



## บทที่ 2

### ทบทวนเอกสาร

การทำเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งมีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในการจัดการของเสียอันตราย อาทิ การบำบัดของเสียจากอุตสาหกรรม การบำบัดของเสียก่อนที่จะทิ้งลงสู่หลุมฝังกลบ

การทำเป็นก้อนแข็งเป็นกระบวนการที่ใช้ตัวกระทำเข้ามาเปลี่ยนแปลงสภาพทางกายภาพของของเสีย เช่น กำลักรับแรงอัด ความชื้นผ่านได้ เป็นต้น ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทำเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งนั้นเพื่อที่จะลดทั้งความเป็นพิษและการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมในลักษณะของการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของก้อนแข็ง (LaGrega, 1994)

#### 2.1 คำนิยาม

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United State Environmental Protection Agency : U.S. EPA) ได้ให้ความหมายของการทำเป็นก้อนแข็งไว้ว่า เป็นเทคนิคที่ใช้กักเก็บของเสียไว้ในโครงสร้างที่มีความมั่นคงแข็งแรง การกักเก็บอาจจะใช้กับของเสียที่มีอนุภาคขนาดเล็ก หรือใช้กับของเสียที่มีขนาดใหญ่ก็ได้ การทำเป็นก้อนแข็งไม่จำเป็นต้องอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างของเสียและตัวกระทำ แต่จะประสานของเสียให้อยู่ในรูปของแข็ง การเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนจะถูกชะลอโดยการลดขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งมีผลต่อการชะละลายหรือโดยการแยกของเสียไปเก็บไว้ในแคปซูลที่ของเสียไม่สามารถซึมผ่านออกมาได้

การทำเสถียรเป็นกระบวนการที่ใช้ตัวกระทำในการลดความเป็นอันตรายของของเสียโดยทำการเปลี่ยนแปลงสภาพของเสียและความอันตรายเข้าไปสู่รูปแบบที่เกิดการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ช้าที่สุดหรือลดระดับความเป็นพิษให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด

การทำเป็นก้อนแข็งเป็นกระบวนการที่นำวัสดุประสานในปริมาณที่เพียงพอไปผสมกับของเสียอันตรายเพื่อให้เกิดการแข็งตัว ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำเป็นก้อนแข็งควรมีคุณสมบัติในการเพิ่มกำลักรับแรงอัดและลดความชื้นผ่านได้ของก้อนแข็ง

โดยทั่วไปทั้งสองกระบวนการมักจะเกิดร่วมกันในการบำบัดของเสียอันตราย ดังนั้นการกล่าวถึงการทำเสถียรมักจะรวมถึงการทำก้อนแข็งด้วย (LaGrega, 1994)

การชะละลายเป็นกระบวนการวัดความสามารถเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนออกจากก้อนแข็งโดยตัวอย่างของเหลวที่ใช้ในการชะละลาย เช่น น้ำกลั่น น้ำกลั่นผสมน้ำกรดที่ค่าพีเอชต่างๆมาผสมกับตะกอนแล้วทำการชะละลายด้วยวิธีต่างๆ เป็นต้น

## 2.2 การหล่อเป็นก้อนแข็ง

การกำจัดของเสียอันตรายมีอยู่หลายทางเลือก โดยอาจต้องมีการทิ้งที่บำบัดแล้วลงหลุมฝังกลบของเสียอันตรายในขั้นตอนสุดท้ายหรือไม่ก็ได้ เช่น การเผาของเสียที่อุณหภูมิสูง หรือการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นต้น แต่บางวิธีการอาจยังทำได้เพียงขั้นตอนการทดลองหรืออาจไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ซึ่งการทำเป็นก้อนแข็งเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญอันหนึ่งสำหรับทางเลือกในการบำบัดของเสียอันตรายตามที่ระบุอยู่ใน U.S. National Contingency Plan (LaGrega, 1994)

การประยุกต์

มีการประยุกต์เทคโนโลยีนี้ไปใช้งานจริงอยู่ 3 ประเภท คือ

1. การบำบัดของเสียก่อนทิ้งลงสู่หลุมฝังกลบ (Land disposal)
2. การบำบัดพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อน (Site remediation)
3. การทำของเสียอุตสาหกรรมให้แข็ง (Solidification of industrial wastes)

ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงแต่การทำของเสียอุตสาหกรรมให้แข็งเป็นก้อน ซึ่งเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยครั้งนี้

## 2.3 การทำของเสียอุตสาหกรรมให้เป็นก้อนแข็ง

สิ่งที่หลงเหลือจากการจัดการของเสียในอดีต อันได้แก่ของเสียอินทรีย์และอนินทรีย์ที่มีความหลากหลายซึ่งจะพบได้ตามหลุมฝังกลบ การทำเป็นก้อนแข็งสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น กำลังรับแรงอัดและอัตราการชะละลายของสิ่งปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม เป้าหมายหลักของการทำเป็นก้อนแข็งคือการปรับปรุงในส่วนของโครงสร้างของก้อนแข็งให้เกิดความเสถียรและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ในการทำเป็นก้อนแข็งนั้นวิธีการวัดประสิทธิภาพจะทำการประเมินจากการวัดกำลังรับแรงของก้อนแข็ง

สำหรับตะกอนจากอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักปนเปื้อน การทำเป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์มักจะเป็นที่นิยมมากกว่าตัวประสานอื่นๆ เช่น ปูนขาวหรือโพลีเมอร์ เนื่องจากซีเมนต์มีราคาถูก ไม่จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่สูงนัก ใช้แรงงานทั่วไปในการทำงานได้ สามารถขนไปทิ้งลงสู่หลุมฝัง

กลบได้ง่าย และเนื่องจากธรรมชาติของก้อนแข็งที่เป็นเบส ทำให้โลหะหนักที่อยู่ในก้อนแข็งจะมีความเสถียรสูงและมีสภาพที่ต้านทานความเป็นกรดได้ในระดับหนึ่ง (Pojasek, 1980)

สำหรับการหล่อเป็นก้อนแข็งตะกอนจากอุตสาหกรรมนั้น ก่อนที่จะทำการหล่อก้อนแข็งทิ้งลงสู่หลุมฝังกลบนั้น จะต้องทำการทดลองหล่อก้อนแข็งที่อัตราส่วนต่างๆก่อน เพื่อหาค่าปริมาณน้ำและอัตราส่วนผสมของตะกอนต่อซีเมนต์ รวมถึงกระบวนการบ่มที่เหมาะสมในการหล่อเป็นก้อนแข็ง โดยก้อนแข็งที่ได้มาในแต่ละอัตราส่วนต้องนำมาทำการทดสอบต่างๆ เช่น กำลังรับแรงอัด หรือทดสอบการชะละลาย โดยอัตราส่วนที่จะนำมาทิ้งลงหลุมฝังกลบได้นั้นจะต้องผ่านมาตรฐานการทดสอบที่กฎหมายกำหนด

ในการทำเสถียรสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในรูปของอะตอม เช่น แคดเมียม ตะกั่ว หรือโลหะตัวอื่นๆ นั้นควรทำให้โลหะนั้นๆอยู่ในรูปของอะตอมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เพื่อให้การทำเสถียร มีความเหมาะสมที่สุด ตัวอย่างเช่น แร่สังกะสีในธรรมชาติจะอยู่ในรูปสังกะสีซัลไฟด์ ดังนั้นการทำเสถียรให้สังกะสีกลับคืนรูปของสังกะสีซัลไฟด์น่าจะเป็นเทคนิคที่เหมาะสมและมีความเสถียรมากที่สุด (LaGrega, 1994)

## 2.4 กลไกการจับยึดโลหะหนัก

ความเข้าใจในพื้นฐานทางกายภาพและเคมีของกลไกการทำให้เป็นก้อนแข็งเพื่อที่จะควบคุมประสิทธิภาพของตัวกระทำเป็นสิ่งจำเป็นต่อการทำให้เป็นก้อนแข็งของเสียอันตรายให้ประสบความสำเร็จ นอกจากนี้ยังมีโอกาสที่ตัวกระทำจะถูกปรับปรุงเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการกำจัดของเสียอื่นๆ ความเข้าใจกลไกการทำให้เป็นก้อนแข็งจะช่วยให้การประเมินประสิทธิภาพทำได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นทั่วไปมีดังนี้

- 1) Macroencapsulation
- 2) Microencapsulation
- 3) Absorption
- 4) Adsorption
- 5) Precipitation
- 6) Detoxification

Macroencapsulation เป็นกลไกที่นำของเสียอันตรายมายึดติดกับก้อนแข็งที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งองค์ประกอบของเสียอันตรายนั้นจะถูกยึดอยู่ในรูพรุนที่ไม่ต่อเนื่องกันภายในก้อนแข็ง เมื่อถึงเวลาเสื่อมหรือเกิดการแตกร้าวบนก้อนแข็งแล้วของเสียอันตรายที่ถูกกักจะสามารถ

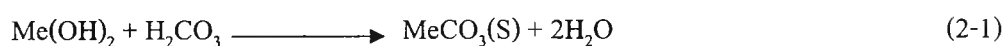
เคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกได้อย่างอิสระ การแตกร้าวสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ระยะเวลา สภาพสิ่งแวดล้อมบริเวณหลุมฝังกลบ (wetting-drying, Freezing-Thawing) และความเค้นจากการกดทับ เป็นต้น ดังนั้นกลไกนี้จะทำให้สิ่งปนเปื้อนมีโอกาสดูดสู่สิ่งแวดล้อมหากไม่มีการดูแลรักษาให้ก้อนแข็งอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์

Microencapsulation เป็นกลไกที่นำของเสียอันตรายมายึดติดกับโครงสร้างแบบผลึกในระดับที่เล็กจนมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น และเมื่อก้อนแข็งเกิดการแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ จะพบว่าของเสียอันตรายยังคงถูกกักไว้ แต่อย่างไรก็ตามกลไกของ microencapsulation ยังไม่ใช่วิธีการยึดติดกันทางเคมี ดังนั้นอัตราการชะละลายของก้อนแข็งมีโอกาที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อก้อนแข็งที่แตกมีขนาดเล็กลงและมีพื้นที่ผิวมากขึ้น

Absorption เป็นกระบวนการที่สิ่งปนเปื้อนถูกนำเข้าไปในตัวดูดซึมในปริมาณมาก ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการใช้ฟองน้ำดูดซึมน้ำ หากต้องการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำเสถียรแล้วกลไก Absorption จะต้องการตัวดูดซึมในรูปของแข็งสำหรับดูดซึมของเหลวที่อยู่ในของเสีย เป้าหมายหลักของกลไกนี้นิยมใช้ในการแยกของเหลวออกจากของเสียเพื่อปรับปรุงลักษณะรูปร่างของของเสีย ของเหลวที่ถูกดูดซึมสามารถเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซึมได้อย่างอิสระเมื่อมีความเค้นจากการยุบอัดตัว ดังนั้นกระบวนการนี้จึงเหมาะเป็นวิธีการชั่วคราวสำหรับการปรับปรุงลักษณะรูปร่างของของเสีย

Adsorption ในการจับยึดทางกายภาพของของเสียด้วยวิธีการทำเป็นก้อนแข็งอาจเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีขึ้น Adsorption เป็นปรากฏการณ์ที่สิ่งปนเปื้อนถูกยึดอยู่ในก้อนแข็งด้วยพันธะทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งอาจจะเป็นพันธะไฮโดรเจนหรือแวนเดอร์วาลส์ สิ่งปนเปื้อนที่ถูกดูดซับทางเคมีอยู่ในก้อนแข็งจะทำให้เกิดการชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยกว่าที่ไม่มีการดูดซับทางเคมีอย่างเช่นกระบวนการ macroencapsulation และ microencapsulation เมื่อก้อนแข็งเกิดการแตกจะทำให้มีอัตราการชะละลายเพิ่มขึ้น

Precipitation กระบวนการทำเสถียรจะต้องมีการตกผลึกของสิ่งปนเปื้อน ทำให้อยู่ในรูปของเสียที่เสถียร ผลึกในรูปแบบต่างๆ เช่น ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ ซิลิเกต และฟอสเฟต จะถูกบรรจุอยู่ในก้อนแข็ง ปรากฏการณ์นี้จะนำไปประยุกต์ในการทำเสถียรสารอนินทรีย์ เช่น ผลึกไฮดรอกไซด์ที่พีเอชสูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะทำการเปลี่ยนรูปจากไฮดรอกไซด์ไปสู่คาร์บอเนต ดังสมการข้างล่าง



เมื่อ Me เป็นไอออนบวกของโลหะ

ความถาวรของการยึดโลหะจะขึ้นกับค่าพีเอช ตัวอย่างเช่น โลหะคาร์บอนจะไม่ใช่โลหะที่พีเอชต่ำภายใต้สภาวะที่เป็นกรด อาจทำให้โลหะเกิดการละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างอิสระ

Detoxification เป็นผลของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการทำเสถียร อาจทำให้ของเสียมีความเป็นพิษลดลง การลดความเป็นพิษจะใช้กลไกที่เปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของของเสียไปสู่องค์ประกอบที่มีพิษน้อยกว่าหรืออาจไม่มีพิษเลย ตัวอย่างเช่น การลดความเอนิเลคตรอนของโครเมียมจาก 6+ เป็น 3+ ในระหว่างการทำเสถียรด้วยซีเมนต์ ซึ่งโครเมียม 3+ มีความสามารถในการละลายและมีความเป็นพิษต่ำกว่าโครเมียม 6+ การใช้เหล็ก(II)ซัลเฟตหรือส่วนผสมระหว่างเหล็ก(II)ซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟตสามารถลดความเอนิเลคตรอนของโครเมียมได้

