

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์

การทดลองระดับห้องปฏิบัติการเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนโลหะหนักในของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดี

ของเสียซึ่งใช้ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการโดยมากเกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีแบบเปิด (open reflux) ของเสียส่วนนี้เก็บรวบรวมจากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำของภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี และคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม ในช่วงภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2543 สมบัติของเสียดังกล่าวดังแสดงในตาราง 8

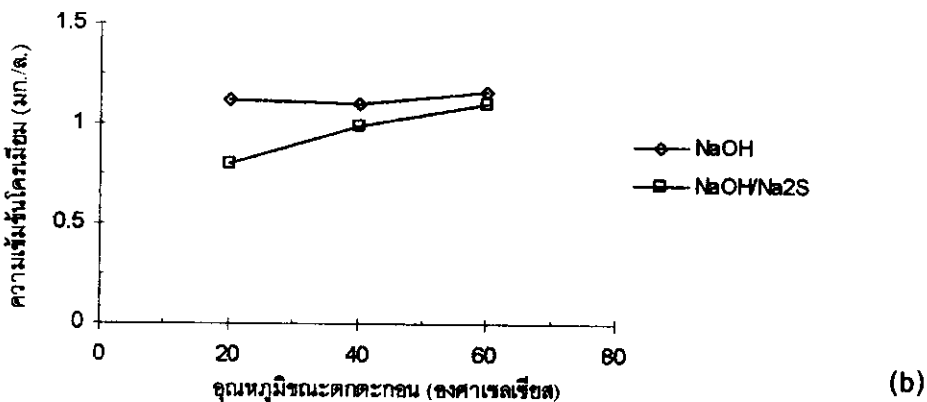
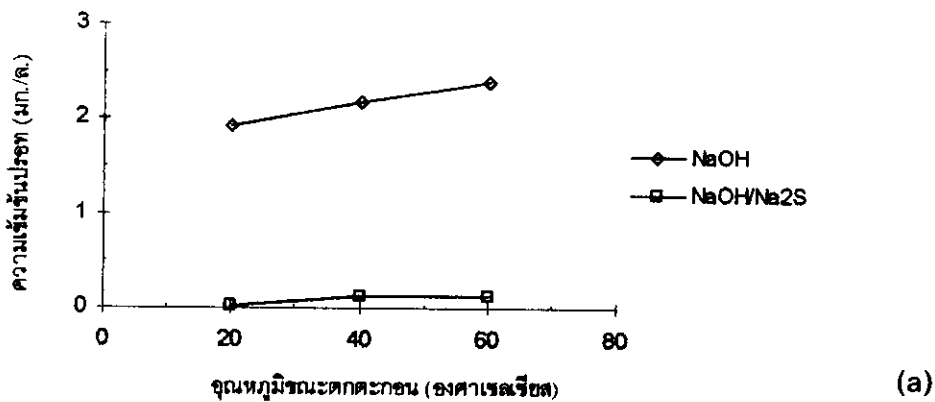
ตาราง 8 สมบัติของของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีที่ใช้ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ

ลักษณะสมบัติ	ค่าที่ตรวจวัดได้
พีเอช	<0
ปรอท	787 มิลลิกรัม/ลิตร
โครเมียม	294 มิลลิกรัม/ลิตร
เงิน	810 มิลลิกรัม/ลิตร
เหล็ก	1,410 มิลลิกรัม/ลิตร

ของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีที่มีการเติมเมอร์คิวริกซัลเฟตนั้นโดยมากจะมีความเข้มข้นของปรอทมากกว่า 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ของเสียที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นของปรอทเพียง 787 มิลลิกรัม/ลิตร อาจเป็นเพราะการวิเคราะห์ค่าซีไอดีบางตัวอย่างผู้วิเคราะห์จะไม่เติมเมอร์คิวริกซัลเฟต ของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีในกรณีนี้เมื่อผสมกับของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีที่เติมเมอร์คิวริกซัลเฟต ย่อมทำให้ความเข้มข้นของปรอทในของเสียรวมมีค่าน้อยลง สำหรับเหล็กซึ่งมีปริมาณมากถึง 1,410 มิลลิกรัม/ลิตร นั้น คาดว่าจะมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน เนื่องจากเมื่อเฟอร์ริกตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ ตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะมีบทบาทเป็นสารตกตะกอนร่วม (coagulant)

1. อิทธิพลของชนิดสารตกตะกอนและอุณหภูมิที่มีผลต่อการตกตะกอนโลหะหนัก (ตารางภาคผนวก ข1 และตารางภาคผนวก ข2)

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพประกอบ 5 พบว่าการตกตะกอนโลหะหนักในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอต์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์ เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยเฉพาะการตกตะกอนปรอทพบว่าการใช้โซเดียมซัลไฟด์เป็นสารตกตะกอนให้ผลดีว่าการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากความสามารถในการละลายของเมอร์คิวริกซัลไฟด์ (9.0×10^{-20} มิลลิกรัม/ลิตร) มีค่าต่ำกว่าความสามารถในการละลายของเมอร์คิวริกไฮดรอกไซด์ (3.9×10^{-4} มิลลิกรัม/ลิตร) มาก



ภาพประกอบ 5 ความเข้มข้นของโคโรเมียมในส่วนใสเมื่อดำเนินการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 20, 40 และ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์เป็นสารตกตะกอน

สำหรับโครเมียมแม้ไม่จะตกตะกอนในรูปซัลไฟด์ แต่เนื่องจากสภาวะขณะเกิดการตกตะกอนซัลไฟด์มีฤทธิ์เป็นด่างจึงมีการตกตะกอนของโครเมียม จากการทดลองพบว่ากรณีที่มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์เป็นสารตกตะกอนจะสามารถตกตะกอนโครเมียมได้ดีกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตกตะกอนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการตกตะกอนที่มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์นั้นทำให้ระดับพีเอชประมาณ 9.5-9.6 ขณะที่การตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ระดับพีเอช 10.5-10.6 และค่าพีเอชในทางทฤษฎีซึ่งทำให้โครเมียมตกตะกอนในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ได้มากที่สุดคือ 8.7 (Wikoff and Prescott, 1998 : 19) ดังนั้นการตกตะกอนที่มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์จึงดำเนินการที่ระดับพีเอชใกล้เคียงกับพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนโครเมียมมากกว่าการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว

หนึ่งพีเอชที่ลดลงภายหลังการพักส่วนผสม 24 ชั่วโมง เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Perez and Umetsu, 2000 : 51)

ดังนั้นในการบำบัดของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยการตกตะกอนควรใช้โซเดียมซัลไฟด์เป็นสารตกตะกอน ทั้งนี้ก่อนเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์จะต้องปรับพีเอชของของเสียให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีมีความเป็นกรดสูงมาก ดังนั้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงในของเสียในช่วงแรกจะมีบทบาทในการลดความเป็นกรดมากกว่าการเป็นสารตกตะกอน จากการทดลองพบว่าต้องใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนักปริมาตร มากถึง 200 มิลลิลิตร เพื่อปรับพีเอชของของเสียจำนวน 200 มิลลิลิตร ให้มีค่าประมาณ 1.5

ปฏิริยาระหว่างกรดในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีกับด่างที่เติมเพื่อลดความเป็นกรดดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็วเป็นผลให้ของผสมในปฏิกรณ์มีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งอาจส่งผลให้ตะกอนโลหะหนักละลายได้ นอกจากนี้การเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็วอาจทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นเกินไปจนปฏิกิริยาดำเนินไม่สมบูรณ์ การแก้ไขปัญหาข้างต้นอาจทำได้โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ช้า ๆ แต่ย่อมต้องเสียเวลาในการดำเนินงานมากขึ้น

เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 5 พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในส่วนใสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิขณะตกตะกอนเพิ่มสูงขึ้น ทั้งในกรณีที่เป็นการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ตะกอนโลหะหนักละลายน้ำได้มาก

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองตกตะกอนที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส, 40 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าการตกตะกอนที่ 20 องศาเซลเซียส จะให้ผลการตกตะกอนที่ดีกว่า การตกตะกอนที่ 40 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะการตกตะกอนซัลไฟด์ที่ 20 องศาเซลเซียส สามารถทำให้ความเข้มข้นของปรอทในส่วนใสลดเหลือเพียง 0.019 มิลลิกรัม/ลิตร อย่างไรก็ตามการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์ทำความเย็นซึ่งจะทำให้ต้นทุนการสร้างอุปกรณ์รวมถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ดังนั้นการทดลองขั้นต่อไปจึงดำเนินการที่อุณหภูมิสูง 30 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นสารหล่อเย็น

เพื่อลดปัญหาความร้อนจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี กับด่าง จึงเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับพีเอชของของเสียให้มีค่าอยู่ในช่วง 1-2 โดยไม่คำนึงถึงอุณหภูมิของของผสม แล้วพักของผสมดังกล่าวจนอุณหภูมิลดลงใกล้เคียงกับน้ำที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำของเสียที่ลดความเป็นกรดไปใช้ในการทดลองตกตะกอนโลหะหนัก

อนึ่งการศึกษาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนโลหะหนักในขั้นต่อไปนั้น ได้เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการดำเนินการทดลองจากร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร เป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร เนื่องจากการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก/ปริมาตรนั้น ต้องใช้น้ำมากกว่าการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร และทำให้น้ำดังกล่าวจะมีประโยชน์ใช้สอยน้อยลงเมื่อปนเปื้อนด้วยมลสารต่าง ๆ ขณะเดียวกันการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่ำย่อมมีปริมาณน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายในระบบมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้ตะกอนโลหะหนักละลายได้มากขึ้น

