

บทที่ 2

บททวนเอกสาร

ในขณะที่เป้าหมายของการลดของเสียให้น้อยที่สุดเป็นสิ่งที่ต้องการ และมีความจำเป็นมาก แต่โรงงานอุตสาหกรรมยังคงปล่อยของเสียที่ยากต่อการบำบัดและทำลายออกสู่สิ่งแวดล้อม เป็นเหตุให้มีอันตรายเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมได้ วิธีการบำบัดมีอยู่หลากหลายวิธีด้วยกันที่นำมาใช้ในการจัดการของเสียที่เป็นอันตราย เช่น การบำบัดทางเคมี ฟิสิกส์ หรือชีววิทยา ในบางกระบวนการบำบัดอาจใช้ประโยชน์จากของเสียที่เกิดขึ้นโดยนำกลับมาใช้อีกและช่วยลดปริมาณของเสียได้อีกด้วยดังมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment)

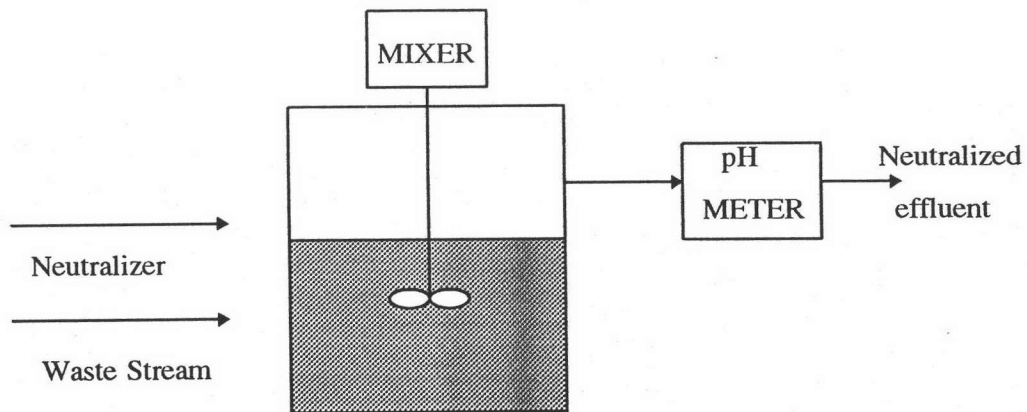
การบำบัดทางเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำเสียให้มีอันตรายน้อยลง มีประโยชน์ใช้ส่งเสริมการนำกลับมาใช้อีกของสารอันตราย การบำบัดทางเคมีเป็นวิธีการจัดการของเสียได้ดีกว่าการฝังกลบแบบถูกสุขลักษณะ (landfill) แม้ว่าวิธีการฝังกลบแบบถูกสุขลักษณะเป็นวิธีการเก่าแต่มีราคาถูกกว่าการบำบัดด้วยสารเคมี อีกทั้งในปัจจุบันการฝังกลบอย่างถูกสุขลักษณะนั้นมีราคาสูงขึ้นและทางกฎหมายมีความเข้มงวดต่อเรื่องของการนำของเสียไปฝังกลบมากขึ้น ทำให้การใช้การบำบัดทางเคมีมีการยอมรับปฏิบัติกันอย่างมาก ซึ่งวิธีการบำบัดทางเคมีจะมีหลายวิธีการให้เลือกที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้จะใช้วิธีการใดจึงจะเหมาะสมสำหรับการบำบัด จำเป็นต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมในแง่ต่าง ๆ ดังนี้คือ คุณลักษณะของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัดทั้งหมด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และการตรวจสอบคุณภาพ ความยากง่ายในการเดินระบบ และความปลอดภัย ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ สามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้คือ

2.1.1. การทำให้เป็นกลาง (Neutralization)

โดยทั่วไปน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะไม่เป็นกลาง เช่นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเคมีผลิตกรดหรือด่าง ซึ่งน้ำเสียจากโรงงานประเภทนี้จะมีสารอนินทรีย์ปะปนอยู่ จะใช้การทำให้เป็นกลางโดยการปรับพีเอชด้วยกรดหรือด่างแล้วแต่กรณี ซึ่งจะสามารถปล่อยลงสู่

แหล่งน้ำสาธารณะได้ โดยมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 5-9 ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม (ธงชัย,2525)

น้ำเสียที่เป็นกรดจะใช้ปูนขาว $[Ca(OH)_2]$ โซดาไฟ (NaOH) หรือโซดาแอช (Na_2CO_3) ในการทำให้เป็นกลาง ปูนขาวจะมีข้อดีที่ราคาถูกกว่าตัวอื่นๆ และทำให้เกิดตะกอนของสารบางชนิดด้วย แต่มีข้อเสียตรงอาจเกิดตะกอนในเส้นท่อได้ ถ้าใช้ปูนขาวในรูปของสารละลายในขณะใช้งานจะต้องมีการกวนตลอดเวลา เพื่อให้ปูนขาวละลายได้ดีและไม่ตกตะกอนอยู่กันถึง น้ำเสียที่เป็นด่างจะทำให้เป็นกลางด้วยกรดแก่ เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) หรือ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (Freeman,1989) ระบบของการปรับค่าพีเอชนั้นจะประกอบด้วยถังผสม (mixing tank) เพื่อทำหน้าที่ผสมกรดหรือด่างให้เข้ากับน้ำเสียอย่างสมบูรณ์ที่สุด ดังนั้นผู้ควบคุมจะต้องคอยวัดค่าพีเอชเป็นระยะๆ หรือถ้าจะให้สะดวกก็ควรใช้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ (pH monitor) ซึ่งจะควบคุมค่าพีเอชให้ได้ตามต้องการ (ธงชัย,2525) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียที่เป็นกรดหรือด่าง

2.1.2. การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation)

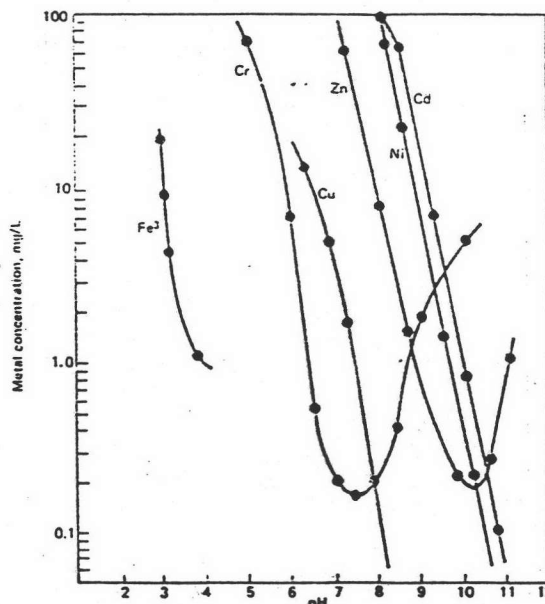
โลหะหนักที่ไม่พึงปรารถนาในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ ด้วยวิธีตกตะกอน หรือกรองเพียงอย่างเดียว แต่การกำจัดโลหะหนักจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกผลึกของแข็ง (precipitation) ก่อน จากนั้นจึงทำให้ผลึกของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อก (floc) เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้โดยวิธีตกตะกอนและวิธีกรอง โลหะหนักแต่ละชนิดจะตกตะกอนผลึกที่พีเอชแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอ็อกไซด์ของโลหะนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ตัวเลือกของสารทำปฏิกิริยาที่ต้องพิจารณาเป็นเรื่องแรกคือ สามารถตกตะกอนผลึกโลหะหนัก เรื่องที่สองคือเรื่องของการละลาย เมื่อตกตะกอนผลึก ตะกอนที่ได้ต้องไม่ละลายกลับและโลหะนั้นจะแยกออกจากน้ำ การละลายจะมีผลกับอุณหภูมิ ในโลหะหนักบางชนิด

สามารถละลายได้ที่อุณหภูมิสูงจะแยกโลหะหนักออกได้ โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำโลหะหนักจะสามารถตกตะกอนแยกออกมา ดังนั้นอุณหภูมิจะมีอิทธิพลในการที่จะเลือกวิธีการในการบำบัด

สภาพที่มีประจุของโลหะก็มีความสำคัญในกระบวนการตกตะกอนผลึก ตัวอย่างเช่น Fe^{2+} จะมีความสามารถในการละลายได้มากกว่า Fe^{3+} ดังนั้นการบำบัดด้วยวิธีตกตะกอนผลึกนี้ก็ต้องใช้สารออกซิไดซ์เปลี่ยน Fe^{2+} ให้เป็น Fe^{3+} ก่อนเช่นเดียวกับ Cr^{6+} ละลายน้ำได้มากกว่า Cr^{3+} จึงจำเป็นต้องลดประจุก่อนแล้วเอาออกในรูป Cr^{3+} ดังนั้นข้อที่ต้องพิจารณาอีกข้อหนึ่งคือ รูปของสารประกอบไอออนเชิงซ้อน ในน้ำเสียเช่น แอมโมเนีย ฟลูออไรด์ หรือไซยาไนด์ เหล็กสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนพวกเฟอร์โรไซยาไนด์ไอออน ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ และเหลืออยู่ในรูปสารเชิงซ้อนเล็กน้อยสามารถตกตะกอน โดยสารเคมีได้ (Manahan, 1993)

