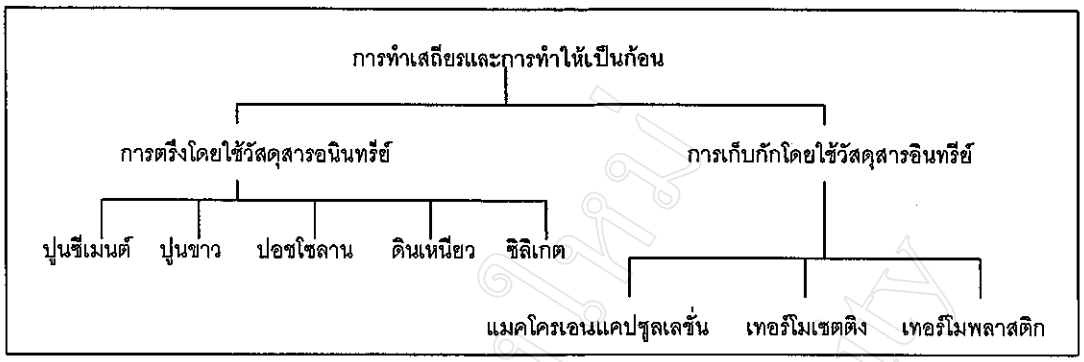
ข) เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย ขนส่ง

ค) ลดพื้นที่ผิวของของเสีย ซึ่งจะเป็นการลดการแพร่กระจายของสารพิษ

ง) ลดอัตราการละลายของสารพิษ เมื่อสัมผัสกับสารละลาย

ในระยะแรกการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนใช้สำหรับของเสียที่เป็นสารกัมมันตภาพรังสี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของของเสียให้ดีขึ้น เพื่อที่จะสามารถขนย้ายไปยังสถานที่กำจัดได้สะดวก วัสดุสารที่ได้จากกระบวนการจะต้องมีสมบัติดังนี้คือ บรรจุของเสียให้อยู่ในรูปที่ไม่สามารถถูกชะละลาย ไม่สามารถถูกย่อยสลาย ลดศักยภาพของการแผ่รังสี และสามารถผลิตได้ง่ายในราคาถูก การทำของเสียจากอุตสาหกรรมให้เป็นก้อนแตกต่างจากการทำสารกัมมันตภาพรังสีให้เป็นก้อน ตรงที่ของเสียจากอุตสาหกรรมมีปริมาณมากกว่าและมีความเป็นพิษน้อยกว่าของเสียกัมมันตภาพรังสี

Poon et al. (1983) กล่าวว่าการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนสามารถแบ่งได้อย่างกว้างๆ คือ การตรึงโดยใช้วัสดุสารอนินทรีย์ (Inorganic Fixation) ซึ่งเหมาะสำหรับของเสียอนินทรีย์โดยเฉพาะพวกประจุบวก และการเก็บกักโดยใช้วัสดุสารอินทรีย์ (Organic Encapsulation) ซึ่งเหมาะสมสำหรับของเสียอินทรีย์และของเสียอนินทรีย์ประจุลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูป 2.2 การแบ่งกระบวนการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อน
ที่มา : Poon et al., 1983

Shin et al. (1988) กล่าวถึงกระบวนการทำให้เป็นก้อน ซึ่งมีการใช้วิธีการต่างๆ 7 วิธี ดังนี้

ก) วิธีการใช้ปูนซีเมนต์ (Cement-Based Techniques)

ข) วิธีการใช้ปูนขาว (Lime-Based Techniques)

ค) วิธีเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Techniques) โดยใช้วัสดุประเภทบิทูเมน พาราฟิน หรือโพลีเอธทีลีน

ง) วิธีเทอร์โมเซตติง (Thermosetting Techniques) โดยใช้วัสดุประเภทออร์แกนิกโพลีเมอร์

จ) วิธีเอนแคปซูลเลชั่น (Encapsulation Techniques)

ฉ) วิธีการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งตัวเหมือนซีเมนต์ (Self-Cementing Techniques)

ช) วิธีการหลอมให้เป็นแก้ว (Glassification)

วิธีการใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว เป็นวิธีที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย มีความเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับวิธีที่ ค ถึง ช จะมีราคาสูง มักใช้กับของเสียอันตรายที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น ของเสียกัมมันตภาพรังสี หรือของเสียที่มีสารอินทรีย์เจือปนอยู่ในปริมาณสูงๆ

ของเสียที่เป็นตะกอนโลหะหนัก สามารถกำจัดได้หลายวิธี เช่น วิธีการใช้ปูนซีเมนต์ วิธีการใช้ปูนขาว วิธีเทอร์โมพลาสติก วิธีเอนแคปซูลเลชั่น หรือวิธีการหลอมให้เป็นแก้ว

Shucrow et al. (1982) อ้างถึงใน Rijal (1990) ได้แสดงรายละเอียดของกระบวนการทำให้แข็งตัวเป็นก้อน และสรุปข้อดีและข้อเสียของกระบวนต่างๆ ทั้ง 7 วิธี แสดงดังตารางที่ 2.1 สำหรับการเลือกใช้วิธีบำบัดของเสียนั้นควรเลือกให้เหมาะสมกับประเภทของของเสียนั้นๆ