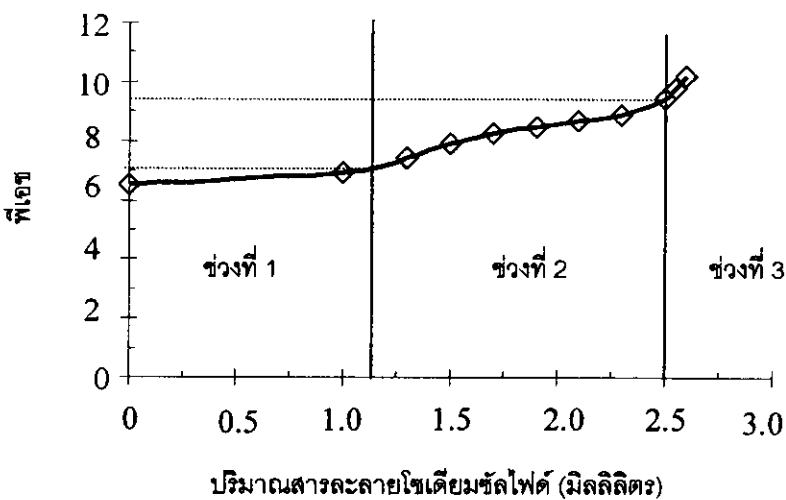
2. การเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนโลหะหนักในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยเติมโซเดียมซัลไฟด์เป็นสารตกตะกอน

2.1 การปรับเปลี่ยนพีเอชในการตกตะกอนและการปรับเปลี่ยนระยะเวลาทวนซ้ำ (ตารางภาคผนวก ข3)

ในการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ เมื่อปรับพีเอชของส่วนผสมจนมีค่าเป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก/ปริมาตรแล้ว จึงเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร เพื่อตกตะกอนโลหะหนัก ขณะเดียวกันนั้นพีเอชของของผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้น (ภาพประกอบ 6)

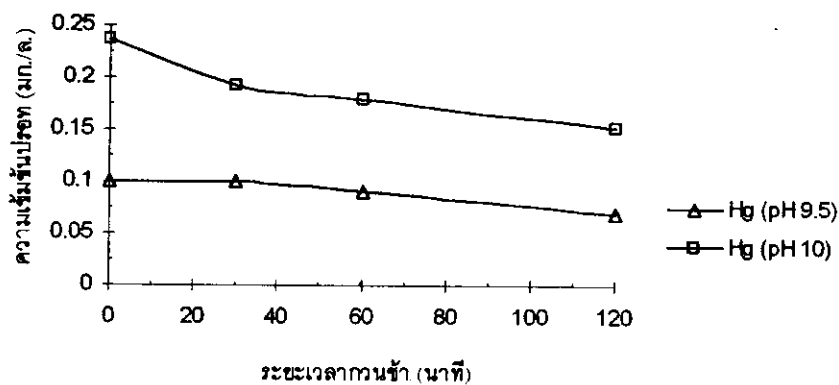
จากภาพประกอบ 6 การเปลี่ยนแปลงของพีเอชของผสมแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ปรับพีเอชจากประมาณ 6.5 ถึง 7 ซึ่งแม้ค่าพีเอชจะปรับขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่ต้องใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ปริมาณมาก เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาไฮโดรเนียมไอออน

และซัลไฟด์ไอออนบางส่วนไม่มีบทบาทเป็นสารตกตะกอนโลหะหนักเนื่องจากอาจเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออน สำหรับช่วงที่ 2 ไฮดรอกซีไอออนจะถูกใช้ในการตกตะกอนเคมีโลหะหนักมากขึ้น และในช่วงที่ 3 ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงนี้จะมีไฮดรอกซีไอออนเหลือจากการทำปฏิกิริยามากขึ้น เนื่องจากมีไฮโดรเนียมไอออนเหลืออยู่น้อยมาก ขณะเดียวกันอาจเหลือโลหะหนักประจุอยู่น้อยมากเช่นกัน หากดำเนินการตกตะกอนถึงระดับพีเอชในช่วงที่ 3 จะมีสารตกตะกอนส่วนเกินซึ่งสามารถก่อสร้างประคบเชิงซ้อนกับตะกอนโลหะหนักเป็นผลให้ตะกอนโลหะหนักละลายน้ำได้

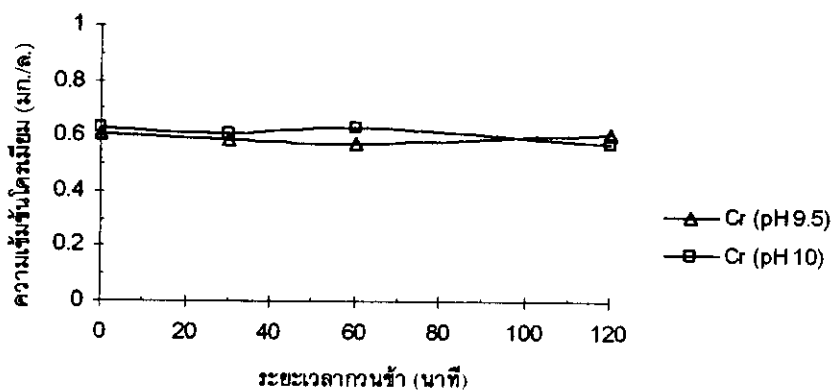


ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของของผสมกับปริมาณสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนโลหะหนักในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี

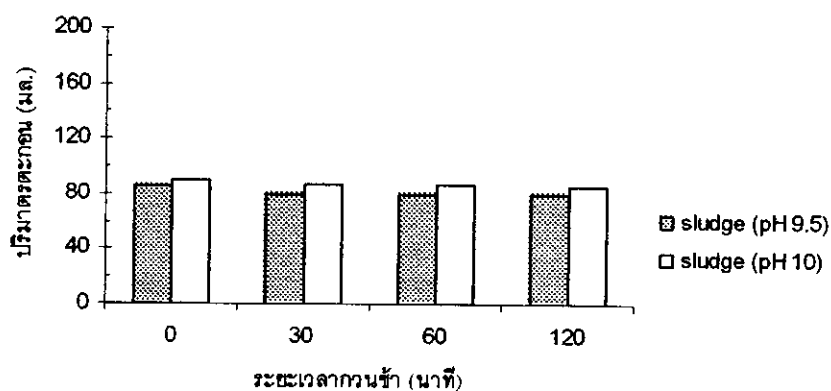
จากการทดลองตกตะกอนโลหะหนักในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยปรับเปลี่ยนพีเอชในการตกตะกอนและระยะเวลาการกวนช้า พบว่าที่พีเอช 9.5 มีประสิทธิภาพในการตกตะกอนปรอท มากกว่าการตกตะกอนที่พีเอช 10 อย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามค่าความเข้มข้นของปรอทในส่วนใสที่ได้จากการทดลองยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (ภาพประกอบ 7(a)) สำหรับการตกตะกอนโครเมียมที่พีเอช 9.5 และ 10 ดังกล่าวให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ความเข้มข้นของโครเมียมในทุกการทดลองมีค่าต่ำกว่า 0.75 มิลลิกรัม/ลิตร (ภาพประกอบ 7(b)) เมื่อพิจารณาปริมาตรตะกอนภายหลังพักส่วนผสมให้ตะกอนตกจมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าตะกอนจากการทดลองที่พีเอช 10 มีปริมาณมากกว่าตะกอนที่เกิดจากการทดลองที่พีเอช 9.5 (ภาพประกอบ 7(c)) เนื่องจากการดำเนินการที่พีเอช 10 ทำให้ตะกอนที่เกิดมีสภาพเป็นคอลลอยด์ตกจมได้ยาก



(a)



(b)



(c)

ภาพประกอบ 7 ผลการตกตะกอนเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์เมื่อปรับเปลี่ยนพีเอชในการตกตะกอน และใช้ระยะเวลาการกวนช้าต่างกัน

โดยทั่วไปการกวนช้าจะทำให้อนุภาคขนาดเล็กที่ต้องการให้เกิดการตกตะกอนมีโอกาสที่จะชนกันมากขึ้น เป็นผลให้อนุภาครวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นและตกจมง่าย การกวนช้าต้องการเพียงให้อนุภาคลอยตัวอยู่ในน้ำได้ แต่การกวนแรงเกินไปจะทำให้กลุ่มอนุภาคที่รวมตัวกันแตกออกเพราะแรงเฉือน ความเร็วปลายใบกวนจึงควรมีค่าประมาณ 15-75 เซนติเมตร/วินาที ขณะที่ระยะเวลาการกวนช้าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 30-60 นาที (ณรงค์ วุทธเสถียร, 2543 : 94-95)

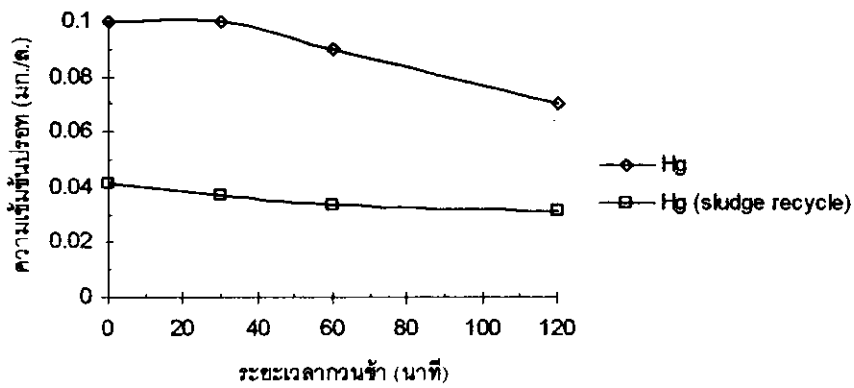
การทดลองตกตะกอนของเสียจากที่เกิดจากการวิเคราะห์น้ำชีโอดีโดยเติมโซเดียมซัลไฟด์ เป็นสารตกตะกอน และดำเนินการกวนช้าโดยใช้ระยะเวลาต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการกวนช้าจะทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนปรอทเพิ่มขึ้นทั้งกรณีการตกตะกอนที่พีเอช 9.5 และการตกตะกอนที่พีเอช 10

และเมื่อพิจารณาปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น พบว่าการกวนช้าจะทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการกวนช้า ดังนั้นการเพิ่มขึ้นขั้นตอนการกวนช้าย่อมส่งผลให้ตะกอนรวมตัวกันดีขึ้น