## 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำก้อนแข็ง

**อัตราส่วนตะกอนต่อซีเมนต์** ปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งลดลงและทำให้ค่าการชะละลายของโลหะหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าสัดส่วนซีเมนต์ในก้อนแข็งที่ลดลงเป็นการลดปริมาณวัสดุประสานในก้อนแข็ง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง และทำให้ความสามารถในการจับยึดโลหะหนักในก้อนแข็งลดลง

**อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์** น้ำมีประโยชน์ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดการพัฒนากำลังรับแรงอัด แต่หากใส่มากเกินไปจะทำให้เกิดช่องว่างใน โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์มาก ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ในทางทฤษฎีปริมาณน้ำเท่ากับ 0.485 ก็เพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อัดแน่นจะแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ กฎนี้เรียกว่า “Abram’s water/cement ratio rule” แต่กฎนี้ไม่สามารถใช้กับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำและการอัดแน่นทำได้ไม่สมบูรณ์

**ระยะเวลาการบ่ม** อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยา มีผลทำให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดมีมากในช่วงแรกและค่อยๆลดลงตามลำดับ ในทางปฏิบัตินิยมทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน โดยปกติกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันจะมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของกำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536)

**อุณหภูมิ** การบ่มซีเมนต์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น เป็นการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้อัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นในช่วงแรก แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปในช่วงระยะเวลาการก่อตัว มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดในช่วงแรกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากอายุการบ่มประมาณ 7 วัน อัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดจะลดลงอย่างมากเช่นกัน สาเหตุมาจากไฮเดรชันในช่วงแรกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างทางกายภาพไม่สมบูรณ์ ความพรุนอาจเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนของช่องว่างในซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536)

## 2.6 ซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ เช่น หินปูนหรือปูนขาวกับดินเหนียวหรือหินดาน จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวถึงนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งจัดเป็นปูนไฮโดรลิกซีเมนต์ที่เมื่อผสมกับน้ำตามอัตราส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน อัตราการก่อตัวและการแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นกับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ส่วนความแข็งแรงและความทนทานเมื่อแข็งตัวแล้วขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและการให้ความชื้นในขณะที่เริ่มแข็งตัว (วินิต ช่อวิเชียร, 2539)

ส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ซีเมนต์มีส่วนประกอบโดยน้ำหนักดังนี้ (วินิต ช่อวิเชียร, 2539)

CaO	63.8 %
SiO <sub>2</sub>	20.2 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.4 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.9 %
MgO	1.5 %
SO <sub>3</sub>	2.6 %
Na <sub>2</sub> O	0.3 %
K <sub>2</sub> O	0.5 %

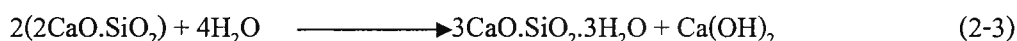
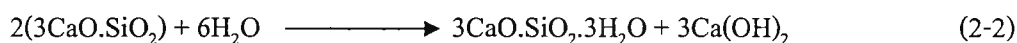
สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่างที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หลังจากการเผาแล้วได้แก่

สารประกอบ	สูตรเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

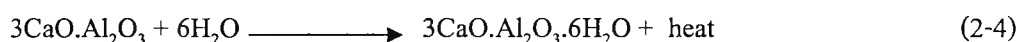
ซีเมนต์ที่ผสมกับน้ำเรียกว่าซีเมนต์เพสต์ (cement paste) มีความเป็นด่างสูงและมีพื้นผิวเป็นไฮดรอกไซด์ ซึ่งโลหะหนักจะดูดติดผิวซิลิเกตและออกไซด์ไฮดรอกไซด์ แคลเซียมซิลิเกตมีความสามารถในการดูดติดโลหะหนักได้ดี (Shively และคณะ, 1986)

การทำเสถียรของเสียอันตราย ส่วนใหญ่จะใช้ซีเมนต์เป็นตัวกระทำ ซีเมนต์ส่วนใหญ่ที่ใช้จะเป็นปอร์ตแลนด์ สำหรับการทำให้เสถียรด้วยซีเมนต์จะต้องนำของเสียมาผสมกับซีเมนต์แล้วจึงเติมน้ำในปริมาณที่เพียงพอเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันยังผลให้เกิดความเหนียวและเกาะแน่นกับวัสดุผสม เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นทำให้ออกไซด์ในซีเมนต์เกิดการจับรูปเป็นโครงสร้างแบบผลึกซึ่งมีแคลเซียมอะมิโนซิลิเกตเป็นส่วนประกอบ

ในรูปแบบปกติ ปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  สามารถแสดงได้ดังนี้



นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดจากสารอื่นในซีเมนต์อีก ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้แก่ ซิลิกาเจลซึ่งอยู่ในรูปของ tobermorite ปฏิกิริยาเหล่านี้เกิดขึ้นค่อนข้างช้าซึ่งจะต้องอาศัยระยะเวลาในการบ่มเข้าช่วย ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นรวดเร็วที่สุดของซีเมนต์คือ



การทำเสถียรด้วยซีเมนต์มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการบำบัดของเสียประเภทอนินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งของเสียที่มีโลหะหนัก เนื่องจากค่าพีเอชของซีเมนต์ที่สูง ทำให้โลหะยังคงรักษาสภาพที่ไม่ละลายน้ำในรูปของเกลือไฮดรอกไซด์หรือเกลือคาร์บอเนต อยู่ในโครงสร้างที่มีความแข็ง จากการศึกษพบว่าตะกั่ว ทองแดง สังกะสี คีบुक และแคดเมียม มักจะถูกยึดติดอยู่ภายในก้อนแข็งด้วยวิธีการยึดติดทางเคมีหรือรูปสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ในขณะที่ปรอทมักจะถูกยึดด้วยกลไก Microencapsulation มากกว่า (LaGrega, 1994)

ในทางตรงข้าม สิ่งปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์จะเข้าไปรบกวนปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้กำลังรับแรงในช่วงท้ายลดลงและทำให้เสถียรได้ยาก ในบางกรณีอาจลดการเกิดโครงสร้างแบบผลึกแล้วเกิดโครงสร้างแบบอสัณฐานเข้าแทนที่

การตัดสินใจว่าสิ่งปนเปื้อนชนิดใดเหมาะกับการทำเป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์นั้นเป็นเรื่องยาก จากการศึกษาถึงตำแหน่งตะกั่วและโครเมียมที่ถูกจับยึดอยู่ในก้อนแข็ง พบว่าตะกั่วจะเกิดการตกผลึกบริเวณผิวรอบนอกของไฮเดรตซีเมนต์ ขณะที่โครเมียมจะกระจายอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ อนุภาคของไฮเดรตซีเมนต์ (LaGrega, 1994)