ประสิทธิภาพของการตกตะกอนผลึกของโลหะหนักจะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของซัลไฟด์ เช่น โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) หรือโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ($NaHS$) การเพิ่มของสารละลายซัลไฟด์จะต้องมีการควบคุม เนื่องจากอาจจะเกิดแก๊สพิษได้ คือในระหว่างการตกตะกอนซัลไฟด์จะเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้น ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ จึงควรมีการควบคุมอย่างดี การลดอันตรายให้เหลือน้อยที่สุดโดยการใช้ต่างช่วย ดังนั้นในการควบคุมการบำบัดแบบนี้จะต้องปรับปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาให้เหมาะสม (optimum dose) เพราะถ้าใช้ปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ขุ่น และทำให้พีเอชเป็นด่างมากต้องใช้กรด เพื่อปรับพีเอชลงมาให้เป็นกลางก่อนจะปล่อยทิ้งหรือต้องนำไปบำบัดด้วยวิธีอื่นต่อไป (องชัย, 2525)



รูปที่ 2.2 ความสามารถในการละลายของโลหะหนักที่ค่าพีเอชต่าง ๆ (Lanouette, 1997)

2.1.3. การสร้างตะกอนและการรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation)

ในน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยขนาดใหญ่ อาจตกตะกอนแยกตัวออกจากน้ำ แต่อนุภาคที่มีน้ำหนักเบามาก ไม่สามารถจมตัวได้ด้วยน้ำหนักของอนุภาคเอง ส่วนอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียต่างก็มีประจุไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นประจุชนิดใด ขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคนั้น ๆ เมื่อแต่ละอนุภาคซึ่งต่างก็มีประจุที่เหมือนกันแขวนลอยอยู่ ก็จะมีแรงผลักรังที่เกิดจากประจุในน้ำที่ล้อมรอบอนุภาคนั้นอยู่ทำให้ไม่สามารถรวมตัวกันได้เป็นอนุภาคใหญ่ จึงไม่สามารถจะแยกตัวออกจากน้ำเสียได้ด้วยน้ำหนักของอนุภาคเองเช่นกัน การที่จะให้อนุภาคขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเบา และอนุภาคคอลลอยด์แยกตัวออกจากน้ำเสียได้จะต้องมีวิธีการที่ทำให้อนุภาคเหล่านี้รวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่มีน้ำหนักพอที่จะสามารถจมตัวได้ วิธีการดังกล่าวนี้ที่ใช้โดยทั่วไปคือการเติมสารเคมี เพื่อไปเป็นตัวประสานให้อนุภาคขนาดเล็กมากจับตัวกัน หรือถ้าในบางกรณีที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์สารเคมีที่เติมลงไปจะเป็นชนิดที่ทำลายประจุที่ล้อมรอบอนุภาค ทำให้แรงผลักรังหายไป แล้วสารเคมีชนิดนั้น (หรือในบางกรณีอาจใช้สารเคมีอีกชนิดหนึ่ง) จะเป็นตัวประสานให้อนุภาคคอลลอยด์นั้นจับตัวกัน การทำให้อนุภาคเล็ก ๆ จับตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ด้วยสารเคมีนี้เรียกว่า เคมีคัลโคแอกกูเลชัน (chemical coagulation) สารเคมีที่ใช้เรียกว่า โคแอกกูแลนต์ หรือ ฟลอคคูแลนต์ (coagulant or flocculant) สารที่รู้จักกันดีและนิยมใช้โดยทั่วไปได้แก่ สารส้ม (alum) ปูนโลมและไฮดรอกไซด์ (III)คลอไรด์ (ธงชัย, 2525)

ในการทำเคมีคัลโคแอกกูเลชัน เมื่อเติมสารเคมีลงไปลงในน้ำเสีย จะต้องทำให้สารเคมีผสมไปในน้ำเสียอย่างรวดเร็วทันทีโดยการกวน เพื่อให้เกิดการสลายตัวและการกระจายไปได้ทั่วในน้ำเสีย เมื่อเกิดอนุภาคเล็ก ๆ ลักษณะเหนียวหยุ่นขึ้นซึ่งเรียกว่าฟลอค (floc) ที่มองเห็นได้ชัด จะต้องเปลี่ยนจากการกวนอย่างรวดเร็วมาเป็นการกวนอย่างช้า ๆ เพื่อไม่ให้ฟลอคที่เกิดขึ้นแตกสลาย และเพื่อให้ฟลอคที่เกิดขึ้นมีโอกาสได้จับตัวกับอนุภาคขนาดเล็กหรืออนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสะเทินประจุที่ล้อมรอบแล้ว กลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มีน้ำหนักพอที่จะแยกหรือจมตัวออกจากน้ำทิ้งได้ โดยทั่วไปเวลาที่ใช้ในการกวนอย่างรวดเร็วประมาณ 1-3 นาที และเวลาในการกวนอย่างช้าประมาณ 12-30 นาที การใช้สารเคมีในการทำให้อนุภาคเหล่านี้รวมตัวกันได้ผลดีที่สุด จะต้องมีการควบคุมค่าความเป็นด่างโดยทั่วไปใช้วัดจากค่าพีเอช ค่าพีเอชสำหรับสารเคมีที่ใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ชนิดหนึ่ง ๆ มีค่าแตกต่างกันไป เช่น สารส้มมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 5-6.5 ถ้าในน้ำเสียมีค่าพีเอชไม่อยู่ในพิสัยดังกล่าว ให้ปรับจนค่าได้ดังพิสัยแล้วจึงเติมสารส้มลงไป ในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กมากและอนุภาคคอลลอยด์ ด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการโดยวิธีที่เรียกว่า จาร์เทสต์ (Jar Test) เพื่อหาค่าความเป็นด่าง พีเอช และปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด (มันสิน, 2534)

การพัฒนาของโพลีเมอร์อินทรีย์ เพื่อใช้ในการเป็นสารสร้างตะกอน และสารรวมตะกอนเรียกว่าโพลีอิเล็กโตรไลต์ (polyelectrolyte) โพลีอิเล็กโตรไลต์เป็นโพลีเมอร์อินทรีย์ขนาด

ใหญ่ละลายน้ำได้ เป็นอออนธรรมชาติ และเป็นสารช่วยให้เกิดตะกอนเม็ดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนได้เร็วขึ้น

- มีแบบประจุบวก, ลบและไร้ประจุ
- มักนิยมใช้แบบประจุลบสำหรับกระบวนการทำให้น้ำใส แต่จะใช้แบบประจุบวก สำหรับกระบวนการรีดน้ำออกจากสลัดจ์ (sludge)
- ปริมาณที่ให้อยู่ในช่วง 0.5-2 มก./ล.
- ละลายนํ้ายาก มีความหนืดสูง อาจไม่สะดวกต่อการใช้งานในบางโรงงานที่ไม่มีอุปกรณ์เติมสารเคมี (feeder) วิธีการที่ให้ละลาย คือต้องละลายในนํ้าอุ่น และกวนอย่างช้าๆทำเป็นสารละลายเริ่มต้น (stock solution) เข้มข้นประมาณ 0.2-2% แล้วค่อยสูบไปใช้งานต่อไป
- มีอายุการใช้งานด้วย ถ้าอยู่ในรูปผงมีอายุใช้งานไม่เกิน 1 ปี ถ้าผสมเป็นสารละลายจะใช้งานได้ไม่เกิน 1-2 สัปดาห์

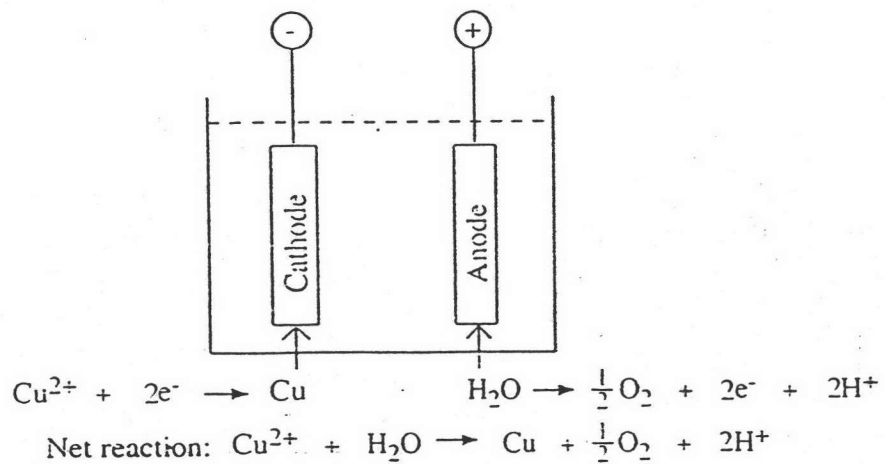
2.1.4. ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

เป็นวิธีการทางเคมีที่ใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่าง ๆ เจือปนอยู่ ดังในตารางที่ 2.1 ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไป เพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือรีดักชันกับสารที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชันได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์มังกาเนต โครเมตและไนเตรท ส่วนสารเคมีทำให้เกิดรีดักชันได้แก่ ไอร์ออน(II)ซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น ตัวอย่างการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการรีดักชัน คือการบำบัดน้ำเสียจากโรงชุบโลหะที่มีสารประกอบโครเมตหรือกรดโครมิกละลายปนอยู่ การบำบัดใช้ไอร์ออน(II)ซัลเฟต ไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบโครเมต ปฏิกิริยานี้เกิดที่พีเอชต่ำกว่า 3 จึงต้องเติมกรดซัลฟูริกไปด้วย จากนั้นจึงเติมปูนโลม์ลงไป เพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง การควบคุมวิธีการบำบัดแบบนี้ค่าพีเอชมีความสำคัญมาก จะต้องปรับพีเอชให้ได้ค่าพอเหมาะ ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ หรือถ้าใช้ไฮโปคลอไรต์ หรือปูนโลม์มากเกินไปพีเอชจะเป็นค่าสูง ต้องใช้กรดปรับพีเอชลงมาให้เป็นกลางก่อนที่จะปล่อยทิ้งไปการวิเคราะห์หาค่าปริมาณโลหะที่ต้องการกำจัดก่อน หรือหลังการบำบัด จะเป็นการช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพของการบำบัด หรือปฏิกิริยาเคมีว่าเกิดขึ้นสมบูรณ์เพียงใด (ธงชัย, 2525)

ตารางที่ 2.1 ปฏิกริยาออกซิเดชัน และปฏิกริยารีดักชันในการบำบัดของเสีย (Manahan,1993)

Waste Substance	Reaction with Oxidant or Reductant
Oxidation of Organics	
Organic matter , {CH ₂ O}	$\{CH_2O\} + 2\{O\}^a \rightarrow CO_2 + H_2O$
Aldehyde	$CH_3CHO + \{O\} \rightarrow CH_3COOH(\text{acid})$
Oxidation of Inorganics	
Cyanide	$2CN^- + 5OCl^- + H_2O \rightarrow N_2 + 2HCO_3^- + 5Cl^-$
Iron(II)	$4Fe^{2+} + O_2 + 10H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 8H^+$
Sulfur dioxide	$2SO_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4$
Reduction of Inorganics	
Chromate	$2CrO_4^{2-} + 3SO_2 + 4H^+ \rightarrow Cr_2(SO_4)_3 + 2H_2O$
Permanganate	$MnO_4^- + 3Fe^{2+} + 7H_2O \rightarrow MnO_2(s) + 3Fe(OH)_3(s) + 5H^+$

{O} สัญลักษณ์นี้ใช้แทนแหล่งที่ให้ออกซิเจนในออกซิไดซ์ซิงเจเนต , a แทนค่าคงที่



รูปที่ 2.3 กระบวนการแยกสารด้วยไฟฟ้า (Manahan,1993)

2.1.5. อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)

จากรูปที่ 2.3 อิเล็กโทรไลซิสเป็นกระบวนการแยกสารด้วยไฟฟ้า โดยที่ขั้วลบของแบตเตอรี่ถูกต่ออิเล็กทรอนิกส์ และอีกขั้วให้อิเล็กทรอนิกส์เป็นขั้วบวกของแบตเตอรี่ และจะมีการรวมตัวกับออกซิเจนที่นี้ ในของเสียอันตราย (hazardous waste) มีการใช้การแยกสารด้วยไฟฟ้ากันอย่างมากมาย เช่น แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) ทองคำ (Au) ตะกั่ว (Pb) เงิน (Ag) และสังกะสี (Zn) ในกรณีที่โลหะมีสารประกอบพวกไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบ จะนำกลับโดยวิธีการแยกสารด้วยไฟฟ้าค่อนข้างยาก เพราะสารมีความซับซ้อนมาก เช่น $\text{Ni}(\text{CN})_4^{2-}$ (Manahan, 1993)

2.1.6. ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งสามารถบำบัดสารเคมีอินทรีย์โดยไฮโดรไลซิส ประกอบด้วยโลหะที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เช่น โลหะคาร์ไบด์ ไฮไดรด์ เอไมด์ แอลโคไซด์ และเฮไลด์ (Manahan, 1993) ตัวอย่างการบำบัดดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การบำบัดสารอนินทรีย์เคมีด้วย การไฮโดรไลซิส (Manahan, 1993)

Class of Chemical	Reaction with Water
Active metals (calcium)	$\text{Ca} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$
Hydrides (sodium aluminum hydride)	$\text{NaAlH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{NaOH} + \text{Al}(\text{OH})_3$
Carbides (calcium carbide)	$\text{CaC}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{C}_2\text{H}_2$
Amides (sodium amide)	$\text{NaNH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \text{NH}_3$
Halides (silicon tetrachloride)	$\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 4\text{HCl}$
Alkoxides (sodium ethoxide)	$\text{NaOC}_2\text{H}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

2.1.7. การสกัดและการชะละลายทางเคมี (Chemical Extraction and Leaching)

การสกัดและชะละลายทางเคมีในการบำบัดของเสียอันตราย โดยปฏิกิริยาทางเคมีด้วยสารทำละลาย (solvent) การละลายของเกลือโลหะหนักน้อยมาก สามารถสกัดโดยปฏิกิริยาของไอออนประจุลบด้วยไฮโดรเจนไอออนแสดงได้ดังนี้



เบสถูกสกัดด้วยกรด เช่นเอมีนและอะนินีนถูกสกัดด้วยกรด ถ้ามีไซยาไนด์หรือซัลไฟด์ควรจะหลีกเลี่ยง เพื่อป้องกันการเกิดไฮโดรเจนไซยาไนด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์

อ็อกไซด์ของโลหะหนักปนเปื้อนในดิน จะใช้การตกตะกอนร่วมในรูปสารที่ไม่ละลายน้ำของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ตามลำดับ ออกไซด์พวกนี้สามารถละลายโดยรีดิวซิงเอเจนต์ (reducing agent) เช่น สารละลายโซเดียมไดไฮโอเนต/ซิเตรท หรือไฮดรอกซิลลามีน ผลที่ได้ คือสารละลายเฟอร์รัสไอออน และแมงกานีสไอออน และปล่อยไอออนของโลหะหนัก เช่น แคดเมียมไอออน หรือนิกเกิลไอออน ละลายอยู่ในน้ำ

2.1.8. การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange)

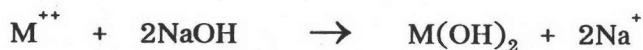
เทคนิคนี้จะอาศัยเรซิน (resin) เป็นตัวแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลาย กับไอออนบนผิวเรซิน เรซินที่ใช้เป็นแคทไอออนเอกเชนจ์ เรซิน (cation exchange resin) เป็นพวกกรดอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble organic acid) ซึ่งอาจจะเป็นกรดซัลโฟนิก หรือกรดคาร์บอกซิลิก (sulfonic or carboxylic acid) วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบกำจัดน้ำเสียจากโรงชุบไฟฟ้า เนื่องจากวิธีนี้มีข้อจำกัดกับชนิดของน้ำเสีย คือถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อความมีประสิทธิภาพสูงสุด (Manahan, 1993)

2.2 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation) (Freeman, 1989)

การตกตะกอนผลึกทางเคมี เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารที่ละลายได้ไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลายโดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี การตกตะกอนผลึกโดยทั่วไป จะใช้เพื่อลดความกระด้างของน้ำโดยเอาแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนออก ในการบำบัดของเสียอันตราย กระบวนการนี้สามารถนำไปใช้เพื่อกำจัดโลหะอันตรายออกจากน้ำเสีย

2.2.1. การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation)

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์จะใช้ตัวตกตะกอน คือแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาว และโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟ โดยเอาโลหะออกจากน้ำในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ โดยมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นตามสมการนี้



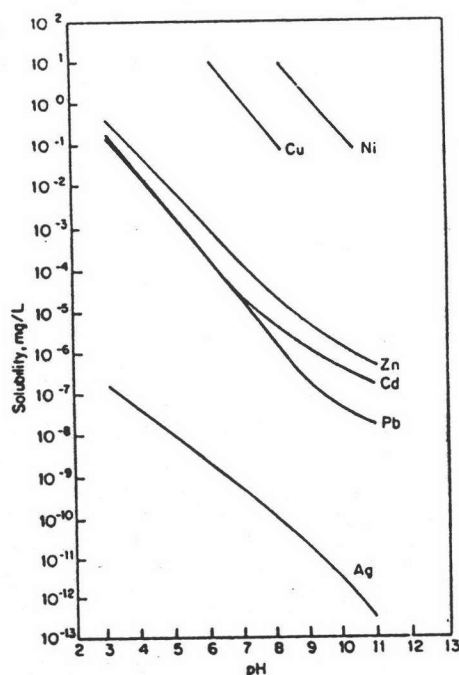
ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการบำบัดจะมีค่าเท่าใดในการตกตะกอนไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับ

- ปริมาณโลหะที่มีอยู่ในน้ำ
- ชนิดของสารตกตะกอนที่ใช้
- สภาวะที่เกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าพีเอช

- สารอื่นๆ ที่มีอยู่ และตัวที่ยับยั้งการตกตะกอนผลึก

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่บำบัดแล้วมีค่าต่ำกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และในบางครั้งอาจต่ำกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ โลหะไฮดรอกไซด์จะเป็นพวกแอมโฟเทอริก (amphoteric) เช่นที่พีเอชสูง และต่ำกว่าสามารถเพิ่มการละลาย และจุดของการละลายต่ำสุด (พีเอชเหมาะสมสำหรับการตกตะกอน) เกิดที่พีเอชต่างค่าสำหรับทุกโลหะ ที่พีเอชหนึ่ง ซึ่งความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ตัวหนึ่งอาจสูงกว่าโลหะหนักอื่น ในเกือบทุกกรณีค่าพีเอชที่ใช้ในการทำจาร์เทสต์ (Jar Test) จะอยู่ระหว่าง 9-11 สำหรับน้ำทิ้งที่มีโลหะหลายๆชนิดปนกันอยู่ อาจจะมีระยะการตกตะกอนผลึกของโลหะ แต่ละชนิดด้วยพีเอชแตกต่างกัน การที่จะควบคุมโลหะทุกตัวออกจากน้ำเสียจนได้ระดับที่เราต้องการ อาจใช้การตกตะกอนผลึกอื่นที่อาจเป็นไปได้

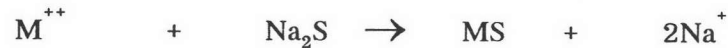
การตกตะกอนโครเมียมเป็นโครมิกไฮดรอกไซด์ จะต้องทำโครเมียมให้อยู่ในรูปประจุ +3 ก่อน เพราะโครเมียมประจุ +6 ไม่สามารถถูกกำจัดได้โดยตรง ด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ การบำบัดเริ่มต้น เพื่อเปลี่ยนโครเมียมประจุ +6 ไปเป็น +3 โดยใช้พีเอชต่ำประมาณ 2-3 และใส่รีดิวซิงเอเจนท์ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) โซเดียมไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) โซเดียมเมตาซัลไฟต์ และเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) กระบวนการปฏิกิริยามีดังนี้



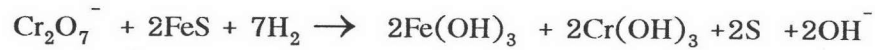
รูปที่ 2.4 ความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ (Freeman, 1989)

2.2.2. การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

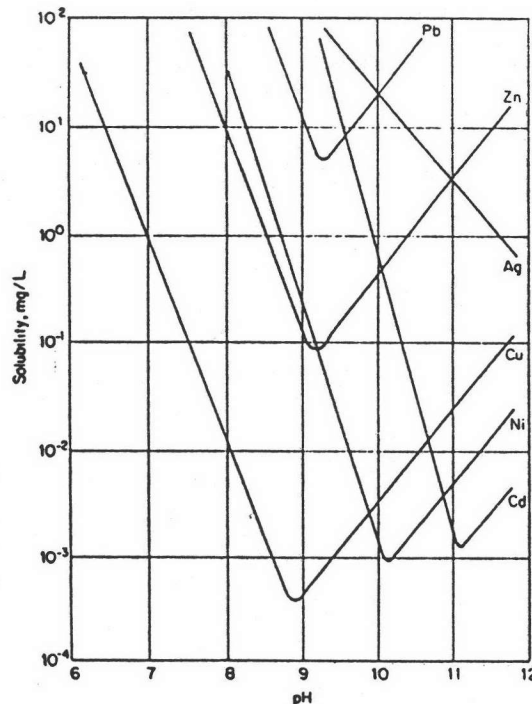
เป็นการตกตะกอนที่มีประโยชน์มาก เป็นอีกทางเลือกหนึ่งนอกจากการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ ความสามารถในการละลายของโลหะซัลไฟด์ แสดงในรูปที่ 2.5 โลหะซัลไฟด์ มีความสามารถในการละลายต่ำกว่าโลหะไฮดรอกไซด์ ดังตารางที่ 2.3 โลหะซัลไฟด์ไม่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก และโครเมียมประจุ +6 สามารถตกตะกอนด้วยกระบวนการนี้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการรีดักชัน กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการรวมไอออนโลหะหนักด้วยซัลไฟด์เรดิคอล มีแผนภาพแสดงปฏิกิริยาของโลหะหมู่ 2 กับ Na_2S ดังนี้คือ



สามารถกำจัดโครเมียมออกได้ โดยไม่ต้องผ่านปฏิกิริยารีดักชัน ได้ตะกอนโครมิกไฮดรอกไซด์ ดังสมการนี้คือ



แหล่งของซัลไฟด์ที่ใช้ คือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) หรือโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งละลายได้เล็กน้อย ข้อเสียของการตกตะกอนซัลไฟด์คือ จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงควรทำพีเอชให้มากกว่า 8 เพื่อป้องกันไฮโดรเจนซัลไฟด์ ข้อเสียอีกข้อคือ จะมีปริมาณซัลไฟด์ไอออนมากเกินไปในน้ำที่จะปล่อยออก ซึ่งทำให้ต้องมีการบำบัดในขั้นสุดท้ายก่อนปล่อยน้ำทิ้งด้วย



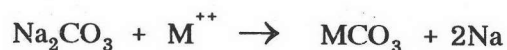
รูปที่ 2.5 ความสามารถในการละลายของโลหะซัลไฟด์ (Freeman, 1989)

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการละลายของโลหะซัลไฟด์เทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์
(Talbot,1984)

อ็อกไซด์โลหะหนัก	ความสามารถในการละลาย (mg/l)	
	โลหะไฮดรอกไซด์	โลหะซัลไฟด์
Cadmium (Cd ⁺⁺)	2.3×10^{-5}	6.7×10^{-10}
Chromium (Cr ⁺⁺⁺)	8.4×10^{-4}	ไม่ตกตะกอน
Cobalt (Co ⁺⁺)	2.2×10^{-1}	1.0×10^{-8}
Copper (Cu ⁺⁺)	2.2×10^{-2}	5.8×10^{-18}
Iron (Fe ⁺⁺)	8.9×10^{-1}	3.4×10^{-5}
Lead (Pb ⁺⁺)	2.1	3.8×10^{-9}
Manganese (Mn ⁺⁺)	1.2	2.1×10^{-3}
Mercury (Hg ⁺⁺)	3.9×10^{-4}	9.0×10^{-20}
Nickel (Ni ⁺⁺)	6.9×10^{-3}	6.9×10^{-8}
Silver (Ag ⁺)	13.3	7.4×10^{-12}
Tin (Sn ⁺⁺)	1.1×10^{-4}	3.8×10^{-8}
Zinc (Zn ⁺⁺)	1.1	2.3×10^{-7}

2.2.3. การตกตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate Precipitation)

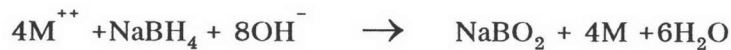
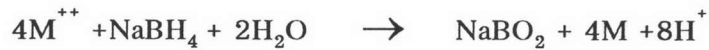
สำหรับโลหะบางตัว เช่น แคลเซียมและตะกั่ว การตกตะกอนคาร์บอเนตทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นโลหะหนักต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ที่พีเอชต่ำกว่า และสามารถกรองตะกอนได้มากกว่า โดยเปรียบเทียบกับ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม และตะกั่วที่พีเอช 10 หรือมากกว่ากับการตกตะกอนคาร์บอเนตที่พีเอช 7.5-8.5 การตกตะกอนโลหะใช้โซเดียมคาร์บอเนต หรือโซดาแอช ดังสมการ



กระบวนการนี้ไม่เหมาะสมกับโลหะทุกชนิด Paterson et al. (1984) บ่งชี้ว่าคุณภาพน้ำที่ปล่อยออกมาไม่ต่างกับน้ำที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ ในการปรับพีเอชหรือปริมาณตะกอนจะมากกว่าการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ในโลหะสังกะสี และนิเกิล

2.2.4. การตกตะกอนโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride Precipitation)

โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นรีดิวซิงเอเจนท์ สามารถใช้ตกตะกอนโลหะได้ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นกับค่าพีเอช แสดงปฏิกริยาได้ดังนี้



กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพสูง ในช่วงพีเอช 8-11 ที่พีเอชต่ำกว่า 8 การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ปริมาณเพิ่มขึ้น โดยการไฮโดรไลซิสของโบโรไฮไดรด์ ขณะที่พีเอชมากกว่า 11 อัตราการเกิดปฏิกริยาลดลง พีเอชที่เหมาะสมถูกกำหนด โดยการทดสอบความสมดุลการใช้โบโรไฮไดรด์กับระยะเวลาทำปฏิกริยา และคุณภาพน้ำที่ปล่อยออก

การตกตะกอนโซเดียมโบโรไฮไดรด์มีประโยชน์ สำหรับการนำกลับโลหะจากน้ำเสีย และการเอาตะกั่ว พรอท นิกเกิล ทองแดง แคดเมียม และโลหะมีค่า เช่น ทอง เงิน แพลตตินัม ออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปริมาณตะกอนลดลง 50% หรือมากกว่า การศึกษาพบว่า สำหรับโซเดียมโบโรไฮไดรด์มีตะกอนน้อยกว่าการตกตะกอนปูนขาว โซเดียมโบโรไฮไดรด์สามารถนำมาช่วยเป็นตัวกระตุ้น หรือสารละลายของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในโซดาไฟ (Freeman, 1989)

สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละประเภทจะใช้ปริมาณที่แตกต่างกัน รวมถึงราคาของแต่ละสารจะมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Dean และคณะ (1971) ศึกษาการกำจัดปรอทออกจากน้ำเสียที่ผ่านการทดลองในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ น้ำเสียจากการทดลองหาค่าซีไอดี น้ำเสียจากการย่อยสลายและน้ำเสียจากการวิเคราะห์แอมโมเนียโดยใช้สารละลายเนสเลอร์ การทดลองนี้ใช้วิธีการตกตะกอนผลึกในรูปของผลึกซัลไฟด์ ลำดับขั้นตอนในการทดลองเป็นดังนี้

1) นำน้ำเสียที่ผ่านการทดลองหาค่าซีไอดี และน้ำเสียส่วนอื่นๆ มาปรับค่าพีเอช โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พร้อมกับกวนให้ความร้อน

2) ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้มีค่ามากกว่า 10

3) เติมโซเดียมไฮโอซัลเฟต เพื่อให้เกิดการตกตะกอนผลึกของโลหะหนัก ในรูปตะกอนซัลไฟด์

4) แยกน้ำใสออกจากตะกอนโลหะหนัก นำตะกอนมาล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง เพื่อให้เกิดโซเดียมซัลเฟตเพื่อกำจัดซัลเฟตออก จากนั้นทำตะกอนให้แห้งโดยอบที่อุณหภูมิมากกว่า 100 °C และนำไปกำจัดต่อไป

วิธีการนี้ได้นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการทดลองหาค่าซีไอดี ในห้องปฏิบัติการก่อนที่จะมีการพัฒนาวิธีการบำบัดน้ำเสียในระยะหลังต่อมา

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบการตกตะกอนแบบต่างๆ

การตกตะกอน	ไฮดรอกไซด์	ซัลไฟด์	คาร์บอเนต	โบโรไฮไดรด์
ข้อดี	1.ราคาถูก	1.โลหะซัลไฟด์มีค่าการละลายน้ำต่ำ 2. ตกตะกอน Cr^{6+} โดยไม่ต้องผ่านรีดักชัน 3. ตกตะกอนพวกchelating agentได้ 4.เอาน้ำออกจากตะกอนได้มากกว่าไฮดรอกไซด์	1.เมื่อใช้กับCdและPbทำปฏิกิริยาที่pHต่ำกว่าไฮดรอกไซด์ 2.สามารถกรองตะกอนได้มากกว่า	1.ใช้กับการนำกลับของโลหะ 2.ตะกอนน้อยกว่าไฮดรอกไซด์
ข้อเสีย	1.มีคุณสมบัติกึ่งโลหะไฮดรอกไซด์ละลายกลับได้เมื่อpHเปลี่ยน 2.เกิดตะกอนมาก 3.ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีพวกchelating agentได้	1.เกิดแก๊ส H_2S 2.มีอิออนของซัลไฟด์เกิดขึ้น 3.โลหะซัลไฟด์อยู่ในรูปคอลลอยด์	1.ใช้กับโลหะได้ไม่ทุกชนิด 2.เกิดตะกอนมากกว่าไฮดรอกไซด์	1.ใช้ได้กับช่วงpHสั้นคือที่8-11เท่านั้น

Lanouete (1977) ได้เขียนบทความในการกำจัดโลหะหนัก โดยได้กล่าวถึง การตกตะกอนของปรอท โดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปของ ตะกอนซัลไฟด์ วิธีการทดลองเริ่มจาก การนำน้ำเสียมาปรับค่าพีเอชให้อยู่ระหว่าง 5-6 ด้วยกรด ซัลฟูริก จากนั้นเติมโซเดียมซัลไฟด์ให้มีมากพอ และเหลืออยู่ในน้ำเสียประมาณ 1-3 มิลลิกรัม ต่อลิตร นำน้ำที่ผ่านการตกตะกอนไปกรอง โดยใช้ Precoat Filter

ผลการทดลองนี้พบว่าสามารถกำจัดปรอทออกจากน้ำเสียได้ดี โดยมีความเข้มข้นของปรอทเหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วประมาณ 10-20 ไมโครกรัมต่อลิตร

Bhattacharyya และคณะ (1981) ได้ทำการศึกษาทั้งในห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) และการศึกษาจริง (full scale) ในการตกตะกอนซัลไฟด์ และสารหนู ความ เป็นไปได้ของการรวมระหว่างการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และซัลไฟด์ที่พีเอช 8-9 และการ ตกตะกอนซัลไฟด์ที่พีเอช 3-5 ตามด้วยการตกตะกอนปูนขาว ซึ่งได้ผลดีจากการแยกสารหนู ออกจากน้ำเสีย สำหรับการตกตะกอนซัลไฟด์ของสารหนูและสังกะสีที่พีเอชน้อยกว่า 5 ปฏิกริยา ข้างเคียงระหว่างการละลายซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ถ้ามีในน้ำเสีย) และซัลไฟด์ ต้องระวังใน กระบวนการออกแบบ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นไม่เป็นปัญหาในระหว่างการตกตะกอน จากการรวมระหว่างไฮดรอกไซด์ และซัลไฟด์ มีประสิทธิภาพสูงในการแยกสารหนูที่ปริมาณ โซเดียมซัลไฟด์น้อยกว่าตามทฤษฎี มีความเป็นไปได้ของการนำโลหะกลับมาใช้ และใช้ได้ดีในการ กำจัดโลหะหนักในช่วงพีเอชที่กว้างโดยการใช้การตกตะกอนซัลไฟด์

Aslam และ Walker (1982) ได้ทำการศึกษาวิธีการในการบำบัดน้ำเสียที่เกิด จากการผลิตทองคำซีโอดี โดยมีวิธีการดังนี้

1) นำน้ำเสียมา 2 ลิตร มาเติมโซเดียมคลอไรด์จำนวน 20 กรัม และกวน ประมาณ 2-3 นาที

2) แยกตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์ออกจากน้ำที่มีตะกอนโลหะหนักอยู่ เพื่อนำตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์ไปทำการทดลองนำกลับมาใช้ใหม่

3) นำน้ำที่ผ่านการแยกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ มาเติมเฟอร์รัสซัลไฟด์ โดยต้อง ทำการทดลองนี้ในตู้ควีน เนื่องจากเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ไว้ประมาณ 2-3 ชั่วโมง

4) นำตะกอนในรูปเมอร์คิวรีซัลไฟด์ มาแยกออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดออก ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทออกจากน้ำเสียประมาณ 98 % ในขณะที่ประสิทธิภาพใน การกำจัดปรอทของวิธีที่ทาง EPA รับรองประมาณ 96.4 % โดยได้นำเสนอตารางที่ 2.5 การทดลองนี้นอกจากจะทำกำจัดปรอทออกจากน้ำเสียแล้ว ได้ทำการนำเงินกลับมา ใช้ใหม่ โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

1.) นำตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์มาประมาณ 100 กรัม เติมโลหะสังกะสี 50 กรัม

2.) นำมาเติมกรดซัลฟูริก 4 นอร์มัล ปริมาณ 500 มิลลิลิตร

3.)ทำให้ได้ผงเงิน ทำการเติมสังกะสีและกรดซัลฟูริกอีกครั้งในปริมาณเดิม จากนั้นกรองและล้างด้วยน้ำกลั่น จะได้เงินที่ยังคงมีสังกะสีเป็นสารมลทิน (impurity)

4.)นำผงเงินมาเติมกรดไนตริก 5-8 มิลลิลิตรและน้ำกลั่น จากนั้นนำไปต้มจนเกิดสารละลายสีใส เติมกรดซัลฟูริก 800 มิลลิลิตรต่อสารละลาย 1 ลิตร จะได้ซิลเวอร์ซัลเฟตในสารละลายกรดซัลฟูริก สามารถนำไปใช้ในการทดลองได้

จากการทดลองนี้ พบว่า ประสิทธิภาพในการนำกลับเงินมาใช้ใหม่เป็น 99 % โดยยังคงมีสังกะสีเป็นสารมลทิน ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทโดยวิธีการของ Aslam & Walker
(Aslam และ Walker,1982)

การทดลอง ที่	ความเข้มข้น ของปรอทใน น้ำเสียที่วิ เคราะห์ค่าซีโอ ดีแล้ว(มก./ล.)	ความเข้มข้น ของปรอทหลัง ผ่านการบำบัด แล้ว(มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัดปรอท (%)	ความเข้มข้น ของปรอทหลัง ผ่านวิธีการที่ EPAยอมรับ แล้ว(มก./ล.)	ประสิทธิภาพ การกำจัดปรอท (%)	ประสิทธิภาพ การกำจัดเงิน ออก(%)
1	2940	50	98.3	108	96.4	99.9
2	3000	58	98.1	116	96.1	99.8
3	2890	45	98.4	110	96.2	99.9
4	3120	70	97.8	98	96.9	99.9
5	3050	65	97.9	120	96.1	99.9
6	3070	66	98.2	121	96.2	99.9
7	2860	54	98.2	105	96.4	99.8
8	2980	56	98.1	97	96.8	99.9
9	3250	68	97.9	130	96.0	99.9
10	3110	74	97.6	101	96.8	99.9
ค่าเฉลี่ย			98.0		96.4	

ตารางที่ 2.6 ประสิทธิภาพการนำเงินกลับมาใช้ใหม่ (Aslam และ Walker, 1982)

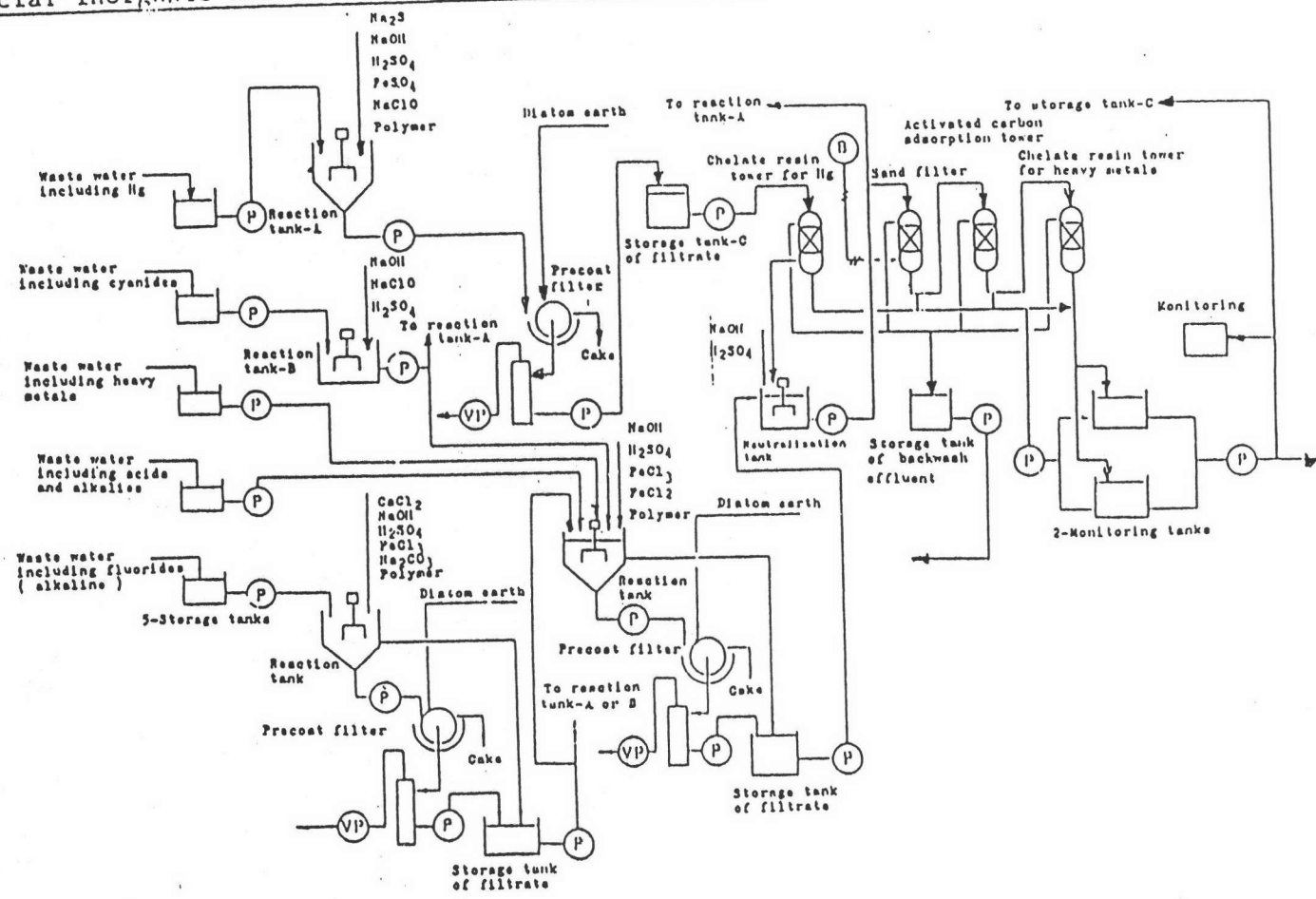
การทดสอบครั้งที่	ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก(%)				
	เงิน	สังกะสี	ปรอท	แคดเมียม	ปรอทหลังให้ความร้อน
1	99.86	0.030	0.071	0.0014	ND
2	99.89	0.025	0.078	0.0010	ND
3	99.86	0.023	0.085	0.0012	ND
4	99.90	0.030	0.065	0.0010	ND
5	99.93	0.021	0.076	0.0013	ND
6	99.92	0.032	0.067	0.0015	ND
7	99.90	0.034	0.063	0.0911	ND
ค่าเฉลี่ย	99.89	0.0278	0.072	0.0012	ND

Okazaki (1983) ได้กล่าวถึงระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ของประเทศญี่ปุ่น โดยนำน้ำเสียที่มีปรอทอยู่จะได้รับการเติมสารเคมี ซึ่งได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ โซดาไฟ กรดซัลฟูริก เพอร์สซัลเฟต โซเดียมไฮโปคลอไรต์ และโพลีเมอร์ น้ำเสียจะถูกนำไปยัง precoat filter โดยโลหะหนักจะอยู่ในรูปของตะกอนเฟอร์ไรท์แยกออกมจากน้ำ ส่วนน้ำใสจะนำไปยัง chelate resin tower เพื่อกำจัดปรอทและโลหะอื่นๆ ที่เหลืออยู่ในน้ำ จากนั้นทำน้ำให้เป็นกลางก่อนระบายทิ้ง

การบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ โดยวิธีนี้สามารถกำจัดปรอทได้อย่างมีประสิทธิภาพ และกำจัดได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ คือต่ำกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร แผนผังในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้แสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7

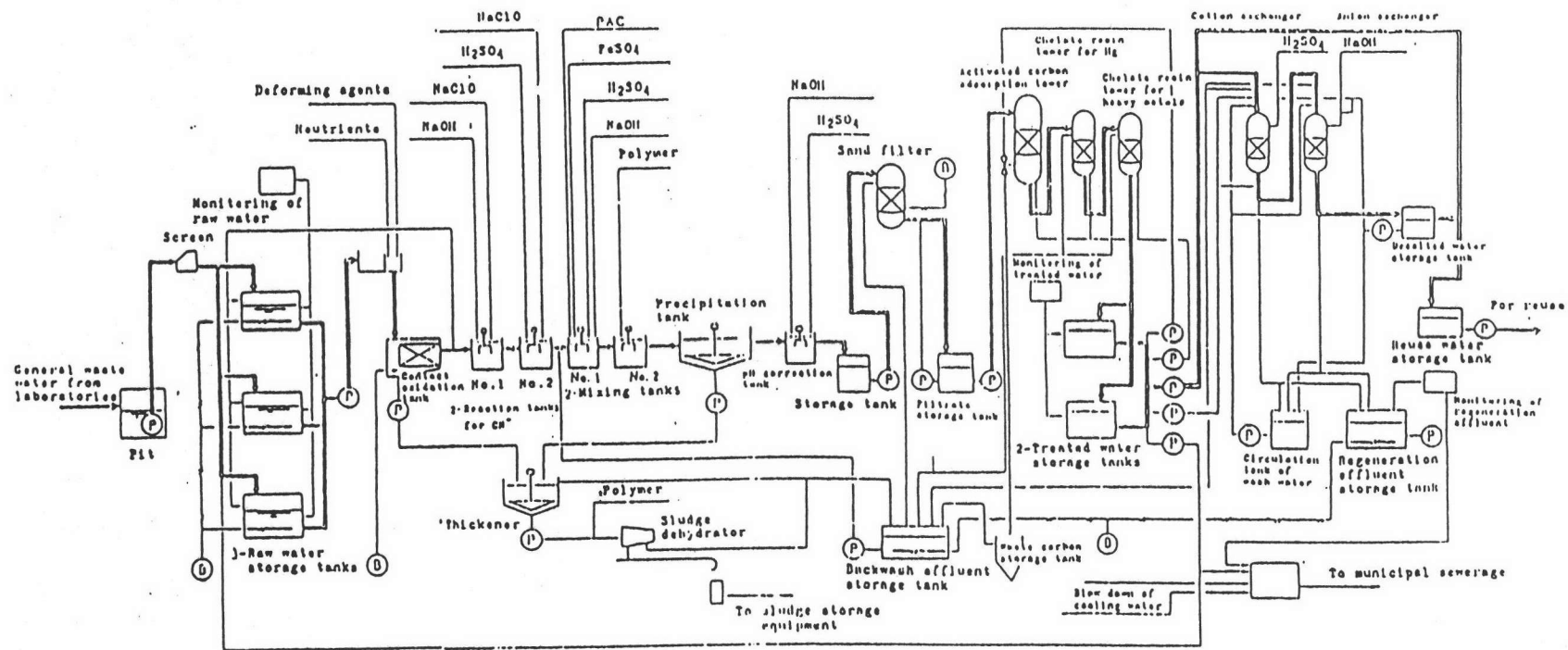
Santhanam และคณะ (1984) ได้ทำการศึกษาวิธีการ และเครื่องมือสำหรับการนำโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยซัลไฟด์ สารละลายถูกนำเข้าไปทำปฏิกิริยา ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็นช่วงๆ ดังนี้ 1) ช่วงผสม 2) ช่วงสร้างตะกอน 3) ช่วงการตกผลึก และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่ผลึกตกเรียบร้อยแล้ว สารละลายที่ใช้ประกอบด้วยไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายอยู่ที่พีเอชต่ำ การตกตะกอนซัลไฟด์ผสมในท่อทำปฏิกิริยาพร้อมกับการปรับพีเอช ที่จุดอิ่มตัวสูงสุดของการสร้างตะกอนโลหะซัลไฟด์ ช่วงแรกและช่วงสร้างผลึกเป็นสภาวะใกล้คงตัวอัตราการเพิ่มของโลหะซัลไฟด์มากกว่าสภาวะไม่คงตัว

Flow Diagram of the Treatment Facility for the Special Inorganic Wastewaters from the Laboratories



รูปที่ 2.6 แผนผังการบำบัดน้ำเสียพิเศษที่เป็นอนินทรีย์สารจากห้องปฏิบัติการ (Okazaki, 1983)

Flow Diagram of the Treatment Facility for the General Waste Water from the Laboratories and the Desalination Equipment



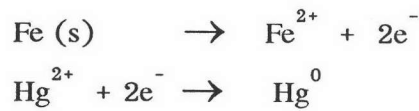
รูปที่ 2.7 แผนผังการบำบัดน้ำเสียทั่วไปจากห้องปฏิบัติการ (Okazaki, 1983)

Hendrickson และคณะ (1984) ได้เสนอวิธีในการบำบัดน้ำเสียจากการทดลองหาค่าซีไอ ดี โดยได้ทำการทดลองในการกำจัดปรอท ดังนี้

1.) นำน้ำเสียที่ผ่านการทดลองหาค่าซีไอดีมาเติม โซเดียมคลอไรด์ในปริมาณ 30 มิลลิโมลต่อลิตร

2.) แยกตะกอนและน้ำที่มีโลหะหนักออกจากกัน นำน้ำที่มีโลหะหนักมาบำบัดต่อ ส่วนตะกอนนำไปทำการทดลองนำเงินกลับมาใช้ใหม่

3.) เติมผงเหล็ก 4.5 มิลลิโมลต่อน้ำเสีย 1 ลิตรลงไป ในน้ำเสียที่มีโลหะหนักอยู่ ผงเหล็ก จะเกิดการออกซิไดส์และปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา โดยปรอทจะนำอิเล็กตรอนนั้นไปใช้ในการรีดิวส์ ดังสมการ



4.) ทำการผสมกันนาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองออก นำน้ำที่ผ่านการกรองไปปรับพีเอชให้มีค่าเป็น 7 ก่อนนำไปปล่อยระบายทิ้ง

จากการทดลองนี้พบว่าปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเป็นปรอท 0.08 ไมโครกรัมต่อลิตร โครเมียม 0.013 ไมโครกรัมต่อลิตร

การทดลองในการนำเงินกลับมาใช้ใหม่ ได้ทดลองหาปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการนำมาใช้ ซึ่งปริมาณที่เหมาะสมในการทดลองคือ 30 มิลลิโมลต่อลิตร โดยนำไปให้ความร้อนที่ 75-100 องศาเซลเซียส และได้เสนอแนะขั้นตอนในการทำให้เป็นซิลเวอร์ซัลเฟต ดังนี้

1) นำไปละลายในแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นเติมโลหะทองแดงโดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-2 วัน

2) นำไปกรองเพื่อแยกทองแดงและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-2 วัน

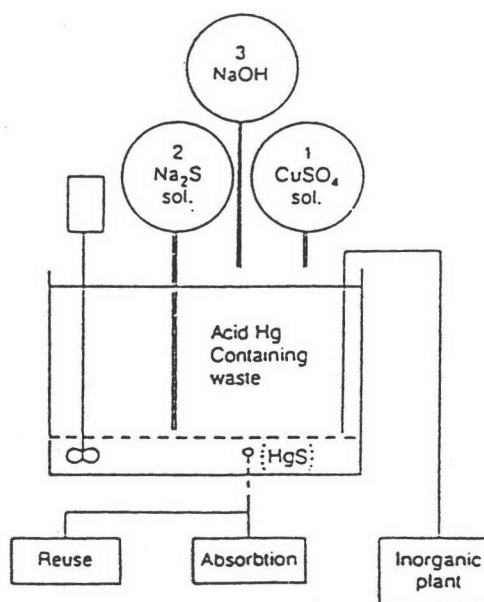
3) เติมเงิน 7.6 กรัม ลงในกรดซัลฟูริก 2.5 ลิตร และสามารถนำไปใช้ในการทดลองต่อไปได้

วิธีการนี้สามารถนำไปใช้ในการนำกลับเงินมาใช้ใหม่ได้โดยอยู่ในรูปของซิลเวอร์ซัลเฟต โดยไม่มีสารใดปนเปื้อน

Sund (1986) ได้กล่าวถึงระบบบำบัดน้ำเสียรวมของประเทศเดนมาร์ก ซึ่งใช้บำบัดน้ำเสียรวมจากแหล่งต่าง ๆ รวมทั้งโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรม และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ

ในการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งมีโลหะหนักคือ ปรอทรวมอยู่ด้วย ได้ทำการบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ ในปริมาณที่มากกว่าคำนวณจากปฏิกิริยาเคมีร้อยละ 30 จากนั้นเติมคอปเปอร์ซัลเฟต โดยปริมาณที่เติมมากกว่าปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ประมาณร้อยละ 15 เพื่อป้องกันการเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากนั้นเติมโซดาไฟเพื่อปรับพีเอช ให้อยู่ในช่วงที่โลหะหนักจะตกตะกอนลงมาได้ ตะกอนของโลหะหนักจะอยู่ในรูปของซัลไฟด์ แผนผังการบำบัดน้ำเสียวิธีนี้ตั้งในรูปที่ 2.8

Precipitation of HgS



รูปที่ 2.8 แผนผังการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการในประเทศเดนมาร์ก
(Sund, 1986)

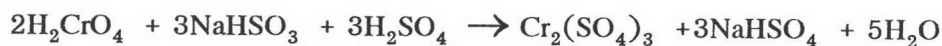
Fresenius และ Schneider (1988) ได้ทำการศึกษาการกำจัดปรอทและเงินออกจากน้ำที่เหลือจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี โดยนำน้ำเสียหลังวิเคราะห์ค่าซีโอดีแล้วจะนำมาเติม โซเดียมไฮโอซัลเฟต 30 กรัมและโซเดียมไฮดรอกไซด์ 30% น้ำหนักโดยปริมาตร ในปริมาตร 300 มิลลิลิตร สำหรับน้ำเสียทุกๆ 500 มิลลิลิตร ปรอทและเงินถูกกำจัดออกในรูปของซัลไฟด์ ส่วนโครเมียมจะถูกกำจัดออกในรูปไฮดรอกไซด์ ซึ่งค่าปรอทที่เหลือ < 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร เงินที่เหลือน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และโครเมียมที่เหลือต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Yuan (1990) ได้ทำการทดลองในการนำน้ำเสียที่ผ่านการทดลองวิเคราะห์ค่าซีโอดีมาบำบัด เพื่อให้โลหะอยู่ในรูปตะกอน จากนั้นนำตะกอนของโลหะที่ได้ไปบำบัด โดยใช้หลักการของการหล่อซีเมนต์ (cementation) ซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ (portland cement) และปูนขาว-เถ้าจากเปลือกข้าว (lime-rice husk ash)

วิธีในการบำบัดน้ำเสียจากการทดลองหาค่าซีโอดีทำได้โดย

- 1) นำน้ำเสียมาวัดปริมาณโครเมียมและปรอท
- 2) วัดพีเอชและปรับพีเอชของน้ำเสียให้มีย่าน้อยกว่า 2 เพื่อให้เหมาะสมกับการรีดักชันโครเมียมจากประจุ +6 เป็นโครเมียมประจุ +3 เพื่อให้สามารถตกตะกอนได้ดีในรูปของไฮดรอกไซด์

3)เติม NaHSO_3 อย่างช้าๆ ใช้เวลาผสมสารเคมีประมาณ 10 นาที เพื่อให้เกิดการรีดักชัน ตามสมการ



4)เติม NaOH เพื่อปรับพีเอชจนมีค่าประมาณ 8.5 ซึ่งจะทำให้เกิดการตกตะกอนโลหะหนักในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ ตามสมการ



5)ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอน จากนั้นแยกตะกอนโลหะหนักออกจากน้ำเสีย

6)วัดความเข้มข้นของโครเมียมและปรอท ในน้ำใสที่ผ่านการบำบัดและในตะกอนของโลหะ นำตะกอนที่ได้ของโลหะไปทำการหล่อซีเมนต์

ผลการทดลองพบว่า ตะกอนโลหะหนักจะอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ และปริมาณปรอทที่อยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีปริมาณน้อยและเป็นไปตามมาตรฐานคือ < 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร

Katsura และคณะ (1991) ได้ศึกษากระบวนการเฟอร์ไรท์ (ferrite process) โดยเป็นการใช้ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ในการบำบัดน้ำเสีย ได้ตะกอนจะอยู่ในรูปของเฟอร์ไรท์ น้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองมาจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม รวมทั้งห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์

การทดลองในการบำบัดน้ำเสียมี่ดังนี้

1)เติม $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ลงไปในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนัก ซึ่งอยู่ในรูปของเฟอร์ไรท์

2)ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 9-11 โดยการเติม NaOH ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ดี

3)ปรับอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส โดยการให้น้ำ

4)ให้อากาศ เพื่อทำให้เกิดการออกซิไดส์ของเหล็กเฟอร์ไรท์

5)แยกตะกอนของโลหะออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วโดยใช้แม่เหล็ก

วิธีการนี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ผลดี โดยมีปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นประมาณ 0.18 ตันต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2.7 2.8 และ 2.9

ตารางที่ 2.7 ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองบำบัดด้วยเหล็กเฟอร์ไรท์ (Katsura และคณะ,1991)

ตาราง 1	ปริมาณโลหะหนัก (mg dm^{-3})									
ตัวอย่างที่	Cd	Mn	Fe	Cu	Pb	Zn	Cr	Co	Ni	T-Hg
16	ND	ND	19	3250	4	3	1	ND	2	ND
39	190	175	2000	335	95	520	425	830	515	ND
49	63	97	1200	240	40	281	193	90	230	ND

ND=not determined

ตารางที่ 2.8 ปริมาณน้ำเสียและตะกอนที่ได้ของเหล็กเฟอร์ไรท์ (Katsura และคณะ,1991)

ตาราง 2	ปริมาณของน้ำเสียและตะกอนเฟอร์ไรท์		
ปีค.ศ.	ปริมาตรน้ำเสีย(m^3)	ความเข้มข้นไอออนโลหะหนัก(mg dm^{-3})	ตะกอนเฟอร์ไรท์(10^3 kg)
1976	10.27	1742	-
1977	5.95	6838	0.86
1978	6.66	3003	0.86
1979	5.00	4120	0.92
1980	5.54	6083	1.10
1981	4.25	5866	0.75
1982	7.84	4518	1.50
1983	4.92	4281	0.86

ตารางที่ 2.9 ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว (Katsura และคณะ, 1991)

ตาราง 3	ความเข้มข้นของอ็อกอนโลหะหนักในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว(mg dm ⁻³)								
ตัวอย่างที่	Cd	Mn	Fe	Cu	Pb	Zn	Cr	T-Hg	As
38	ND	0.14	ND	1.3	ND	ND	ND	ND	ND
42	ND	ND	ND	0.07	ND	0.23	ND	ND	ND
51	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND= not determined

สำหรับในประเทศไทยมีการศึกษาดังต่อไปนี้

Asian Institute of Technology (1995) ได้ทำการศึกษาถึงแนวทางการจัดการ และเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการ ในการศึกษานี้ประกอบไปด้วยการทดลองในห้องปฏิบัติการ และการทดลองในภาคสนาม โดยใช้วิธี Conventional chemical reduction/precipitation จากการทดลอง พบว่าควรใช้ปูนขาว (CaO) เพื่อการตกตะกอนของโลหะหนักในรูปของสารละลายมากกว่าของแข็ง โดยการเติมปูนขาวจะใช้ปริมาณมากกว่าปริมาณน้ำเสียถึง 4-25 เท่า ในขณะที่ใช้สารละลายโซดาไฟ (NaOH) เพียง 0.5-1.0 เท่าของปริมาณน้ำเสีย ปริมาณรีดิวซิ่ง เอเจนต์ (NaHSO₃/Na₂S₂O₅) ที่เหมาะสม คือ 3 กรัมต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร อัตราการเกิดตะกอนจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ปริมาณตะกอนแห้งต่อปริมาณน้ำเสีย) พบว่าเท่ากับ 0.07 ซึ่งน้อยกว่าตะกอนจากสารละลายปูนขาว ซึ่งมีอัตราการเกิดเท่ากับ 1.56-1.80 เวลาในการตกตะกอนจากปูนขาวประมาณ 7 วัน ส่วนเวลาในการตกตะกอนจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณ 1 วัน จึงจะได้ปริมาณของแข็งในตะกอนเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณโลหะหนักในน้ำทั้งพบว่ามีโครเมียม และปรอทน้อยกว่า 0.21 และ 13.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากการทดลองในภาคสนาม (ไม่รวมค่าการทำให้เป็นก้อน) เท่ากับ 16.15 และ 16.45บาท ต่อน้ำเสีย 1ลิตร ถ้าใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และปูนขาวตามลำดับ

พวงรัตน์ (2537) ศึกษาแนวทางการจัดการน้ำเสียซีไอที ในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งประกอบด้วยรวบรวมข้อมูลน้ำเสียซีไอที และแหล่งกำเนิดจากห้องปฏิบัติการจำนวน 20 แห่งในเขตกรุงเทพมหานคร โดยนำน้ำเสียมาทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียและการนำกลับของเงิน ตลอดจนทำการศึกษาค่าใช้จ่ายของการบำบัดน้ำเสียเมื่อส่งไปทำการบำบัดที่หน่วยบำบัดน้ำเสียส่วนกลาง

การทดลองนี้ใช้วิธีการตกตะกอนผลึกในรูปของผลึกไฮดรอกไซด์ โดยใช้ปูนขาว และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบประสิทธิภาพและความเหมาะสม และสารเคมีที่มีความเหมาะสมในการวิจัย คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ที่พีเอช 9.5 ระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน

150 นาที ส่วนการนำกลับเงินจะทดลองใช้โซเดียมคลอไรด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน และค่าที่เหมาะสมสำหรับการวิจัยนี้ คือ 4 เท่าของค่าสตอยชิโอเมตริก และสารที่ใช้ในการละลายตะกอนเงินคือ สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 2.5 เท่าของค่าสตอยชิโอเมตริก ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และสารที่ใช้ในการนำกลับของเงิน คือ ทองแดง ด้วยปริมาณ 1.5 เท่าของค่าสตอยชิโอเมตริก และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการนำกลับที่ได้มีค่า 70% ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย 2.88 บาท ต่อตัวอย่างหรือ 8.71 บาทต่อลิตร (ไม่รวมค่าวัสดุอุปกรณ์) กรณีที่คิดทั้งหมดจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัด 13.50 บาทต่อตัวอย่าง หรือ 49.50 บาทต่อลิตร (กรณีคิดค่าใช้จ่ายรวมกับค่าวัสดุอุปกรณ์)