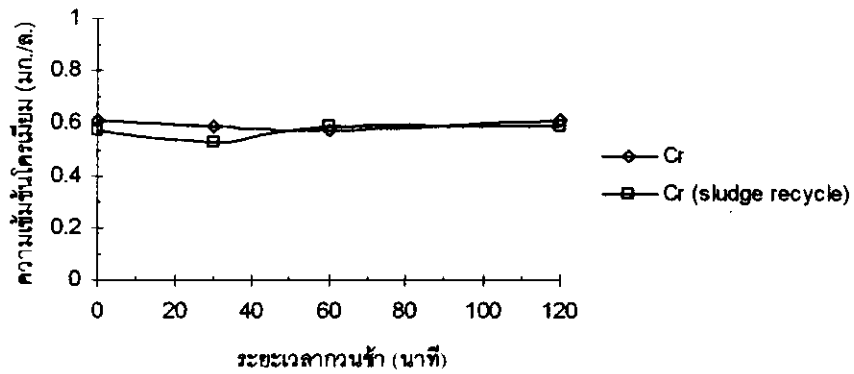
2.2 การนำตะกอนที่เกิดขึ้นมาป้อนกลับในขั้นตอนการกวนช้า และการปรับเปลี่ยนระยะเวลาการกวนช้า (ตารางภาคผนวก ข4)

เมื่อนำตะกอนมาป้อนกลับพบว่าความเข้มข้นของปรอทในส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีการนำตะกอนมาป้อนกลับ เนื่องจากการนำตะกอนที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอนโลหะหนักครั้งก่อนมาป้อนกลับจะทำให้จำนวนอนุภาคในของผสมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่อนุภาคต่าง ๆ จะปะทะกันและรวมตัวกันมีมากขึ้น ขณะเดียวกันระยะเวลาการกวนช้ามีผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนปรอท กล่าวคือเมื่อเพิ่มระยะเวลาการกวนช้าความเข้มข้นของปรอทในส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลง (ภาพประกอบ 8 (a)) ซึ่งจากการทดลองนำตะกอนมาป้อนกลับ 1 ครั้ง และเพิ่มระยะเวลาการกวนช้าถึง 120 นาที สามารถทำให้ความเข้มข้นของปรอทในส่วนใหญ่มีค่าลดลงเหลือ 0.031 มิลลิกรัม/ลิตร

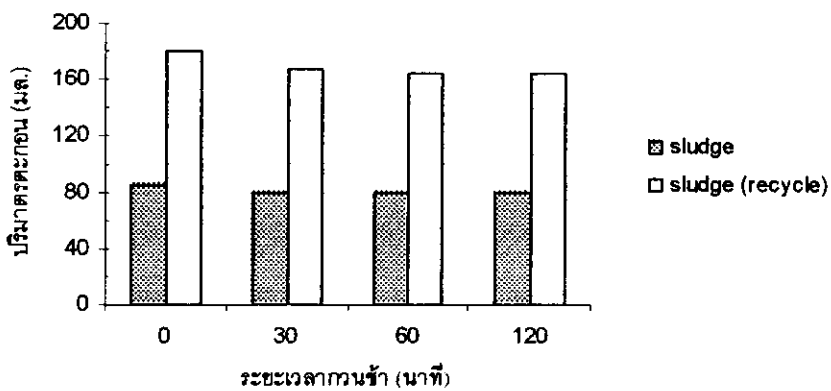
กรณีการตกตะกอนของโครเมียมพบว่าการนำตะกอนมาป้อนกลับในขั้นตอนการกวนช้า และการเพิ่มระยะเวลาการกวนช้าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนโครเมียมอย่างเด่นชัด (ภาพประกอบ 8 (b)) อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของโครเมียมในส่วนใหญ่ที่ได้ทุกจากการทดลองมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม



(a)



(b)



(c)

ภาพประกอบ 8 ผลการตกตะกอนเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์เมื่อนำตะกอนที่เกิดขึ้นมาป้อนกลับ
ในขั้นตอนการกวนช้า และการปรับเปลี่ยนระยะเวลาการกวนช้า

เมื่อพิจารณาปริมาตรตะกอนที่เกิดขึ้นพบว่าเมื่อมีการนำตะกอนมาป้อนกลับในชั้นการกวนช้า ปริมาตรตะกอนจะเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีที่ไม่มีการนำตะกอนมาป้อนกลับประมาณหนึ่งเท่าตัว (ภาพประกอบ 8 (c)) แสดงให้เห็นว่าการนำตะกอนมาป้อนกลับเพียง 1 ครั้ง ไม่ช่วยให้ตะกอนอัดตัวได้ดีขึ้น ซึ่งหากตะกอนอัดตัวจนมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นแล้ว ย่อมส่งผลให้ปริมาตรของตะกอนที่เกิดขึ้น / ปริมาตรของของเสียที่ใช้ในการทดลอง ลดลงได้

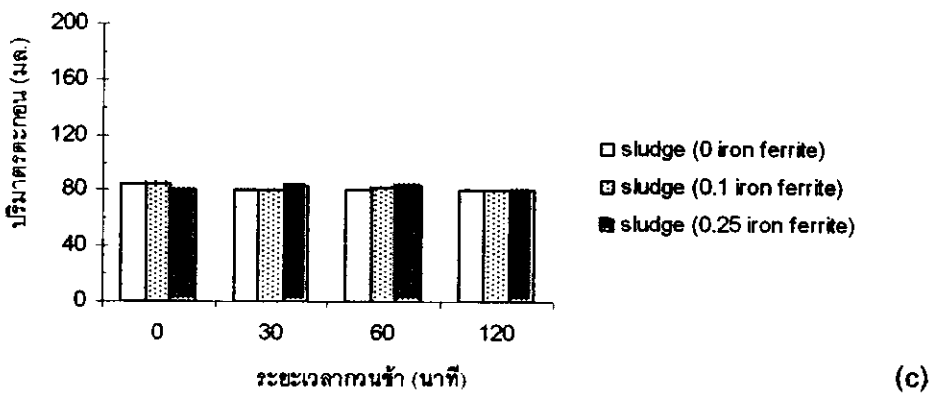
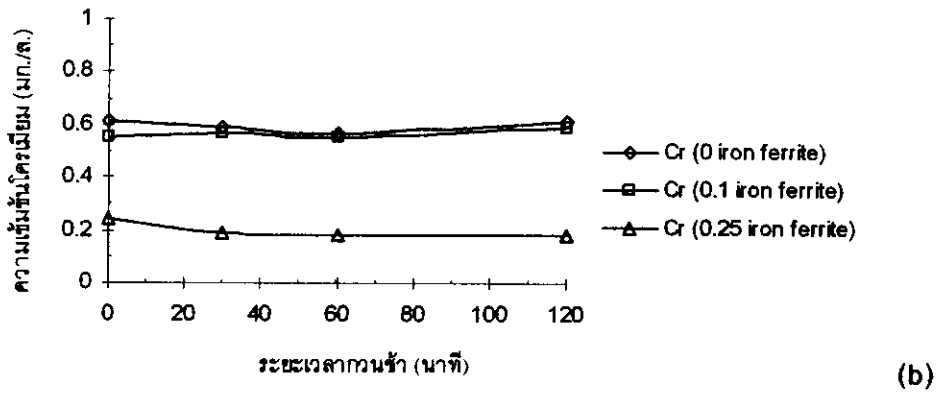
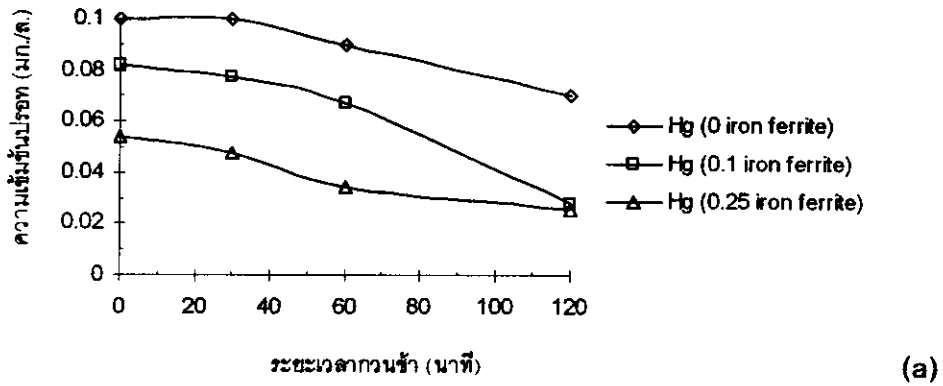
2.3 การใช้เหล็กเฟอร์ไรท์เป็นสารช่วยตกตะกอน และการปรับเปลี่ยนระยะเวลาการกวนช้า (ตารางภาคผนวก ข5)

การเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนกรณีใช้สารประกอบซิลไฟด์เป็นสารตกตะกอน แม้จะทำได้โดยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์เพื่อเป็นสารช่วยตกตะกอน แต่ของเสียที่ใช้ในการทดลองมีเหล็กอยู่แล้วถึง 1,410 มิลลิกรัม/ลิตร จึงไม่จำเป็นต้องเติมเฟอร์ริกคลอไรด์อีก อย่างไรก็ตามจากการทดลองที่ผ่านมา ค่าความเข้มข้นของปรอทยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม จึงได้ทดลองใช้เหล็กเฟอร์ไรท์เป็นสารช่วยตกตะกอน

การเตรียมเหล็กเฟอร์ไรท์ทำได้โดยผสมสารละลายเฟอร์ริสซัลเฟต กับสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตให้มีจำนวนโมลเหล็ก (II) : โมลเหล็ก (III) ประมาณ 2 : 1 จากนั้นจึงเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ของผสมมีพีเอชประมาณ 10.5 เมื่อพักส่วนผสมให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง แล้วรินส่วนใสทิ้ง และเก็บตะกอนเหล็กเฟอร์ไรท์ไว้ใช้ในการทดลอง (ดัดแปลงจาก Wang, Xu and Finch, 1996)

จากการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณเหล็กเฟอร์ไรท์เพื่อเป็นสารช่วยตกตะกอนมีแนวโน้มที่จะทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนปรอท และโครเมียมเพิ่มขึ้น (ภาพประกอบ 9 (a), (b)) เฉพาะการตกตะกอนโครเมียมนั้นพบว่า การเติมเหล็กเฟอร์ไรท์ 0.1 เท่าของจำนวนโมลรวมของโลหะหนักในของเสีย ให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนโครเมียมใกล้เคียงกับการทดลองที่ไม่เติมเหล็กเฟอร์ไรท์ และการเติมเหล็กเฟอร์ไรท์ 0.25 เท่าของจำนวนโมลรวมของโลหะหนักในของเสีย จะช่วยให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนโครเมียมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับการเพิ่มระยะเวลาการกวนช้า ยังคงเป็นปัจจัยที่ช่วยให้ความเข้มข้นของปรอทและโครเมียมในส่วนใสลดลง



ภาพประกอบ 9 ผลการตกตะกอนเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์เมื่อใช้เหล็กเฟอร์ไรท์เป็นสารช่วยตกตะกอน และการปรับเปลี่ยนระยะเวลาการดูดซับ

เมื่อพิจารณาปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นพบว่า การไม่เติมไฮรอนเพอร์ไรท์ กับการเติมเหล็กเพอร์ไรท์ 0.1 และ 0.25 เท่าของจำนวนโมลรวมของโลหะหนักในของเสีย แทบไม่ทำให้ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน (ภาพประกอบ 9 (c))

2.4 การใช้เหล็กเพอร์ไรท์เป็นสารช่วยตกตะกอน การนำตะกอนที่เกิดขึ้นมาบ้อนกลับในขั้นตอนการกรองซ้ำ 1 ครั้ง และการปรับเปลี่ยนระยะเวลาการกรองซ้ำ (ตารางภาคผนวก ข5 และตารางภาคผนวก ข6)

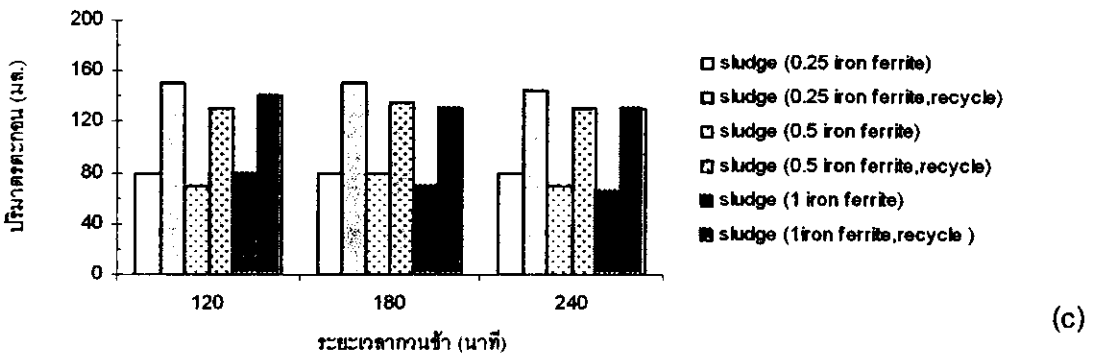
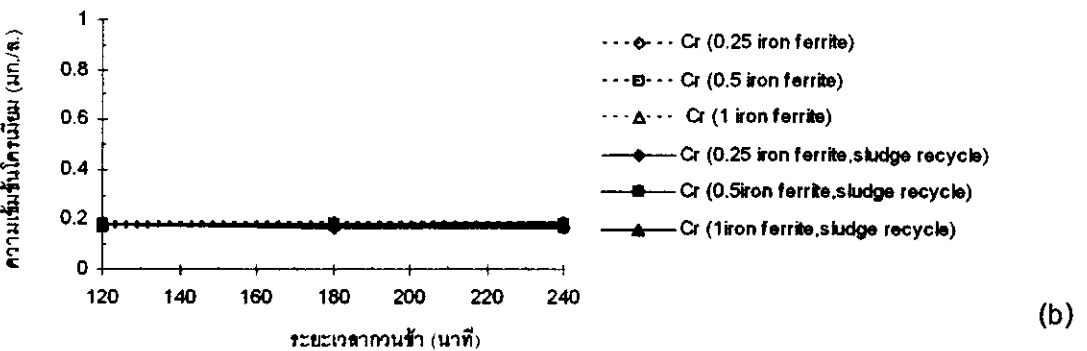
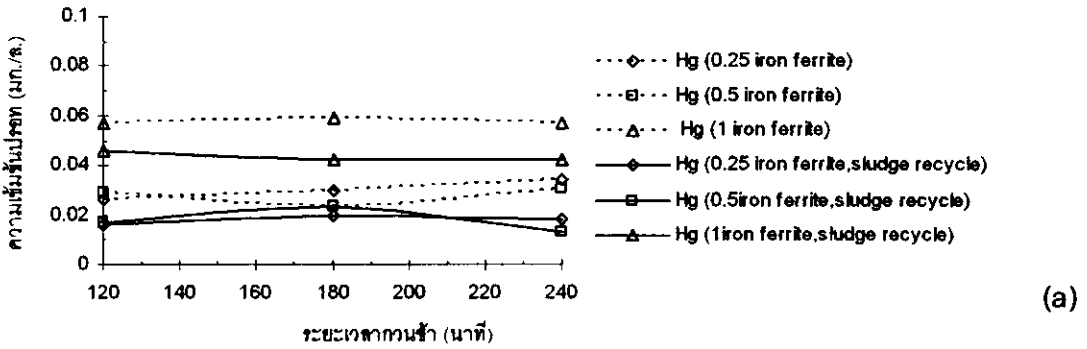
จากการทดลองที่ผ่านมากล่าวได้ว่าการใช้โซเดียมซัลไฟด์เป็นสารตกตะกอน โดยดำเนินการตกตะกอนที่พีเอช 9.5 การเพิ่มระยะเวลาการกรองซ้ำ และการเติมเหล็กเพอร์ไรท์ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนปรอท และโครเมียมในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดี แต่ยังไม่สามารถลดความเข้มข้นของปรอทได้ต่ำกว่าเกณฑ์กำหนด ดังนั้นจึงทดลองเพิ่มระยะเวลาการกรองซ้ำเป็น 180 นาที และ 240 นาที และเพิ่มเหล็กเพอร์ไรท์เป็น 0.5 เท่า และ 1 เท่าของจำนวนโมลรวมของโลหะหนักในของเสีย รวมกับการนำตะกอนที่เกิดขึ้นมาบ้อนกลับในขั้นตอนการกรองซ้ำ (ผลดังแสดงในภาพประกอบ 10)

จากภาพประกอบ 10 พบว่าการใช้ระยะเวลาการกรองซ้ำมากกว่า 120 นาที แทบไม่มีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนปรอทและโครเมียมเพิ่มขึ้น และการเติมเหล็กเพอร์ไรท์แม้มีแนวโน้มที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน แต่การเพิ่มปริมาณเหล็กเพอร์ไรท์ถึง 1 เท่าของจำนวนโมลรวมของโลหะในของเสีย กลับทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักโดยเฉพาะความเข้มข้นปรอทเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ภายหลังพักส่วนผสมซึ่งเติมเหล็กเพอร์ไรท์ 1 เท่า เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตะกอนแยกจากส่วนใส พบว่าส่วนในใสที่ได้อังคยังมีตะกอนแขวนลอย ตะกอนดังกล่าวมีขนาดเล็กและดูดติดแท่งแม่เหล็ก

สำหรับการนำตะกอนที่เกิดขึ้นมาบ้อนกลับในขั้นตอนการกรองซ้ำยังคงเป็นปัจจัยที่ช่วยลดความเข้มข้นของปรอทในส่วนใสอย่างเห็นได้ชัด

จากการทดลองข้างต้นกล่าวได้ว่าการกรองซ้ำโดยใช้เวลา 120 นาที เพียงพอที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนปรอทและโครเมียมในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดี การเติมเหล็กเพอร์ไรท์ 0.25 และ 0.5 เท่า แม้จะช่วยเพิ่มมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของโครเมียมและปรอทได้ดีใกล้เคียงกัน แต่การเติมเหล็กเพอร์ไรท์ 0.5 เท่า จะช่วยให้ตะกอนยุบตัวมากกว่า ขณะที่การเพิ่มจำนวนครั้งของการนำตะกอนมาบ้อนกลับในขั้นตอนการกรองซ้ำมีแนวโน้มจะช่วยให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนเพิ่มขึ้น

ดังนั้นแนวทางในการทดลองขั้นต่อไปจึงจำกัดเวลาการกวนซ้ำที่ 120 นาที โดยเพิ่มจำนวนครั้งของการนำตะกอนมาป้อนกลับในขั้นการกวนซ้ำ และยังคงมีการปรับเปลี่ยนปริมาณเหล็กเฟอร์ไรท์เพื่อหาข้อสรุปเกี่ยวกับปริมาณเหล็กเฟอร์ไรท์ที่เหมาะสม



ภาพประกอบ 10 ผลการตกตะกอนเคมีด้วยโซเดียมซัลไฟด์เมื่อใช้เหล็กเฟอร์ไรท์เป็นสารช่วยตกตะกอน ปรับเปลี่ยนระยะเวลาการกวนซ้ำ และนำตะกอนมาป้อนกลับในขั้นการกวนซ้ำ

2.5 การใช้เหล็กเฟอร์ไรท์เป็นสารช่วยตกตะกอน และการนำตะกอนที่เกิดขึ้นมาป้อนกลับในขั้นตอนการทวนซ้ำมากกว่า 1 ครั้ง (ตารางภาคผนวก ข7)