การทำเสถียรด้วยซีเมนต์มักจะใช้สำหรับการยึดตะกอนที่มีโลหะไฮดรอกไซด์และดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก นอกจากนี้การทำเสถียรด้วยซีเมนต์มีการใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจาก

- 1) การขาดแคลนทางเลือกที่ดีกว่า เช่น โลหะจะไม่เกิดการย่อยทางชีวภาพ และโครงสร้างระดับอะตอมของโลหะไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากทำการเผาที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น
- 2) มีความเหมาะสมและความง่ายต่อความเข้าใจถึงกลไกการทำเสถียร เช่น การตกผลึกและการดูดซับ เป็นต้น

Bishop (1988) ได้ทำการสรุปข้อดีและข้อเสียของการทำเป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์ดังนี้

- ข้อดี
- 1) เทคนิคการผสมซีเมนต์ และการกำจัดได้มีการพัฒนามาอย่างดีแล้ว
  - 2) วิธีการนี้สามารถทนต่อสารเคมีหลายชนิดในตะกอนของแข็งได้เป็นอย่างดี
  - 3) เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการจัดหาได้ง่าย
  - 4) ความแข็งแรงและความซึมผ่านได้จากการทำเสถียรสามารถปรับได้โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมลงไปของเสีย
  - 5) วัสดุที่ใช้มีราคาถูก

ข้อเสีย

- 1) ไม่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์บางชนิดซึ่งจะทำลายกลไกการแข็งตัวของซีเมนต์
- 2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถถูกชะละลายได้ในสภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำ
- 3) การเพิ่มน้ำหนักของของเสีย โดยการทำแข็งด้วยซีเมนต์จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งของเสียไปกำจัดเพิ่มขึ้น

## 2.7 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำก้อนแข็ง

U.S. EPA (1992) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับของเสียที่สามารถนำไปทิ้งโดยการฝังกลบหรือของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยการทดสอบของเสียดังกล่าวด้วยวิธีการสัคศาสตร์ (Toxicity



Characteristic Leaching Procedure) และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Extraction Solution) มาตรฐานของ EPA ได้กำหนดความเข้มข้นของโลหะหนักซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของสารที่เป็นพิษ ตามประเภทของของเสีย ดังมีรายละเอียดตามตารางที่ 2.1

กระทรวงอุตสาหกรรมในพ.ศ. 2531 ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วท้ายประกาศกระทรวงฯ ฉบับที่ 25 โดยวิธีการทำลายฤทธิ์ของสิ่งปฏิกูลต่างๆ ของกระทรวงอุตสาหกรรมได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 การกำหนดคุณสมบัติของสารมีพิษ เมื่อนำมาทำการสกัดสารด้วยวิธีการสกัดสาร(Extraction Procedure) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดแล้ว ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าใดค่าหนึ่งดังต่อไปนี้

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

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด (Extraction Solution) สำหรับของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดแล้ว (US.EPA 1992)

Waste Code	Regulated Hazardous Constitute	Constitution (mg/l)
D004	Arsenic	5.0
D005	Barium	100
D006	Cadmium	1
D007	Chromuim	5
D008	Lead	5
D009( Low Mercury Subcategory less than 260 mg/kg Mercury)	Mercury	0.2
D010	Selenium	5.7
D011	Silver	5

ตารางที่ 2.2 วิธีการทำลายฤทธิ์ของสิ่งปฏิภูลประเภทต่างๆ

(ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2531)

ประเภทสิ่งปฏิภูล	วิธีการทำลายฤทธิ์
1. ตะกอนที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำตะกอนมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ ( $\text{HgS}$ ) แล้วจึงทำให้เป็นก้อนผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติมผสมลงไปด้วย
2. จากการผลิตหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำที่อาจต้องผ่านการบดให้มีขนาดเล็กลงก่อน เพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ทั่วถึงมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ ( $\text{HgS}$ ) แล้วจึงทำให้เป็นก้อนผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติมผสมลงไปด้วย
3. ตะกอนหรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม, โครเมียม, ตะกั่ว, แมงกานีส เป็นต้น	ใช้สารละลายต่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ผสมกับตะกอนให้ทั่วกันจนสารโลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบของเกลือไฮดรอกไซด์ที่มีค่าพีเอชของของผสมประมาณ 11 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ในกรณีที่เป็นตะกอนหรือฝุ่นที่เป็นแคดเมียม จะต้องทำให้เป็นก้อนต่อด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์
4. ตะกอนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มียาฆ่าแมลง ยากำจัดศัตรูพืช หรือยากำจัดเชื้อราปนเปื้อน	เติมสารละลายต่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ในปริมาณที่สามารถจะทำลายพิษของตัวยาแต่ละชนิดได้หมด

พ.ศ.2540 กระทรวงอุตสาหกรรมได้ออกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งสรุปข้อกำหนดของเสียที่ผ่านกระบวนการทำเป็นก้อนแข็ง จะต้องมีความสมบัติดังต่อไปนี้

1. สามารถรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1633 และ D2166 ได้ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบ (Secured landfill) ได้อย่างปลอดภัย
2. มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร
3. มีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ extract fluid) เป็นไปตามเกณฑ์ในการสกัดสาร (leachate extraction procedure) เพื่อทดสอบว่าสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วได้ผ่านการทำลายฤทธิ์กรดและปรับเสถียรอย่างสมบูรณ์ ก่อนการนำไปฝังกลบ

พ.ศ.2540 กระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดมาตรฐานสำหรับลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว โดยกำหนดคุณสมบัติของสารมีพิษ ซึ่งเมื่อนำมาทำการสกัดด้วยวิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดแล้วปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง สำหรับตะกั่ว โครเมียม และแคดเมียม จะมีค่าดังนี้

ตะกั่ว (ทั้งหมด)	≥	5.0	มก./ ล.
โครเมียม(ทั้งหมด)	≥	5.0	มก./ ล.
แคดเมียม(ทั้งหมด)	≥	1.0	มก./ ล.

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชัยวัฒน์ โปธิทอง (2541) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการทำลายฤทธิ์โลหะหนักในผงถ่านที่ใช้แล้ว โดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง โดยทำการแปรผันวัสดุประสาน 5 ชนิด อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม และผลของระยะเวลาการบ่มที่มีต่อกำลังรับแรงอัดและการชะละลาย ซึ่งผลการวิจัยพบว่าปูนซีเมนต์ซีลีกาามีประสิทธิภาพในการทำเป็นก้อนแข็งใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 อัตราส่วนผสมระหว่างผงถ่านต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมอยู่ที่ 1 ต่อ 7 และผลของระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด แต่ไม่ค่อยมีผลต่อการชะละลายเท่าใดนัก

นฤมิตร คินนิมาน (2538) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการนำตะกอน โลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งจากการทดลองพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนอัตราส่วนผสมตะกอน โลหะหนักในวัสดุประสานจะมีผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง และทำให้การชะละลายของ โลหะหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมต่อการทำลายนฤทธิ์มีค่าเท่ากับ 0.5 ระยะเวลาการบ่มมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น และการชะละลายของ โลหะหนักมีค่าลดลงตามระยะเวลาการบ่ม และจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ภายหลังระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

สุรพัชร พันธุ์พานิชย์กุล (2542) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการทำเสถียรตะกอนจาก โรงหลอมเบตเตอรีเก่า โดยทำการแปรผันวัสดุประสานระหว่าง ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมปูนขาว และปูนซีเมนต์ผสมโซเดียมซัลไฟด์ และเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยจะพิจารณาจากคุณสมบัติของก้อนแข็งให้เป็นไปตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรมฉบับที่ 1 (พ.ศ. 2531) และประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ผลการวิจัยพบว่าวัสดุประสานที่เหมาะสมในการทำเสถียรได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 25 ของน้ำหนักตะกอน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5

ภูพิงค์ ทวีทรัพย์ (2540) ได้ทำการวิจัยหาสัดส่วนวัสดุประสานที่เหมาะสมที่สุดในการทำเสถียรโลหะหนักในเศษสีที่เกิดจากกระบวนการขัดลอกสีเก่าออกจากถังบรรจุก๊าซหุงต้มและฝืนสีที่เกิดจากการขัดสีรถยนต์ก่อนพ่นสีจริงทับ เมื่อนำของเสียไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดสารของกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่ามีโลหะหนัก 3 ชนิดคือ โครเมียม ตะกั่ว และปรอท เกินค่ามาตรฐานและจัดอยู่ในข่ายของสารพิษ โดยการวิจัยจะศึกษาเกี่ยวกับความเหมาะสมของสัดส่วนการผสมของของเสียต่อปริมาณวัสดุประสานที่มีผลต่อความสามารถในการทำเสถียร โลหะหนัก โดยมีปูนซีเมนต์และ/หรือปูนขาวเป็นวัสดุประสาน มีการเปรียบเทียบผลการวิจัยเมื่อมีการเติมและไม่เติมกรดกำมะถันและโซเดียมซัลไฟด์ โดยจะทำการผสมก่อนที่จะหล่อเป็นก้อนแข็ง ซึ่งผลการวิจัยสรุปได้ว่าที่อัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุประสานที่ 1:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม และเท่ากับ 3:1 เมื่อมีการเติมโซเดียมซัลไฟด์ สำหรับกรณีที่มีการใช้ซีเมนต์และปูนขาวในอัตราส่วน 1:1 เป็นวัสดุประสานค่าอัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุประสานที่ 3:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมเช่นกัน และค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 0.4

ประพิศลา เทพสิทธิ (2542) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดตะกอนจากการถลุงแร่ เซรัสไซต์เพื่อผลิตตะกั่วบริสุทธิ์ ตะกอนเป็นของแข็งที่ปนเปื้อนโลหะหนักซึ่งถูกจัดว่าเป็นของเสียอันตราย จากการศึกษพบว่าตะกอนมีปริมาณตะกั่วร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของตะกั่วใน

น้ำสกัดมีค่า 9 มก./ล. ซึ่งเกินค่ามาตรฐานของสารอันตรายของกระทรวงอุตสาหกรรม จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการทำเสถียรตะกอนด้วยซีเมนต์เป็นทางเลือกที่ดีกว่าการใช้ปูนขาวเป็นวัสดุประสาน โดยใช้ซีเมนต์ร้อยละ 12 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.8 คุณสมบัติของของเสถียรผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 ขนาดของตะกอนมีผลต่อการทำให้เป็นก้อนแข็ง โดยที่มีขนาดเล็กจะมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามกฎหมายได้ในขณะที่ตะกอนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าไม่สามารถอยู่เป็นก้อนได้

Bishop (1988) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการชะละลายโลหะหนักจากของเสถียรที่ผ่านกระบวนการทำแข็ง โดยใช้ของเสถียรสังเคราะห์เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ของแคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว โดยได้ศึกษาถึง Buffering Capacity ของวัสดุที่แข็งตัวจากการกำจัดโลหะหนัก และกลไกการยึดจับของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในของเสถียรที่ถูกทำแข็ง สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

#### 1. ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity)

จากการทดสอบการชะละลายของก้อนแข็งโดยทำการชะละลายก้อนแข็งด้วยกรดอะซิติกแล้วทำการชะละลายติดต่อกันอีกเป็นจำนวนรวมทั้งหมด 15 ครั้ง ตรวจวัดค่าพีเอช และความเป็นด่างแล้วนำไปเขียนกราฟดังรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าเมื่อทำการชะละลายของก้อนแข็งหลายๆครั้งพบว่า ค่าพีเอชของกรดที่ผ่านการชะละลายแล้วมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเกือบคงที่ในครั้งที่ 15 ส่วนค่าความเป็นด่างสะสมจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะละลายได้จะเหลือน้อยประมาณร้อยละ 1.7 ของค่าความเป็นด่างสะสมทั้งหมด โดยความเป็นด่างสะสมถึงการชะล้างในครั้งที่ 15 มีค่าเท่ากับ 1.83 meq/g ซึ่งถือเป็นค่า Buffering Capacity ของก้อนแข็ง ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะล้างออกมาแต่ละครั้งนี่จะเป็นตัวควบคุมพีเอชของการชะล้าง โดยการสะท้อนกรดอะซิติกที่ใช้ในการทดลองให้เป็นกลาง

#### 2. กลไกการยึดจับโลหะหนัก

จากรูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลาย(โครเมียม แคลเซียม และตะกั่ว) กับค่าความเป็นด่างและซิลิคอน ซึ่งจะถูกระบายมากขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลงต่ำกว่า 6.0

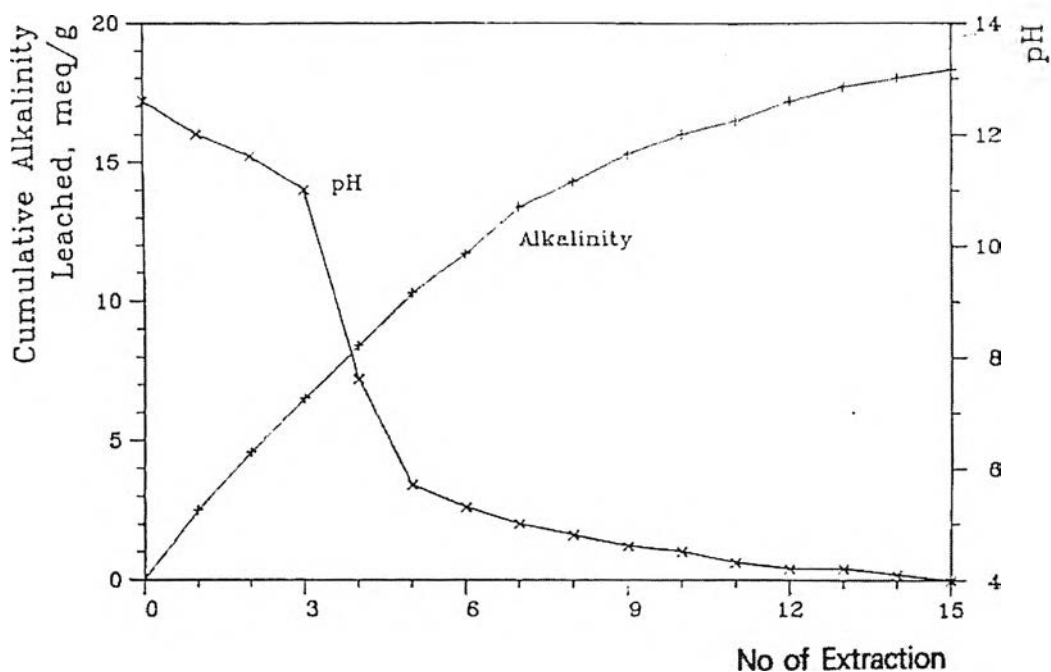
จากการทดลองที่ผ่านมาหลายครั้งทำให้ทราบว่าโลหะหนักอาจจะอยู่ในโครงสร้างของก้อนแข็ง ในรูปแบบต่างๆ เช่นอยู่ในรูปของโครงสร้างภายในก้อนแข็ง ถูกเกาะบนผนังของรูพรุนและทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แคลเซียมจะถูกระบายออกมาได้มากกว่าโครเมียมและตะกั่ว

กรณีที่โลหะหนักถูกกักอยู่ในของแข็งหรืออยู่ในรูพรุน หรือเกาะติดผิวรูพรุนแล้วโลหะหนักเหล่านี้ควรจะถูกระบายออกมามากน้อยก็ขึ้นกับการละลายค่าความเป็นด่าง จากรูปที่ 2.2 เส้นกราฟของแคลเซียมสะสมที่ถูกชะล้างออกมาจะคล้ายคลึงกับเส้นกราฟของค่าความเป็นด่างสะสมที่ถูกชะล้างออกมา จึงสันนิษฐานได้ว่า แคลเซียมจะอยู่ในของแข็งที่แข็งตัวในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยอยู่ตามรูพรุนและเกาะติดอยู่ตามผนังของรูพรุน

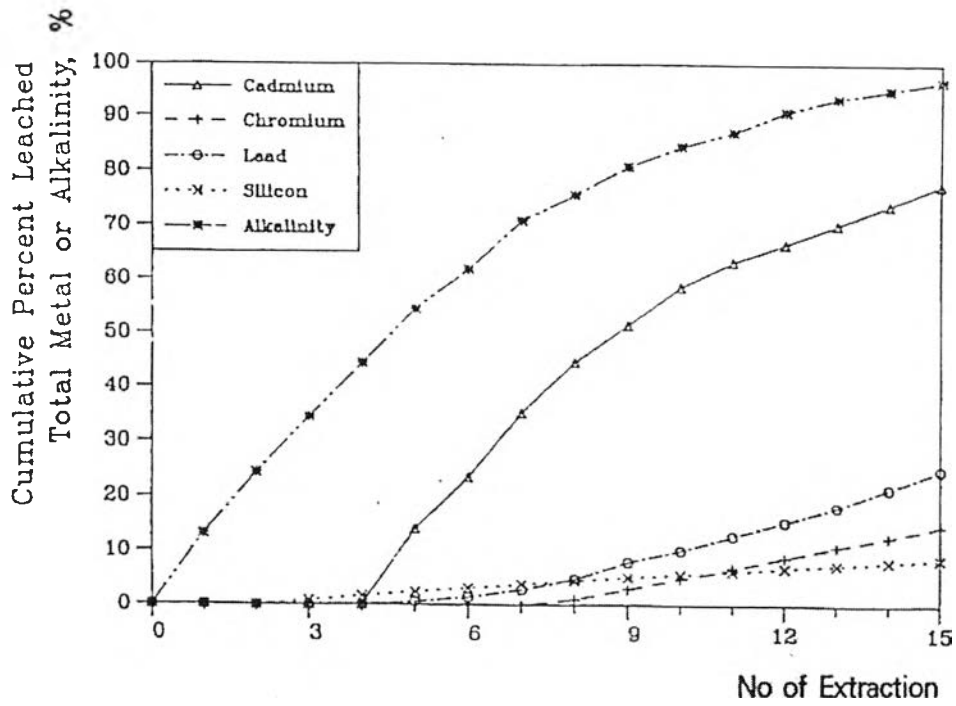
สำหรับโครเมียมและตะกั่ว นั้น เมื่อพิจารณาเส้นกราฟแล้วจะมีรูปแบบของการละลายคล้ายคลึงกับซิลิกา ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์และทราย ดังนั้นจึงเชื่อว่าโครเมียมและตะกั่วจะถูกยึดติดอยู่ในโครงสร้างซิลิกอนมากกว่าเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูพรุน การละลายของโครเมียมและตะกั่วค่อนข้างยากที่จะเกิดเฉพาะที่พีเอชต่ำๆ และต่ำกว่าพีเอชในการละลายแคลเซียม อัตราการละลายของโลหะทั้งสองนี้มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการละลายที่คาดคะเนจากการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงว่าโลหะทั้งสองนี้เกาะติดอย่างแข็งแรงภายในโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกาและจะถูกชะออกต่อเมื่อโครงสร้างของซิลิกาถูกทำลาย

รูปที่ 2.3 แสดงถึง pC-pH diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม โครเมียมและตะกั่ว ในสารละลายที่มีค่า ionic strength 0.75 M พบว่าในขณะที่เริ่มผสมปูนซีเมนต์และส่วนผสมอื่นๆ ค่าพีเอชจะมีค่าสูงประมาณ 12-13 ซึ่งทำให้แคลเซียมส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ และอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นของแข็งที่อยู่ในรูซีเมนต์ ส่วนโครเมียมและตะกั่วจะละลายน้ำได้ และมีส่วนในปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์และเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกา จากสาเหตุดังกล่าวนี้จึงอธิบายได้ว่าแคลเซียมจะถูกระบายออกมาเช่นเดียวกับค่าความเป็นด่าง ส่วนโครเมียมและตะกั่วจะถูกระบายออกมาโดยขึ้นกับการละลายของซิลิกา

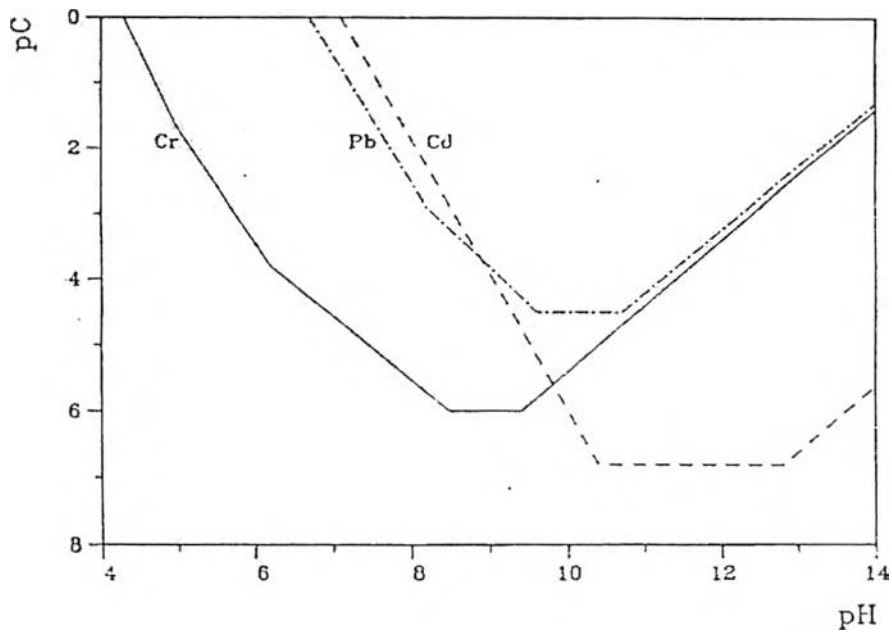
ภายหลังการทดลองการชะละลายได้วิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งของสารทั้งหมด พบว่า หลังจากการทดลองชะล้าง 15 ครั้ง ปริมาณสารที่ถูกชะล้างออกไปประมาณร้อยละ 50 ถึง 70 ของ ปริมาณทั้งหมดก่อนการทดลอง แต่อย่างไรก็มีโลหะหนักเหลืออยู่ โดยมีแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว เหลืออยู่ร้อยละ 50 85 และ 75 ตามลำดับ และมีโลหะที่เป็นสารประกอบโดยปกติในซีเมนต์ ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็ก และซิลิกอน เหลืออยู่ร้อยละ 90 98 และ 80 ตามลำดับ และแคลเซียมเหลืออยู่ร้อยละ 8 ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์ที่แข็งตัวสามารถยึดจับโลหะหนักได้ดี และยากที่จะทำการ ชะละลายโลหะหนักออกจากซีเมนต์ที่แข็งตัวดังกล่าว



รูปที่ 2.1 ค่าพีเอชและความเป็นด่าง จากการทดสอบการชะละลาย (Bishop,1988)



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ โลหะหนักที่ถูกชะละลายกับค่าความเป็นด่าง และซิลิกอนจากการทดสอบการชะละลาย (Bishop,1988)



รูปที่ 2.3 pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม โครเมียมและ ตะกั่ว (Bishop,1988)



Shively และคณะ (1986) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักโดยการทำให้เป็นก้อน และทดสอบการชะละลายโลหะหนัก และกำลังรับแรงอัด โดยทดสอบโลหะหนัก 4 ชนิด คือ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว แล้วทำการทดสอบการชะละลายน้ำ 15 ครั้งในโลหะหนัก แต่ละชนิด และโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสมกัน สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การทดสอบความเข้มข้นของน้ำสกัดจากของเสียทั้ง 4 ชนิด และของเสียผสมซึ่งผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์แล้วนั้น พบว่าเมื่อทำการสกัดโลหะหนักครั้งแรก ความเข้มข้นของโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ U.S.EPA ทั้งกรณีที่ใช้อัตราส่วนผสมน้ำ : ซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 1.0 โดยค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของน้ำจาก 0.5 เป็น 1 การละลายโลหะหนักออกจากของเสียแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเมื่อเริ่มการสกัดโลหะหนัก แคดเมียมไฮดรอกไซด์ ในซีเมนต์จะทำหน้าที่ทำลายฤทธิ์ของกรดที่ใช้สกัดให้เป็นกลาง ทำให้ค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 10.0 และมีการละลายของสารในซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ในช่วงที่สองจะมีการละลายของโลหะหนักสูงสุด ค่าพีเอชมีค่าน้อยกว่า 6.0 ในช่วงที่สามเมื่อทำการสกัดต่อไปการละลายของโลหะหนักจะเริ่มลดน้อยลง และการชะละลายจากการสกัดแต่ละครั้งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในของเสีย
2. จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน พบว่าเมื่อใช้อาร์เซนิก และแคดเมียม มากำจัดโดยการทำให้เป็นก้อน จะทำให้กำลังรับแรงอัดของแท่งซีเมนต์ลดลงทั้งกรณีที่ใช้ค่าอัตราส่วนผสมน้ำ : ซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ส่วนโครเมียมและตะกั่วจะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

Shin และ Sujiwathana (1988) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียอันตรายโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์ โดยใช้ของเสีย 4 ชนิด คือ แคดเมียม ตะกั่ว อัลตริน และคลอเดน และนำก้อนแข็งไปทดสอบการชะละลายและทดสอบกำลังรับแรงอัด สรุปผลของปัจจัยต่างๆ ได้ดังนี้

1. ปริมาณของเสียที่ใช้ในการกำจัดปริมาณ แคดเมียม ตะกั่ว อัลตริน และคลอเดนในน้ำสกัดจากการชะละลายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของเสียที่เติมลงไป สำหรับกำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเสียลงในส่วนผสม
2. อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ทำให้ความสามารถในการชะละลายของแคดเมียม ตะกั่ว อัลตริน และคลอเดน มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.5 และที่อัตราส่วนเท่ากับ 0.5 นี้ทำให้ได้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการทดสอบที่อัตราส่วน 0.25 และ 1 ตามลำดับ
3. ค่าพีเอชของสารที่ใช้สกัด สารสกัดที่มีพีเอชต่ำจะทำให้การชะละลายเพิ่มขึ้น

4. อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ขนาดก้อนแข็งที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากขึ้นจะทำให้ค่าการชะละลายเพิ่มมากขึ้น
5. ระยะเวลาการบ่ม ไม่มีผลมากนักต่อการชะละลาย แต่จะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้น
6. วิธีการทำให้เป็นก้อนด้วย ซีเมนต์และซิลิกา จะเหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าสารอินทรีย์ที่ใช้ฆ่าแมลง

Shin และคณะ (1988) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ ด้วยการทำให้แข็งโดยใช้ซีเมนต์ โดยมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนผสมทรายต่อซีเมนต์ น้ำต่อซีเมนต์ ปริมาณของเสีย และปริมาณสารเร่งตกผลึก ซึ่งผลการวิจัยสรุปว่า

1. การชะละลายของโลหะหนักได้แก่ โครเมียมและสังกะสีจะลดลง เมื่อลดค่าอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ น้ำต่อซีเมนต์ และเพิ่มปริมาณสารเร่งตกผลึก
2. กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มตัว 14 วัน จะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ น้ำต่อซีเมนต์ และปริมาณของเสีย
3. จากการวิเคราะห์โดย Anova Analysis พบว่าอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์จะมีผลต่อการชะละลายของโครเมียมและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลต่อการชะละลายของสังกะสีและกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็ง
4. เมื่อนำผลการวิจัยไปวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ เช่น ค่าใช้จ่าย การชะละลายของโครเมียมและสังกะสีจะต้องต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ EPA คือ 5 และ 500 ppm และกำลังรับแรงอัด ต้องมีค่าสูงกว่า 10 กก./ตร.ซม. จะได้อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดของเสีย 30 กรัม จะต้องใช้อัตราส่วนผสมทรายต่อซีเมนต์ น้ำต่อซีเมนต์ และปริมาณสารเร่งตกผลึกเท่ากับ 1 1.5 และ 1.075 กรัม ตามลำดับ
5. การใช้สารเร่งตกผลึกจะไม่มีควมสำคัญในทางปฏิบัติและในทางเศรษฐศาสตร์

Rijal (1990) ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดตะกอนน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ ด้วยการทำให้ก้อนแข็ง เพื่อกำจัดโลหะหนักในตะกอนน้ำเสีย ได้แก่ โครเมียม และสังกะสี โดยใช้วัสดุประสาน ได้แก่ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าเกลบที่อัตราส่วน 1:1 ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักที่อัตราส่วนผสมของตัวแปรต่างๆ ผลการวิจัยพบว่า กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในส่วนผสม การชะละลายของโลหะหนักเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณตะกอน กำลังรับแรงอัดจากตัวอย่างที่หล่อด้วยซีเมนต์จะสูงกว่าตัวอย่างที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าเกลบ

การชะละลายโครเมียมในตัวอย่างที่หล่อจากปูนซีเมนต์จะต่ำกว่าในตัวอย่างที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบที่อัตราส่วนผสมตะกอนต่อซีเมนต์ น้อยกว่า 0.2 แต่เมื่ออัตราส่วนผสมมากกว่า 0.5 การชะละลายของโครเมียมในตัวอย่างที่หล่อด้วยซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบจะต่ำกว่าตัวอย่างที่หล่อด้วยปูนซีเมนต์

Leangon (1993) ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาหาวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนของตะกอน จากโรงงานฟอกหนัง และตะกอนจากโรงงานเซมิคอนดักเตอร์ โดยตะกอนจากโรงงานฟอกหนัง จะมีโครเมียมและสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ส่วนตะกอนจากโรงงานเซมิคอนดักเตอร์ประกอบด้วย ทองแดง ตะกั่วและดีบุก วัสดุประสาน 5 ชนิดที่นำมาใช้ทดลอง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เถ้าจากแกลบ เถ้าลอยลิกไนท์และซิลิกาฟูม ซึ่งจากการทดลองพบว่าวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกำจัดตะกอนทั้ง 2 ประเภท ได้แก่ ปูนซีเมนต์ โดยสามารถกำจัดตะกอนสูงสุดในอัตราส่วนตะกอน:วัสดุประสาน ของโรงงานฟอกหนัง และตะกอนจากโรงงานเซมิคอนดักเตอร์ที่ 0.64 และ 1.37 ตามลำดับ

Minocha (2002) ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ที่มีต่อการหล่อเป็นก้อนแข็งตะกอนโลหะหนักโดยตะกอนที่ใช้ในการทดลองจะมาจากการสังเคราะห์ตะกอนที่มีโลหะหนัก โดยตะกอนที่ใช้ในการทดลองจะมาจากการสังเคราะห์ตะกอนที่มีโลหะหนักในรูปในเตรตของโครเมียม นิกเกิล แคลเซียม และปรอท วัสดุประสาน 3 ชนิดที่นำมาใช้ทดลอง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย และปูนขาวผสมเถ้าลอย สารอินทรีย์ที่นำมาเติมได้แก่ ไขมัน น้ำมัน เฮกซะคลอโรเบนซีน ไตรคลอโรเอทีลีน และฟีนอลในปริมาณร้อยละ 2 5 และ 8 ของน้ำหนักตะกอน ทำการบ่มที่ระยะเวลา 28 วัน ปัจจัยที่ทำการทดสอบได้แก่ค่าความหนาแน่นของก้อนแข็ง และค่ากำลังรับแรงอัด ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ฟีนอล ไขมันและน้ำมัน ส่งผลต่อการลดลงของค่ากำลังรับแรงอัด ในทางตรงข้ามผลกระทบของเฮกซะคลอโรเบนซีน ไตรคลอโรเอทีลีน ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดจะอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า และมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมอัตราส่วนตะกอนต่อวัสดุประสานในการบำบัดของเสียอันตรายลักษณะนี้

Minocha (2003) ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ที่มีต่อการหล่อเป็นก้อนแข็งตะกอนโลหะหนัก โดยตะกอนที่ใช้ในการทดลองจะมาจากการสังเคราะห์ตะกอนที่มีโลหะหนักในรูปในเตรตของโครเมียม นิกเกิล แคลเซียม และปรอท วัสดุประสาน 3 ชนิดที่นำมาใช้ทดลอง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย และปูนขาวผสมเถ้าลอย สารอินทรีย์ที่นำมาเติมได้แก่ ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลเฟตในปริมาณร้อยละ 2 5 และ 8 ของน้ำหนักตะกอน ทำการบ่มที่ระยะเวลา 28 วัน ปัจจัยที่ทำการทดสอบได้แก่

ค่าความหนาแน่นก้อนแข็ง และกำลังรับแรงอัด ซึ่งจากการทดลอง พบว่าสารอนินทรีย์ทั้งหมดที่นำมาทดลองส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของก้อนเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 2 ถึง 8 ในทุกอัตราส่วน และวัสดุประสาน ตัวอย่างที่มีการเติมทองแดงและตะกั่วจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยและปูนขาวผสมเถ้าลอยมีค่าลดลงในทุกอัตราส่วน ตัวอย่างที่มีการเติมสังกะสีจะส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งที่ต่ำลงในทุกวัสดุประสานในทุกอัตราส่วน ยกเว้นที่ปริมาณสังกะสีร้อยละ 2 ที่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ในขณะที่ตะกั่วจะมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งที่ใช้ซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน