

บทที่ 3
ทบทวนเอกสาร

3.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 - 92 ภายในคาบที่ 4 - 7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งหมด 68 ธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โลหะเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ ผัก และผลไม้ จากนั้นจะเข้าสู่มนุษย์ โลหะหนักหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้

โลหะหนักที่ทำการวิจัยนี้ยึดตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 (พ.ศ.2531) ได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และปรอท ซึ่งอยู่ในรูปของแข็ง ดังแสดงในภาคผนวก ก

3.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ ซีเมนต์นี้มีส่วนประกอบโดยน้ำหนัก (วินิจ ซอวิเชียร, 2538) ดังนี้

CaO	63.8 %
SiO ₂	20.2 %
Al ₂ O ₃	5.4 %
Fe ₂ O ₃	2.9 %
MgO	1.5 %
SO ₃	2.6 %

Na ₂ O	0.3 %
K ₂ O	0.5 %

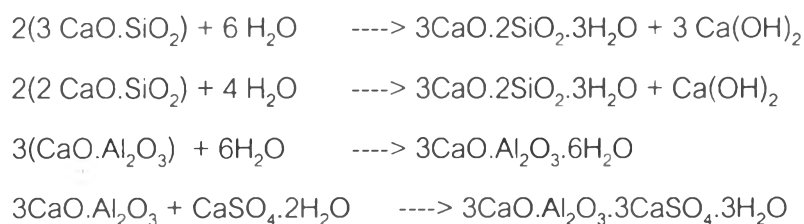
และซีเมนต์ยังปรากฏในรูปสารประกอบ ดังนี้

สารประกอบ	สูตรเคมี	สัญลักษณ์
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	3CaO . SiO ₂	C3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	2CaO . SiO ₂	C2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	3CaO . Al ₂ O ₃	C3A
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	4CaO . Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C4AF

Shively (1986) ซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) มีความเป็นด่างสูง และมีพื้นผิวเป็น ออกซีไฮดรอกไซด์ (Oxyhydroxide) ซึ่งโลหะหนักจะดูดติดบนพื้นผิวซิลิเกต และออกซีไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกตมีความสามารถในการดูดติดผิวโลหะหนักได้อย่างดี

3.3 ปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ

เมื่อซีเมนต์ผสมกับน้ำ กลายเป็นซีเมนต์เพสต์ ปฏิกริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำก็จะเริ่มขึ้น เรียกว่า ปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration) ยังผลให้เกิดความเหนียว และเกาะแน่นกับวัสดุผสมออกไซด์ในซีเมนต์ จะเปลี่ยนรูปอยู่ในรูปไฮเดรตเมื่อถูกน้ำ Neville (1981) แสดงสมการปฏิกริยาไฮเดรชัน (วินิจ ช่อวิเชียร, 2538) ดังนี้



ค่าความเป็นด่างที่เกิดโดยปฏิกริยาไฮเดรชัน จะอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงความสามารถเป็นบัฟเฟอร์ (Buffer) ซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าความเป็นด่างสูง และมีพื้นผิวออกซีไฮดรอกไซด์ ซึ่งเหมาะสมกับภาวะสำหรับการตกผลึก Amphoteric Metal และการดูดติดโลหะ

Lea (1956) น้ำจะทำลายซีเมนต์เพสต์โดยละลายปูนขาว (Lime) และอลูมินาบางส่วน ถ้าการชะล้างเกิดต่อไป มันจะเหลือตะกอนของไฮเดรตซิลิกา, ไอออนออกไซด์, อลูมินา ปฏิกริยานี้เกิดขึ้นมากในสภาพน้ำตามธรรมชาติ จนแทบจะละลายได้ แต่ถ้าในสภาพเป็นกรดมันจะเกิดเร็วกว่า

3.4 สี (Paints)

สี คือวัสดุที่ใช้เคลือบป้องกันการผุกร่อน และช่วยทำให้วัตถุที่ถูกเคลือบดูสวยงาม มีสีตามที่ต้องการ

3.4.1 องค์ประกอบของสี

แบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท (อรอุษา สรวารี) คือ

1. ผงสี (Pigments)

เป็นสารที่ให้สี และมีความสามารถในการปิดบังพื้นผิว หรือกำลังซ่อนแสง (Hiding Power) ผงสีต่างๆ เช่น ขาว, ดำ, แดง, เหลือง, เขียว, ส้ม เป็นต้น อาจเป็นสารอินทรีย์ (Organic) หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic) ก็ได้

ผงสีพวกนี้ส่วนใหญ่ต้องมีการสั่งซื้อมาจากต่างประเทศ แต่ก็มีผงสีบางอย่างที่สามารถผลิตเองในประเทศได้บ้าง เช่น Carbon Black, Red Lead (เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตแบตเตอรี่) แต่ปริมาณและคุณภาพยังไม่ค่อยดี

2. ตัวประกอบหรือตัวขยายผงสี (Extender Pigments)

เป็นวัสดุที่เป็นผงที่นำมาใช้ลดต้นทุนของสี ทำให้มีคุณสมบัติทาง Brushability ดีขึ้น ทำให้สีมีเนื้อสีมากขึ้นหรือเข้มข้นโดยไม่ทำให้ความเข้มของ Shade สีเพิ่มขึ้น Extender Pigments หรือ Fillers ได้แก่ Calcium Carbonate, China Clay, Talcum, Diatomaceous, Silica, Barium Sulphate, Zinc Oxide เป็นต้น Extender Pigments หรือ Fillers นี้ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นเองได้ในประเทศ แต่ก็ยังมี Extender Pigments บางส่วนที่ใช้ในอุตสาหกรรมสีที่ยังต้องสั่งซื้อมาจากต่างประเทศ ทั้งนี้เนื่องจาก Extender Pigments บางตัวยังไม่สามารถผลิตขึ้นเองในประเทศได้ หรือยังไม่สามารถผลิตให้มีคุณภาพดีทัดเทียมกับของต่างประเทศได้

3. สารยึดหรือสิ่งนำสี (Binders)

คือสารที่ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคของสารประกอบในสี ได้แก่ Pigments และ Extender Pigments ให้เกิดเป็นฟิล์มของสีติดแน่นกับพื้นผิวที่ถูกเคลือบ ตัวอย่างของสารยึดได้แก่น้ำมันแห้งเร็ว (Drying Oil), เรซินธรรมชาติ, เรซินสังเคราะห์ เป็นต้น สารยึดที่ใช้ในการทำสีมีทั้งที่ผลิตเองได้ภายในประเทศและที่ต้องสั่งซื้อมาจากต่างประเทศ

4. ตัวทำละลาย (Solvents)

มีหน้าที่ช่วยปรับความหนืดของสีเพื่อให้เหมาะต่อการผลิต หรือสะดวกต่อการใช้งาน จะเป็นตัวทำละลายสารยึด (Binders) แต่ไม่ละลาย Pigments และ Extender Pigments ตัวทำละลายที่สามารถผลิตขึ้นเองภายในประเทศ ได้แก่ Ethyl Alcohol, Denatured Alcohol, Methyl Alcohol, White Spirit เป็นต้น ตัวทำละลายส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์

5. สารเติมแต่ง (Additives)

คือสารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษบางอย่างได้แก่ ทำให้แห้งเร็ว, ทำให้สีไม่ขึ้นรา, ทำให้องค์ประกอบต่างๆ ของสีคลุกเคล้าเข้ากันได้ดี เป็นต้น สารเติมแต่งที่ใช้ในการทำสีส่วนใหญ่ต้องสั่งเข้ามาจากต่างประเทศ

3.4.2 ชนิดของสี

สีแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ

1. สีน้ำพลาสติก (Emulsion Paints)

คือ สีที่ใช้ Emulsions เป็น Binders Emulsion นี้เป็นโพลีเมอร์พวก Monomer, Copolymer หรือ Terpolymer ของ Vinyl Acetate, Acrylic และ Styrene และใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

2. สีน้ำมัน (Oil Paints)

คือ สีที่ใช้ Alkyd Resins, Petro Resins, Epoxy Resins, Chlorinated Rubber, Vinyl Resins ฯลฯ เป็น Binder มีสารละลายพวก Aliphatic และ Aromatic เป็นตัวทำละลาย สีน้ำมันอาจแยกเป็นสีประเภทต่างๆ ได้อีกมากมาย ตามประเภทของ Resins ที่ใช้ และลักษณะของการทำงาน เช่น

- Epoxy Paints คือ สีที่สามารถทนกรด ทนด่าง ทนสารเคมีบางอย่างได้ ทนการขีดขีด ใช้ Epoxy Resins เป็น Binders

- Traffic Paints คือ สีที่ใช้ทาผิวจราจร

- Decorative Paints คือ สีที่ใช้ทาประดับตกแต่งอาคารบ้านเรือน

- Marine Paints คือ สีที่ใช้ทาเรือ

- Baking Paints คือ สีที่ไม่แห้งในอุณหภูมิปกติ แต่แห้งได้โดยการอบให้ร้อนในเตาอบตามอุณหภูมิที่กำหนด

- Industrial Paints คือ สีที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทของสีตามหน้าที่ในการทาสีนั้นๆ เช่น

- สีเคลือบ (Enamel) คือ สีที่ใช้ทาทับบน Under Coat หรือ Primer (สีรองพื้น) อีกทีหนึ่ง
- สีกันสนิม (Rust Preventing Paints) คือ สีที่ใช้ทาบนผิวโลหะเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสนิมบนโลหะนั้น
- สีแห้งช้า (Slow Drying Paints) คือสีที่ใช้ตกแต่งทางสถาปัตยกรรม และสีอุตสาหกรรมบางอย่าง ที่เวลาการแห้งค่อนข้างช้า โดยจะแห้งในเวลา 2 - 3 ชั่วโมงขึ้นไป
- สีแห้งเร็ว (Fast Drying Paints or Quick Drying) คือสีอุตสาหกรรมบางอย่างที่เวลาแห้งรวดเร็ว เพื่อสะดวกกับงานอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่จะใช้เวลาไม่เกิน 15 นาที
- สีกันเปรียง (Antifouling Paints) คือ Marine Paints ชนิดหนึ่งที่ใช้ทาทับหน้าสีตรงส่วนพื้นผิวของเรือ ท่อน หรือสิ่งก่อสร้างส่วนที่จมอยู่ในน้ำ คุณสมบัติของสีนี้สามารถละลายน้ำได้โดยอัตราการละลายคงที่ ส่วนผสมของสีที่ละลายหลุดออกมาจะเป็นสารพิษสำหรับตัวเปรียง ทำให้เปรียงไม่กล้าเข้ามาใกล้และเกาะสิ่งก่อสร้าง เมื่อใดที่สารพิษที่อยู่ในสีถูกละลายหมดไปสีนั้นก็ จะไม่สามารถกันเปรียงได้อีกต่อไป จึงต้องทาสีกันเปรียงใหม่เพื่อให้สามารถกันเปรียงได้อีก

3.4.3 หลักการเตรียมสีก่อนทาหรือพ่น

ก่อนทาหรือพ่นสีจะต้องกวนสีให้เข้ากันดีเสียก่อน และปรับความความข้นเหลวของสีให้พอเหมาะกับการทาหรือพ่น หากสีนั้นข้นเกินไปจะต้องเติมทินเนอร์(Thinner) ของสีนั้นๆ ลงไปพอเหมาะ และกวนให้เข้ากันดีจึงสามารถนำไปใช้ทาหรือพ่นได้

ก่อนจะนำสีใส่ในเครื่องพ่นจะต้องกวนสีในกระป๋องให้เข้ากันก่อน จากนั้นเติม Thinner ของสีนั้นๆ ลงไปเพื่อปรับความข้นเหลวให้พอเหมาะกับการพ่น คนให้เข้ากันดี แล้วเทใส่เครื่องพ่น ปรับหัวพ่นให้ทำมุมพอเหมาะแล้วทำการพ่น การพ่นไม่ควรพ่นให้หนาเกินไปเพราะจะทำให้เกิด Sagging ถ้าต้องการพ่นหนาๆ ควรใช้วิธีพ่นหลายๆ ชั้น คือเมื่อชั้นแรกแห้งดีแล้วจึงจะพ่นทับชั้นถัดไปอีกเรื่อยๆ

3.4.4 กรรมวิธีการผลิตสี

การผลิตสีมีกรรมวิธีในการผลิตโดยทั่วๆ ไปแบ่งออกได้เป็นระยะและขั้นตอนดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การผสม (Mixing) คือ การเอา Pigment, Extender Pigments ทั้งหมด Binder บางส่วน (สำหรับสี Emulsion Paints จะยังไม่เติม Binder ในระยะนี้) ตัวทำละลาย (Solvents) บางส่วน และ Additives บางส่วน ลงไปผสมเข้าด้วยกัน ในระยะนี้จะยังไม่ได้ความละเอียดที่ต้องการ

2. การบด (Grinding) คือ การทำให้ขนาดของอนุภาคของ Pigments และ Extender Pigments มีขนาดเล็กลงโดยใช้ High Speed Stirrer หรือใช้เครื่องบด(Grinder) ชนิดต่างๆ เช่น Ball Mill, Pearl Mill, Sand Mill, Super Mill, Roll Mill ฯลฯ โดยใช้ Grindometer สำหรับวัดค่า Fineness

3. การปรับความข้นเหลว (Adjustment of Consistency) คือ ระยะที่เอา Binder , ตัวทำละลาย(Solvents) และ Additives ส่วนที่เหลือเติมลงไป ใน Grinding Base ที่บดได้ความละเอียดตามต้องการแล้ว

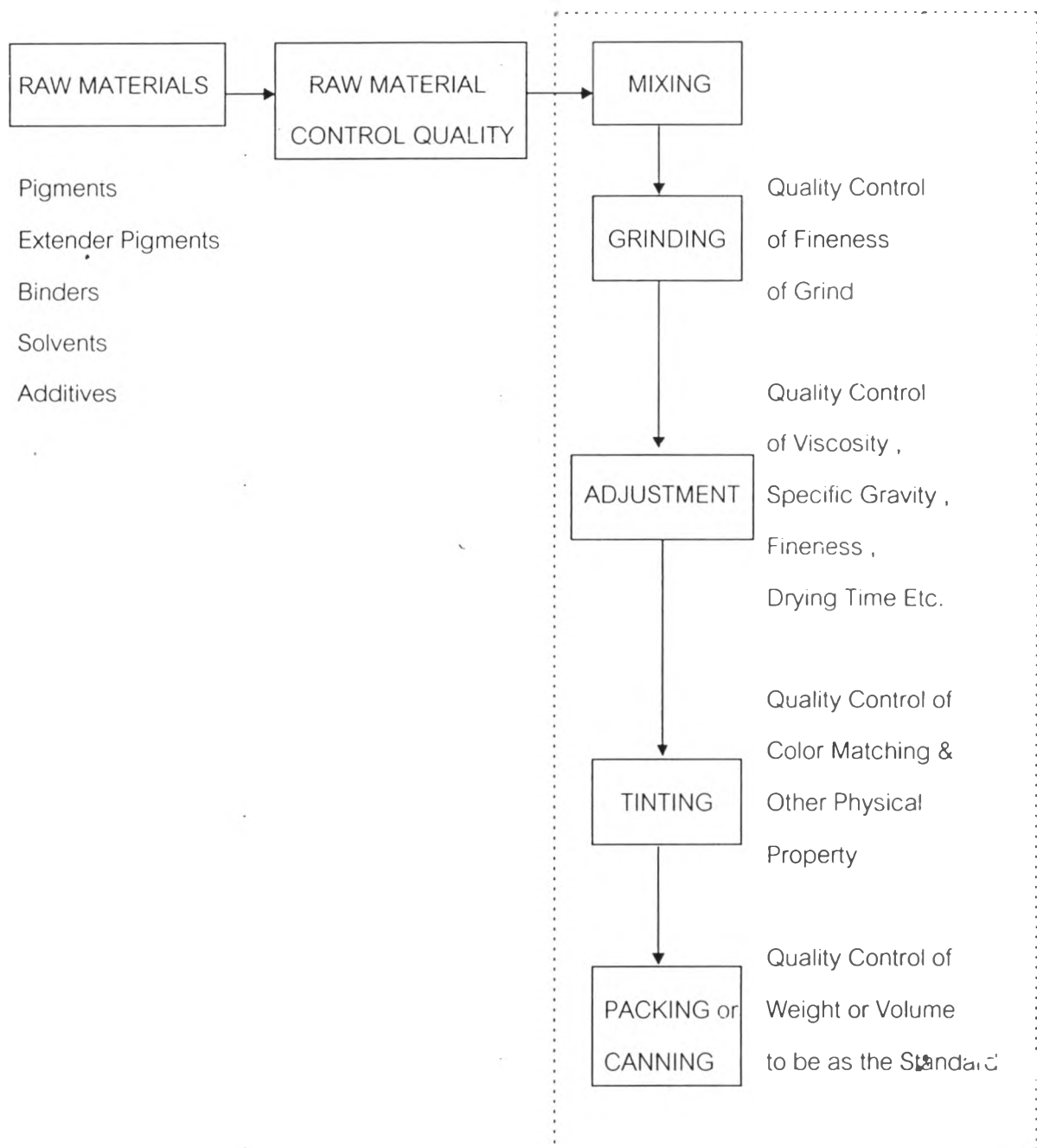
4. การเทียบสี (Tinting) คือ การเอาสีที่เติมส่วนประกอบต่างๆ ของสีลงไปครบถ้วนแล้ว ไปตกแต่งสีให้เหมือนกับสีมาตรฐานที่เก็บไว้เป็นตัวอย่าง โดยเติม Tinting Color ของสีประเภทเดียวกันนั้นลงไปจนกระทั่งสีที่ใหม่มี Shade สีเหมือนกับมาตรฐาน

5. การควบคุมคุณภาพ (Quality Control) คือการควบคุมคุณภาพของสีให้มีคุณสมบัติต่างๆ เหมือนกับรายละเอียดที่ระบุ (Specification) ไว้ก่อนที่จะได้รับอนุญาตให้บรรจุ

6. การบรรจุ (Canning) คือการนำสีที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เรียบร้อย และถูกต้องตามรายละเอียดที่ระบุ(Specification) ที่ตั้งไว้แล้วไปบรรจุใส่ภาชนะหรือกระป๋องที่มีขนาดต่างๆ ตามที่ต้องการ ส่วนใหญ่จะบรรจุในกระป๋องขนาด 1/4 US.แกลลอน, 1 US.แกลลอน และ 5 US.แกลลอน

หมายเหตุ : ในการทำสี Emulsion Paints จะทำการบดผงสีโดยใช้ High Speed Stirrer บดให้ขนาดอนุภาคของ Pigments และ Extender Pigments เล็กลงจนได้ความละเอียดตามต้องการ ในการบดแบบนี้ บางครั้งจะเกิดความร้อนสูงพอสมควร จึงไม่มีการใส่ Binder ของสีลงในระยะ Mixing และ Grinding เพราะหาก Binder ของสี Emulsion ได้รับความร้อนสูงๆ จะเกิดการรวมตัวเอง ทำให้เกิดเป็นเส้นหรือก้อนแข็ง ดังนั้นในการทำสี Emulsion จึงใส่ Binder ลงไปในระยะการปรับความข้นเหลวเท่านั้น

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการผลิตสีโดยทั่วไป (Paint Manufacturing Process)



จากรายงานการสำรวจของ EPA (1980) พบว่า ในสหรัฐอเมริกา มีโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสี ประมาณ 1,500 แห่ง มีการผลิตสีที่ใช้ในการทาโครงสร้างอาคารทั้งภายนอกและภายในอาคาร และสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น รถยนต์, เครื่องบิน, เฟอร์นิเจอร์, เครื่องจักร ฯลฯ ร้อยละ 40 ของโรงงานผลิตสีทั้งหมด มีจำนวนคนงานน้อยกว่า 10 คน กำลังการผลิตของโรงงานทั้งหมดมีตั้งแต่ 50 แกลลอน จนถึง 10,000 แกลลอนต่อวัน น้ำเสียโดยทั่วไปจะเกิดจาก น้ำล้างเครื่องจักร, ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน, ของเสียจากการทดสอบคุณภาพสี, น้ำฝนที่ชะบริเวณส่วนผลิต, น้ำเสียจากเครื่องจักร ฯลฯ ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น รวมแล้วประมาณ 1.5 ล้านแกลลอนต่อวัน ครึ่งหนึ่งจะถูกนำกลับไปใช้ในการผลิตใหม่ สำหรับอีกครึ่งหนึ่งจะถูกระบายทิ้ง

EPA ได้มีการออกสำรวจโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสี จำนวน 22 โรงงาน เพื่อเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ลุ่มบัติน้ำทิ้งซึ่งเป็นตัวบ่งชี้องค์ประกอบภายในสีได้ทางอ้อม จากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสี การเก็บตัวอย่างจะกระจายตัวตามลักษณะกำลังผลิต และตำแหน่งจุดเก็บตามความเข้มข้นของแหล่งกำเนิดน้ำเสียและภาคตะกอน เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องเป็นตัวแทนของเสียประเภทอุตสาหกรรมสี เพื่อจะหามาตรการควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงาน โดยสมบัติของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสี ดังแสดงในภาคผนวก ข ซึ่งแสดงค่ามลสาร 65 ตัวที่ทำการวิเคราะห์ พบว่าปริมาณโลหะหนักหลายตัวมีค่าที่สูง เช่น โครเมียม, ตะกั่ว เป็นต้น

จากการออกตรวจระบบบำบัดน้ำเสีย ที่มีอยู่ในโรงงานพบว่า จากโรงงาน 22 แห่ง มีการใช้การบำบัดแบบ Physical-Chemical Treatment ดังแสดงในภาคผนวก ข จากโรงงานทั้งหมดมีโรงงาน 17 แห่งที่ใช้แบบ Batch Basis นอกนั้นใช้แบบต่อเนื่อง มีการปรับ pH พร้อมกับเติมสาร Coagulant (Lime , Alum , Ferric Chloride) และเติมโพสิเมอร์ ต่อจากนั้น จะเข้าไปสู่ส่วนตกตะกอน มีระยะเวลาตั้งแต่ 1 - 48 ชั่วโมง น้ำใสจะถูกระบายทิ้ง ส่วนกากตะกอน(Sludge) จะถูกกำจัดโดยการว่าจ้างบริษัทรับกำจัดกากของเสียอันตราย โดยจะถูกนำไปทำลายฤทธิ์แล้วมีการฝังกลบ

จากรายงานการศึกษาการจัดการ Solid Waste ของ EPA (1976) พบว่าในปี ค.ศ.1974 มีกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสีมีปริมาณ 436,000 ตัน(น้ำหนักเปียก) ในส่วนนี้เป็นกากของเสียอันตราย 105,000 ตัน ซึ่งเกิดจากกระบวนการทำความสะอาดเศษสีที่ตกค้างในถังบรรจุ และการหกของสี โดยโรงงานต่าง ๆ จะมีการว่าจ้างบริษัทรับกำจัดกากของเสียอันตรายนำไปทำลายฤทธิ์และฝังกลบ (Landfills) นอกโรงงาน

3.4.5 สมบัติของสีที่ใช้ในอุตสาหกรรม

ในการพ่นสีแบ่งสีที่ใช้พ่นตามลำดับดังนี้

3.4.5.1 สีรองพื้น(Primers)

โลหะทุกชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กจะเกิดการกัดกร่อนได้ เมื่อสัมผัสกับน้ำ ออกซิเจน เกลือ กรดหรือด่างที่มีอยู่ในบรรยากาศ การกัดกร่อนยังเกิดขึ้นได้กับโลหะที่ต้องจุ่มหรือแช่อยู่ในของเหลวเป็นเวลานานๆ เมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อนจะเป็นสนิม ทำให้ใช้งานต่อไปไม่ได้ ดังนั้นการป้องกันไม่ให้โลหะสัมผัสกับสิ่งต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ เช่น ออกซิเจน ความชื้น เป็นต้น ซึ่งก็ทำได้โดยการเคลือบพื้นผิวโลหะ

ในกรณีที่เป็นเหล็ก การเคลือบพื้นผิวหน้าด้วยสังกะสี ดีบุก และแคดเมียม จะให้ผลดีเนื่องจากความชื้นและออกซิเจนไม่สามารถซึมผ่านผิวหน้าได้ ถ้าใช้สีเคลือบจะต้องเคลือบให้มีความหนาเพียงพอที่จะไม่ยอมให้ความชื้น และออกซิเจนซึมผ่านผิวได้ และสีที่ใช้ส่วนใหญ่ทำมาจากยางคลอริเนตด พอลิยูรีเทนชนิด 2 ส่วน และอีพอกซีเรซินชนิด 2 ส่วน ถ้านำสีที่ทำจากอัลคิเด เรซินหรือน้ำมันวาร์นิชมาเคลือบ ความชื้น และออกซิเจน ยังสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ แต่ปัญหาการซึมผ่านนี้ สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ผงสีที่อนุภาคมีรูปร่างเป็นเป็นแผ่นบางๆ เช่น ผงอะลูมิเนียม หรือการใช้ผงสีที่ยับยั้งการเกิดการกัดกร่อน(Corrosion Inhibiting Pigments) เช่น ซิงก์โครเมต หรือ ตะกั่วแดง(Red Lead, Pb_3O_4) ผสมลงในสีรองพื้นด้วย

สีรองพื้นสำหรับเหล็กมีด้วยกันหลายชนิดดังนี้ คือ

1 วอชไพรเมอร์ หรือ เอทช์ไพรเมอร์(Wash or Etch Primers)

วอชไพรเมอร์ อาจเป็นสีรองพื้นชนิด 2 ส่วน หรือชนิด 1 ส่วน(One-pack) ก็ได้ ถ้าเป็นชนิด 2 ส่วนผสมกัน จะประกอบด้วยส่วนของซิงก์เททรอคซีโครเมต(Zinc Tetraoxychromate) ที่กระจายอยู่ในสารละลายแอลกอฮอล์ของโพลีไวนิลบิวทิลเรซิน(Polyvinylbutyral Resin) และส่วนของกรดฟอสฟอริก ซึ่งมักใส่ภาชนะแยกกันเมื่อต้องการใช้งานจึงจะนำกรดฟอสฟอริกมาใส่ลงในสารละลายของซิงก์เททรอคซีโครเมต

สำหรับวอชไพรเมอร์ชนิด 1 ส่วน ประกอบด้วยกรรพอสฟอริก และโครเมียมฟอสเฟต แต่โดยทั่วไปแล้ว นิยมใช้วอชไพรเมอร์ชนิด 2 ส่วน และสามารถเพิ่มสมบัติทนน้ำของวอชไพรเมอร์ได้ โดยการใช้อีพอกซีเรซินแทนโพลีไวนิลบิวทิลเรซิน ถ้าใช้อีพอกซีเรซินชนิดดัดแปลง สีรองพื้นที่ได้จะนำมาใช้เคลือบเหล็กที่พ่นทรายมาใหม่ๆ แต่ถ้าใช้อีพอกซีเรซินชนิดไม่ดัดแปลง ก็จะใช้เป็นสีรองพื้นสำหรับโลหะชนิดนอนเฟอร์รัส(Non-ferrous) เช่น สังกะสี และอะลูมิเนียม เป็นต้น

การใช้วอชไพรม์บนพื้นผิวที่สะอาดที่เป็นโลหะเจือ หรือเหล็ก หรือมิใช่เหล็กจะทำให้มีความติดแน่นดีมาก เกิดเป็นฟิล์มที่ขัดขวางการกัดกร่อน และเป็นพื้นฐานที่ดีสำหรับการเคลือบสีชั้นต่อๆ ไป แต่ฟิล์มที่ได้จากวอชไพรม์จะบางมาก ซึ่งอาจจะทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ ดังนั้นในกรณีที่ต้องการป้องกันพื้นผิวมากที่สุด จึงมักเคลือบทับด้วยสีรองพื้นชนิดอื่น เช่น ซิงค์โครมไพรม์(Zinc Chrome Primer) เพื่อให้ฟิล์มหนาขึ้น

ตัวอย่างสูตรของวอชไพรม์ชนิด 2 ส่วน

		ส่วนโดยน้ำหนัก
ส่วนของสารยึด	โพลีไวนิลบิวทิลเรซิน	7.2
	ซิงค์เททรอคซีโครเมต	6.9
	ทัลก์	1.1
	ไอโซโพรพานอล หรือ 95%เอทานอล	48.7
	นอร์มอล-บิวทานอล	<u>16.1</u>
		80.0
ส่วนของกรด	กรดออร์โทฟอสฟอริก 85%(ถ.พ.1.7)	3.6
	น้ำ	3.2
	ไอโซโพรพานอล หรือ 95%เอทานอล	<u>13.2</u>
		20.0

2 ซิงค์โครมไพรม์(Zinc Chrome Primer)

ซิงค์โครมไพรม์ประกอบด้วยซิงค์โครเมตกระจายอยู่ในอัลคิเดเรซินหรือน้ำมันวารนิช สีรองพื้นชนิดนี้สามารถเคลือบได้ด้วยกรรมวิธีต่างๆ กัน นอกจากนี้สีรองพื้นชนิดนี้ยังสามารถใช้เคลือบผิวโลหะได้ ทั้งชนิดเฟอร์รัสและนอนเฟอร์รัส ในบางกรณีจะใช้ร่วมกับวอชไพรม์หรือบลาสต์ไพรม์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ตัวอย่างสูตรของซิงค์โครมไพรม์

	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ซิงค์โครเมต	17.0
ซิงค์ออกไซด์	3.7
แบไรต์	8.5
ไมกา	12.8
อัลคิเดเรซิน(70%ของแข็ง)	23.5

ตัวทำละลายแฉะฟทา	15.3
ไวท์สปีริต	18.6
ตะกั่วแฉะฟทา(24%)	0.4
โคบอลต์แฉะฟทา(60%)	0.2

ซิงก์โครมไพโรเมอร์สูตรข้างต้นจะแห้งในอากาศภายใน 2-3 ชั่วโมง แต่ถ้านำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จะแห้งภายใน 30 นาที

3 Red Oxide - Zinc Chrome Primers

สีรองพื้นชนิดนี้เคยเป็นที่นิยมใช้กันมาก เรซินที่ใช้เป็นสารยึดอาจเป็นอัลคิเดเรซินหรือฟีนอลิกเรซิน ถึงแม้ว่าปริมาณของซิงก์โครเมตในสีรองพื้นชนิดนี้จะต่ำกว่าปริมาณที่ใช้ในซิงก์โครมไพโรเมอร์ แต่สีรองพื้นทั้งสองชนิดนี้จะมีสมบัติคล้ายกันมาก

ตัวอย่างสูตรของ Red Oxide - Zinc Chrome Primer

	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เหล็กออกไซด์แดง	35.9
ซิงก์โครเมต	10.0
ทัลก์	3.0
แคลเซียมคาร์บอเนต	1.5
เลซีทีน	0.4
อัลคิเดชนิด Medium - Oil (70%ของแข็ง)	36.4
ไวท์สปีริต	11.4
ตะกั่วแฉะฟทา (24%)	1.0
โคบอลต์แฉะฟทา (60%)	0.4

4 Red Lead Primer

สีรองพื้นชนิดนี้ใช้เคลือบรองพื้นเหล็กมานานแล้ว เนื่องจากสามารถป้องกันไม่ให้เหล็กเกิดการกัดกร่อนได้ดี สำหรับเรซินที่ใช้เป็นสารยึดได้แก่ อัลคิเดเรซินและน้ำมันลินสีด ซึ่งผลจากการที่ใช้น้ำมันลินสีดนี้ จะทำให้ฟิล์มที่ได้จากสีรองพื้นชนิดนี้แห้งช้า ต้องใช้เวลานานหลายวันฟิล์มจึงจะแห้งแข็งพอที่จะทาทับใหม่ได้ จึงได้มีการปรับปรุงโดยการใส่สารยึดหรือเรซินชนิดอื่นแทน เช่น ยางคลอริเนเตด หรือไวนิลเรซิน เป็นต้น

3.4.5.2 สีทับหน้า (Finishing Coats)

งานวัสดุอุตสาหกรรมผิวงานจะต้องสัมผัสกับบรรยากาศภายนอก ดังนั้นสีทับหน้าจะต้องมีความทนทานต่อมลภาวะสูง โดยมีส่วนประกอบที่แสดงสมบัติสี คือ ผงสี (Pigments) เป็นสีต่างๆ ซึ่งขึ้นกับแต่ละบริษัทผู้ผลิตสีเลือกนำมาผสมกันจนได้สีและสมบัติตามต้องการ ซึ่งเป็นลิขสิทธิ์เฉพาะของแต่ละบริษัทผู้ผลิตสี โดยแบ่งได้ดังนี้

ในอุตสาหกรรมการพ่นสีเคลือบถังบรรจุก๊าซที่จะใช้เป็นตัวอย่างภาคพิเศษในการวิจัย มีการใช้สีประเภท Quick Drying Enamel Pit Metallic Blue ซึ่งเป็นสีที่แห้งเร็วในอากาศโดยไม่ต้องมีการอบ สำหรับสีพ่นซ่อมสีถังก๊าซหุงต้มจะใช้สีชนิด Phenolic Modified Alkyd Resin ขนาดความจุภาชนะ 5 ยูเอสแกลลอน/ถัง มีคุณสมบัติดังนี้

- ชนิด Phenolic Modified Alkyd Resin
- Shade สี Metallic Blue
- เนื้อสี(โดยปริมาตร) 40% - 45%
- ความหนืดเนื้อสี 85 - 100 KU (Krebs Unit) ที่ 30°C
- % Pigment Phthalocyanine Blue ไม่น้อยกว่า 3% ของ Total Pigment (Base on Weight)
- ใช้ได้กับ ทินเนอร์ Toluene 100% ปริมาณผสมใช้ทินเนอร์ไม่เกิน 1 ลิตร ต่อสี 1 ยูเอสแกลลอน
- ใช้ได้กับระบบการพ่นแบบ Air Spray , Airless Spray , Airless Electrostatic Spray

1 โครมเยลโลว์ (Chrom Yellow)

โครมเยลโลว์คือ ตะกั่วโครเมต (Lead Chromate, $PbCrO_4$) มีลักษณะผลึกแบบ โมโนคลินิก (Monoclinic) อาจมีสีตั้งแต่สีเหลืองอ่อนไปจนถึงสีเขียวใบไม้ ถ้าให้ $PbCrO_4$ ตกตะกอนร่วมกับ $PbSO_4$ จะได้โครมเยลโลว์สีต่างๆ กัน

โครมเยลโลว์มีดัชนีหักเหสูง ดังนั้นสีที่ทำจากโครมเยลโลว์จึงทึบแสง โครมเยลโลว์ไม่เกิดการคายสีในน้ำ น้ำมัน แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายที่ใช้ในแลกเกอร์ สีของโครมเยลโลว์จะหมดไปเมื่อถูกกับกรดหรือด่างเข้มข้น แต่จะไม่เปลี่ยนสีเมื่อถูกกรดเจือจาง สำหรับด่างเจือจางจะทำให้สีของโครมเยลโลว์อมแดงมากขึ้น โครมเยลโลว์ทนแสงได้ดี แต่อาจสีคล้ำไปบ้างเมื่อถูกแสง

นานๆ และเนื่องจากโครมเยลโลว์มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นสีจะเปลี่ยนไปเป็นดำเมื่อถูกกับอากาศของโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

2 โครมออเรนจ์ (Chrom Orange)

โครมออเรนจ์ คือ Basic Lead Chromate ($PbO \cdot PbCrO_4$) ซึ่งมีสีต่างๆ กันไปแล้วแต่ปริมาณของ PbO และ $PbCrO_4$

โครมออเรนจ์เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างโครมเยลโลว์และด่าง ถ้าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดใหญ่ สีจะอมแดงมากขึ้นได้เป็นโครมเรด (Chrom Red) แต่ถ้าอุณหภูมิมิขนาด เล็กจะได้ผงสีที่เข้ม ดังนั้นอาจจะทำให้โครมเรดเปลี่ยนเป็นโครมเยลโลว์ได้โดยการอบ

3 โมลิบเดตออเรนจ์ (Molybdate Orange)

เมื่อให้ $PbCrO_4$ ตกตะกอบร่วมกับ $PbMoO_4$ และ $PbSO_4$ จะได้ผงสีที่สดใส สะอาด และมีสีแรงกว่าผงสีโครมออเรนจ์ ผงสีชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า โมลิบเดตออเรนจ์ ซึ่งมีลักษณะที่บด แสง ทนแสงได้ดี แต่สีจะคล้ำไปบ้างเมื่อถูกแสง

4 ซิงก์เยลโลว์ หรือซิงก์โครม (Zinc Yellow or Zinc Chrome)

ซิงก์เยลโลว์ หรือซิงก์โครมเป็นผงสีที่มีได้ประกอบด้วย $ZnCrO_4$ เพียงอย่างเดียว องค์ประกอบอื่นๆ ในซิงก์เยลโลว์ ได้แก่ K_2CrO_4 และ $Zn(OH)_2$ ซึ่งโดยปกติจะแบ่งซิงก์เยลโลว์ ออกเป็น 3 ชนิดตามองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลดังนี้ คือ

ชนิดที่ 1 ได้แก่ $ZnCrO_4$

ชนิดที่ 2 ได้แก่ $K_2CrO_4 \cdot 3ZnCrO_4 \cdot Zn(OH)_2$

ชนิดที่ 3 ได้แก่ $ZnCrO_4 \cdot 4Zn(OH)_2$

5 แคดเมียมเยลโลว์ และแคดเมียมออเรนจ์ (Cadmium Yellow และ Cadmium Orange)

แคดเมียมเยลโลว์ประกอบด้วย CdS เป็นส่วนใหญ่ CdS เตรียมได้จากการผ่านก๊าซ H_2S ไปในสารละลาย $CdCl_2$ ดังนี้

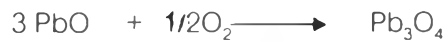
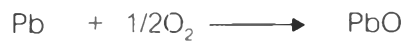


แคดเมียมออเรนจ์ประกอบด้วยของผสมระหว่าง CdS และ $CdSe$ โดยมีอัตราส่วนระหว่าง $Cd : Se$ เท่ากับ $100 : 12$ ซึ่งถ้ามีปริมาณของ Se มากขึ้น สีจะเปลี่ยนไปเป็นสีแดงมากขึ้น

ผลสีที่มี Cd เป็นองค์ประกอบ จะปิดบังผิวหน้าได้ดี มีความที่บด แสง ทนต่อความร้อน แสงสว่าง กรดและด่างเป็นอย่างดี แต่สีจะถูกทำลายโดยกรดเข้มข้น ความชื้นจะทำให้ผงสีที่ได้จาก Cd มีสีจางลงบ้าง

6 ตะกั่วแดง (Red Lead)

ตะกั่วแดงเป็นผงสีสีแดงอมส้มที่ประกอบด้วย $2\text{PbO} \cdot \text{PbO}_2$ ซึ่งโดยปกติมักเขียนเป็น Pb_3O_4 เตรียมได้จากการนำตะกั่วไปเผาในที่ที่มีอากาศ ที่อุณหภูมิ 450 - 500 องศาเซลเซียส ซึ่งขั้นตอนการเกิดเป็นตะกั่วแดงมีอยู่ 2 ขั้นตอนดังนี้



คุณภาพของตะกั่วแดงขึ้นอยู่กับปริมาณของตะกั่วอิสระ (Free 'PbO') ที่ปนอยู่ด้วยในโครงสร้าง เชื่อกันว่าตะกั่วออกไซด์อิสระสามารถทำปฏิกิริยากับกรดไขมันในสารยึดติดเป็นสบู่ ทำให้สีที่ทำจากตะกั่วแดงเมื่อทิ้งไว้นานๆ จะเกิดเป็นก้อนขึ้น นอกจากนี้คุณภาพของตะกั่วแดงยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคด้วย

การใช้งานส่วนใหญ่ของตะกั่วแดง นำมาใช้เป็นผงสีในสีรองพื้นกันการกัดกร่อน (Anti-cor-rosive Primers) สำหรับใช้ทาเหล็ก

7 แคดเมียมเรด (Cadmium Red)

แคดเมียมเรด เป็นผงสีที่ประกอบด้วยของผสมระหว่าง CdS และ CdSe โดยมีอัตราส่วนระหว่าง Cd : Se เท่ากับ 100 : 25 (สีแดงสดใส, Bright Red) หรือเท่ากับ 100 : 400 (สีแดงเลือดนก, Dark Maroon)

8 โครมกรีน (Chrome Green)

บางที่เรียกกันว่ามิลอริกกรีน (Milor Green) ผงสีชนิดนี้เป็นของผสมระหว่างโครมเยลโลว์ และไลออนบลู โครมกรีนมีสมบัติเป็นสารเร่งแห้งที่ดี ดังนั้นสารเคลือบผิวที่ใช้โครมกรีนเป็นผงสีจึงต้องการสารเร่งแห้งปริมาณไม่มาก ผงสีชนิดนี้มีความทึบแสงสูง ทนแสงสว่าง และไม่คายสีในน้ำ น้ำมัน แอลกอฮอล์ และพาราฟินร้อน

กรดอ่อนจะทำให้ผงสีเปลี่ยนเป็นสีแกมม่าน้ำเงินมากขึ้น และด่างจะทำให้ไฮดรอกไซด์เปลี่ยนเป็นเหล็กออกไซด์ ซึ่งทำให้สีเปลี่ยนจากน้ำเงินมาเป็นน้ำตาล ดังนั้นจะมีผลทำให้สีเขียวของผงสีโครมกรีนหมดไป

9 ซิงก์กรีน (Zinc Green)

ซิงก์กรีนเป็นผงสีที่ประกอบด้วยของผสมระหว่างไฮดรอกไซด์ และซิงก์เยลโลว์ชนิดที่ 1 (ZnCrO_4)

10 โครเมียมออกไซด์กรีน (Chromium Oxide Green)

บางที่เรียกกันว่าโครมออกไซด์กรีน (Chrom Oxide Green) ประกอบด้วย Cr_2O_3 97 - 98% ได้จากการเผาโซเดียม หรือโปแตสเซียมไดโครเมต กับสารรีดิวส์ เช่น กำมะถัน หรือคาร์บอน

โครเมียมออกไซด์กรีนทนกรดและด่าง ทนความร้อนได้ถึง 100 องศาเซลเซียส ทนแสงสว่าง ผงสีชนิดนี้ที่บดแล้วดี แต่มีสีไม่สดใส (Dull)

11 ไฮเดรตโครเมียมออกไซด์กรีน (Hydrate Chromium Oxide Green)

บางที่เรียกกันว่า Guignet's Green มีสูตรโครงสร้างคือ $\text{CrO}(\text{OH})$ ได้จากการเผา Alkali Metal Bichromate กับกรดบดริก ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ผงสีชนิดนี้ให้สีที่สดใส มีการดูดกลืนน้ำมันสูงและบดยาก

ในทางตรงกันข้ามกับโครมออกไซด์กรีน ผงสีชนิดนี้จะโปร่งแสง ทนความร้อนได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า และจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

3.4.6 ลักษณะสมบัติของสีที่ใช้ในการวิจัย

กากสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการเก็บตัวอย่างจากโรงงานขัดสีของถังบรรจุก๊าซหุงต้มและโรงเคาะพ่นสีรถยนต์ ซึ่งกากสีที่ได้มีส่วนประกอบต่างๆ คือ

3.4.6.1 กากเศษสีจากถังบรรจุก๊าซหุงต้ม

ในอุตสาหกรรมการพ่นสีเคลือบถังบรรจุก๊าซที่จะใช้เป็นตัวตัวอย่างกากเศษสีในการวิจัย มีการใช้สีประเภท Quick Drying Enamel Pit Metallic Blue ซึ่งเป็นสีที่แห้งเร็วในอากาศโดยไม่ต้องมีการอบ สำหรับสีพ่นซ่อมสีถังก๊าซหุงต้มจะใช้สีชนิด Phenolic Modified Alkyd Resin ขนาดความจุภาชนะ 5 ยูเอสแกลลอน/ถัง มีคุณสมบัติดังนี้

- ชนิด Phenolic Modified Alkyd Resin
- Shade สี Metallic Blue
- เนื้อสี(โดยปริมาตร) 40% - 45%
- ความหนืดเนื้อสี 85 - 100 KU (Krebb Unit) ที่ 30°ซ
- % Pigment Phthalocyanine Blue ไม่น้อยกว่า 3% ของ Total Pigment (Base on Weight)
- ใช้ได้กับ ทินเนอร์ Toluene 100% ปริมาณผสมใช้ทินเนอร์ไม่เกิน 1 ลิตร ต่อสี 1 ยูเอสแกลลอน
- ใช้ได้กับระบบการพ่นแบบ Air Spray , Airless Spray , Airless Electrostatic Spray

ดังนั้นในการเคลือบสีของถังบรรจุก๊าซหุงต้มมีการใช้ส่วนผสมดังนี้

1. สีรองพื้นชนิด Zinc Chrome Primers

ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

ตัวอย่างสูตรของ Red Oxide - Zinc Chrome Primer

	ร้อยละโดยน้ำหนัก
เหล็กออกไซด์แดง	35.9
ซิงก์โครเมต	10.0
ทัลก์	3.0
แคลเซียมคาร์บอเนต	1.5
เลซีทิน	0.4
อัลคิเดชนิด Medium - Oil (70%ของแข็ง)	36.4
ไวท์ลปิริต	11.4
ตะกั่วเนฟทีเนต (24%)	1.0
โคบอลต์เนฟทีเนต (60%)	0.4

2. สีทับหน้า (Finishing Coats)

ตามข้อกำหนดที่ใช้ระบบชนิดมีทับหน้าโดยมีปริมาณเนื้อสี (Pigment) 40%-45% ของสีทับหน้าที่ใช้มีองค์ประกอบดังนี้

	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Phenolic Resins	45.0
Pigment (Metallic Blue $PbCrO_4$)	31.5
สารเติมแต่ง (Additives)	20.0
Phthalocyanine Blue	3.0
สารเร่งแห้ง (Co/Zr ออกโทเอต)	0.5

ตามทฤษฎีแล้วการชุบสีเก่าออกเพื่อพ่นสีใหม่นั้นจะต้องชุบชั้นสีรองพื้นและสีทับหน้าออกเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติการชุบสีออกจะมีผิวโลหะของถังบรรจุก๊าซถูกชุบออกมาด้วย ดังนั้นส่วนผสมที่ได้ในภาคเศษสีที่ชุบออกมาจึงมีความคลาดเคลื่อนจากส่วนผสมข้างต้นนี้

3.4.6.2 ผุ่นสีจากการชุบสีรถยนต์

สีที่ใช้ในการพ่นสีรถยนต์เป็นสีที่มีคุณสมบัติเดียวกันกับสีที่ใช้พ่นถังบรรจุ
ก๊าซ มีส่วนประกอบดังนี้

1. สีรองพื้นชนิด Zinc Chrome Primers

ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

ตัวอย่างสูตรของ Red Oxide - Zinc Chrome Primer

ร้อยละโดยน้ำหนัก

เหล็กออกไซด์แดง	35.9
ซิงก์โครเมต	10.0
ทัลก์	3.0
แคลเซียมคาร์บอเนต	1.5
เลซีทิน	0.4
อัลคิเดน Medium - Oil (70%ของแข็ง)	36.4
ไวท์สปีริต	11.4
ตะกั่วเนฟทีเนต (24%)	1.0
โคบอลต์เนฟทีเนต (60%)	0.4

2. สีทับหน้า (Finishing Coats)

เนื่องจากผุ่นสีเกิดจากการชุบสีรถยนต์เพื่อเคลือบสีใหม่ซึ่งรถยนต์แต่ละคันมีสีที่
ไม่เหมือนกัน เมื่อทำการเก็บตัวอย่างผุ่นสีที่ถูกชุบออกมาจึงมีการผสมกันของสีต่างๆ สีที่ใช้พ่น
รถยนต์ จึงไม่สามารถจำแนกชนิดของสีที่ใช้ ออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ จากหัวข้อ 3.4.6 เนื้อสี
(Pigment) ที่ใช้ในการพ่นสีจะมีปริมาณสารประกอบที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบอยู่ในสีต่างๆ
ได้แก่ $PbCrO_4$, PbO , $PbCrO_4$, $ZnCrO_4$, $CdSe$, $CrO(OH)$, Pb_3O_4 , Cr_2O_3 เป็นต้น

3.5 การกำจัดของเสียที่เป็นอันตรายและโลหะหนัก

ของเสียที่เป็นอันตราย (Hazardous Waste) หมายถึง สิ่งที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม
และสุขภาพของมนุษย์ มีผู้ให้คำจำกัดความของ Hazardous Waste ต่างๆ กันดังนี้ คือ

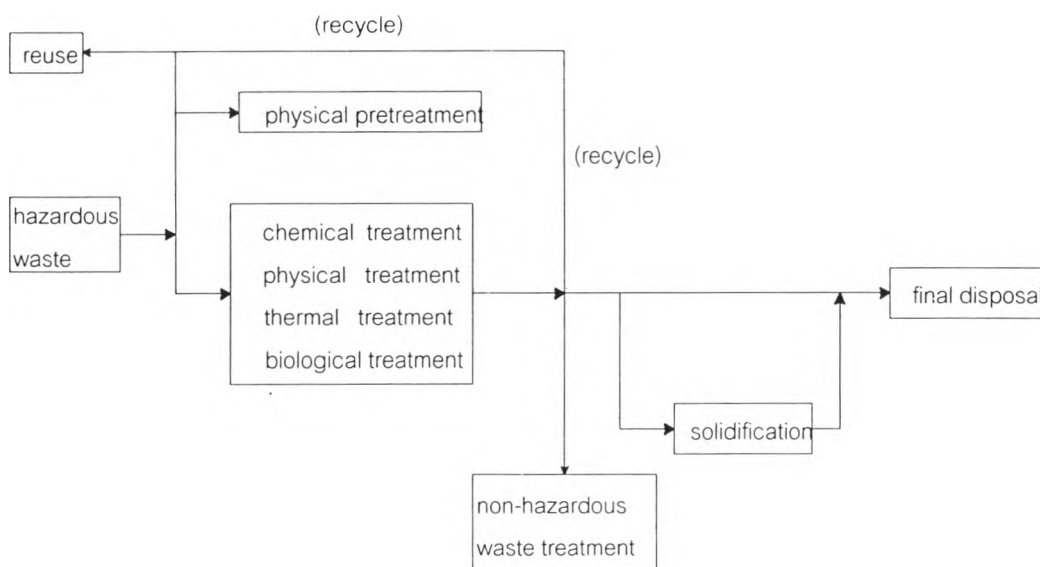
- 1) ของเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม (ไม่ว่าจะอยู่ในรูป ของแข็ง กิ่ง
ของเหลว ของเหลว และก๊าซ) และปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม (ทางน้ำ อากาศ และดิน)
- 2) สิ่งต่างๆ ที่ไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ และเมื่อถูกนำไปทิ้งโดยไม่ได้กำจัด ไม่ว่าจะทิ้งใน
น้ำ ดิน หรืออากาศ จะก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ พืช สัตว์ และสิ่งแวดล้อม

3) ของเสียใดๆ ซึ่งลุกติดไฟได้, ทำให้เกิดโรคติดต่อ, สะสมในสิ่งมีชีวิต แล้วก่อให้เกิดมะเร็ง หรือเกิดการผ่าเหล่าได้

ของเสียที่เป็นอันตราย (Hazardous Waste) ตามคำจำกัดความของ กรมควบคุมมลพิษ หมายถึง ของเสีย หรือสิ่งที่เจือปนด้วยของเสียที่ของเหลว ของแข็ง หรือก๊าซที่มีความเข้มข้น หรือคุณสมบัติทางด้านกายภาพ เคมี หรืออื่นๆ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการตาย หรือการเจ็บป่วย ทั้งที่รักษาได้ และรักษาไม่ได้ ตลอดจนทำให้เกิดหรือมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้มีการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด เก็บกัก ขนส่ง และกำจัด

สำหรับคำจำกัดความของ "วัตถุอันตราย" (พ.ร.บ. ส่งเสริมสิ่งแวดล้อม ปี พ.ศ. 2535) หมายถึง วัตถุระเบิดได้ วัตถุไวไฟ วัตถุออกซิไดซ์ และวัตถุเปอร์ออกไซด์ วัตถุมีพิษ วัตถุที่ทำให้เกิดโรค วัตถุกัมมันตรังสี วัตถุที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม วัตถุกัดกร่อน วัตถุที่ก่อให้เกิดการระคายเคือง วัตถุอย่างอื่นไม่ว่าจะเป็นเคมีภัณฑ์ หรือสิ่งอื่นใดที่อาจทำให้เกิดอันตรายแก่บุคคล สัตว์ พืช ทรัพย์ หรือสิ่งแวดล้อม

TSAI และ HSU (1985) ได้อธิบายถึงขั้นตอนและกระบวนการ กำจัดของเสียที่เป็นอันตราย ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment) เคมี (Chemical Treatment) ความร้อน (Thermal Treatment) และชีวภาพ (Biological Treatment) รวมถึงการทำให้เป็นก้อน (Solidification) และการกำจัดขั้นสุดท้าย (Final Disposal) ดังแสดงรายละเอียดในแผนผังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงกระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตราย (TSAI และ HSU,1985)

3.6 การกำจัดของเสียอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน (Solidification of Hazardous Wastes)

3.6.1 นิยามของ Solidification

กระบวนการทำให้เป็นก้อน (Solidification) และ การทำลายฤทธิ์ (Stabilization) จะใช้อธิบายร่วมกันในการอธิบายถึงระบบที่ทำให้สารต่างๆ ถูกยึดไว้และไม่สามารถแสดงคุณสมบัติทางเคมีเดิมออกมาได้

Anderson และคณะ (1979) อ้างถึงใน Rijal (1990) ได้ให้ความหมายของ Solidification ว่าเป็นกิจกรรม ซึ่งสารที่กระจัดกระจายอยู่หรือตะกอน หรือองค์ประกอบของสารเหล่านี้จะถูกนำมารวมกันเพื่อทำให้เกิดเป็นมวลแข็งตัวขึ้น

การทำให้เป็นก้อนเป็นกระบวนการบำบัดของเสียอันตราย เพื่อจำกัดความเป็นพิษของของเสีย โดยทั่วไปของเสียอันตรายจะถูกยึดติดด้วยกระบวนการทางเคมี หรือทำให้ดูดติดทางกายภาพ โดยการผสมสารเคมีบางชนิดลงไป Sheffield และคณะ (1986) ได้รายงานว่ วิธีการทำลายฤทธิ์ดังกล่าวนี้ ถูกออกแบบมาเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของของเสีย เพื่อลดผลกระทบต่อ การขนส่งและเคลื่อนย้าย, การลดพื้นที่ผิวของของเสีย และจำกัดการปนเปื้อนของสารมลพิษที่ปล่อยออกมาจากของเสีย

Thomson (1979) อ้างถึงใน Rijal, (1990) กล่าวว่า ในระยะแรกนั้นกระบวนการทำให้เป็นก้อนได้ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับของเสียที่เป็นสารกัมมันตภาพรังสีที่ไม่แอคทีฟ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของของเสีย ให้สามารถขนย้ายไปยังสถานที่กำจัดได้ และได้มีการเลือกกระบวนการในการบรรจุเก็บของเสียกัมมันตภาพรังสีในระยะยาว วัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้ที่ถูกเลือกจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) ลดศักยภาพสำหรับการแผ่รังสี
- 2) ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้และเก็บบรรจุของเสียในรูปที่ไม่สามารถถูกละลายได้

วัสดุที่มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการดังกล่าวคือ ปูนซีเมนต์ผสม, Bituminous Material, Urea Formaldehyde, Resins และ Glass

Bahadir และคณะ (1987) อ้างถึงใน Rijal (1990) รายงานว่ การทำให้ของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรมแข็งตัว จะแตกต่างจากของเสียที่มีกัมมันตภาพรังสี ทั้งนี้เพราะของเสีย

อันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม จะมีปริมาณมาก มีความเป็นพิษปานกลาง และมีคุณสมบัติ ไม่สม่ำเสมอ

Shively และ คณะ(1986) กล่าวว่า กระบวนการทำให้เป็นก้อนที่ใช้สำหรับการกำจัดของเสียประกอบด้วย Cement Based Techniques, Lime Based Technique, Thermoplastic Techniques (Bitumen, Paraffin, and Polyethylene), Organic Polymers, Encapsulation, Self-Cementing (Pozzolan) Techniques and Glassification

เทคนิคการทำให้แข็งตัวแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ Porous Systems และระบบ Monolithic Systems ซึ่งแตกต่างกันที่ความสามารถทนทานต่อน้ำ สำหรับวิธีการใน 2 วิธีแรกคือ Cement Based Technique และ Lime Based Technique จัดเป็นระบบ Porous Systems ซึ่งอาจมีการชะละลายสารต่างๆออกมาได้ โดยวัสดุที่ทำให้แข็งตัวที่ใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์, ฝุ่นซีเมนต์จากเตา, ซิลิกาเกตที่สามารถละลายน้ำ, แถาลอย, ซีโลหะจากเตาหลอม, ปูนขาว Bituminous Asphalt และสารโพลีเมอร์ ส่วนระบบแบบ Monolithic Systems นั้นจะสามารถป้องกันการซึมแพร่ของน้ำได้

Barns และคณะ (1979) อ้างถึงใน Rijal (1990) ได้กำหนดความต้องการ สำหรับขบวนการทำให้เป็นก้อนของสารพิษ, สารอันตราย และของเสียกำจัดยากไว้ดังนี้

- 1) สารพิษทั้งหมดในของเสียควรมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ, ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและสามารถถูกยึดจับไว้ในของเสียได้ดี
- 2) ของเสียที่ทำเสถียรแล้วควรจะเป็นมวลแข็ง ที่น้ำ และแสง ไม่สามารถผ่านได้และมีพื้นที่ผิวสำหรับสัมผัสกับน้ำน้อยที่สุด
- 3) มวลของแข็งควรมีคุณสมบัติดังนี้
 - มีความคงตัวตามลักษณะขนาด
 - มีคุณสมบัติ ของการเปียก/แห้ง (Wet/Dry) และการแข็งตัว/การละลาย (Freeze/Thaw) ที่ดี
 - มีความทนทานต่อน้ำหนักและแรงกดได้ดี
 - การซึมผ่านของน้ำต่ำ
- 4) สถานที่สำหรับกำจัดสามารถใช้งานได้ภายหลังการฝังของเสียแล้ว

3.6.2 กระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำลายฤทธิ์ (Solidification and Stabilization Process)

กระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำลายฤทธิ์ เป็นวิธีการที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการละลายของสารเคมี ที่เป็นของเสียอันตราย และการปนเปื้อนของสารพิษลงสู่สิ่งแวดล้อม วัตถุประสงค์ของกระบวนการดังกล่าว เพื่อสร้างมวลของแข็งเนื้อเดียวที่มีความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้น้อย และมีโครงสร้างที่มั่นคงแข็งแรง โดยกำหนดหลักสำคัญ 4 ข้อ ในการบำบัดของเสียอันตรายดังนี้

- 1) ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของของเสียให้เหมาะสมในการเคลื่อนย้าย
- 2) การลดพื้นที่ผิวของของเสียเพื่อป้องกันหรือลดการสูญเสียสารมลพิษ
- 3) การจำกัดการละลายของสารมลพิษที่อยู่ในของเสีย
- 4) การกำจัดสารมลพิษออกจากของเสีย

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของกระบวนการทำให้เป็นก้อนประเภทต่างๆ 7 วิธี ได้แก่ Cement Based, Pozzolanic, Thermoplastic, Organic Polymer, Surface Encapsulation, Self Cementing และ Glassification and Production of Synthetic Minerals or Cements การเลือกวิธีการบำบัดของเสียดังกล่าว ควรเลือกให้เหมาะสมกับของเสียประเภทต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของของเสียและคุณสมบัติเฉพาะของของเสีย สำหรับตะกอนโลหะหนักนั้นสามารถกำจัดได้หลายวิธี

ตารางที่ 3.1 กระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน
(Engineering and Science, 1989)

กระบวนการทำให้เป็นก้อน (Solidification)	รายละเอียด
1. Cement Based	ของเสียจะถูกผสมลงในซีเมนต์น้ำและส่วนผสมอื่นๆ แล้วปล่อยให้แห้งจนแข็งตัว เป็นก้อนซีเมนต์
2. Pozzolanic (Lime Based)	ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาว และวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นพอซโซลาน เช่น เถ้าลอย, ผงซีเมนต์ที่เตาเผา เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งตัวได้เมื่อผสมน้ำ ผสมน้ำแล้วปล่อยให้แห้งตัว
3. Thermoplastic	นำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น Bitumen, Paraffin หรือ Polyethylene ปล่อยให้ส่วนผสมเย็นตัวลงและแข็งตัว
4. Organic Polymer	ของเสียในขั้นแรกจะถูกผสมกับ สารโพลีเมอร์ (Gelling Agents หรือ Urea Formaldehyde) และเติมสารแคตตาไลสต์ผสมให้เข้ากันก่อนที่สารโพลีเมอร์จะแข็งตัว
5. Surface Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันให้แน่นแล้วเคลือบผิวนอกของของเสียที่ถูกบดอัดด้วยสารเชื่อม เช่น Polyethylene หรือ Organic Resins
6. Self-Cementing	สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซิลเฟต และแคลเซียมซิลไฟท์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมได้แก่ การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถนำมาใช้ผสมกับตะกอนของเสียเพื่อหล่อให้แข็งตัวได้ โดยวัสดุที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย และมีความสามารถให้น้ำซึมได้น้อย
7. Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics	สารที่เป็นอันตรายมาก เช่น กากสาร กัมมันตภาพรังสี สามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็นส่วนผสมของแก้วหรือ Synthetic Silicate Mineral เพื่อป้องกันการไม่ให้สารอันตรายนี้ถูกชะละลายด้วยน้ำ สามารถนำไปกำจัดต่อไปโดยไม่ต้องมีขบวนการหุ้มหรือบรรจุเป็นครั้งที่ 2

เช่น Cement Based, Lime Based, Thermoplastic, Surface Encapsulation และ Glassification

Shukrow และคณะ (1982) อ้างถึงใน Rijal (1990) ได้สรุปข้อดีและข้อเสีย สำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อน 7 วิธี ดังสรุปไว้ในตารางที่ 3.2

3.6.3 การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ (Cement Based Technique)

กระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ ประกอบด้วย การผสม ของเสี้ยวกับปูนซีเมนต์ และสารอื่นที่เติมลงไป ได้แก่ เถ้าลอย, ซิลิกา, ซัลไฟด์ ฯลฯ โลหะหนักหลายชนิดในของเสี้ยวจะถูกเปลี่ยนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ และโลหะซิลิเกต ซึ่งไม่ละลายน้ำ ในสภาพแวดล้อมซึ่งมีความเป็นด่างสูงมากในปูนซีเมนต์ และโลหะหนักจะถูกจับไว้ให้อยู่ภายในส่วนผสมปูนซีเมนต์ รวมทั้งในช่องว่างของปูนซีเมนต์ (Bishop, 1988) สรุปข้อดีและข้อเสียได้ดังนี้

ข้อดี

1. สารที่เติมในส่วนผสมมีเพียงพอสำหรับอัตราส่วนที่ใช้
2. เทคนิคการผสมซีเมนต์ และการกำจัดได้มีการพัฒนามาอย่างดีแล้ว
3. วิธีการนี้จะสามารถทนต่อสารเคมีหลายชนิดในตะกอนของแข็งได้เป็นอย่างดี
4. เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการมีอยู่แล้ว
5. ความแข็งแรงและความสามารถในการน้ำซึมผ่านของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแข็งตัวสามารถปรับได้โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมลงในของเสี้ยว
6. วัสดุที่ใช้มีราคาถูก

ข้อเสีย

1. ไม่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์บางชนิดซึ่งจะทำลายกลไกการแข็งตัวของซีเมนต์
2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถถูกชะละลายได้ในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ
3. การเพิ่มน้ำหนักของของเสี้ยว โดยการหล่อด้วยซีเมนต์จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งของเสี้ยวไปกำจัดเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบกระบวนการ ข้อดีและข้อเสียของการกำจัดของเสียโดยวิธีทำให้เป็นก้อน (Shukrow และ คณะ ,1982)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Cement Based	Chemical Fixation Solidification	แห้งหรือเปียก (โดยทั่วไป เหมาะกับของเสียที่เป็น สารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้มีราคาถูก - มีความทนทานต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี - กำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดี - เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาอย่างดีแล้ว 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ซีเมนต์และของเสียที่แข็งตัวแล้วถูกชะล้างได้ในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ - เพิ่มน้ำหนักและขนาดของของเสีย และเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการฝังกลบ - เหมือนกับกระบวนการประเภท Cement Based
2. Lime Based	Chemical Fixation/ Solidification	แห้งหรือเปียก (เหมาะ สำหรับของเสียที่เป็น สารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้ผสมมีราคาถูก - เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างดีแล้ว - การใช้เถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมเป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิด โดยขบวนการเดียวกัน 	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีได้เป็นอย่างดี
3. Thermoplastic Based	Physical Fixation	แบบแห้ง (เหมาะกับ สารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - สารละลายที่ชะล้างมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความชำนาญ - ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ - ไม่สามารถใช้กำจัดสารพวก Strong Oxidants , Dehydrated Salts
4. Organic Polymer Process	Physical Fixation	แบบแห้งหรือเปียก (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิด Polymer's Matrix - ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียจะถูกยึดไว้ในโพลีเมอร์อย่างหลวม ๆ - สารที่มี pH ต่ำ จะทำให้โลหะละลายออกมาได้มากขึ้น - การย่อยสลายทางชีวของสารโพลีเมอร์บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบกระบวนการและข้อดีข้อเสียของการกำจัดของเสียโดยวิธีทำให้เป็นก้อน (Shukrow และ คณะ ,1982) (ต่อ)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
5. Encapsulation	Chemical Containment	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> - ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี - ไม่มีการชะล้างของของเสียออกมา เมื่อสารที่หุ้มห่ออยู่ไม่ถูกทำลาย - ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ 	<ul style="list-style-type: none"> - การชะล้างของเสียจะเกิดขึ้นหากสารที่หุ้มห่อทำลาย - ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่ต้องกำจัดของเสียจำนวนมาก ๆ
6. Self Cementing	Chemical Fixation	แห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> - กระบวนการนี้ต้องการสารเติมในส่วนผสมซีเมนต์ ซึ่งจะช่วยให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - สารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการห่อหุ้มสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะล้างได้ภายใต้สภาวะที่มี pH ต่ำ
7. Glassification (Vitrification)	1 Physical Fixation	แบบแห้ง	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก้วจะถูกชะล้างได้น้อยมาก - การบรรจุหรือหุ้มห่ออยู่ในเกณฑ์ดี - ใช้วัสดุที่มีราคาสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิสูงอาจทำให้ของเสียอื่นระเหยออกมา - ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับการให้ความร้อนอุปกรณ์ และต้องการผู้ชำนาญงานเฉพาะ - ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการกำจัดของเสียทุกชนิด ยกเว้นสารกัมมันตภาพรังสี และสารมีพิษมาก ๆ

3.6.4 กลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์

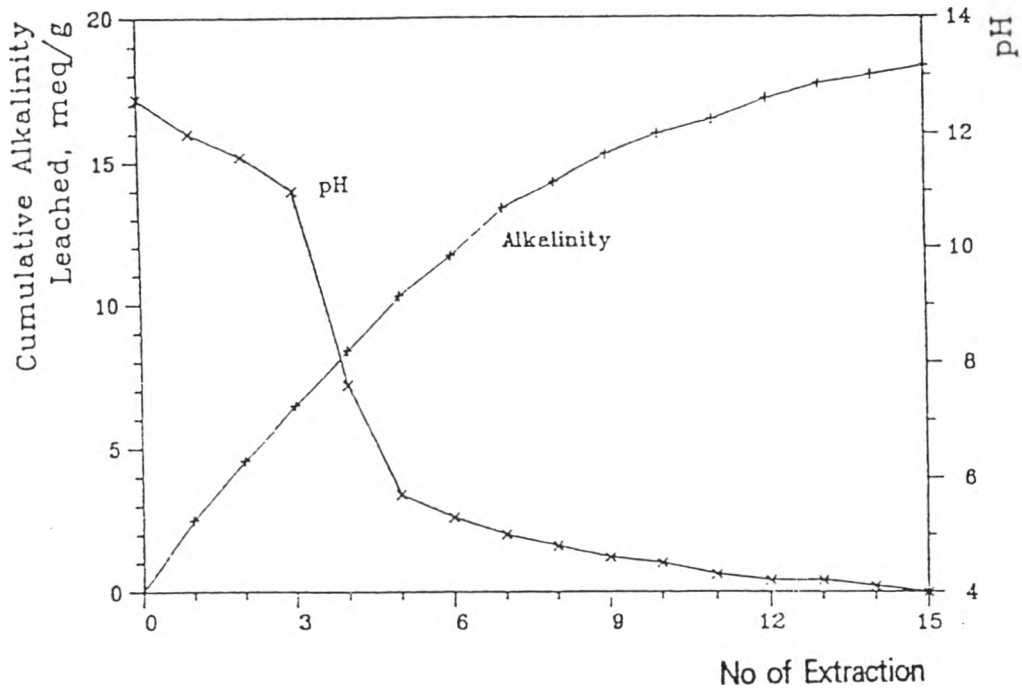
BISHOP (1988) ได้ทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการชะละลายโลหะหนักในของเสี้ยวที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (Cement Based Solidification) โดยใช้ของเสี้ยวสังเคราะห์เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ของแคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว โดยได้ศึกษาถึง Buffering Capacity ของวัสดุที่แข็งตัวจากการกำจัดโลหะหนัก และกลไกการยึดจับโลหะหนักของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในของเสี้ยวที่ถูกทำให้แข็งตัว (Solidified Waste) สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

3.6.4.1 ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity)

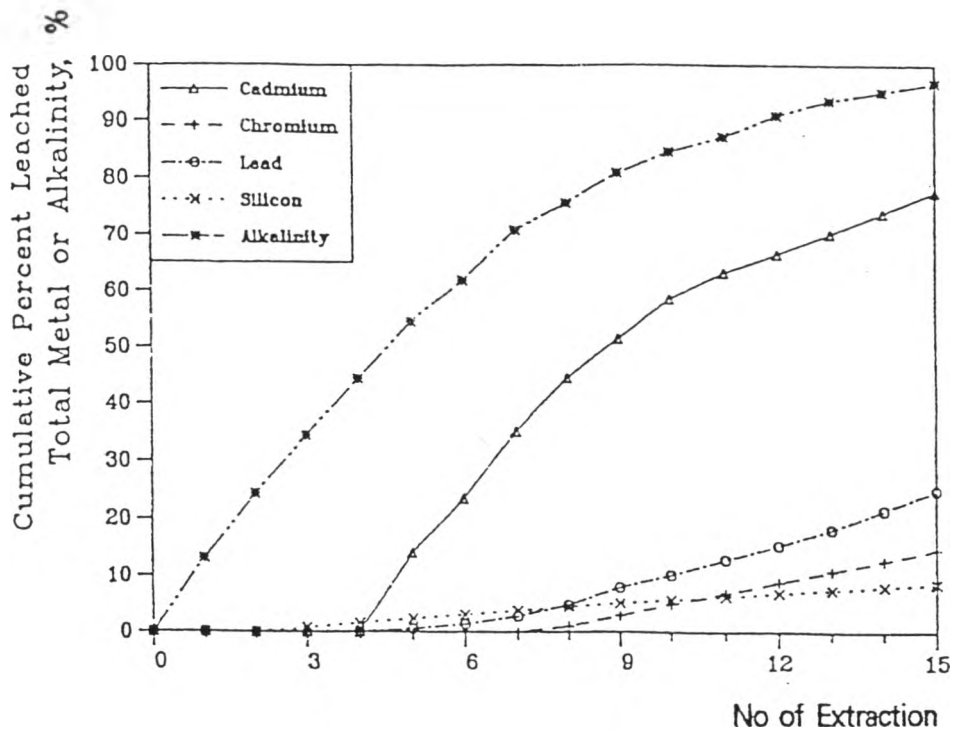
จากการทดสอบการชะละลาย (Leaching Test) กับของเสี้ยวที่แข็งตัวในซีเมนต์ โดยทำการชะละลายของเสี้ยวแข็งตัวด้วยกรดอะซิติก แล้วทำการชะละลายติดต่อกันอีกเป็นจำนวนรวมทั้งหมด 15 ครั้ง ตรวจวัดค่า pH และความเป็นด่าง (Alkalinity) แล้วนำไปเขียนกราฟ ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อทำการชะละลายของเสี้ยวแข็งตัวหลายๆ ครั้งพบว่า ค่า pH ของกรดที่ผ่านการชะละลายแล้วมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเกือบคงที่ในครั้งที่ 15 ส่วนค่าความเป็นด่างสะสม (Cumulative Alkalinity) จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยในครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะละลายได้จะเหลือน้อยมากประมาณ 1.7% ของค่าความเป็นด่างสะสมทั้งหมด โดยความเป็นด่างจะถูกชะล้างออกมามากในช่วงต้นและลดลงตามลำดับจนถึงครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างสะสมถึงการชะล้างในครั้งที่ 15 มีค่าเท่ากับ 18.3 meq/g ซึ่งถือเป็นค่า Buffering Capacity ของของเสี้ยวแข็งตัว ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะล้างออกมาแต่ละครั้งนี้จะเป็นตัวควบคุม pH ของการชะล้าง โดยการสะเทินกรดอะซิติกที่ใช้ในการทดลองให้เป็นกลาง

3.6.4.2 กลไกการยึดจับโลหะหนัก

จากกราฟรูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลาย (แคลเซียม , โครเมียม และตะกั่ว) กับค่าความเป็นด่าง และซิลิโคนซึ่งจะถูกชะละลายมากขึ้นเมื่อค่า pH ลดลงต่ำกว่า 6.0



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงค่าพีเอช (pH) และความเป็นด่าง (Alkalinity) จากการทดสอบการชะละลาย (Bishop, 1988)



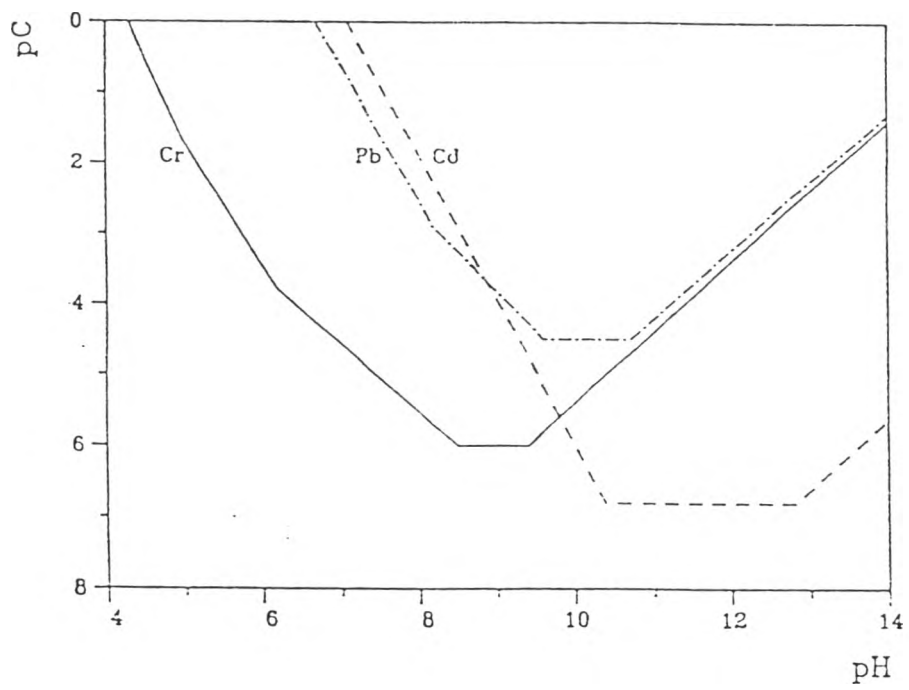
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายกับค่าความเป็นด่างและซิลิคอน จากการทดสอบการชะละลาย (Bishop, 1988)

จากการทดลองที่ผ่านมาหลายๆ ครั้ง ทำให้ทราบว่า โลหะหนักอาจจะอยู่ในโครงสร้างของของเสี้ยแข็งตัวในรูปแบบต่างๆ เช่น อยู่ในรูพรุนของโครงสร้างภายในของของเสี้ยแข็งตัว, ถูกเกาะติดบนผนังของรูพรุน และทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แคดเมียม (Cd) จะถูกชะละลายออกมาได้มากกว่า โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) ซึ่งถูกชะล้างออกมาได้น้อย

กรณีที่โลหะหนักถูกปล่อยออกมาในของแข็งหรืออยู่ในรูพรุน หรือเกาะติดผิวรูพรุนแล้วโลหะหนักเหล่านี้ ควรจะถูกชะละลายออกมาคล้ายกับการชะละลาย ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) จากรูปที่ 3.4 เส้นกราฟของแคดเมียมสะสม ที่ถูกชะล้างออกมาจะคล้ายคลึงกับเส้นกราฟของค่าความเป็นด่างสะสมที่ถูกชะล้างออกมา ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่า แคดเมียมจะอยู่ในของเสี้ยที่แข็งตัวในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ โดยอยู่ตามรูพรุนและเกาะติดอยู่ตามผนังของรูพรุน

สำหรับโครเมียมและตะกั่ว นั้น เมื่อพิจารณาเส้นกราฟแล้ว พบว่ามีรูปแบบของการถูกชะละลายคล้ายคลึงกับซิลิกอน ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์และทราย ดังนั้นจึงเชื่อว่าโครเมียมและตะกั่วจะถูกยึดอยู่ในโครงสร้างของซิลิกอนมากกว่าเป็น โลหะไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูพรุน การชะละลายของโครเมียมและตะกั่วค่อนข้างยาก โดยจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ pH ต่ำๆ และต่ำกว่า pH ในการชะละลายแคดเมียม อัตราการชะละลายของโลหะทั้งสองนี้มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการชะละลายที่คาดคะเนจากการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงว่าโลหะทั้งสองนี้จะเกาะติดอย่างแข็งแรงภายในโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกา และจะถูกชะละลายออกต่อเมื่อโครงสร้างของซิลิกานี้ถูกทำลาย

รูปที่ 3.5 แสดง pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของ แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว ในสารละลายที่มีค่า Ionic Strength 0.75 M พบว่า ในขณะที่เริ่มผสมปูนซีเมนต์และส่วนผสมอื่นๆ ค่า pH จะสูงประมาณ 12-13 ซึ่งทำให้แคดเมียมส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ และอยู่ในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็น ของแข็งอยู่ในรูพรุนของซีเมนต์ ส่วน โครเมียม และตะกั่ว จะละลายน้ำได้ และมีส่วนในปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ และเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิเกต จากสาเหตุดังกล่าวนี้จึงอธิบายได้ว่า แคดเมียมจะถูกชะละลายออกมาเช่นเดียวกับค่าความเป็นด่าง ส่วนโครเมียม และตะกั่ว จะถูกชะล้างออกมาโดยขึ้นกับการละลายของซิลิเกต



รูปที่ 3.5 กราฟ pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียมโครเมียมและตะกั่ว (Bishop, 1988)

ภายหลังการทดลอง Leaching Test ได้วิเคราะห์น้ำหนักแห้งของสารทั้งหมดพบว่า ภายหลังจากการทดลองชะล้าง 15 ครั้ง ปริมาณสารที่ถูกชะล้างออกไปประมาณ 50-70% ของปริมาณทั้งหมดก่อนการทดลอง แต่ว่ายังมีโลหะหนักเหลืออยู่ โดยมีแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว เหลืออยู่ 50, 85 และ 75% ตามลำดับ และมีโลหะที่เป็นสารประกอบโดยปกติในซีเมนต์ ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็ก และ Silicon เหลืออยู่ 90, 98 และ 80% ตามลำดับ และแคลเซียมเหลืออยู่ 8% ดังนั้นจากผลการทดลองนี้ จึงแสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์ที่แข็งตัวสามารถยึดจับโลหะหนักได้ดี และยากที่จะทำการชะละลายโลหะหนักออกจากซีเมนต์ที่แข็งตัวดังกล่าว

3.7 การทดสอบการชะละลาย (Leaching Tests)

การทดสอบการชะละลายแบ่งออกได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์คุณภาพของสารที่ต้องการทดสอบ โดยใช้ปริมาณตัวอย่างสาร วิธีการเตรียมตัวอย่าง และเครื่องมือที่แตกต่างกัน ตารางที่ 3.5 สรุปและเปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะละลาย แบบต่างๆ

Conway และ Mally (1981) อ้างถึงใน Youn (1990) ได้แบ่งวิธีการทดสอบออกเป็น 2 วิธี คือ Batch Tests และ Column Tests โดย Batch Tests เป็นการทดสอบการชะละลายโดยให้ตัวอย่างสารสัมผัสกับของเหลวที่ใช้ในการชะละลาย (Extract Solution) ในภาชนะอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาทำการทดสอบ ส่วน Column Tests นั้น จะทำการทดสอบในคอลัมน์ ซึ่งบรรจุตัวอย่างสารที่จะทดสอบจนแน่น และป้อนสารที่ใช้ทดสอบผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

ในอดีตการทดสอบการชะละลายของสารนิยมใช้ทั้งวิธี Batch Tests และ Column Tests ปัจจุบันการออกแบบเครื่องมือสำหรับ Batch Tests จะใช้กับการทดสอบการชะละลายของของเสีย ก่อนที่จะนำไปกำจัดโดยการฝังกลบ

U.S.EPA (1980) ได้กำหนดวิธี Toxicant Extraction Procedure (TEP) เป็นวิธีที่ใช้บังคับ ต่อมาได้มีการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการเป็น วิธี Extraction Procedure (EP) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ดังมีรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะละลาย (Extraction Test Procedures) (Perket และ Webster, 1981)

การทดสอบการชะละลาย	Standard Leach Test	(US EPA) Toxicant Extraction Procedure	ASTM Method A	Extraction Procedure
1. ปริมาณตัวอย่างสาร	28.6 กรัมตัวอย่างสาร (ส่วนที่เป็นของแข็ง)	ไม่ระบุน้ำหนักต่ำสุด	350 กรัม	น้ำหนักอย่างน้อย 100 กรัม (0.5 %) ของแข็ง)
2. การเตรียมตัวอย่าง สาร	แยกของเหลว โดยใช้ 0.45 mm pressure filtration	แยกของเหลวโดยวิธี centrifugation หรือ filtration		บดจนมีขนาด 9.5 มม.
3. อัตราส่วนของเหลว ต่อของแข็ง	10 : 1 ถึง 7 : 1	10 : 1 ถึง (เริ่มต้น 8 : 1)	4 : 1	20 : 1 (เริ่มต้น 16 : 1)
4. สารที่ใช้ทดสอบการ ชะละลาย (Extraction Solution)	buffered acetic acid หรือ น้ำกลั่น	acetic acid หรือ Sodium hydroxide	ASTM Type IV water	0.5 N acetic acid; 4 มล./ก ของตัวอย่างสาร
5. การควบคุม pH		4.9 - 5.2	ไม่กำหนด	4.8 - 5.2
6. ภาชนะที่ใช้ทดสอบ	ภาชนะ-ปิด	ไม่กำหนด	ขวดปากกว้าง (ปิดฝา)	เครื่องกวนหรือเครื่องมือที่ เทียบเท่า
7. วิธีการผสมและระยะเวลา การทดสอบ	rotating shaker 24 ซม.	mechanical stirring 24 ซม.	reciprocating shaker 48 ซม.	เครื่องกวนต่อเนื่อง 24 ซม.
8. การแยกของเหลว และของแข็ง	กรองผ่านกรองใยแก้ว ขนาด 0.45 mm	centrifugation หรือ กรองผ่านกรองขนาด 0.45 mm	กรองผ่านกรอง 0.45 mm โดยใช้เครื่องกรองแบบ ความดันหรือแบบสูญญากาศ	กรองผ่านกรอง 0.45 mm

17871165

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2531) ได้กำหนดวิธีการทดสอบการชะละลายของของเสียอันตราย โดยใช้วิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure)

ดังมีรายละเอียดของขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. บดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดของสิ่งปฏิกูลระหว่าง 0.5-5 มิลลิเมตร
2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1. หนัก 50 กรัม ใส่ในตัวทำละลาย ซึ่งประกอบด้วย น้ำกลั่น ผสมกับกรดไฮโดรคลอริก จนมีความเป็นกรดต่างระหว่าง 5.8-6.3 ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายเป็น 10 เท่า (มิลลิเมตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่างสิ่งปฏิกูล
3. เขย่าบนเครื่องเขย่า (Agitator) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบ/นาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 5 เซนติเมตร
4. กรองสารละลาย โดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรู 1 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้ ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่างๆ ตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง

3.8 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

Sollars และ Perry (1989) ได้กล่าวถึง การประเมินคุณภาพของของเสีย ที่ผ่านกระบวนการบำบัด โดยการทำให้แข็งตัว ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ของการบำบัด ได้แก่ ปัจจัยต่างๆ เช่น การปรับปรุงให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมั่นคงการลดพื้นที่ผิว และการจำกัดการละลายของสารที่เป็นอันตราย เมื่อสัมผัสกับสารชะล้าง ในช่วงเวลาดังกล่าวนั้น ประเทศสหราชอาณาจักร (ประเทศอังกฤษ) ยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานเป็นทางการ สำหรับคุณภาพของเสียที่ผ่านการบำบัด โดยวิธีการข้างต้น แต่ได้มีหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง อาทิ หน่วยงานที่เกี่ยวกับการกำจัดของเสีย (Waste Disposal Authority) ได้กำหนดมาตรฐาน สำหรับการปฏิบัติงานในการบำบัดของเสีย โดยการทดสอบค่า Compressive Strength , Permeability และ Leachability ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของคุณสมบัติที่ต้องการ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัด โดยกระบวนการ Sealosafe จากโรงบำบัดของเสียที่เมือง West Thurrock

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัด โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยวิธี Sealosafe (Sollars และ Parry,1989)

TABLE IV. SPECIMEN SOLIDIFIED WASTE PERFORMANCE CHARACTERISTICS REQUIRED BY A WASTE DISPOSAL AUTHORITY^y

Characteristic	Requirement ^z	Comparative values
Permeability (28 day)	$\leq 1 \times 10^{-7}$ m/s	Sand: 1×10^{-4} – 5×10^{-5} m/s Silt: 1×10^{-6} – 1×10^{-7} m/s
Compressive strength (28 day)	≥ 0.34 MN/m ²	Concrete: 1×10^{-8} m/s Concrete: 30 MN/m ² Mortar: 20 MN/m ² Grouts: 0.5–4 MN/m ²
Leachate Quality ^{**} :	pH 8–11 COD < 280 g/m ³ Total CN < 1 g/m ³ Total Sulphide < 5 g/m ³ Total Phenol < 5 g/m ³ NH ₃ < 40 g/m ³ Toxic heavy metals: Zn < 10 g/m ³ , Hg < 0.5 g/m ³ ; Others (inc. Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Ba, Co, Mn, Se, Sb): < 5 g/m ³ total Pesticides < 0.1 g/m ³ Supernatants: none after 24 h	n.a. – – – – – – – – – –

n.a. = not applicable

^{**}: Conditions: 50 g solidified waste (28 day cure), ground to fine powder, stirred 1 h with 500 ml distilled water (20°C), filtered through Whatman No. 2 filter paper

บริษัท Engineering-Science บริษัท Thai DCI และบริษัท Systems Engineering (1989) ได้ดำเนินการศึกษา และจัดทำแผนการจัดการของเสียอันตรายของประเทศไทย (National Hazardous Waste Management Plan) ได้กล่าวถึง การทดสอบการชะละลายและเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสีย โดยการทำให้แข็งตัวโดยแบ่งการทดสอบได้ 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1 การทดสอบ โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี อาทิ โลหะหนัก และสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ เป็นต้น โดยกำหนดค่า Threshold Value สำหรับสารเคมีต่างๆ ที่ถูกชะละลายออกมาจากของเสียขึ้น ถ้าค่าที่ทดสอบดังกล่าวสูงกว่าค่า Threshold Value แสดงค่าของเสียนั้นเป็นสารที่มีอันตราย เกณฑ์ในการกำหนดค่า Threshold Value โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 100 เท่าของมาตรฐานน้ำดื่ม ดังนั้นสารเคมีดังกล่าวถูกชะละลายและเจือจางในธรรมชาติได้มากกว่า 100 เท่า ก็จะไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อแหล่งน้ำใช้ของมนุษย์ การทดสอบการชะละลายของสารเคมีจากของเสียที่ผ่านการบำบัด โดยการทำให้เป็นก้อน จะเป็นการประเมินความสามารถและประสิทธิภาพของระบบบำบัดของเสียค่า Threshold Value สำหรับสารเคมีต่างๆ กำหนดไว้ ดังนี้

Arsenic	5.0	มก./ล.
Barium	100.0	มก./ล.
Cadmium	1.0	มก./ล.
Chromium	5.0	มก./ล.
Mercury	0.2	มก./ล.
Selenium	1.0	มก./ล.
Silver	5.0	มก./ล.
Endrin	0.02	มก./ล.
Lindane	0.4	มก./ล.
Methoxychlor	10.0	มก./ล.
Toxaphene	0.5	มก./ล.
2,4-D	10.0	มก./ล.
2,4,5-TP Silvex	1.0	มก./ล.

วิธีที่ 2 เป็นวิธีการทดสอบ ความเป็นพิษของสารที่ถูกชะละลายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ (Bioassay) โดยทำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่เกิดจากการทดลองใช้ค่า Threshold Value (การทดลองนี้ใช้น้ำกลั่นเป็นสารชะละลาย) ถ้าความเป็นพิษของสารชะละลายเกินค่ากำหนด ซึ่งได้เลือกไว้สำหรับ การเจือจางในสิ่งแวดล้อมแล้ว ของเสียนั้นจะถูกจัดว่าเป็นของเสียอันตราย โดยกำหนดค่า 24-hour LC 50 เมื่อน้ำสกัดมีการเจือจางน้อยกว่า 20%

U.S.EPA (1992) ได้กำหนดมาตรฐาน สำหรับของเสียที่สามารถนำไปทิ้ง โดยการฝังกลบ หรือของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยการทดสอบของเสียดังกล่าวด้วย วิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Extract Solution) มาตรฐานของ EPA ได้กำหนดความเข้มข้นของโลหะหนัก ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของสารที่เป็นพิษ ตามประเภทของของเสีย ดังมีรายละเอียดในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 มาตรฐานความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด (Extract Solution) สำหรับของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดแล้ว (U.S. EPA 1992)

Waste Code	Regulated Hazardous Constituent	Constitution (mg/l)
D004	Arsenic	5.0
D005	Barium	100
D006	Cadmium	1.0
D007	Chromium	5.0
D008	Lead	5.0
D009(Low Mercury Subcategory less than 260 mg/kg Mercury)	Mercury	0.2
D010	Selenium	5.7
D011	Silver	5.0

3.9 กฎหมายที่บังคับใช้เกี่ยวกับของเสียอันตรายของประเทศไทย

กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2531) ได้กำหนดมาตรฐาน สำหรับลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ตามท้ายประกาศกระทรวงฯ ฉบับที่ 25 โดยกำหนดคุณสมบัติของสารมีพิษ ซึ่งเมื่อนำมาทำการสกัดสารด้วยวิธี การสกัดสาร (Extraction Procedure) วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดแล้ว ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าใดค่าหนึ่งต่อไปนี้

Arsenic	< 5	มก./ล.
Cadmium	< 1	มก./ล.
Chromium	< 5	มก./ล.
Lead	< 5	มก./ล.
Mercury	< 0.2	มก./ล.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2531) ได้ออกประกาศกรมโรงงานฯ ฉบับที่ 1 เรื่อง กำหนดวิธีการเก็บ ทำลายฤทธิ์ กำจัด ผึ่ง ทิ้ง เคลื่อนย้ายและขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วสรุปมาตรฐานที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

1. วิธีการทำลายสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วก่อนนำไปทิ้งหรือผึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 3.6
2. สิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (Solidification) ต้องมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้
 - น้ำซึมผ่านได้ในอัตราต่ำกว่า 1×10^6 ซม./วินาที
 - รับแรงอัด (Compressive Strength) ได้ไม่น้อยกว่า 14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
 - มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
 - มีลักษณะแข็งคล้ายหิน ไม่ไหม้ไฟ ไม่มีกลิ่น

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมได้ระบุวิธีการทำลายฤทธิ์ไว้กว้างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.6 สำหรับกากสีทั้งสองที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับ กากตะกอนที่มีสารปรอทปนเปื้อน และกากตะกอนหรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม, โครเมียม, ตะกั่ว, แมงกานีส ซึ่งกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้ใช้วิธีทำลายฤทธิ์โดยเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์(Na_2S) ปูนขาว และปูนซีเมนต์ ซึ่งงานวิจัยนี้ก็เลือกใช้วัสดุประสานตามแนวทางที่กำหนดนี้ด้วย

ตารางที่ 3.6 วิธีการทำลายฤทธิ์ของสิ่งปฏิภูลประเภทต่างๆ
(กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม,2531)

ประเภทสิ่งปฏิภูล	วิธีการทำลายฤทธิ์
1. กากตะกอนที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากตะกอนมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ (HgS) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (Solidification) ผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม (Additives) ผสมลงไปด้วย
2. กากจากการผลิต หลอดไฟ ฟลูออเรสเซนต์ ที่มี สารปรอทปนเปื้อน	นำกากที่อาจต้องผ่านการบดให้มีขนาดเล็กลงก่อน เพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ทั่วถึงมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ (HgS) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (Solidification) ด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม (Additives) ผสมลงไปด้วย
3. กากตะกอนหรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม, โครเมียม, ตะกั่ว, แมงกานีส เป็นต้น	ใช้ สารละลายต่าง เช่น ปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผสมกับกากตะกอนให้ทั่วกัน จนสารโลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบของเกลือไฮดรอกไซด์ที่มีค่าพีเอช (pH) ของของผสมประมาณ 11 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ในกรณีที่เป็นกากตะกอนหรือฝุ่นที่เปื้อนด้วยแคดเมียม (Cd) จะต้องทำให้เป็นก้อนต่อด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์
4. กากตะกอนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มียาฆ่าแมลงยากำจัดศัตรูพืชหรือยากำจัดเชื้อราปนเปื้อน	เติมสารละลายต่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในปริมาณที่สามารถจะทำลายพิษของตัวยาแต่ละชนิดได้หมด

3.10 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

จากการรวบรวมผลงานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดของเสีย โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และวัสดุอื่นๆ สรุปผลงานวิจัยในช่วงปี 1986-1997 ได้ดังนี้

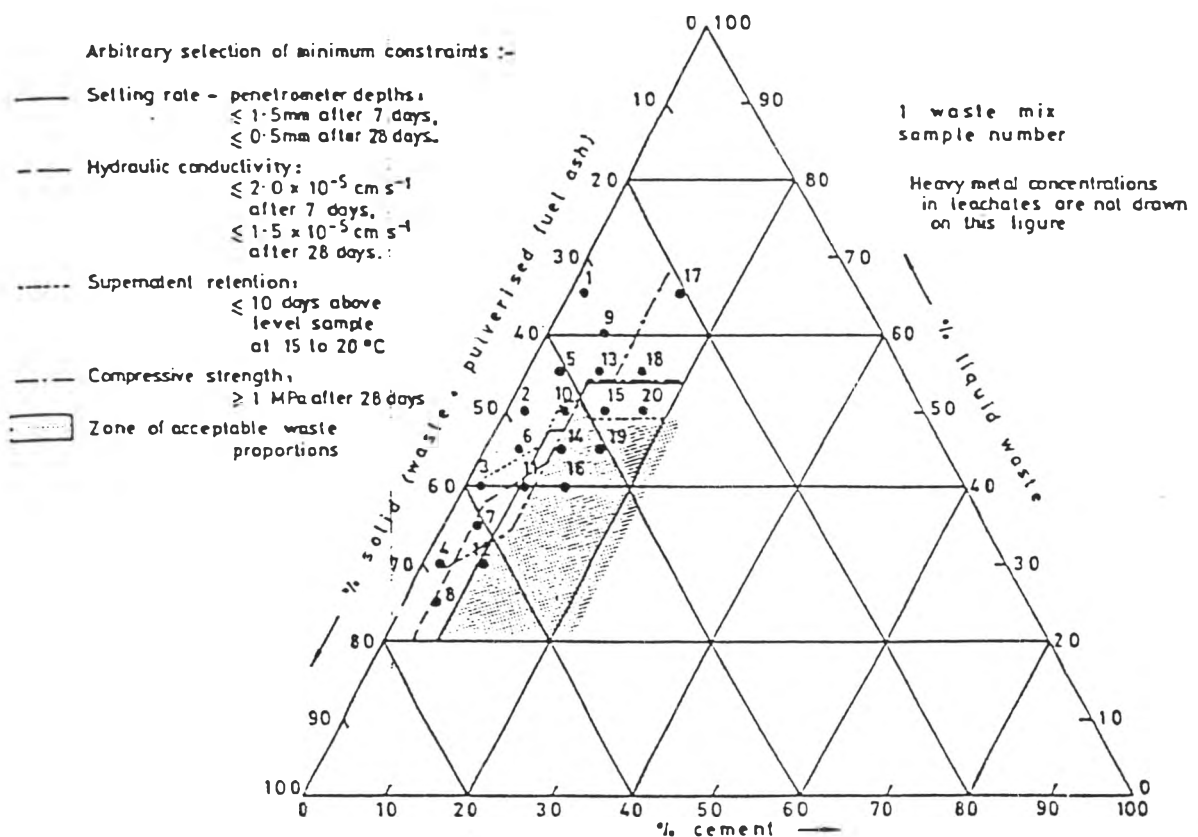
Shively และคณะ (1986) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักของน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีโลหะหนัก ได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว โดยการทำให้เป็นก้อนและทดสอบการชะละลายโลหะหนัก (Leaching Tests) และกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) โดยทดสอบโลหะหนัก 4 ชนิด คือ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว และทดสอบการชะละลายน้ำ 15 ครั้งในโลหะหนักแต่ละชนิด และโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสมกัน สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การทดสอบความเข้มข้นของน้ำสกัดจากของเสียทั้ง 4 ชนิด และของเสียผสมซึ่งผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์แล้วนั้น พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ U.S.EPA (สำหรับการสกัดโลหะหนักในครั้งแรก) ทั้งกรณีที่ใช้อัตราส่วนผสมน้ำ : ซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.5 และ 1.0 โดยค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของน้ำจาก 0.5 เป็น 1.0 การละลายโลหะหนักออกจากของเสียแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเมื่อเริ่มการสกัดโลหะหนัก แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในซีเมนต์ จะทำหน้าที่ทำลายฤทธิ์ของกรดที่ใช้สกัดให้เป็นกลาง ทำให้ค่า pH มีค่ามากกว่า 10.0 และมีการละลายของสารในซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ในช่วงที่สองจะมีการละลายของโลหะหนักสูงสุด ค่า pH มีค่าน้อยกว่า 6.0 ในช่วงที่สามเมื่อทำการสกัดต่อไปการละลายของโลหะหนักจะเริ่มลดน้อยลง และการละลายจากการสกัดแต่ละครั้งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในของเสีย

2. จากการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน พบว่า เมื่อใช้อาร์เซนิก และแคดเมียม มากำจัดโดยการทำให้เป็นก้อน จะทำให้กำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์ลดลงทั้งกรณีที่ใช้ค่า W/C 0.5 และ 1.0 ของเสียผสมจะลดกำลังรับแรงอัดเฉพาะค่า W/C 0.5 ส่วน โครเมียม และ ตะกั่ว นั้นจะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

Baldwin และ คณะ (1987) ได้ทำการวิจัยกำจัดของเสีย โดยการทำให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ ผสมกับของเสียหลายชนิด จำแนกเป็น 2 จำพวก คือ พวกที่เป็นของเหลว (Liquid Waste) ได้แก่ Oxidized Solid Cyanide Waste (in Liquid Form) , Oxidized Liquid Cyanide Waste และ Neutralized Acid/Alkali และพวกที่เป็นของแข็ง (Solid Waste) ได้แก่ ฝ้ายลอย (Pulverized Fly Ash) และขี้โลหะจากเตาหลอม (Metal Slags) ทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของแท่งซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว อาทิ การทดสอบการชะละลาย (Leaching Test) กำลังรับแรงอัด

(Compressive Strength) Setting Rate ฯลฯ โดยใช้มาตรฐานการทดสอบจาก Standard Waste Research Unit Method จากผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ของเสียในรูปของเหลว และของเสียในรูปของแข็ง มาเขียนกราฟ ทำให้สามารถทราบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการกำจัดของเสียด้วยการทำให้เป็นก้อน (Baldwin และ คณะ, 1987)

Shin และ Sujiwatthana (1988) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียอันตราย โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ โดยใช้ของเสีย 4 ชนิดคือ แคลเซียม ตะกั่ว อัลดริน (Aldrin) และคลอเดน (Chlordane) และนำก้อนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วไปทดสอบการชะละลาย (Leaching Tests) และทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) สรุปผลของปัจจัยต่างๆ ได้ ดังนี้

1. ปริมาณของเสียที่ใช้ในการกำจัด ปริมาณ แคลเซียม ตะกั่ว อัลดริน และคลอเดน ในน้ำสกัดจากการชะละลายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของเสียที่เติมลงไป สำหรับกำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเสียลงในส่วนผสม
2. อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) อัตราส่วนผสม W/C ที่เหมาะสมที่ทำให้ความสามารถในการชะละลายของแคลเซียม ตะกั่ว อัลดริน และคลอเดนมีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 0.5 และที่อัตราส่วนผสม W/C 0.5 นี้ ทำให้ได้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการทดสอบที่ W/C 1.0 และ 0.25
3. ค่า pH ของสารที่สกัด (Extract Solution) สารสกัดที่มี pH ต่ำจะทำให้การชะละลายเพิ่มมากขึ้น
4. อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (AV ratio) ขนาดก้อนของแข็งที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากขึ้นจะทำให้ค่าการชะละลายเพิ่มมากขึ้น
5. ระยะเวลาการบ่ม ไม่มีผลมากนักต่อการชะละลาย แต่มันจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้น
6. วิธีการทำให้เป็นก้อนด้วย ซีเมนต์และซิลิกา จะเหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่า สารอินทรีย์ที่ใช้ฆ่าแมลง

Bishop (1988) ได้ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากของเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนัก ได้แก่ แคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว ที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ ทดสอบการชะละลายค่าความเป็นด่างจากก้อนของเสีย 15 ครั้ง สามารถหาค่า Buffering Capacity ของเสียดังกล่าวได้ 18.3 meq/g และจากการศึกษาการชะละลายโลหะหนัก 3 ชนิด คือ แคลเซียม โครเมียม และตะกั่วเพื่อศึกษาถึงกลไกของการยึดจับโลหะหนักในซีเมนต์แข็งตัว สรุปได้ว่าแคลเซียมจะอยู่ในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์ และแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนหรือเกาะติดกับผนังของรูพรุนในซีเมนต์แข็งตัว ส่วนโครเมียม และตะกั่วมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ และเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกา

Shin และ คณะ (1988) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ โดยการทำเป็นก้อนด้วยซีเมนต์ โดยมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์, น้ำต่อปูนซีเมนต์, ปริมาณของเสีย และปริมาณสาร Precipitator สรุปผลการวิจัยได้ว่า

1. การชะละลายของโลหะหนักได้แก่โครเมียมและสังกะสีจะลดลง เพื่อลดค่าอัตราส่วนทราย : ซีเมนต์, น้ำ : ซีเมนต์ และเพิ่มปริมาณสาร Precipitator

2. กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มตัว 14 วันจะเพิ่มขึ้น เมื่อลดอัตราส่วนทราย : ซีเมนต์, น้ำ : ซีเมนต์ และปริมาณของเสียที่กำจัด

3. จากการวิเคราะห์โดย Anova Analysis พบว่า อัตราส่วน ทราย : ซีเมนต์ จะมีผลต่อการชะละลายของโครเมียม และอัตราส่วนน้ำ : ซีเมนต์ จะมีผลต่อการชะละลายของสังกะสี และกำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์

4. จากผลการวิจัย เมื่อนำไปวิเคราะห์ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ เช่น ค่าใช้จ่าย, การชะละลายของโครเมียม และสังกะสี จะต้องต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ EPA คือ 5 และ 500 ppm และกำลังรับแรงอัด ต้องมีค่าสูงกว่า 10 กก./ซม² จะได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับการกำจัดกากตะกอนแห้ง 30 กรัม จะต้องใช้อัตราส่วนผสมทราย : ซีเมนต์, น้ำ : ซีเมนต์ และปริมาณสาร Precipitator เท่ากับ 1, 1.5 และ 1.075 กรัมตามลำดับ

5. การใช้สาร Precipitator และทราย จะไม่มีความสำคัญในทางเศรษฐศาสตร์ และในทางปฏิบัติ

Stegemann Cote (1991) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการทดสอบของเสียที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (Solidified Waste) ภายใต้โครงการร่วมมือระหว่าง Environment Canada, U.S.EPA. และ Alberta Environment ทดสอบของเสีย 5 ชนิด ได้แก่ สารละลายสังเคราะห์ (Synthetic Solution) ตะกอนสังเคราะห์ (Synthetic Sludge) Aluminum Coil Plating Sludge, Dredged Sediment และ Wood Preservation Waste Soil ทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และส่วนผสมอื่นๆ และได้ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ อาทิเช่น ความหนาแน่น ความชื้น การซึมของน้ำ กำลังรับแรงอัด ฯลฯ คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ การทดสอบการชะละลายด้วยวิธีต่างๆ และการตรวจสอบโดยใช้ X-ray Diffraction, Scanning Electron Microscopy และ Energy Dispersive X-ray Analysis ผลการทดสอบ โดยเฉพาะตะกอนสังเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วย แคลเซียม, โครเมียม, นิกเกิล และปรอท 4, 18, 19 และ 0.2 มก./ก. สรุปได้ดังนี้

ก. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

- ความหนาแน่นจำเพาะ	2.55
- ความชื้น	2.6 %
- การซึมของน้ำ	6×10^{-9} m/s
- กำลังรับแรงอัด	1370 kPa

ข. การทดสอบการชะละลาย (TCLP)

พารามิเตอร์	ของเสีย (มก./ล.)	ของเสียผ่านการทำให้เป็นก้อน (มก./ล.)
pH	5.7	10.1
Cd	ND	-
Cr	ND	0.052
Ni	ND	0.34
Hg	2.8	0.51

Cheng และ Bishop (1992) ได้ทำการศึกษาการกระจายของโลหะหนักใน แท่งซีเมนต์ก่อน และภายหลังการทดสอบการชะละลาย โดยใช้กรดอะซิติก ซีเมนต์จะถูกหล่อเป็นรูปทรงกลมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และกากตะกอนโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และอาร์เซนิก โลหะหนักจะถูกวิเคราะห์ โดยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray (EDX) และ Wet Digestion / AA Method จากผลการวิจัยพบว่า บริเวณผิวของตัวอย่างจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยกรดอะซิติก แคลเซียมส่วนใหญ่ในองค์ประกอบของซีเมนต์จะถูกชะละลายออกมา ในขณะที่ซิลิกอน , เหล็ก และอลูมิเนียมยังคงเหลืออยู่ และสารดังกล่าวนี้จะมีคุณสมบัติในการดูดซับ และดูดติดผิวได้ดี ดังนั้น โลหะหนักที่ละลายออกไปจะถูกดูดติดผิวที่บริเวณชั้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งจะช่วยป้องกันการชะละลายของโลหะหนักได้

จากการวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างพบว่า การชะละลายของโลหะหนักจะเกิดเฉพาะที่บริเวณชั้นผิวเท่านั้น ปริมาณโลหะหนักในชั้นที่ไม่มีการชะละลาย ยังคงมีค่าใกล้เคียงกันใน ช่วงก่อนการทดสอบการชะละลาย

3.11 การกำหนดแนวทางในการวิจัย

จากงานวิจัยที่มีการศึกษาผ่านมา เมื่อนำมาประมวลแล้ว ทำให้สามารถกำหนดตัวแปรที่จะทำการศึกษา โดยการทดลองที่จะมีการปรับค่าส่วนผสมในแต่ละส่วนผสมของตัวอย่างกากผงสี ดังนี้

- สัดส่วนปริมาณกากเศษสีหรือฝุ่นสีต่อวัสดุประสาน เป็น 0, 1:9, 1:3, 1:1 และ 3:1
- สัดส่วนระหว่างซีเมนต์ต่อปูนขาว เป็น 1:1
- อัตราส่วนระหว่างน้ำ : ซีเมนต์ เป็น 0.50
- ระยะเวลาบ่มตัว เป็น 28 วัน

ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัด ได้แก่ As, Cr, Hg, Cd และ Pb และวัดค่าพีเอช และความนำไฟฟ้าของน้ำสกัด โดยทำการวัดทดสอบ 2 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด, ความหนาแน่น ของก้อนตัวอย่าง ได้ใช้ตัวอย่างทดสอบ 1 ตัวอย่าง ของทุกส่วนผสม

ขั้นตอนการทดลอง

ซึ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็นส่วยย่อยต่างๆ ดังนี้

1. การทดลองที่ 1 การหาส่วนผสมประกอบในกากเศษสีและฝุ่นสี
2. การทดลองที่ 2 เพื่อหาอัตราส่วนผสมเบื้องต้นที่เหมาะสมและศึกษาความสามารถในการทำเสถียรโลหะหนักโดยใช้
 - 1) กากเศษสีและฝุ่นสี ผสม ปูนซีเมนต์
 - 2) กากเศษสีและฝุ่นสี ผสม ปูนขาว ผสม ปูนซีเมนต์
 - 3) กากเศษสีและฝุ่นสี ผสม สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ผสม ปูนซีเมนต์
 - 4) กากเศษสีและฝุ่นสี ผสม สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ผสม ปูนขาว ผสม ปูนซีเมนต์
 - 5) กากเศษสีและฝุ่นสี ผสม กรดกำมะถัน ผสม ปูนซีเมนต์
 - 6) กากเศษสีและฝุ่นสี ผสม กรดกำมะถัน ผสม ปูนขาว ผสม ปูนซีเมนต์
 - 7) กากเศษสีและฝุ่นสี ผสม กรดกำมะถัน ผสม สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ผสม ปูนซีเมนต์
 - 8) กากเศษสีและฝุ่นสี ผสม กรดกำมะถัน ผสม สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ผสม ปูนขาว ผสม ปูนซีเมนต์

3. การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ในการทำเสถียรโลหะหนักโดยใช้วัสดุประสานต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเลือกจากการทดลองที่ 2
4. การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของพีเอช (pH) ของน้ำชะละลายที่ใช้ทดสอบการชะละลายโลหะในวัสดุประสานต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเลือกจากการทดลองที่ 2
5. หาประสิทธิภาพในการ ลดการถูกชะละลายโลหะหนัก
6. ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับกรณีที่ใช้วัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ทั้งกากเศษสีและฝุ่นสี