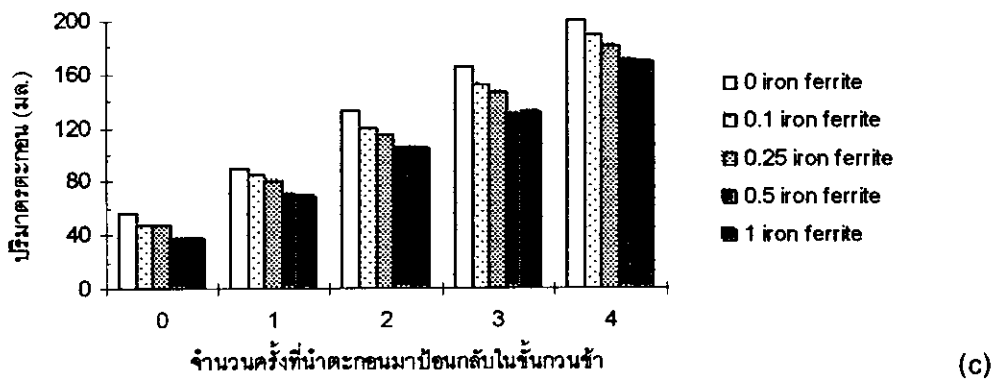
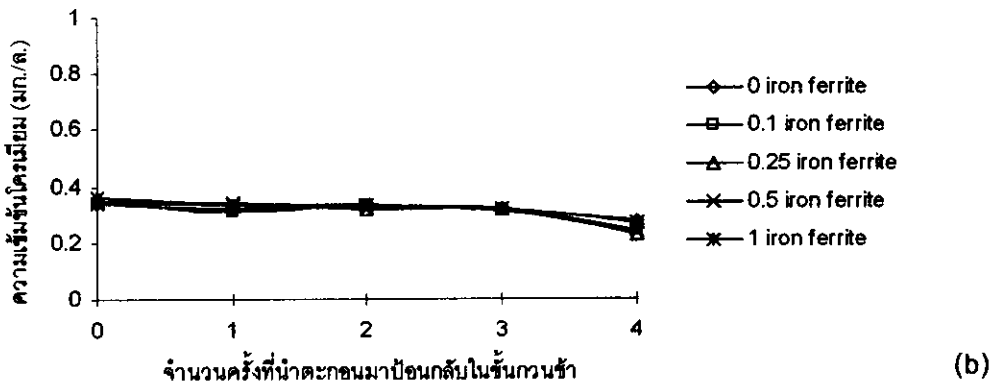
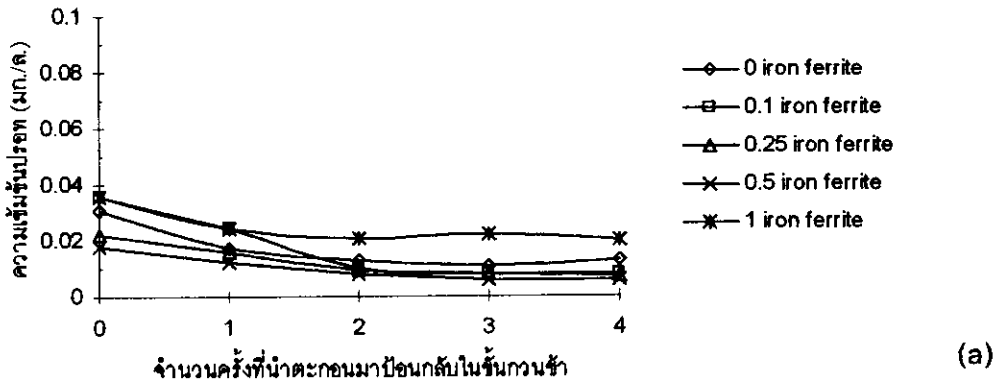
จากการทดลองที่ผ่านมาขณะที่ความเข้มข้นของโครเมียมในสไลม์มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งซึ่งกำหนดให้ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ความเข้มข้นของปรอทในสไลม์จากทุกการทดลองยังคงมีค่าสูงกว่า 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร การทดลองครั้งนี้จึงมุ่งที่จะลดความเข้มข้นของปรอทในสไลม์

เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 11 พบว่าการใช้เหล็กเฟอร์ไรท์เป็นสารช่วยตกตะกอนเป็นปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนปรอทและโครเมียมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มเหล็กเฟอร์ไรท์มากถึง 1 เท่าของจำนวนโมลโลหะรวมในของเสียกลับทำให้ความเข้มข้นของปรอทในสไลม์สูงกว่าความเข้มข้นของปรอทในการทดลองที่ไม่เติมเหล็กเฟอร์ไรท์ นอกจากนี้ยังพบอนุภาคขนาดเล็กแขวนลอยในสไลม์เช่นเดียวกับผลการทดลองในข้อ 2.4 ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเติมเหล็กเฟอร์ไรท์มากเกินไปซึ่งเป็นผลให้เฟอร์รัสที่ยังคงเหลือจากการเตรียมเหล็กเฟอร์ไรท์รบกวนการตกตะกอนของปรอท รวมถึงปรอทบางส่วนดูดติดอยู่กับอนุภาคเหล็กเฟอร์ไรท์ที่แขวนลอยในสไลม์ และอนุภาคดังกล่าวอาจมีขนาดเล็กมากจนผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 ได้

การเพิ่มจำนวนครั้งของการนำตะกอนมาป้อนกลับในขั้นทวนซ้ำช่วยลดความเข้มข้นของปรอทในสไลม์ได้ แต่ความเข้มข้นของปรอทในสไลม์มีแนวโน้มคงที่เมื่อนำตะกอนมาป้อนกลับมากกว่า 4 ครั้ง นอกจากนี้จำนวนครั้งของการนำตะกอนมาป้อนกลับยังลดอิทธิพลของปริมาณเหล็กเฟอร์ไรท์ที่มีต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนปรอท กล่าวคือในการนำตะกอนมาป้อนกลับตั้งแต่ 2 ครั้ง ขึ้นไปจะส่งผลให้ความเข้มข้นของปรอทในสไลม์ซึ่งได้จากการทดลองที่เติมไฮดรอกไซด์ 0.1, 0.25 และ 0.5 มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น เนื่องจากการทดลองเติมเหล็กเฟอร์ไรท์ 0.5 เท่า และนำตะกอนมาป้อนกลับ 4 ครั้ง ช่วยให้ความเข้มข้นของปรอทลดเหลือ 0.006 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งนับว่าใกล้เคียงกับค่ากำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงาน ขณะเดียวกันก็สามารถลดความเข้มข้นของโครเมียมในสไลม์เหลือเพียง 0.24 มิลลิกรัม/ลิตร

นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนครั้งของการนำตะกอนมาป้อนกลับยังเป็นปัจจัยที่ช่วยลดปริมาตรตะกอนที่เกิดขึ้นด้วย อาทิในการทดลองเติมเหล็กเฟอร์ไรท์ 0.25 เท่า กรณียังไม่นำตะกอนมาป้อนกลับพบว่าปริมาตรตะกอน 48 มิลลิลิตร/ของเสีย 100 มิลลิลิตร แต่ในการนำตะกอนมาป้อนกลับครั้ง 4 มีปริมาตรตะกอน 36 มิลลิลิตร/ของเสีย 100 มิลลิลิตร และในกรณีการทดลองเติมเหล็กเฟอร์ไรท์ 0.5 เท่า ขณะที่ยังไม่นำตะกอนมาป้อนกลับมีปริมาตรตะกอน 36 มิลลิลิตร/

ของเสีย 100 มิลลิลิตร เมื่อนำตะกอนมาป้อนกลับครั้ง 4 มีปริมาณตะกอน 34 มิลลิลิตร/ของเสีย 100 มิลลิลิตร ทั้งนี้เนื่องจากการนำตะกอนมาป้อนกลับทำให้น้ำหนักของตะกอนที่ก่ดทับเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 11 ผลการใช้เหล็กเฟอร์ไรต์เป็นสารช่วยตกตะกอน และการนำตะกอนที่เกิดขึ้นมาป้อนกลับในชั้นการกวนช้ามากกว่า 1 ครั้ง

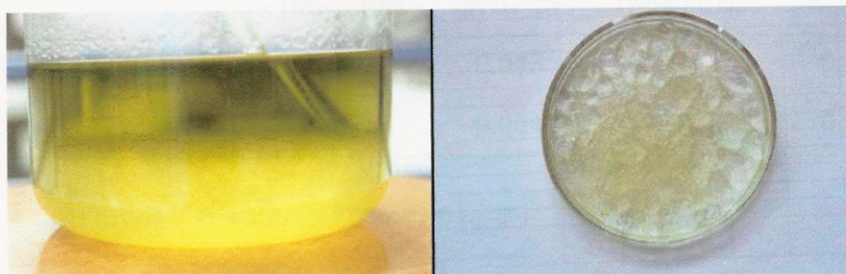
การเพิ่มปริมาณเหล็กเฟอร์ไรท์ช่วยลดปริมาตรตะกอนที่เกิดขึ้น เนื่องจากเมื่อเหล็กเฟอร์ไรท์จับกับตะกอนโลหะหนัก จะทำให้อนุภาคดังกล่าวมีน้ำหนักมากขึ้น เมื่อเกิดการตกจมของตะกอนย่อมมีน้ำหนักกดทับมากกว่าตะกอนจากการทดลองที่ไม่เติมเหล็กเฟอร์ไรท์ ซึ่งจะส่งผลให้ตะกอนที่เกิดจากการทดลองเติมเหล็กเฟอร์ไรท์ในปริมาณมากกว่ามีปริมาตรน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการเติมเหล็กเฟอร์ไรท์ 0.5 เท่า และ 1 เท่า ไม่ทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาตรแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการเติมเหล็กเฟอร์ไรท์ 1 เท่า แม้จะทำให้ตะกอนยุบลงได้มากแต่เหล็กเฟอร์ไรท์ที่ใช้ก็มีปริมาณมากเช่นกัน ประกอบกับการเติมเหล็กเฟอร์ไรท์มากถึง 1 เท่า กลับทำให้มีเหล็กเฟอร์ไรท์ส่วนเกินเป็นตะกอนขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในส่วนใสแม้จะพักให้ตะกอนตกจมนานถึง 24 ชั่วโมงแล้วก็ตาม จึงไม่เหมาะที่จะเติมเหล็กเฟอร์ไรท์มากถึง 1 เท่า