ตาราง 2.1 : รายละเอียดของกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยวิธีการต่างๆ (Shucrow. et al., 1982)

วิธีการทำให้เป็นก้อน	กระบวนการ	รายละเอียด	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. วิธีการใช้ซีเมนต์ (Cement-based)	Chemical Fixation/ Solidification	ผสมซีเมนต์ลงในของเสีย และ/หรือ เติมส่วนผสมอื่นๆ หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้แข็งตัว	แห้งหรือเปียก (โดยทั่วไปเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	- วัสดุที่ใช้ราคาถูก - มีความยืดหยุ่นต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี - กำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดีมาก - เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาอย่างดี	- ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ส่วนผสมของซีเมนต์ และกากของเสียที่ไม่ได้ห่อหุ้มจะสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะละลายได้ภายใต้สภาวะที่มี pH ต่ำ - เพิ่มน้ำหนักและปริมาณของเสียทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งและฝังกลบเพิ่มขึ้น
2. วิธีการใช้ปอซโซลานิค (Pozzolanic)	Chemical Fixation/ Solidification	ทำการผสมกากของเสียกับปูนขาว และวัสดุที่เป็นปอซโซลานพร้อมกับเติมน้ำ ทิ้งให้แข็งตัว	แห้งหรือเปียก (เหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	- วัสดุที่ใช้ราคาถูก - การใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นของเสียอันตรายมาเป็นส่วนผสม เป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิด โดยกระบวนการเดียวกัน - เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาอย่างดีแล้ว	- เหมือนกับวิธีการใช้ซีเมนต์
3. วิธีการใช้ความร้อน (Thermoplastic)	Physical Fixation	นำของเสียมาทำให้แห้งและให้ความร้อน จากนั้นทำให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกร้อน (เช่น Bitumen, Paraffin หรือ Polyethylene) ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงจะได้ก้อนแข็ง	แบบแห้ง (เหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	- สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีได้เป็นอย่างดี - สารละลายที่ชะล้างมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก	- ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความเชี่ยวชาญ - ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ - ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวกStrong Oxidants และ Dehydrated Salts

ตาราง 2.1 : (ต่อ)

วิธีการทำให้เป็นก้อน	กระบวนการ	รายละเอียด	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
4. วิธีการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งตัวเหมือนซีเมนต์ (Self-Cementing Techniques)	Chemical Fixation/ Solidification	สารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน เช่น แคลเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลไฟด์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม สามารถนำมาผสมกับกากของเสียอันตราย ทำให้เป็นก้อนแข็งได้ มีความสะดวกในการขนส่ง และมีอัตราซึมน้ำต่ำ	แห้งหรือเปียก	- ใช้สารเสริมประสิทธิภาพ (Additive) น้อย - ส่วนผสมของซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก	- สารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการห่อหุ้ม สามารถถูกย่อยสลายและถูกชะล้างได้ ภายใต้สภาวะที่มี pH ต่ำ
5. วิธีการหลอมให้เป็นแก้ว (Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics)	Physical Fixation	กากของเสียที่เป็นอันตรายสูงเช่น กากสารกัมมันตภาพรังสี จะนำมาทำการผสมกับทราย แล้วหลอมให้เปลี่ยนเป็นแร่ซิลิเกตสังเคราะห์ แก้วหรือผลึกของซิลิเกตจะป้องกันการชะละลายได้เป็นอย่างดี กากของเสียที่ทำให้แข็งตัวโดยวิธีนี้จัดว่าเป็นวัสดุที่ปลอดภัย สามารถนำไปทิ้งโดยไม่ต้องห่อหุ้มอีกต่อไป	แบบแห้ง	- ของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก้วจะถูกชะล้างได้น้อยมาก - การบรรจุหรือห่อหุ้มอยู่ในเกณฑ์ดี	- อุณหภูมิสูงอาจทำให้ของเสียอื่นระเหยออกมาก่อนที่จะถูกตรึงไว้ - ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับการให้ความร้อน - อุปกรณ์มีราคาแพง และต้องการผู้ชำนาญงานเฉพาะ - ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการกำจัดของเสียทุกชนิด ยกเว้นสารกัมมันตภาพรังสี และสารที่มีพิษมากๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

ตาราง 2.1 : (ต่อ)

วิธีการทำให้เป็นก้อน	กระบวนการ	รายละเอียด	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
6. วิธีการใช้ Organic Polymer	Physical Fixation	ทำการผสมกากของเสียกับ Polymer ก่อน จากนั้นให้เติมสารเร่งปฏิกิริยา โดยให้กระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งส่วนผสมก่อนที่จะแข็งตัว กากของเสียจะถูกกักไว้ภายในมวลอย่างหลวมๆ คล้ายฟองน้ำ	แบบแห้งหรือเปียก (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	- ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิด Polymer's matrix - ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ ทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง	- ของเสียจะถูกยึดไว้ใน Polymer อย่างหลวมๆ - สารที่มี pH ต่ำ จะทำให้โลหะละลายออกมาได้มากขึ้น - การย่อยสลายทางชีวภาพของสาร Polymer บางชนิด ทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ
7. วิธีการใช้ Surface Encapsulation	Chemical Containment	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันแน่น จากนั้นจะใช้วัสดุเฉื่อยหุ้มเคลือบผิวด้านนอกของก้อนของเสีย เช่น Polyethylene หรือ Organic Resin	แห้งหรือเปียก	- ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี - ไม่มีการชะล้างของของเสียออกมา เมื่อสารที่หุ้มห่ออยู่ยังไม่ถูกทำลาย - ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีอื่น	- การชะล้างของของเสียจะเกิดขึ้นหากสารที่หุ้มถูกทำลาย - ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่ ต้องกำจัดของเสียจำนวนมากๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

การทำลายฤทธิ์ของเสียที่เป็นอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อนนั้น เป็นวิธีการบำบัดของเสียที่เป็นอันตรายเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบแบบ Secure Landfill ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ได้มีการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนดังนี้

ก) สามารถรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-1633 และ ASTM D-2166 ได้ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบ (Secure Landfill) ได้อย่างปลอดภัย

ข) มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

ค) มีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachate) เป็นไปตามเกณฑ์ในการสกัดสาร (Leachate Extraction Procedure) โดยวิธีการสกัดสารให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

- บดตัวอย่างให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดรูเปิด 9.5 มิลลิเมตร
- นำตัวอย่างที่ร่อนผ่านตะแกรง 10 กรัม เติมด้วยน้ำสกัดหรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าพีเอชของน้ำสกัดมีค่าคงที่เท่ากับ 5 โดยเติมน้ำสกัดในปริมาตร 200 มิลลิลิตร
- เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25°ซ เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
- กรองสารละลายจากการสกัดด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
- นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้ว ไปทำการวิเคราะห์หาค่าสารอันตรายต่างๆ โดยใช้วิธีมาตรฐานของ US Environmental Protection Agency (US EPA SW 846)

2.4 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุประสาน

2.4.1 ปูนขาว (Quick Lime)

ปูนขาวเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาหินปูน (Lime Stone) จนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์แยกตัวออกมา ประเภทของปูนขาวขึ้นกับส่วนประกอบของหินปูนและขั้นตอนการเผา ถ้าหินปูนถูกเผาอย่างสมบูรณ์ ปูนขาวที่ได้เป็นพวกปูนขาวดิบ (Quick Lime) แต่ถ้าได้รับความชื้น องค์ประกอบออกไซด์จะรวมตัวกับน้ำกลายเป็นรูปของไฮดรอกไซด์ ซึ่งเรียกว่า ปูนขาวสุก (Hydrated Lime)

ปูนขาวเมื่อรวมตัวกับน้ำจะทำให้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) กลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และเมื่อเข้าทำปฏิกิริยากับกากซิลิโคจาโรไซท์ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จะเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต ($3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$) ดังสมการที่ 2.12-2.13 ซึ่งจะทำให้ก้อนซิลิโคจาโรไซท์มีความแข็ง นอกจากนี้สารประกอบพวกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรตยังมีความสามารถในการดูดซับ (Adsorption) โลหะหนักอื่นๆ ไว้เป็นอย่างดี

$$3\ Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O \qquad (2.12)$$

$$3\ Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \qquad (2.13)$$

2.4.2 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์ที่กล่าวถึงนี้ หมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเมื่อผสมกับน้ำแล้วจะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ ตามมาตรฐานทั่วไป ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ

ประเภทหนึ่ง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับใช้ในงานก่อสร้าง หรืออุตสาหกรรมก่อสร้างที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว ตราเพชร

ประเภทสอง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) ใช้ในงานก่อสร้างหรืออุตสาหกรรมก่อสร้างใดๆ ที่เกิดความร้อน และทนซัลเฟตได้ปานกลาง ซึ่งปัจจุบันไม่มีผลิตในประเทศไทย

ประเภทสาม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (High-Early-Strength Portland Cement) จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงในช่วงแรก เพราะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานเร็วหรือถอดไม้แบบในเวลาอันสั้น ได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดง ตราสามเพชร

ประเภทสี่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low-Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำที่สุด ใช้ในงานคอนกรีตหลา (Mass Concreat) เช่น การสร้างเขื่อน ซึ่งเป็นโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่เกิดความร้อนสะสมมาก ในประเทศไทยไม่มีการผลิตปูนประเภทนี้

ประเภทห้า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ทนซัลเฟตได้สูง ใช้สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในที่ที่มีการกระทำของซัลเฟตอย่างรุนแรงเช่น ในน้ำหรือดินที่ค่าความเป็นด่างสูง มีระยะเวลาในการแข็งตัวช้ากว่าประเภทหนึ่ง ได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราฉลาม และตราช้างฟ้า

องค์ประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงดังตารางที่ 2.2

ตาราง 2.2. องค์ประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบ	ร้อยละ
1. ออกไซด์ของธาตุต่างๆ	
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	60 – 67
ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2)	17 – 25
อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3)	3 – 8
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	0.5 – 6.0
2. องค์ประกอบที่อยู่ในรูปสารประกอบ	
ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO.SiO_2$)	49
ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$)	25
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3$)	12
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$)	8

ที่มา : วินิต ช่อวิเชียร 2529 และ ชัชวาล เศรษฐบุตร 2540

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำเรียกว่า ซีเมนต์เพสท์ (Cement Paste) ปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนกับน้ำเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration) แสดงดังสมการของที่ 2.14 – 2.17 ซึ่งเป็นผลให้เกิดความเหนียว และจับตัวกันแน่นเป็นก้อนแข็ง

$$2\,(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (2.14)$$

$$2\,(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2.15)$$

$$2\,(3CaO.Al_2O_3) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (2.16)$$

$$2\,(2CaO.Al_2O_3) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2\,Al_2O_3.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (2.17)$$

ความเป็นด่างที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับซิลิกาออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมินาไฮเดรต ดังสมการที่ 2.12 – 2.13 ต่อไป

สารละลายซัลเฟตของด่างชนิดต่างๆ เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โปแตสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) แอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$) สามารถทำลายเนื้อซีเมนต์ได้ค่อนข้างรุนแรง โดยจะทำปฏิกิริยากับไฮเดรตของแคลเซียมอลูมินา ทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ปริมาตรของวัสดุสารจะเพิ่มขึ้นเกิดการขยายตัว ทำให้ก้อนซีเมนต์แตกสลายได้

2.4.3 หินปูน (Lime Stone)

หินปูน ($CaCO_3$) เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดจะเกิดเป็นแคลเซียมออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแคลเซียมออกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมินาไฮเดรตได้ดังสมการที่ 2.12–2.13

2.4.4 ขี้เถ้าลอย (Fly Ash)

ขี้เถ้าลอย (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash) ในที่นี้จะหมายถึงขี้เถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินในโรงงาน โรงไฟฟ้าถ่านหิน เถ้าลอยนี้จะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล มีสีเทา เทาดำ หรือน้ำตาล รูปร่างส่วนใหญ่มีลักษณะค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบา ลอยน้ำได้หรืออาจพบในลักษณะที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ขี้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) มีองค์ประกอบดังตารางที่ 2.3 โดยมีส่วนประกอบหลักเป็นสารประกอบออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสกับน้ำภายใต้อุณหภูมิปรกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious) โดยที่คุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของขี้เถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแต่ละแหล่งที่เผาถ่านหิน

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีขี้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะมีปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมอลูมินาไฮเดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ดังสมการที่ 2.14 – 2.17 หลังจากนั้นสารปอซโซลานในที่นี้ก็คือเถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์

จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ดังสมการที่ 2.12 –2.13 แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ในงานที่เป็นคอนกรีตหลาเมื่อใส่เถ้าลอยลงไปปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะทำให้คอนกรีตสามารถระบายความร้อนได้ทัน

ตาราง 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์จากแหล่งต่างๆ

ขี้เถ้าลอย จากแหล่ง	องค์ประกอบ (ร้อยละ)							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
แม่เมาะ	46.25	26.43	10.71	7.61	2.21	1.11	3.07	1.85
ระยอง	45.02	36.21	4.09	3.64	0.54	0.44	0.31	0.48
สมุทรสาคร	43.092	36.62	3.97	3.05	0.55	0.38	0.44	0.64
กาญจนบุรี	47.39	22.73	6.29	8.36	2.64	0.63	2.95	3.38
ต่างประเทศ	49.04	37.91	2.75	1.03	0.39	0.38	0.52	0.18

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 2542

2.4.5 ขี้เถ้าลิกไนต์ (Lignite Ash)

ขี้เถ้าลิกไนต์ (Lignite Ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงาน โรงไฟฟ้าถ่านหิน โดยเป็นส่วนของถ่านหินที่เหลือจากการเผาไหม้ในเตา ทั้งนี้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินา

2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

Bishop (1988) ได้ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 2 โดยทำการสกัด 15 ครั้ง สามารถหาความจุบัฟเฟอร์ (ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะละลายออกมา) ของของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนได้ 18.3 meq/g และจากการศึกษาการชะละลายของโลหะหนัก 3 ชนิดคือ แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว เพื่อศึกษากลไกการยึดจับของโลหะหนักกับซีเมนต์ สรุปได้ว่าแคดเมียมจะอยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์

ซึ่งแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนหรือเกาะติดกับผนังรูพรุนในก้อนซีเมนต์ที่แข็งตัว สำหรับโครเมียมและตะกั่ว จะทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสท์เกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนกับซิลิกา

Fuessle และ Taylor (1994) ได้ศึกษาการทำเสถียรฝุ่นจากเตาหลอมที่ใช้ไฟฟ้าอาร์คโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และส่วนผสมอื่นได้แก่ เถ้าลอยลิกไนต์และซิลิกาฟูม (เป็นซิลิการูปแบบหนึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาว) เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเติมเถ้าลอยลิกไนต์และซิลิกาฟูม โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์ต่อวัสดุประสานทั้งหมดเท่ากับ 0.30 และอัตราส่วนซิลิกาฟูมต่อวัสดุประสานทั้งหมดเท่ากับ 0.15 ศึกษาที่อัตราส่วนผสมของวัสดุประสานต่อกากของเสียเท่ากับ 0.12 และ 0.20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 60 และ 335 วัน ได้มีการทดสอบความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดตามวิธี TCLP (U.S. Environmental Protection Agency Toxicity Characteristic Leaching Procedure) ผลการทดสอบพบว่า ที่ระยะเวลาการบ่ม 60 วัน การใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน จะให้ประสิทธิภาพในการเสถียรกากตะกอนได้ดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม แต่ที่ระยะเวลาการบ่ม 335 วัน จะให้ผลตรงกันข้ามกัน คือการใช้ปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูมจะให้ประสิทธิภาพในการเสถียรได้ดีกว่า โดยเฉพาะค่าโครเมียม ตะกั่ว และนิเกิล

Jaggi (1988) ได้ศึกษาการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนของกากของเสียอันตราย 3 แหล่งคือ จากโรงงานชุบโลหะ โรงงานอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ (สารปนเปื้อนคือ ตะกั่วและแคดเมียม) และอุตสาหกรรมยาฆ่าแมลง (สารปนเปื้อนคือ อัลดริน) วัสดุประสานที่ใช้ศึกษามี 3 ชนิดคือ ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ และผงซีเมนต์จากเตาที่โรงงานปูนซีเมนต์ โดยมีการทดสอบคุณสมบัติของแท่งซีเมนต์คือ ค่ากำลังรับแรงอัด และการชะละลาย ผลการทดสอบพบว่าการชะละลายของโลหะหนักและอัลดรินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกากของเสียในส่วนผสม และเพิ่มอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของแท่งตัวอย่าง โลหะหนักจะถูกชะละลายได้มากขึ้นเมื่อพีเอชของน้ำสกัดมีค่าต่ำลง ส่วนอัลดรินจะถูกชะละลายได้ต่ำในสภาวะที่น้ำสกัดเป็นกรดหรือเบส แต่ถูกชะละลายได้ดีในสภาวะที่เป็นกลาง ส่วนกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้กากของเสียในปริมาณต่ำและเพิ่มระยะเวลาการบ่มตัวของแท่งซีเมนต์ให้นานขึ้น ส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมในกรณีที่ของเสียเป็นสารอนินทรีย์ (ตะกั่วและแคดเมียม) คือ 0.50 และเท่ากับ 0.35 ในกรณีที่ของเสียเป็นสารอินทรีย์ (อัลดริน) พบว่าวัสดุประสานมีผลต่อประสิทธิภาพของการทำให้เป็นก้อนของกากของเสียแต่ละชนิดไม่เหมือนกันคือ ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบเหมาะสมสำหรับบำบัดกากของเสียจากโรงงานชุบโลหะและโรงงานอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ ส่วนผงซีเมนต์

จากเตาเผาเหมาะสมกับกากของเสียจากอุตสาหกรรมยาฆ่าแมลง การทำให้เป็นก้อนโดยใช้เทคนิคซีเมนต์-ซิลิกา สำหรับของเสียประเภทสารอนินทรีย์มีประสิทธิภาพดีกว่าของเสียประเภทสารอินทรีย์

Leangon (1993) ได้ทำการวิจัยเพื่อหาวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนของกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งของโรงงานฟอกหนัง (บริษัทลีนาวน์จำกัด) และกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Chemical Precipitation ของโรงงานเซมิคอนดักเตอร์ (บริษัทไทยเอนเจอาร์จำกัด) จากนิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ จังหวัดลำพูน โดยกากตะกอนจากโรงงานฟอกหนังมีสารปนเปื้อนคือโครเมียมและสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ส่วนกากตะกอนจากโรงงานเซมิคอนดักเตอร์ประกอบด้วย ทองแดง ตะกั่ว และดีบุกเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษามี 5 ชนิดคือ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ขี้เถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และซิลิกาฟูม จากการทดสอบการทำให้เป็นก้อนโดยใช้วัสดุประสานผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของก้อนของเสียแข็งตัวหลังการบ่ม 28 วัน คือกำลังรับแรงอัด การชะละลาย และค่าใช้จ่ายในการบำบัด พบว่าวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดกากตะกอนดังกล่าวสรุปได้ดังตารางที่ 2.4 นอกจากนั้นกากตะกอนจากโรงงานทั้ง 2 ประเภทที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน สามารถพัฒนาเพื่อผลิตเป็นก้อนคอนกรีตสำหรับใช้ปูเป็นทางเดินได้

ตาราง 2.4 สัดส่วนวัสดุประสานคละที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

กากตะกอนจาก	วัสดุประสาน			อัตราส่วนกากตะกอนต่อวัสดุประสานที่มากที่สุด
	ปูนซีเมนต์	ขี้เถ้าแกลบ	เถ้าลอยลิกไนต์	
โรงงานฟอกหนัง	0.70	0.20	0.10	0.64
โรงงานเซมิคอนดักเตอร์	0.70	0.10	0.20	1.37

Chang (1989) ได้ทำการสังเคราะห์กากของเสียที่มีโลหะหนักคือโครเมียม ทองแดง และปรอทเป็นองค์ประกอบ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัด และอัตราการชะละลาย โดยวัสดุประสานที่ใช้ศึกษาคือ ปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ (อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก) พบว่ารูปแบบการยึดเหนี่ยวกันระหว่างโมเลกุลของโลหะหนักกับวัสดุประสานจะมีผลต่อความสามารถในการถูกชะละลาย โดยถ้าของเสียเป็นโครเมียม ควรใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุ

ประสาน แต่ถ้าของเสียเป็นทองแดงหรือปรอท ควรใช้ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบเป็นวัสดุประสาน เพื่อให้ได้ค่าการชะละลายของโลหะหนักมีค่าต่ำที่สุด การเพิ่มสัดส่วนของกากของเสียต่อวัสดุประสาน จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง และค่าการถูกชะละลายจะเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของกากของเสียต่อวัสดุประสานที่ทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ 0.5 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ และเท่ากับ 0.2 เมื่อมีการใช้ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบเป็นวัสดุประสาน

Rijal (1990) ได้ทำการศึกษาการทำให้เป็นก้อนของตะกอนน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่ผ่านกระบวนการ Chemical Precipitation ซึ่งจะได้กากตะกอนไฮดรอกไซด์ของโครเมียม และสังกะสี วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ (อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก) โดยมีการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการชะละลายของโลหะหนัก ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้วัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ จะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบในทุกกรณี การเพิ่มปริมาณกากตะกอนน้ำเสียในส่วนผสมจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง และทำให้ความสามารถในการชะละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มจะทำให้การชะละลายของโลหะหนักลดต่ำลง ส่วนกำลังรับแรงอัดในกรณีที่ใช้วัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์จะเพิ่มขึ้นในช่วง 3 วันแรกหลังจากนั้นจะเริ่มคงที่ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากซัลเฟตในกากตะกอน ส่วนกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาการบ่ม และจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน การทำเสถียรกากตะกอนน้ำเสียชนิดนี้โดยเทคนิคการทำให้เป็นก้อนพบว่าเหมาะสมที่สุดเมื่อมีการใช้กากตะกอนต่อวัสดุประสานในอัตราส่วน 0.5 และอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 กรณีใช้ปูนซีเมนต์ และ 0.65 สำหรับการใช้ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ

Shin et al. (1988) ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆคือ อัตราส่วนผสมของทรายต่อซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ปริมาณตะกอนเปียกที่ใช้ และปริมาณสาร Precipitator (สารเคมีที่มีสถานภาพเป็นของเหลว เติมลงไปเพื่อให้ทำปฏิกริยาและตรึงสารโลหะหนัก) ที่มีผลต่อการบำบัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะซึ่งมีสังกะสี โครเมียม และเฮกเซนเป็นองค์ประกอบ โดยเทคนิคการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ผลการวิจัยแสดงว่า เมื่อลดอัตราส่วนของทรายต่อซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ หรือปริมาณกากตะกอนของเสียที่ใช้ จะทำให้ค่าการชะละลายของโลหะหนักได้แก่ โครเมียมและสังกะสีลดลง และกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วันมีค่าเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์โดยวิธี ANOVA (เป็นวิธีวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์) พบว่าอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์มีผลอย่างสำคัญต่อการชะละลายของโครเมียม และอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์มี

ผลอย่างสำคัญต่อการชะละลายของสังกะสีและกำลังรับแรงอัด และพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดกากตะกอนแห้ง 30 กรัม คือการใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และปริมาณสาร Precipitator เท่ากับ 1, 1.5 และ 1.075 ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ค่าการชะละลายของโครเมียม และสังกะสี ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ US Environmental Protection Agency (US EPA) และมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

Shively et al. (1986) ได้ทำการทดลองนำกากตะกอนโลหะหนักมาบำบัดด้วยเทคนิคการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 2 เป็นวัสดุประสาน มีการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักและกำลังรับแรงอัด กากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการทดลองได้มีการสังเคราะห์ขึ้นโดยโลหะหนักที่ใช้ในการทดลองได้แก่ อาร์เซนิค แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสมรวมกัน ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน พบว่าก้อนตัวอย่างที่เกิดจากการนำกากตะกอนที่มีอาร์เซนิคหรือแคดเมียมเป็นองค์ประกอบมาทำให้เป็นก้อนจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง แต่กากตะกอนที่ประกอบด้วยโครเมียมหรือตะกั่วไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด การทดสอบความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจากของเสียที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 5 ชนิด พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด 15 ครั้ง น้อยกว่าความเข้มข้นที่ทำนายจากความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ประมาณ 100 ถึง 10,000 เท่า และพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ US EPA (สำหรับการสกัดในครั้งแรก) ทั้งในกรณีที่ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ การละลายของโลหะหนักสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือช่วงแรกเมื่อเริ่มสกัด แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์จะทำหน้าที่ทำลายฤทธิ์ของกรดที่ใช้ในการสกัดให้เป็นกลาง ซึ่งจะทำให้ค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 10.0 และมีการละลายของสารในซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ในช่วงที่สองค่าพีเอชมีค่าลดลงเหลือน้อยกว่า 6.0 จะมีการละลายของโลหะหนักสูงสุด สำหรับในช่วงที่สาม เมื่อทำการสกัดต่อไปพีเอชยังคงน้อยกว่า 6.0 โลหะหนักที่มีความสามารถในการละลายต่ำเริ่มที่จะละลายออกมา โดยโลหะหนักที่ละลายออกมาจากการสกัดแต่ละครั้งมีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในของเสีย

Youn (1990) ได้ทำการศึกษาการทำให้เป็นก้อนของตะกอนน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี โดยใช้วัสดุประสานคือ ปูนซีเมนต์ และปูนขาวผสมขี้เถ้าแกลบ โดยได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนัก ผลการทดสอบพบว่า ความสามารถในการถูกชะละลายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนของตะกอนต่อ

วัสดุประสานและเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะเวลาการบ่มตัว พบว่าก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนขาวผสมขี้เถ้าแกลบเป็นวัสดุประสาน ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของตะกอนในส่วนผสม แต่ในกรณีที่ใช้ปูนขาวผสมขี้เถ้าแกลบเป็นวัสดุประสาน กำลังรับแรงอัดไม่เพิ่มตามระยะเวลาการบ่มตัว กล่าวคือในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นแต่ในเวลาต่อมาจะลดลง และกำลังรับแรงอัดจะสูงขึ้นตามปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายพบว่าปูนขาวและขี้เถ้าแกลบเป็นวัสดุที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ สามารถนำมาใช้ในการบำบัดกากของเสียด้วยการทำให้เป็นก้อนได้โดยจะทำให้ค่าการชะละลายของโลหะหนักต่ำ และค่ากำลังรับแรงอัดสูงพอสำหรับการนำไปฝังกลบได้

นฤมิต คินิมาน (2538) ได้ศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีซึ่งเก็บจากห้องปฏิบัติการของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยซึ่งมีโครเมียม ปรอท และเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักด้วยเทคนิคการทำให้เป็นก้อนโดยใช้วัสดุประสาน 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยลิกไนต์ โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น อัตราส่วนของเถ้าลอยลิกไนต์ในวัสดุประสาน อัตราส่วนของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน ผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่ใช้สกัด และระยะเวลาการบ่มตัวที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น ความซึมน้ำได้ การชะละลายของโลหะหนักรวมทั้งหาประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายโลหะหนักและค่าใช้จ่ายในการบำบัด จากผลการทดลองพบว่าการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก) เป็นวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน 0.25 อัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 และระยะเวลาการบ่ม 28 วัน จะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า 14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรและมีค่าความหนาแน่นมากกว่า 1.04 ตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักพบว่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (น้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่ความเข้มข้นของปรอทมีค่าสูงกว่ามาตรฐานคือมากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้พบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก) เป็นวัสดุประสานมีประสิทธิภาพการลดการถูกชะละลายของปรอท โครเมียม และเหล็ก เท่ากับ 30.7, 50 และ 90 % ตามลำดับ ส่วนการใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีประสิทธิภาพการลดการถูกชะละลายของปรอท 26.4 % โครเมียมต่ำมาก และเหล็ก 80 % เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนโลหะหนัก 1 ตัน พบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก) เป็นวัสดุ

ประสานมีค่าใช้จ่าย 3,800 บาท ส่วนการใช้ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าเท่ากับ 6,800 บาท ดังนั้นวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำลายฤทธิ์ตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีคือปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก)

รักษพล ชูชาติ (2538) ได้ศึกษาวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดในการทำเสถียรกากจาโรไซท์ซึ่งมีองค์ประกอบที่เป็นโลหะหนักคือ อาร์เซนิค แคดเมียม โครเมียม ปรอท ตะกั่ว และสังกะสีโดยการทำให้เป็นก้อน กากจาโรไซท์เป็นกากที่เกิดจากการตกตะกอนผลึกเหล็กด้วยกระบวนการจาโรไซท์ในระหว่างกระบวนการสกัดสังกะสีออกไซด์ กากจาโรไซท์ที่เกิดขึ้นมี 2 ประเภทได้แก่ กากจาโรไซท์แบบธรรมดาและกากซิลิโคจาโรไซท์ วัสดุประสานที่ใช้ศึกษามี 4 ประเภท คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมปูนขาว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกากแร่สังกะสีซิลิเกต วิธีที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการทำให้เป็นก้อนได้แก่ กำลังรับแรงอัดและความเข้มข้นของโลหะในน้ำสกัด ผลการทดสอบสัดส่วนผสมเบื้องต้นพบว่ากากจาโรไซท์ทั้ง 2 ประเภท สามารถใช้วัสดุประสานทุกชนิด ที่อัตราส่วนผสมต่ำสุดคือร้อยละ 5 สำหรับกากซิลิโคจาโรไซท์ และร้อยละ 7 สำหรับกากจาโรไซท์แบบธรรมดา ก็สามารถทำให้ทุกค่าของโลหะหนักในน้ำสกัดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นกำลังรับแรงอัดจึงเป็นค่ากำหนดที่สำคัญในการเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมต่อไป โดยวัสดุประสานที่ให้ค่ากำลังแรงอัดดีที่สุดคือปูนซีเมนต์ ผลการทดสอบสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดพบว่าอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์มีผลอย่างสำคัญต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง แต่ไม่มีผลมากนักต่อความเข้มข้นของโลหะในน้ำสกัด เนื่องจากทุกอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่ทำการทดลอง ทำให้ค่าพีเอชของน้ำสกัดมีค่าสูงเกิน 10 ซึ่งในสภาพนี้โลหะหนักสามารถละลายได้ต่ำมาก นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นจะมีผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น แต่หลังจากการบ่ม 28 วัน กำลังรับแรงอัดจะสูงขึ้นไม่มากนัก พบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 11 เทียบกับน้ำหนักของกากจาโรไซท์แบบธรรมดา หรือร้อยละ 15 เทียบกับน้ำหนักของกากซิลิโคจาโรไซท์จะทำให้ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า 14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบการชะละลายในระยะยาวเป็นการทดสอบในคอลัมน์โดยใช้น้ำประปาที่มีพีเอชอยู่ระหว่าง 5.8 และ 6.3 เป็นน้ำชะละลาย เมื่อกำหนดอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 10 พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดช่วงระยะเวลาชะละลาย 90 วัน ค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากจาโรไซท์ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการทำให้เป็นก้อน ค่าขนส่ง และค่าฝังกลบ เท่ากับ 152 บาทต่อการผลิตโลหะสังกะสี 1 ตันสำหรับกากจาโรไซท์แบบธรรมดา และ 172 บาทต่อการผลิตโลหะสังกะสี 1 ตันสำหรับกากซิลิโคจาโรไซท์

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2532) ศึกษาวิจัยการเพิ่มเสถียรภาพของกากแร่สังกะสีซิลิเกตจากกระบวนการผลิตสังกะสีของบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) โดยใช้เทคนิคการเติมปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ และเทคนิคด้านความร้อนสูง ผลการศึกษาพบว่าปูนขาวและปูนซีเมนต์สามารถนำมาใช้ผสมกับกากแร่สังกะสีได้ ในสัดส่วนปริมาณปูนขาวร้อยละ 4 หรือปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของกากสังกะสีแห้งนั้นพอเพียงที่จะทำให้ส่วนผสมมีความคงสภาพ และเกิดการยึดเกาะพอเพียงที่จะป้องกันโลหะหนักไม่ให้ถูกชะละลายออกมาได้ แต่ถ้าต้องการให้ส่วนผสมมีสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีคือมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า 14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ควรใช้ปริมาณปูนขาวร้อยละ 10 หรือปูนซีเมนต์ร้อยละ 12 แต่พบว่าปูนขาวจะเป็นวัสดุประสานที่มีความเหมาะสมมากกว่า โดยเฉพาะผลในระยะยาวทั้งนี้เพราะปฏิกิริยา Pozzolanic ระหว่างปูนขาวและสารประกอบออกไซด์ในกากแร่สังกะสีจะเกิดไปเรื่อยๆ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะสามารถต้านทานผลของซัลเฟตในระยะยาวได้ นอกจากนี้ปูนขาวยังมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์มาก ในด้านการเพิ่มเสถียรภาพด้วยความร้อน พบว่ากากแร่ผ่านความร้อนเกิน 1,000 °ซ มีเสถียรภาพดี การชะละลายของโลหะหนักมีค่าอยู่ในพิกัดของมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม การใช้ประโยชน์ของกากแร่สังกะสีมีแนวโน้มที่จะใช้ประโยชน์ในทางเซรามิกส์ได้โดยการทำกระเบื้อง

ศักดา วรพิพัฒน์ (2538) ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาถึงการทำลายฤทธิ์ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงย่างแร่สังกะสีของบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ซึ่งมีโลหะหนักคือ อาร์เซนิค แคดเมียม โครเมียม ปรอท ตะกั่ว และสังกะสีเป็นองค์ประกอบโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยวัสดุประสานประเภทซีเมนต์ ซึ่งได้แก่ปูนซีเมนต์ซิลิกา ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 ปูนขาว และปูนซีเมนต์ซิลิกาผสมเถ้าลอยลิกไนต์ (อัตราส่วน 1:1โดยน้ำหนัก) โดยมีการใช้วัสดุปรุงแต่ง 2 ชนิดคือ โซเดียมเมตาซิลิเกต (Na_2SiO_3) และน้ำแก้ว ($Na_2Si_3O_7$) เพื่อช่วยในการแข็งตัวให้เร็วขึ้น ได้มีการทดสอบคุณสมบัติของตะกอนที่ผ่านการทำลายฤทธิ์คือ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น ความซึมน้ำ และการชะละลายของโลหะหนัก เพื่อพิจารณาเลือกวัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ตะกอนได้ดีที่สุดโดยใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมและประหยัดที่สุด จากผลการทดลองพบว่าตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงย่างแร่สังกะสีมีลักษณะสมบัติเข้าข่ายเป็นของเสียอันตรายเนื่องจากมีความเข้มข้นของอาร์เซนิคในน้ำสกัดสูงเกินมาตรฐานกากของเสียอันตรายของกระทรวงอุตสาหกรรม กากตะกอนที่ผ่านการทำลายฤทธิ์ด้วยวัสดุประสานชนิดต่างๆ มีค่าการถูกชะละลายของโลหะหนักผ่านเกณฑ์มาตรฐานสารพิษที่โรงงานอุตสาหกรรมกำหนดทุกการทดลอง พบว่าการใช้วัสดุปรุงแต่งไม่ได้ช่วยพัฒนากำลังรับแรงอัดเลย แต่พบว่าความชื้นในตะกอนน้ำเสียมีผลต่อกำลังรับแรงอัด ทั้งนี้พบว่าปูน

ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ตะกอนได้ดีกว่าวัสดุประสานชนิดอื่นที่ใช้ในการศึกษา โดยมีประสิทธิภาพดีที่สุดที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 เทียบกับตะกอนแห้ง ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการบำบัดเท่ากับ 775 บาทต่อตะกอนน้ำเสีย 1 ตัน หรือเท่ากับ 15 บาทต่อปริมาณสังกะสีออกไซด์ที่ผลิตได้ 1 ตัน

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University