ผลจากการทดลองทุกครั้งที่ผ่านมากล่าวได้ว่าการตกตะกอนโลหะหนักโดยเฉพาะปรอทและโครเมียมในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอตินั้น โซเดียมซัลไฟด์เป็นสารตกตะกอนที่เหมาะสมมากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามการที่ของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอตินมีความเป็นกรดสูงก่อนการตกตะกอนจึงต้องปรับลดความเป็นกรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนของเสียมีพีเอชประมาณ 1.4-1.5 การทำปฏิกิริยาระหว่างกรดกับด่างดังกล่าวทำให้ของเสียมีอุณหภูมิสูงขึ้นจึงจำเป็นต้องพักของเสียให้ลดอุณหภูมิลงถึงอุณหภูมิห้องก่อนดำเนินการตะกอน ซึ่งการตกตะกอนอุณหภูมิประมาณที่ 30 องศาเซลเซียส สามารถทำได้โดยใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น และการเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนเพื่อความเข้มข้นปรอทมีค่าต่ำใกล้เคียงกับค่ากำหนดทำได้โดยการกวนช้าที่ 120 นาที การเติมเหล็กเฟอร์ไรท์ประมาณ 0.5 เท่าของจำนวนโมลรวมของโลหะหนักในของเสีย และการนำตะกอนที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงาน 4 รอบ มาบ้อนกลับในขั้นการกวนช้า

เพื่อยืนยันข้อสรุปจึงได้ทดลองตามแนวทางข้างต้นโดยใช้ของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอติน 2 กลุ่ม ได้แก่ ของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีโอตินแบบเปิดซึ่งใช้ในทุกการทดลองที่ผ่านมา และของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอตินแบบปิด (close reflux) ซึ่งเก็บรวบรวมได้จากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำของคณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม สำหรับตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในการทดลองนั้นรวบรวมได้จากการทดลองที่ผ่านมา

เมื่อพิจารณาปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ทั้งในการวิเคราะห์แบบเปิดและแบบปิด พบว่าการวิเคราะห์แบบเปิดใช้กรดและน้ำตัวอย่างอัตราส่วน 1 : 2 ขณะที่การวิเคราะห์แบบปิดใช้อัตราส่วน 1.4 : 1 (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2540 : 116, 125) ของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์แบบปิดจึงมีความเป็นกรดสูงกว่า

ในเบื้องต้นเมื่อปรับลดความเป็นกรดในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีแบบปิดโดยใช้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก/ปริมาตรนั้น พบผลึกซึ่งคาดว่าเป็น โซเดียมซัลเฟตเกิดขึ้น (ภาพประกอบ 12)



ภาพประกอบ 12 ผลึกที่เกิดขึ้นภายหลังการปรับลดความเป็นกรดในของเสียจากการวิเคราะห์ค่า ซีไอดีแบบปิดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50

เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงเปลี่ยนมาใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ในการทดลอง และพบว่าการปรับลดความเป็นกรดในของเสียจากการ วิเคราะห์ค่าซีไอดีแบบปิดจำนวน 100 มิลลิลิตรนั้น ต้องใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ถึงประมาณ 200 มิลลิลิตร ขณะที่ของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดี แบบเปิดจำนวน 100 มิลลิลิตรนั้น ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 25 โดย น้ำหนัก/ปริมาตร เพียง 100 มิลลิลิตร เพื่อลดความเป็นกรด

จากผลการตกตะกอนปรอทและโครเมียมในของเสีย 2 กลุ่มข้างต้น (ตาราง 9) พบว่า ความเข้มข้นของปรอทในส่วนใสจากการทดลองใช้ของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีแบบเปิดมี ค่าเฉลี่ย 0.013 มิลลิกรัม/ลิตร (ตารางภาคผนวก ข7) มากกว่าค่าที่เคยทดลองได้ที่ 0.006 มิลลิกรัม/ลิตร (ตารางภาคผนวก ข6) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนมาใช้สารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ทำให้มีน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายในของผสม มากขึ้น และละลายปรอทบางส่วนจากตะกอนออกมาในส่วนใส

สำหรับการตกตะกอนของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีแบบปิดซึ่งมีค่าความเข้มข้นของ ปรอทสูงกว่ากลุ่มแรก ให้ผลการตกตะกอนที่ดีกว่าและสามารถลดความเข้มข้นของปรอทได้ต่ำกว่า ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง

ตาราง 9 ผลการตกตะกอนโลหะหนักในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดี 2 กลุ่ม

ของเสีย	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)*			
	ปรอท		โครเมียม	
	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด
วิเคราะห์แบบเปิด	787	0.013	294	0.33
วิเคราะห์แบบปิด	1,911	0.004	248	0.18

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ

การทดลองตกตะกอนโลหะหนักในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีโดยใช้ระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง

การทดลองในขั้นนี้ได้ใช้ของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีแบบปิดที่เก็บรวบรวมได้จากห้องปฏิบัติการของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม (ตาราง 10) เนื่องจากของเสียที่ใช้ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการเหลือไม่พอที่จะใช้ในการทดลองบำบัดโดยกระบวนการต่อเนื่อง

ตาราง 10 สมบัติของของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีที่ใช้ในการทดลองระดับนำร่อง

ลักษณะสมบัติ	ค่าที่ตรวจวัดได้
พีเอช	<0
ปรอท	2,695 มิลลิกรัม/ลิตร
โครเมียม	370 มิลลิกรัม/ลิตร
เงิน	2,316 มิลลิกรัม/ลิตร
เหล็ก	489 มิลลิกรัม/ลิตร

ระบบบำบัดที่สร้างขึ้น (ภาพประกอบ 13) ใช้ดำเนินการทดลองระดับนำร่อง สามารถบำบัดของเสียซึ่งปรับลดความเป็นกรดแล้วได้ประมาณ 5 ลิตร/ชั่วโมง อุปกรณ์หลักประกอบด้วย

- ปฏิกรณ์ 1 : ลดความเป็นกรดในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดี ปริมาตรปฏิกรณ์ประมาณ 800 มิลลิลิตร ระยะเวลาพักพักประมาณ 8 นาที

- ปฏิกรณ์ 2 : เพิ่มพีเอชของของเสีย และเกิดการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักบางส่วน ปริมาตรปฏิกรณ์ประมาณ 800 มิลลิลิตร ระยะเวลาพักประมาณ 8 นาที
- ปฏิกรณ์ 3 : เกิดการตกตะกอนของโลหะหนักไฮดรอกไซด์ และโลหะหนักซัลไฟด์ ปริมาตรปฏิกรณ์ประมาณ 400 มิลลิลิตร ระยะเวลาพักประมาณ 4 นาที
- ถังกวนช้า : มีสารป้อนเข้า คือ ของผสมจากปฏิกรณ์ 3 และตะกอนที่นำมาป้อนกลับ ปริมาตรปฏิกรณ์ประมาณ 12 ลิตร ระยะเวลาพักประมาณ 2 ชั่วโมง
- ถังตกตะกอน : มีปริมาตรประมาณ 20.5 ลิตร รองรับของผสมที่เกิดจากการบำบัดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 13 ชุดอุปกรณ์บำบัดของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีแบบต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาปริมาณของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีซึ่งเกิดจากห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตหาดใหญ่ซึ่งมีปริมาณ 450 ลิตร/ปี การดำเนินการบำบัดของเสียวันละ 5 ลิตร ย่อมสามารถรองรับปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นดังกล่าวได้ เนื่องจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าต้องใช้สารละลายไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ผสมกับของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในอัตราส่วน 2 : 1 เพื่อลดความเป็นกรดในของเสีย และ

เพิ่มพีเอชของของเสียถึง 1.5 ในแต่ละวันจึงมีของเสียที่ปรับลดความเป็นกรดแล้วเข้าสู่กระบวนการ ตกตะกอนโลหะหนัก 15 ลิตร

ในการทดลองป้อนของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดี และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร เข้าสู่ปฏิกรณ์ 1 ของผสมที่ได้จะมีอุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส ต้องพักไว้ข้ามคืนจนมีอุณหภูมิลดลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ดังนั้นเพื่อการดำเนินงาน เป็นไปอย่างต่อเนื่องจึงใช้ถังรองรับของผสมจากปฏิกรณ์ 1 จำนวน 2 ใบ โดยใช้งานสลับกัน

อุปกรณ์ป้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ เข้าทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์ 2 และ 3 เป็นปัมเปอร์รีสแตติกแบบ 3 หัวจ่าย โดยมีเพลลาขับเคลื่อนชุดเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องป้อน สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ในอัตราเดียวกับการป้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ขณะที่สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ที่ต้องป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์ 2 เพื่อบำบัด ของเสีย 5 ลิตร มีปริมาณ 450 มิลลิลิตร แต่สารละลายโซเดียมซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดย น้ำหนัก/ปริมาตร ที่ต้องป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์ 3 มีปริมาณเพียง 50-60 มิลลิลิตร การที่ต้องป้อนสาร ทั้งสองชนิดข้างต้นในอัตราเดียวกันย่อมทำให้โซเดียมซัลไฟด์ที่ป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์ 4 มีปริมาณมาก เกินความต้องการ จึงจำเป็นต้องเจือจางสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร

เหล็กเฟอร์ไรท์ที่เตรียมขึ้นสำหรับการบำบัดของเสีย 5 ลิตร มีปริมาตรประมาณ 250 มิลลิลิตร มีความขุ่นหนืดสูงไม่สามารถบ่มขึ้นได้ จึงปรับวิธีการดำเนินงานโดยผสมเหล็กเฟอร์ไรท์ เข้ากับตะกอนต้องการนำมาป้อนกลับในชั้นกวนช้า แล้วจึงป้อนตะกอนข้างต้นเข้าสู่ถังกวนช้า

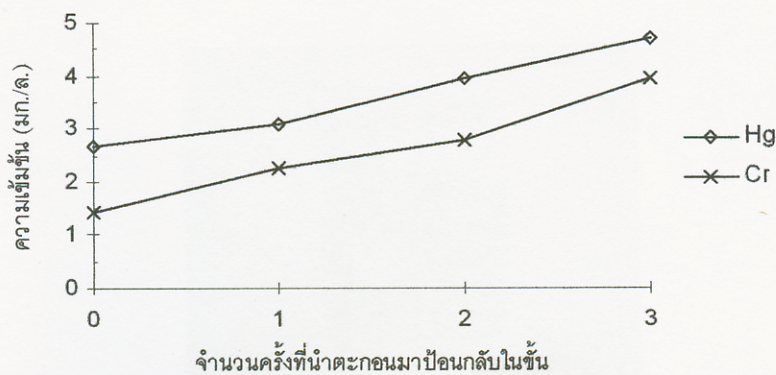
เมื่อของผสมจากถังกวนช้าผ่านเข้าสู่ถังตกตะกอน การแยกตะกอนออกจากส่วนใสไม่ได้ ดำเนินการเป็นกระบวนการต่อเนื่อง แต่จะปล่อยให้ตะกอนตกจมแยกจากส่วนใสในถังตกตะกอน ชั้นตอนดังกล่าวใช้เวลาประมาณ 20 ชั่วโมง นับจากการหยุดดำเนินการบำบัด เหตุที่ต้องดำเนินการ ในลักษณะดังกล่าวเนื่องจากหากออกแบบระบบให้เป็นการดำเนินงานต่อเนื่องทั้งหมดย่อมต้องมี ผู้ควบคุมดูแลระบบตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งไม่สอดคล้องกับช่วงระยะเวลาการทำงานตามปกติ

จากการทดลองบำบัดในวันที่สองพบว่าส่วนใสที่ได้มีสีเขียวแกมเหลือง (ภาพประกอบ 14) ขณะที่การทดลอง 2 วันต่อมา ส่วนใสมีสีเข้มมากขึ้นตามลำดับ เบื้องต้นสันนิษฐานว่าเป็นสีจาก ไอออนของโลหะหนักที่ละลายจากตะกอน



ภาพประกอบ 14 ส่วนใสที่มีสีเขียวแกมเหลืองเนื่องจากการละลายของตะกอนโลหะหนัก

เมื่อนำส่วนใสดังกล่าวไปตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทและโครเมียมพบว่าความเข้มข้นของปรอทและโครเมียมมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งของการนำตะกอนมาบ้อนกลับ (ภาพประกอบ 15) กล่าวคือโครเมียมมีค่าอยู่ในช่วง 1.42-3.94 มิลลิกรัม/ลิตร และปรอทมีค่าอยู่ในช่วง 2.66-4.69 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งปัญหาเช่นนี้ไม่พบในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ

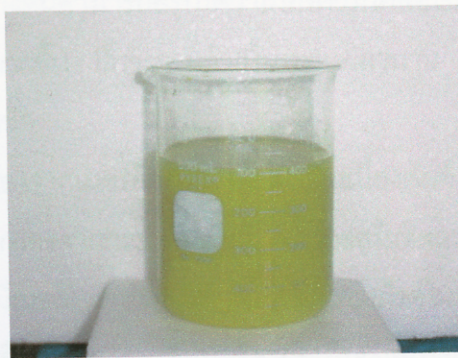


ภาพประกอบ 15 ความเข้มข้นของปรอท และโครเมียมในส่วนใส ซึ่งได้จากกระบวนการตกตะกอนที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ประเภทอุตสาหกรรมซึ่งละลายด้วยน้ำประปา

เมื่อพิจารณาจากสารเคมีที่ใช้พบว่าในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ระดับคุณภาพวิเคราะห์ และเตรียมโดยใช้น้ำหนักเป็นตัวอย่าง ขณะทำการทดลองระดับนำร่องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ประเภทอุตสาหกรรมชั้นคุณภาพ 1 และละลายด้วยน้ำประปาเพื่อประหยัดต้นทุนการดำเนินงาน

ในน้ำประปามีคลอไรด์ซึ่งเกิดจากการเติมโซเดียมไฮโปคลอไรท์เพื่อฆ่าเชื้อโรค รวมถึงคลอไรด์ในน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำประปา นอกจากนี้ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ประเภทอุตสาหกรรมชั้นคุณภาพ 1 ซึ่งนำมาใช้ในการทดลองนั้นจะมีโซเดียมคลอไรด์อยู่ด้วยโดยมีปริมาณไม่เกินร้อยละ 0.15 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2518 : 3) เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ประเภทอุตสาหกรรมซึ่งละลายด้วยน้ำประปาในกระบวนการตกตะกอนโลหะหนักในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีที่ย่อมเป็นผลให้คลอไรด์ซึ่งมีแหล่งที่มาจากน้ำประปาและโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของเงิน และไอออนของปรอท ได้ซิลเวอร์คลอไรด์ และเมอร์คิวริกคลอไรด์เป็นผลิตภัณฑ์

จากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้น้ำประปาเป็นตัวทำละลายลดความเป็นกรดในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีจนของเสียมีพีเอชเท่ากับ 1.5 พบตะกอนละเอียดเกิดขึ้นและทำให้ของผสมขุ่น (ภาพประกอบ 16) และเมื่อพักของเสียที่ปรับลดความเป็นกรดได้เป็นเวลาข้ามคืน ตะกอนดังกล่าวจะตกจมแยกจากส่วนใส จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทและโครเมียมพบว่าส่วนใสดังกล่าวมีความเข้มข้นของปรอทและโครเมียมเหลือเพียง 111 มิลลิกรัม/ลิตร และ 142 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่ปรอทบางส่วนจะตกตะกอนในรูปเมอร์คิวริกคลอไรด์ สำหรับโครเมียมซึ่งไม่ตกตะกอนในรูปคลอไรด์มีความเข้มข้นลดลงเช่นกันแต่เป็นผลของการเจือจางจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงในของเสียเพื่อลดความเป็นกรด



ภาพประกอบ 16 ของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีภายหลังปรับลดความเป็นกรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ระดับคุณภาพการค้ำที่ใช้น้ำประปาเป็นตัวทำละลาย

เมอร์คิวริกคลอไรด์ไม่ละลายในกรดแต่จะละลายน้ำได้มากพอสมควร กล่าวคือที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมอร์คิวริกคลอไรด์สามารถละลายน้ำในปริมาตร 100 มิลลิลิตร ได้ถึง 7.4 กรัม (<http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/m1469.htm>)

เมื่อพิจารณาถึงการทดลองพบว่าภายหลังการปรับลดความเป็นกรดในของเสีย ของผสมที่ได้จะมีพีเอชต่ำประมาณ 1.5 คาดว่าในสภาวะดังกล่าวเมอร์คิวริกคลอไรด์จะละลายได้น้อยมาก ต่อเมื่อมีการเติมสารตกตะกอนจนทำให้พีเอชของของผสมเพิ่มขึ้นจนมีพีเอชเป็นด่างเมอร์คิวริกคลอไรด์จะละลายได้มากขึ้นเป็นผลให้ความเข้มข้นของปรอทในส่วนใสเพิ่มขึ้น

สาเหตุอีกประการที่ทำให้การตกตะกอนด้วยประสิทธิภาพคือพีเอชที่ใช้ในการตกตะกอนอาจยังไม่เหมาะสม

เมื่อทดลองตกตะกอนโลหะหนักในของเสียที่ลดความเป็นกรดแล้วข้างต้นที่พีเอชต่างกันโดยตัดขั้นตอนการกวนช้าออก (ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 11) พบว่าเมื่อพีเอชของของผสมในปฏิกรณ์ 2 มีค่าประมาณ 6 และของผสมในปฏิกรณ์ 3 มีพีเอช 8 ความเข้มข้นของปรอทและโครเมียมในส่วนใสที่ได้มีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของปรอทและโครเมียมในส่วนใสที่ได้จากการทดลองอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากของการทดลองข้างต้นใช้โซเดียมซัลไฟด์น้อยมากทั้งนี้ต้องเจือจางโซเดียมซัลไฟด์จนมีความเข้มข้นต่ำเพียงร้อยละ 1 โดยน้ำหนักปริมาตร การใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟด์มีความเข้มข้นต่ำย่อมมีน้ำในปฏิกรณ์ 3 มากขึ้น ส่งผลให้การละลายของเมอร์คิวริกคลอไรด์เพิ่มขึ้น และการละลายของเมอร์คิวริกคลอไรด์ย่อมทำให้ตะกอนโลหะหนักอื่น ๆ ละลายมากขึ้นเพื่อรักษาสมดุลไอออนของระบบ ดังจะเห็นได้จากความเข้มข้นของโครเมียมที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน เมื่อปรับพีเอชของของผสมในปฏิกรณ์ 3 เพิ่มเป็น 9 และ 9.5 ปัญหาเนื่องจากการละลายของเมอร์คิวริกคลอไรด์ลดลงตามลำดับ เนื่องจากใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้น

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเมอร์คิวริกคลอไรด์จะละลายมากขึ้นเมื่อมีน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายในระบบมากขึ้น มีการกวนช้าเป็นระยะเวลาสั้น รวมถึงมีการนำตะกอนที่เกิดขึ้นมาบ่อนกลับในขั้นการกวนช้า

เพื่อบรรเทาปัญหาเนื่องจากเมอร์คิวริกคลอไรด์ ในเบื้องต้นจึงพยายามลดปริมาณเมอร์คิวริกคลอไรด์ที่เกิดขึ้นโดยใช้น้ำกรองจากกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสละลายสารเคมีทุกชนิดที่ใช้ในการทดลอง อย่างไรก็ตามยังมีเมอร์คิวริกคลอไรด์ซึ่งเกิดจากคลอไรด์ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ ดังนั้นขณะดำเนินการตกตะกอนจึงต้องระมัดระวังไม่ให้ตะกอนในถังพักของเสียที่ลดความเป็นกรดแล้วฟุ้งกระจาย และต้องไม่ดูดตะกอนกันถึงเข้าสู่ปฏิกรณ์ 2 นอกจากนี้ยังต้องปรับพีเอชในการทดลองให้

อยู่ในช่วงที่เหมาะสม กล่าวคือควบคุมให้พีเอชของของผสมในปฏิกรณ์ 3 มีค่าอยู่ในช่วง 4-5 และพีเอชของของผสมในปฏิกรณ์ 4 มีค่า 8-9

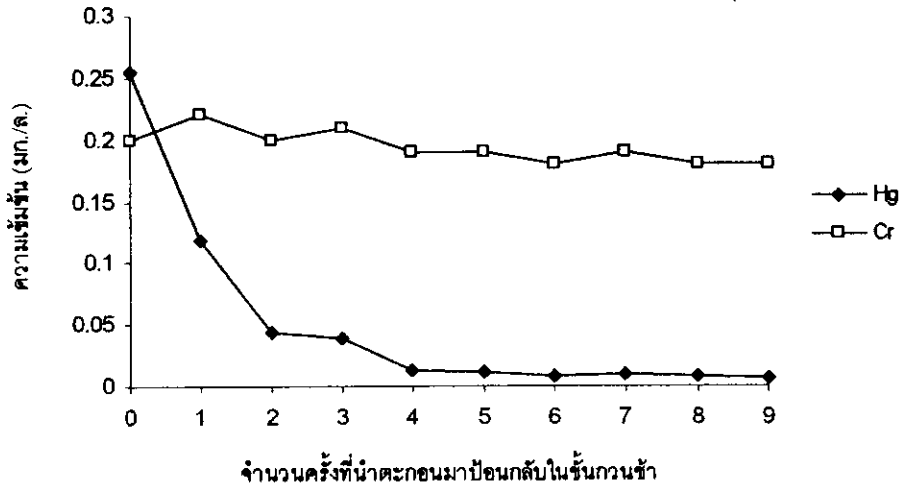
ตาราง 11 ความเข้มข้นของปรอท และโครเมียมในส่วนนไลที่ได้จากการทดลองตกตะกอนที่พีเอชต่าง ๆ เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ประเภทอุตสาหกรรมที่ละลายด้วยน้ำประปาในการทดลอง

พีเอช		ความเข้มข้น* (มิลลิกรัม/ลิตร)	
ปฏิกรณ์ 2	ปฏิกรณ์ 3	ปรอท	โครเมียม
4	8	0.026	0.17
4	9	0.029	0.16
5	8	0.071	0.17
5	9	0.022	0.17
6	8	47.219	0.74
6	9	2.281	0.21
6	9.5	0.028	0.17

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยการทดลอง 2 ซ้ำ

เมื่อทำการทดลองโดยใช้สารเคมีที่ละลายด้วยน้ำกรองจากกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (ตารางภาคผนวก ข10) พบว่าในช่วงแรกของการทดลองความเข้มข้นของปรอทยังคงมีค่าสูง คาดว่าเป็นปัญหาจากตะกอนเมอร์คิวริกคลอไรด์จากการทดลองครั้งก่อนยังคงเหลือในระบบ และเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการทดลองพบว่าความเข้มข้นของปรอทในส่วนนไลลดลง ขณะที่การนำตะกอนมาป้อนกลับมากขึ้นเป็นปัจจัยที่ทำให้ความเข้มข้นของปรอทในส่วนนไลลดลงเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ปริมาตรตะกอนที่นำมาป้อนกลับถูกจำกัดไม่เกิน 4 ลิตร ไม่เช่นนั้นจะทำให้ของผสมที่เข้าสู่ถังตกตะกอนมีปริมาณมากเกินไปที่ถังตกตะกอนจะรองรับได้ ซึ่งจากการทดลองพบว่ามีตะกอนเกิดประมาณ 0.6 ลิตร จากการบำบัดของเสียที่ลดความเป็นกรดแล้ว 15 ลิตร ดังนั้นปริมาตรตะกอนซึ่งสามารถนำมาป้อนกลับในขั้นการทวนซ้ำได้มากที่สุดเกิดจากการทดลอง 6 รอบ และพบว่าความเข้มข้นของปรอทในส่วนนไลที่ได้จากการในตะกอนปริมาตร 6 รอบมาป้อนกลับมีค่าอยู่ในช่วง 0.007-0.009 มิลลิกรัม/ลิตร (ภาพประกอบ 17) ซึ่งแม้จะไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง

อุตสาหกรรมแต่สามารถลดความเข้มข้นของปรอทได้มาก และอาจลดความเข้มข้นของปรอทได้ต่ำกว่าค่ากำหนดเมื่อเพิ่มปริมาณของตะกอนที่นำมาป้อนกลับในชั้นกวนซ้ำ



ภาพประกอบ 17 ความเข้มข้นของปรอท และโครเมียมในสไลด์ ซึ่งได้จากกระบวนการตกตะกอนที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ระดับคุณภาพการค้าซึ่งละลายด้วยน้ำกรองจากกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส

เมื่อพิจารณาปริมาณปรอทและโครเมียมในของเหลวที่เข้าและออกจากระบบ (ตาราง 12) แสดงให้เห็นว่าระบบที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพในตกตะกอนปรอทและโครเมียมได้มากถึงร้อยละ 99.99 และ 99.85 ตามลำดับ

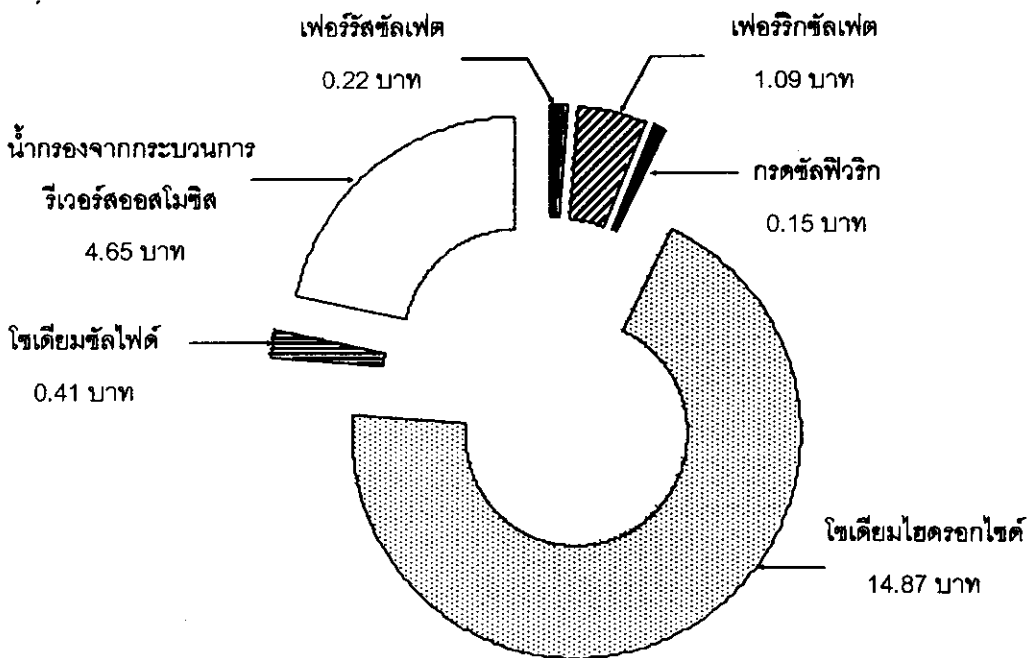
ตาราง 12 ปริมาณปรอทและโครเมียมที่เข้าและออกจากระบบ

ตัวอย่าง	ปริมาตร (ลิตร)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)		ปริมาณ (มิลลิกรัม)	
		ปรอท	โครเมียม	ปรอท	โครเมียม
ของเสียที่เข้าสู่ระบบ	5	2,695	370	13,475	1,850
สไลด์ที่ออกจากระบบ	15.4	0.007	0.18	0.1	2.8
ตะกอน	0.6	22,458	3,079	13,474.9	1,847.2

จากการทดลองพบว่าพีเอชของของผสมในปฏิกรณ์ 2 จะมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อปรับพีเอชไว้ประมาณ 4 และในแต่ละรอบของการทดลองจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ

25 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ประมาณ 0.5 ลิตร ขณะที่ต้องใช้โซเดียมซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร เพื่อให้ของผสมในปฏิกรณ์ 3 มีพีเอช 8.8 - 9 ประมาณ 0.5 ลิตร เช่นกัน อนึ่ง โซเดียมซัลไฟด์ที่เตรียมขึ้นจะเสื่อมคุณภาพอย่างรวดเร็ว จึงต้องเตรียมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ใหม่ก่อนการบำบัดในแต่ละครั้ง

เมื่อประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัด พบว่าการตกตะกอนโลหะหนักในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี 1 ลิตร ต้องเสียค่าสารเคมีประเภทอุตสาหกรรม และค่าน้ำกรองจากกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสที่ใช้เป็นตัวทำละลายทั้งสิ้น 21.39 บาท รายละเอียดดังแสดงในภาพประกอบ 18 เฉพาะค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์คิดเป็นร้อยละ 70 ของค่าใช้จ่ายรวม ทั้งนี้ร้อยละ 95 ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ทั้งหมดจะถูกใช้ไปในขั้นการปรับลดความเป็นกรด



ภาพประกอบ 18 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเฉพาะค่าสารเคมีและน้ำกรอง สำหรับบำบัดของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี 1 ลิตร

แม้จะสามารถลดความเข้มข้นของปรอทได้มากและสามารถลดความเข้มข้นของโครเมียมได้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม แต่ปัญหาสำคัญที่ประสบคือมีตะกอนขนาดเล็กแขวนลอยอยู่

ในส่วนไส้ ตะกอนดังกล่าวเกิดจากเหล็กเฟอร์ไรท์ส่วนเกิน แนวทางแก้ปัญหาที่ง่ายและประหยัดคือการพักส่วนผสมในถังตกตะกอนไว้นานประมาณ 3 วัน จึงไม่พบตะกอนแขวนลอยในส่วนไส้

อนึ่งการทดลองตกตะกอนโลหะหนักโดยกระบวนการต่อเนื่อง ดำเนินการในช่วงฤดูร้อนซึ่งในช่วงกลางวันน้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 30 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อุณหภูมิของของผสมในปฏิกรณ์ 2 และปฏิกรณ์ 3 มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิควบคุมที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส กล่าวคือของผสมในปฏิกรณ์ 2 และปฏิกรณ์ 3 มีอุณหภูมิสูงสุดที่ 33 องศาเซลเซียส และ 32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวแทบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนปรอทและโครเมียม