

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ลักษณะของน้ำเสียซีโอติ

น้ำเสียซีโอติในงานวิจัยนี้เก็บรวบรวมมาจากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นน้ำเสียจากการวิเคราะห์หาค่าซีโอติโดยวิธีฟลักซ์แบบเปิด สีของน้ำเสียจะเป็นสีน้ำตาลในช่วงแรกและจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้าอมเขียว มีลักษณะเป็นสารละลายใส มีค่าพีเอชน้อยกว่า 1 เนื่องจากการทดลองหาค่าซีโอติมีการใช้กรดซัลฟิวริกเพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำ โลหะหนักในน้ำเสียซีโอติประกอบด้วยปรอท, โครเมียม และเงิน มีปริมาณค่าเฉลี่ยดังนี้ 1,396 มิลลิกรัมต่อลิตร, 444 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1,715 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีเหล็ก 1,041 มิลลิกรัมต่อลิตร โลหะหนักเหล่านี้มาจากสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าซีโอติคือ เมอร์คิวรีซัลเฟต, โปตัสเซียมไดโครเมต, ซิลเวอร์ซัลเฟต และเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปรอทและโครเมียมมีปริมาณที่สูงมาก เกินค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม(2539) ซึ่งกำหนดให้มีปรอทไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร และโครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการกำจัดก่อนทิ้งลงแหล่งน้ำสาธารณะ

การแยกไอออนเงินออกจากน้ำเสียซีโอติ

ก่อนทำการทดลองกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอติด้วยกระบวนการเพอร์ไรด์ ไอออนเงินในน้ำเสียซีโอติจะถูกแยกออกเพื่อนำกลับต่อไปโดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอนผลึกซิลเวอร์คลอไรด์ ซึ่งใช้ปริมาณ 4 เท่าของค่าความต้องการทางทฤษฎี หรือ 3.7 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร หลังการตกตะกอนผลึกแล้วพบว่าในน้ำเสียมี เงิน 0.22 มิลลิกรัมต่อลิตร, ปรอท 682 มิลลิกรัมต่อลิตร, โครเมียม 417 มิลลิกรัมต่อลิตร และเหล็ก 973 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากไอออนคลอไรด์สามารถทำปฏิกิริยากับเมอร์คิวรัสไอออน(Hg^{2+}) จึงทำให้ปรอทบางส่วนตกตะกอนเป็นเมอร์คิวรัสคลอไรด์($HgCl_2$) ได้

เงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอไซด์ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาตัวแปรคือ พีเอช อุณหภูมิ และปริมาณเฟอร์ริซัลเฟต เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอไซด์ โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก เป็นการศึกษาหาพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสม และในขั้นตอนที่สอง เป็นการศึกษาหาอัตราส่วน โมลของเฟอร์ริซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมดที่เหมาะสม

ทุกเงื่อนไขการทดลองจะทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือค่าศักย์รีดอกซ์ (ORP) ขณะเดิมอากาศเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เมื่อค่าศักย์รีดอกซ์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งที่ แสดงว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันสิ้นสุดลงจึงหยุดการเติมอากาศ บันทึกเวลาการเกิดปฏิกิริยา, สี และลักษณะตะกอนเฟอร์ไรต์ที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ ตรวจสอบความเป็นสารแม่เหล็กอย่างคร่าวๆ โดยทดสอบกับแท่งแม่เหล็ก ทำการกรองแยกน้ำใสส่วนบนและตะกอนออกจากกัน นำน้ำใสส่วนบนไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นปรอทและโครเมียมที่เหลืออยู่ ด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตเมตรีเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัด ส่วนตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ในทุกเงื่อนไข จะถูกนำไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และทำการเปรียบเทียบความเป็นสารแม่เหล็กด้วยวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี โดยที่พิจารณาจากจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่ ตะกอนที่มีจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่มากกว่าจะเป็นสารแม่เหล็กดีกว่าตะกอนที่มีจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่น้อยกว่า และในทุกเงื่อนไขของการทดลองจะทำซ้ำ 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยของการทดลองนั้นๆ

ก. การศึกษาหาพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสม

การศึกษาผลของพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอไซด์ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ทำการทดลองแปรค่าพีเอชเป็น 9, 10, 11, 12 และแปรค่าอุณหภูมิเป็น 55, 60, 65, 70 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณเฟอร์ริซัลเฟต 0.025 โมล อัตราการเติมอากาศ 10 ลิตรต่อนาที การทดลองใช้ปริมาตรน้ำเสียซีโอไซด์ 500 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นปรอท 98.6 มิลลิกรัมต่อลิตร, โครเมียม 25.70 มิลลิกรัมต่อลิตร และเหล็ก 50.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอไซด์ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ที่พีเอชและอุณหภูมิต่างๆ สรุปไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการกำจัดปรอท, โครเมียมและเหล็กในน้ำเสียซีโอไซด์ด้วยกระบวนการเพอร์โรทที่พีเอชและอุณหภูมิต่างๆและปริมาณเพอร์สัลเฟต 0.025 โมล

อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	ความเข้มข้นโลหะหนัก (มก/ล)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			จำนวนอิเล็กตรอน ไว้คู่ (10 ⁵ ตัว)	สี,ลักษณะตะกอน ความเป็นสารแม่เหล็ก	เวลากักเก็บ (นาที)
		ปรอท	โครเมียม	เหล็ก	ปรอท	โครเมียม	เหล็ก			
55	9	0.09	0.14	0.17	99.91	99.46	99.67	9.85	ดำ,หนัก,+	25
55	10	0.50	0.68	0.17	99.49	97.35	99.66	4.80	ดำ,หนัก,+	30
55	11	3.88	0.82	0.18	96.06	96.81	99.64	4.39	ดำ,หนัก,+	30
55	12	7.71	1.73	0.19	92.18	93.27	99.63	2.75	น้ำตาลปนดำ,เบา,+	55
60	9	0.09	0.16	0.12	99.91	99.38	99.77	10.42	ดำ,หนัก,+	25
60	10	0.48	0.66	0.15	99.51	97.43	99.71	5.77	ดำ,หนัก,+	30
60	11	1.27	0.71	0.14	98.72	97.24	99.72	4.87	ดำ,หนัก,+	30
60	12	6.57	1.25	0.21	93.34	95.14	99.58	5.96	ดำ,หนัก,+	35
65	9	0.07	0.14	0.12	99.93	99.46	99.76	12.77	ดำ,หนัก,+	25
65	10	0.16	0.59	0.19	99.83	97.70	99.63	10.70	ดำ,หนัก,+	30
65	11	0.87	0.63	0.23	99.12	97.55	99.54	7.15	ดำ,หนัก,+	30
65	12	1.96	1.53	0.55	98.01	94.05	98.91	6.30	ดำ,หนัก,+	35
70	9	0.04	0.15	0.13	99.96	94.42	99.75	9.61	ดำ,หนัก,+	25
70	10	0.11	0.52	0.13	99.88	97.98	99.73	6.70	ดำ,หนัก,+	30
70	11	1.13	0.71	0.14	98.85	97.24	99.71	7.89	ดำ,หนัก,+	30
70	12	2.08	1.60	0.99	97.89	93.77	98.03	7.80	ดำ,หนัก,+	35

หมายเหตุ ความเข้มข้นโลหะก่อนกำจัดคือ ปรอท 98.60 มิลลิกรัมต่อลิตร, โครเมียม 25.70 มิลลิกรัมต่อลิตร และเหล็ก 50.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลากักเก็บ หมายถึง เวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นทำปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งค่าศักย์รีดอกซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งคงที่

เครื่องหมาย + หมายถึง ความเป็นสารแม่เหล็กซึ่งตะกอนสามารถดูดติดได้ด้วยแท่งแม่เหล็ก

1. ผลของพีเอช

เนื่องจากไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับโลหะที่มีอยู่ในน้ำเสีย ได้เป็นสารผสมไฮดรอกไซด์ ก่อนที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเฟอร์ไรต์โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยอากาศ จากผลการทดลองได้ว่า พีเอชมีผลต่อการกำจัดโลหะในน้ำเสีย และความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์กล่าวคือ ตามรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3 พบว่าแต่ละค่าของพีเอช(9, 10, 11, 12) ทำให้เกิดผลในการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (การวิเคราะห์ทางสถิติแสดงไว้ในภาคผนวก ข) และมีแนวโน้มว่าที่พีเอชต่ำจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กได้ดีกว่าพีเอชสูง โดยที่พีเอช 9 มีความเข้มข้นของปรอท, โครเมียม และเหล็กเหลืออยู่ภายหลังจากบำบัดน้อยกว่าที่ค่าพีเอชอื่น และจากรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กที่พีเอช 9 มีมากกว่า 99% ในทุกเงื่อนไขของอุณหภูมิ นอกจากนั้นจากรายที่ 4.1 พบว่าเวลาการทำปฏิกิริยาที่พีเอชต่ำเร็วกว่าที่พีเอชสูง ทั้งนี้อาจเนื่องจากที่พีเอชต่ำมีปริมาณไฮดรอกไซด์น้อยกว่าดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า ส่วนผลของพีเอชต่อความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนที่ได้ซึ่งพิจารณาจากจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าแต่ละค่าของพีเอชทำให้เกิดผลความเป็นสารแม่เหล็กแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน ทั้งนี้มีแนวโน้มว่าที่พีเอชต่ำให้ผลต่อความเป็นสารแม่เหล็กดีกว่าที่พีเอชสูง โดยที่พีเอช 9 ตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์มีความเป็นสารแม่เหล็กดีที่สุด

2. ผลของอุณหภูมิ

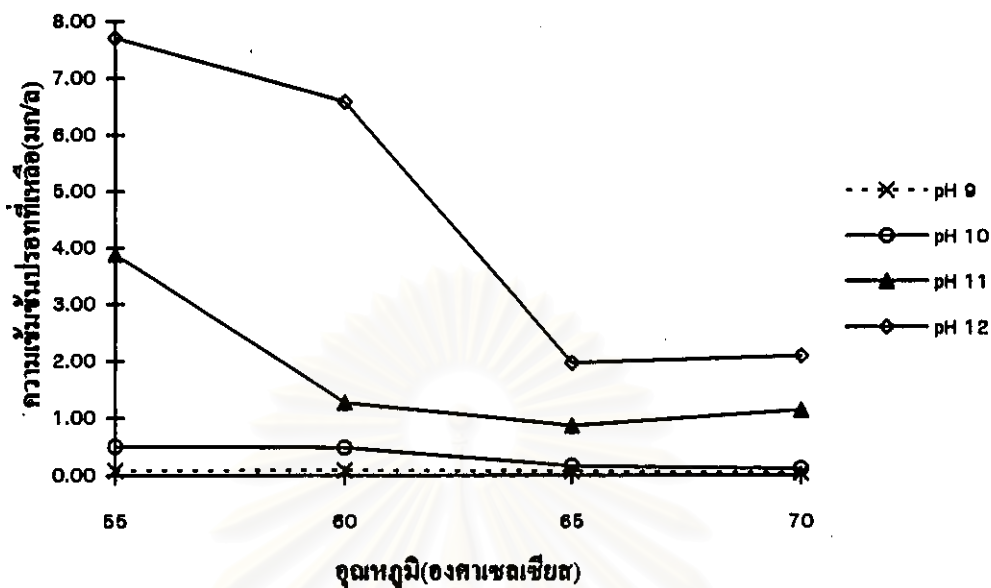
เนื่องจากอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบเฟอร์ไรต์ จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิมีผลต่อการกำจัดโลหะในน้ำเสีย และความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์กล่าวคือ แต่ละค่าของอุณหภูมิ(55, 60, 65, 70 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดผลในการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และมีแนวโน้มว่าที่อุณหภูมิสูงจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.6 ทั้งนี้อาจเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทำให้ไอออนปรอท, โครเมียม และเหล็กซึ่งมีรัศมีไอออน 0.11, 0.069 และ 0.064 นาโนเมตร (Smith, 1963)ตามลำดับ เข้าอยู่ในช่องว่างในแลตทิซผลึกได้มากขึ้น ส่วนผลของอุณหภูมิต่อความเป็นสารแม่เหล็กซึ่งพิจารณาจากจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่ พบว่าแต่ละค่าของอุณหภูมิทำให้เกิดผลความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และจากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิสูงมีแนวโน้มให้ตะกอนมีความเป็นสารแม่เหล็กสูงขึ้นได้อย่างไม่เด่นชัดนัก โดยที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส พีเอช 9 ตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์มีความเป็นสารแม่เหล็กดีที่สุด

3. ผลรวมของพีเอชและอุณหภูมิ

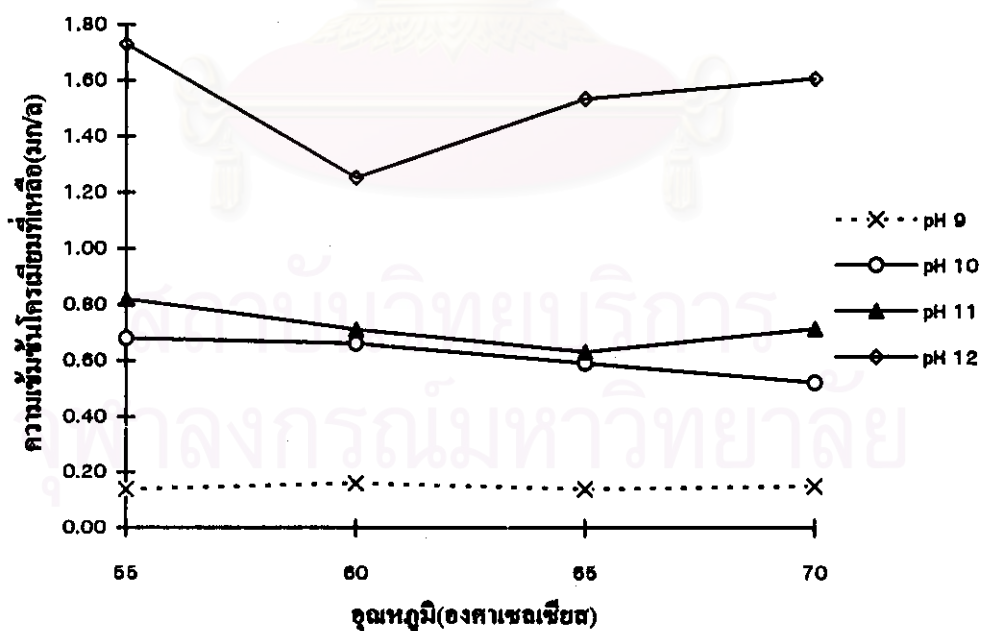
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.6 พบว่าพีเอชและอุณหภูมิมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญในการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็ก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอช(9, 10, 11, 12) และอุณหภูมิ(55, 60, 65, 70 องศาเซลเซียส)ร่วมกัน พบว่าที่พีเอชต่ำอุณหภูมิสูงมีแนวโน้มให้ประสิทธิภาพการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กสูงกว่าที่พีเอชสูงอุณหภูมิต่ำ และในทุกเงื่อนไขการทดลองให้ตะกอนสีดำและหนัก ยกเว้นที่พีเอช 12 อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสให้ตะกอนสีน้ำตาลปนดำและเบา และทุกเงื่อนไขของตะกอนที่ได้เมื่อทดสอบความเป็นสารแม่เหล็กทางกายภาพ พบว่า สามารถดูดติดได้ด้วยแท่งแม่เหล็ก ในการทดลองนี้พบว่า พีเอชและอุณหภูมิไม่มีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญต่อความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์

4. การพิจารณาเลือกพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสม

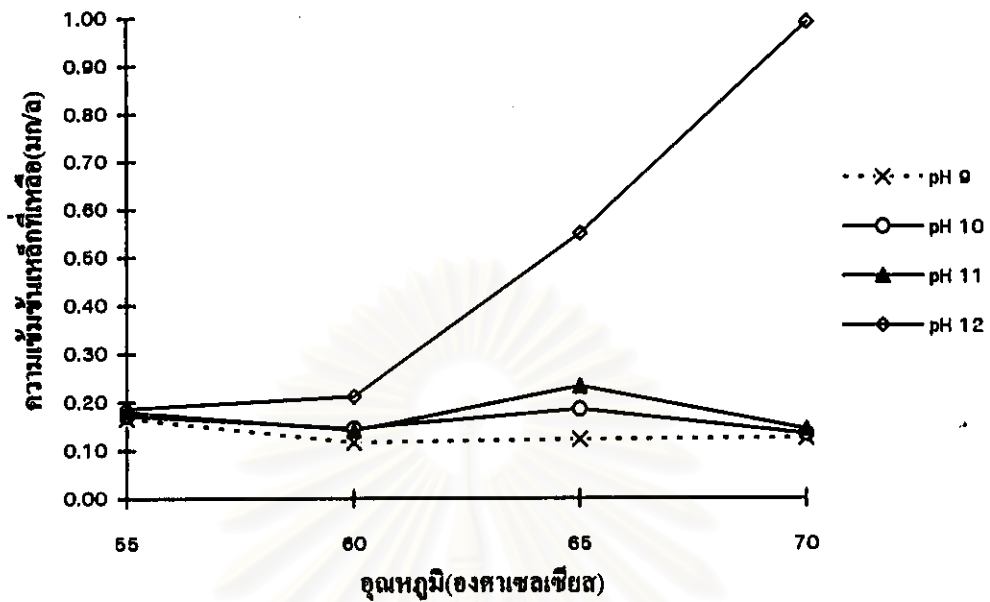
พีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสมพิจารณาจาก เงื่อนไขที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและโครเมียมในน้ำเสียซีโอดีสูงสุด และให้ตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์มีความเป็นสารแม่เหล็กดีที่สุด จากผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 9 มีประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและโครเมียมในน้ำเสียซีโอดีสูงสุด และให้ตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์มีความเป็นสารแม่เหล็กดีที่สุด โดยทุกค่าอุณหภูมิที่ทำการทดลองร่วมกับพีเอช 9 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและโครเมียมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ให้ตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์มีความเป็นสารแม่เหล็กแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสให้ตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์มีความเป็นสารแม่เหล็กแตกต่างจากอุณหภูมิต่ำอย่างมีนัยสำคัญ และให้ความเป็นสารแม่เหล็กสูงสุด ดังนั้นจึงเลือก พีเอช 9 และอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ รูปที่ 4.8 เป็นตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงศักย์รีดอกซ์ของการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ที่เงื่อนไข พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ส่วนรูปที่ 4.9 เป็นตัวอย่างตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ซึ่งสามารถดูดติดได้ด้วยแท่งแม่เหล็ก



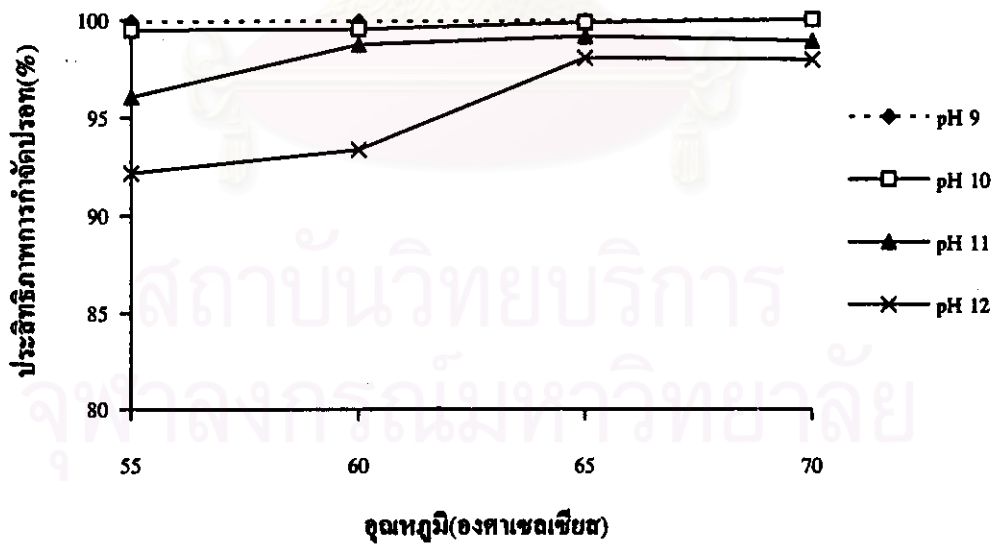
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโปรตีนหลังการบำบัดกับอุณหภูมิและพีเอช ปริมาณเฟอริตซัลเฟต 0.025 โมล



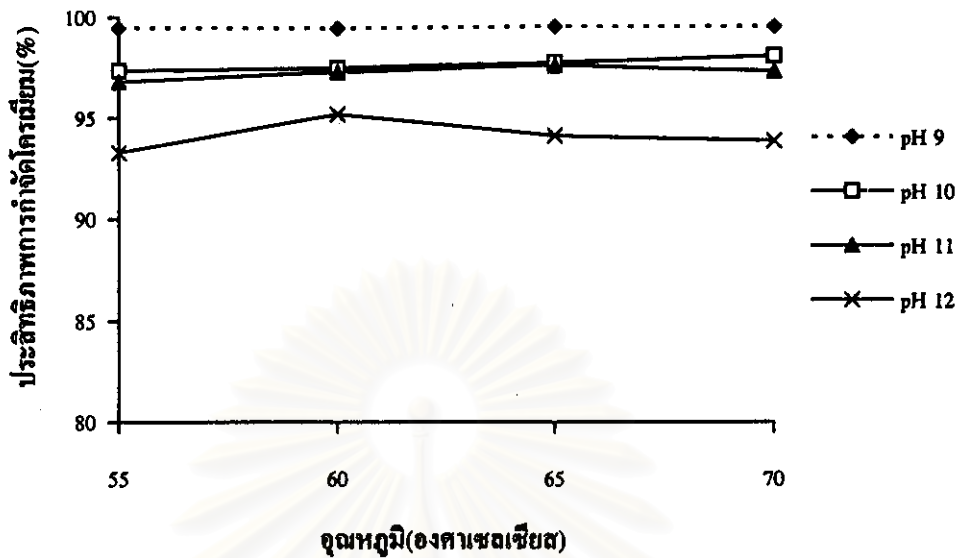
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโครเมียมหลังการบำบัดกับอุณหภูมิและพีเอช ปริมาณเฟอริตซัลเฟต 0.025 โมล



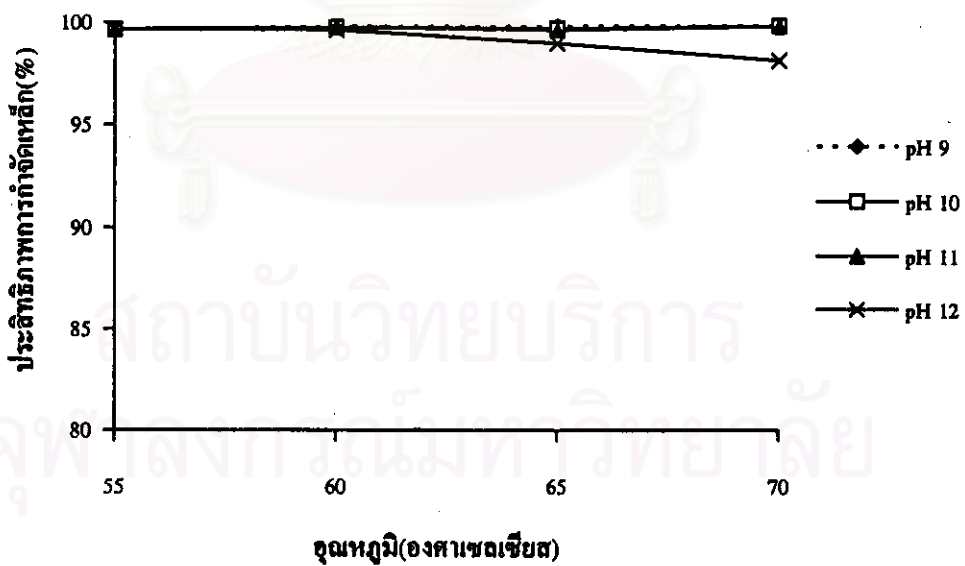
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเหล็กหลังการบำบัดกับอุณหภูมิและพีเอช ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล



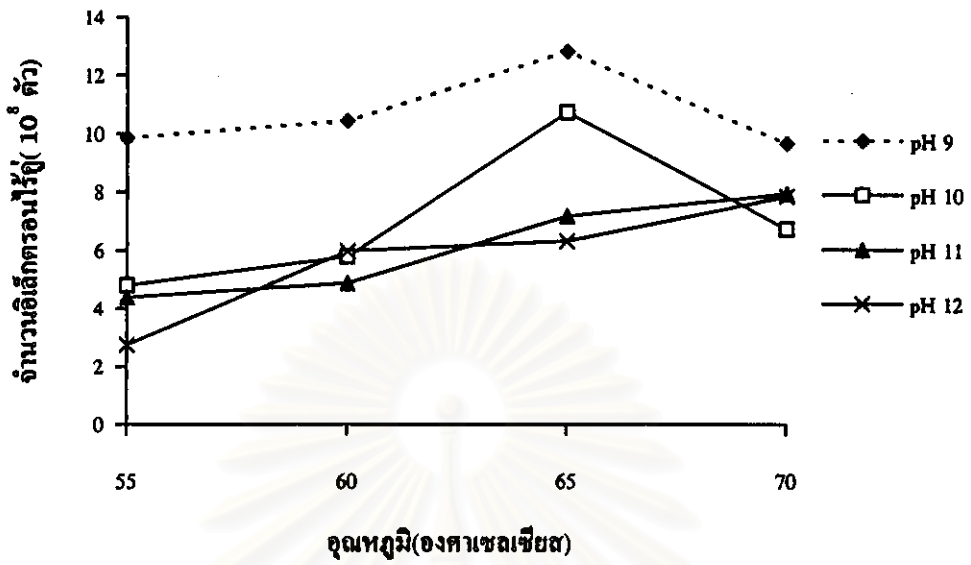
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดปรอทกับอุณหภูมิและพีเอช ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล



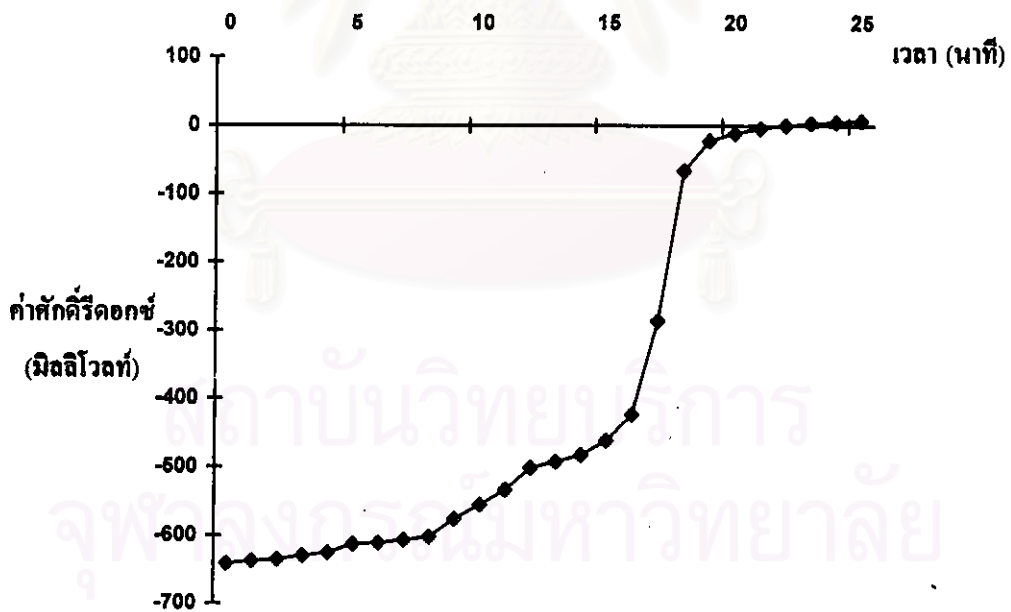
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมกับอุณหภูมิและพีเอช ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กกับอุณหภูมิและพีเอช ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล



รูปที่ 4.7 ผลเปรียบเทียบความเป็นแม่เหล็กของตะกอนที่ได้พิจารณาจากจำนวนอณูจุลินทรีย์ ที่ค่าพีเอชและอุณหภูมิต่างๆ ใช้ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าศักรีดออกซ์ของการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็ก ในน้ำเสียซีโอดีที่เงื่อนไขพีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล



รูปที่ 4.9 การดูดติดตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ด้วยแท่งแม่เหล็ก

ข. การศึกษาหาอัตราส่วนโมลที่เหมาะสม

การศึกษาอัตราส่วน โมลของเฟอร์สซิลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมดที่เหมาะสม ในการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ โดยใช้เงื่อนไขที่ได้จากข้อ 1 คือ ทีพีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราการเติมอากาศ 10 ลิตรต่อนาที การทดลองใช้ ปริมาณน้ำเสียซีโอดี 500 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นปรอท 72.08 มิลลิกรัมต่อลิตร, โครเมียม 15.44 มิลลิกรัมต่อลิตร และเหล็ก 38.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองแปรปริมาณเฟอร์สซิลเฟตเป็น 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1 โมล คิดเป็นอัตราส่วนโมลของเฟอร์สซิลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด หรือ Fe(II)/M เท่ากับ 18.65, 37.30, 74.60, 149.20 ตามลำดับ ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโมลของเฟอร์สซิลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมดในน้ำเสียนี้ จะเป็นประโยชน์ในการนำไปคำนวณหา ปริมาณเฟอร์สซิลเฟตที่จำเป็นต้องใช้ เพื่อให้กระบวนการเฟอร์ไรต์ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์และสามารถกำจัดโลหะหนักอย่างมีประสิทธิภาพ ผลการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์สรุปไว้ในตารางที่ 4.2

1. ผลของปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต

เนื่องจากเมื่อมีการเติมอากาศไอออนเฟอร์รัส(Fe^{2+})จะถูกออกซิไดซ์เป็นไอออนเฟอร์ริก(Fe^{3+}) ซึ่งทำให้ไอออนโลหะเข้าไปอยู่ในแลตทิซผลึก จากการทดลองพบว่า ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตมีผลต่อการกำจัดโลหะ และความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์กล่าวคือ จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.15 พบว่าแต่ละค่าของอัตราส่วนโมล $Fe(II)/M$ ทำให้เกิดผลในการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ค่าอัตราส่วนโมล 18.65 ให้ผลในการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับผลของอัตราส่วนโมล 74.60 และของค่าอัตราส่วนโมล 149.20 แต่ให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับค่าอัตราส่วนโมล 37.30 นอกจากนั้นผลการกำจัดมีแนวโน้มว่า ที่ค่าอัตราส่วนโมลมากจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามในทุกค่าอัตราส่วนโมลของการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็ก มีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 99%, 98%, 99% ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของปรอท, โครเมียม และเหล็กที่เหลือหลังการบำบัดมีค่าในช่วง 0.025-0.097, 0.201-0.329 และ 0.036-0.180 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของปรอทที่เหลืออยู่มีมากกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม (2539) ซึ่งกำหนดให้มีปรอทไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลืออยู่น้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม(2539) ซึ่งกำหนดให้มีโครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับผลของปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตต่อความเป็นสารแม่เหล็ก ซึ่งพิจารณาจากจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่ พบว่า ที่อัตราส่วนโมล 18.65, 37.30 และ 74.60 ให้ตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์มีความเป็นสารแม่เหล็กไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งให้จำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่เท่ากับ 10.3×10^8 , 11.2×10^8 และ 11.5×10^8 ตัว ตามลำดับ แต่ที่อัตราส่วนโมล 149.20 ให้ตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์มีความเป็นสารแม่เหล็กแตกต่างจากอัตราส่วน โมลอื่นอย่างมีนัยสำคัญ และให้จำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่เท่ากับ 14.0×10^8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และตะกอนที่ได้จากการทดลองทุกเงื่อนไขมีสีดำและหนัก

ในการพิจารณาเลือกอัตราส่วนโมลที่เหมาะสม นอกจากจะพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและโครเมียมในน้ำเสียซีโอดีแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงความเสถียรของตะกอนที่ได้, คุณสมบัติความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนและค่าใช้จ่ายในการบำบัดประกอบด้วย รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

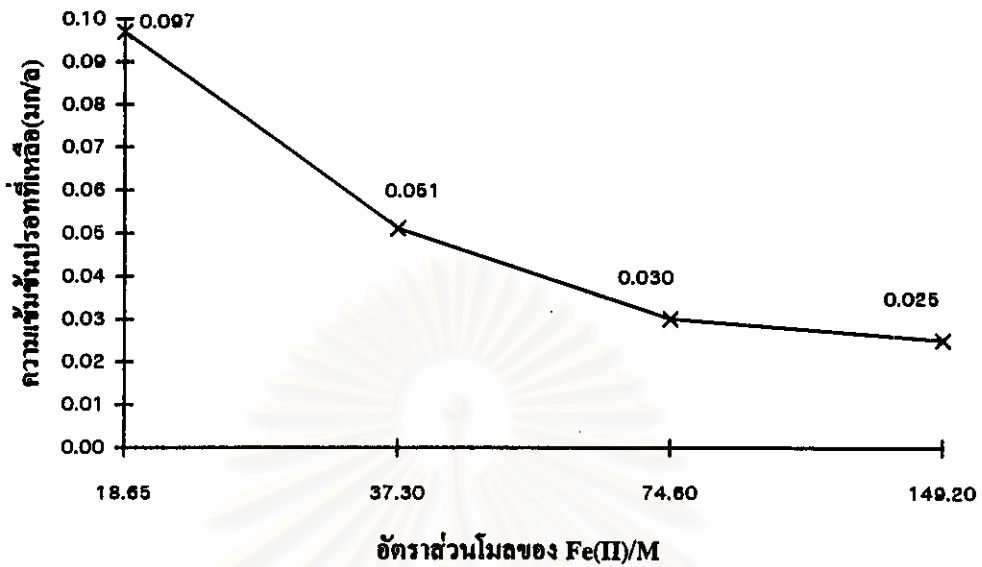
ตารางที่ 4.2 ผลการกำจัดปรอท,โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอไซด์ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโมลต่างๆ

Fe(II)/M	ความเข้มข้นโลหะหนัก(มก/ล)			ประสิทธิภาพการกำจัด(%)			จำนวนอิเล็กตรอน ไว้คู่ (10 ⁸ ตัว)	สี,ลักษณะตะกอน ความเป็นสารแม่เหล็ก	เวลาดักเก็บ (นาที)
	ปรอท	โครเมียม	เหล็ก	ปรอท	โครเมียม	เหล็ก			
18.65	0.097	0.329	0.180	99.86	97.87	99.53	10.3	ดำ, หนัก, +	15
37.30	0.051	0.302	0.160	99.93	98.04	99.58	11.2	ดำ, หนัก, +	25
74.60	0.030	0.248	0.073	99.96	98.39	99.81	11.5	ดำ, หนัก, +	40
149.20	0.025	0.201	0.036	99.97	98.70	99.91	14.0	ดำ,หนัก, +	60

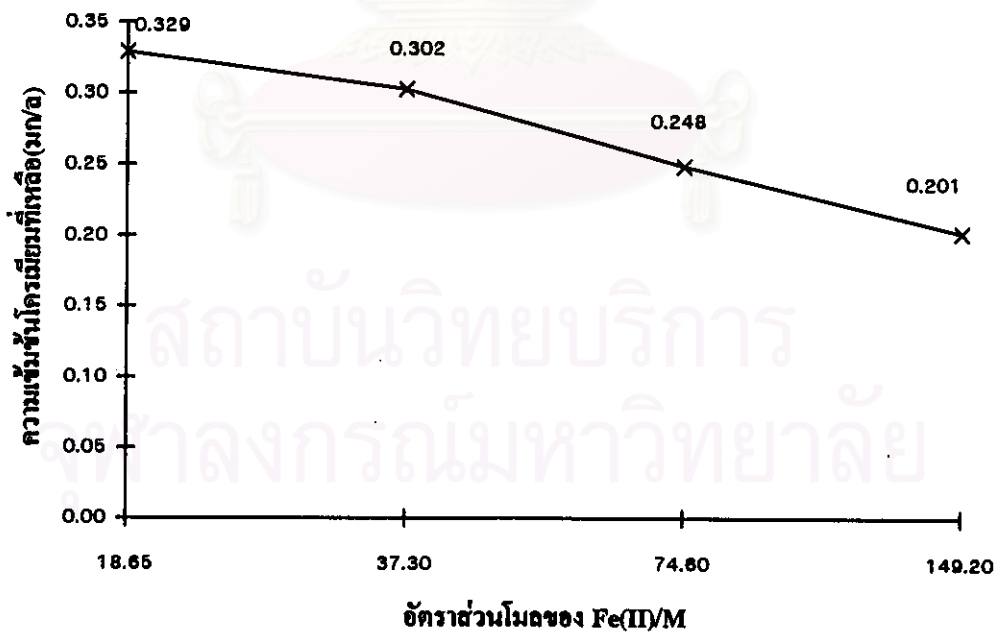
หมายเหตุ ความเข้มข้นโลหะก่อนกำจัดคือ ปรอท 72.08 มิลลิกรัมต่อลิตร, โครเมียม 15.44 มิลลิกรัมต่อลิตร และเหล็ก 38.25 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาดักเก็บ หมายถึง เวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นทำปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งค่าศักย์รีดอกซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งคงที่

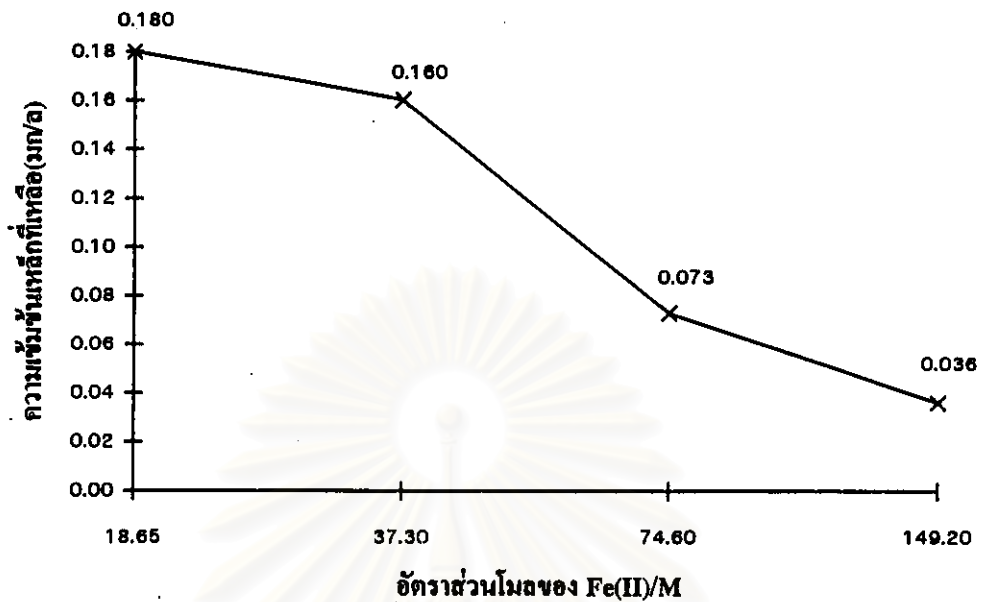
เครื่องหมาย + หมายถึง ความเป็นสารแม่เหล็กซึ่งตะกอนสามารถดูดติดได้ด้วยแท่งแม่เหล็ก



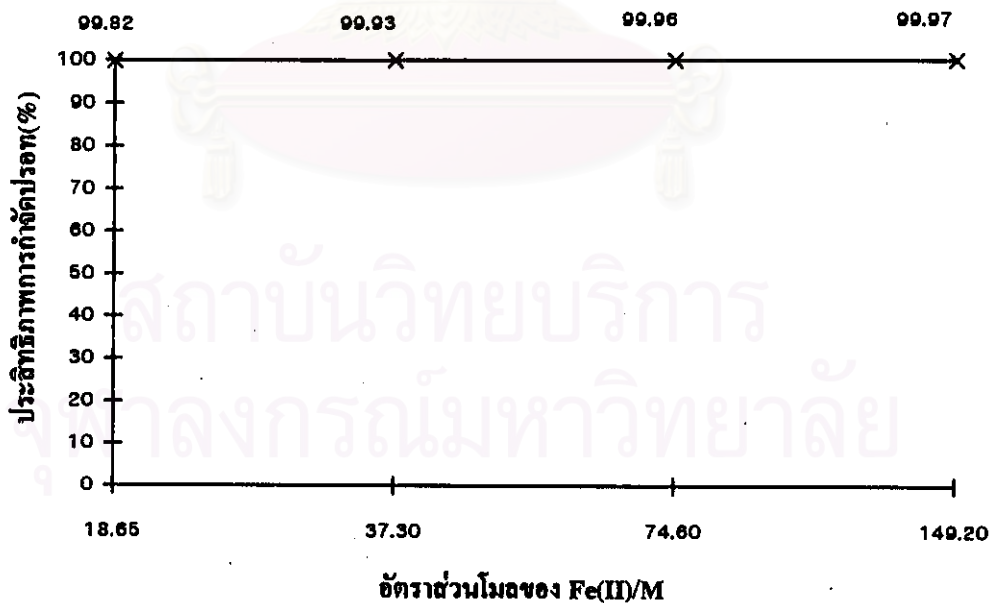
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นปรอทหลังการบำบัดกับอัตราส่วนโมลของเฟอร์รัสคลอไรด์ต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



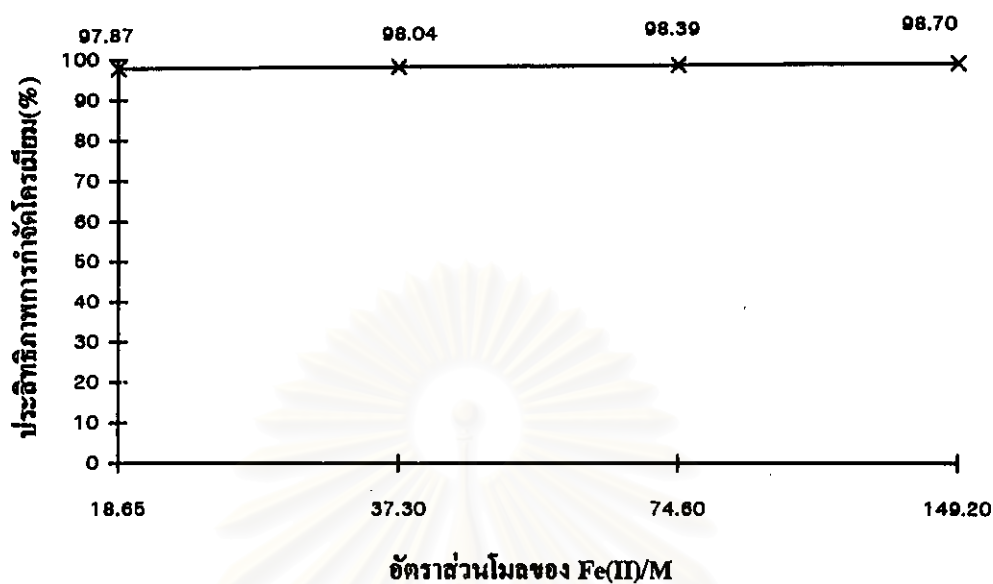
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโครเมียมหลังการบำบัดกับอัตราส่วนโมลของเฟอร์รัสคลอไรด์ต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



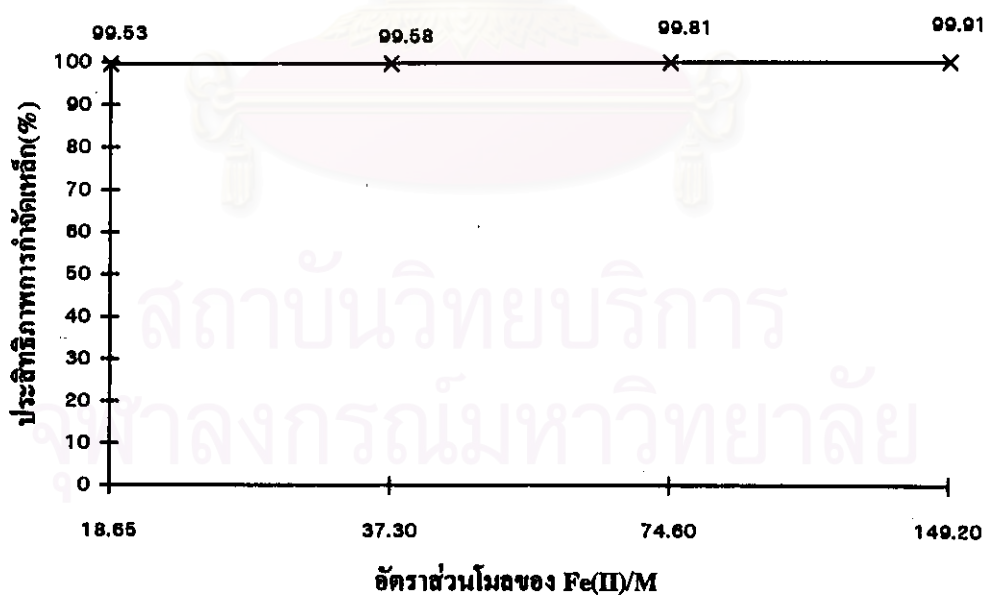
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเหล็กหลังการบำบัดกับอัตราส่วน โมลของเฟอร์ริซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



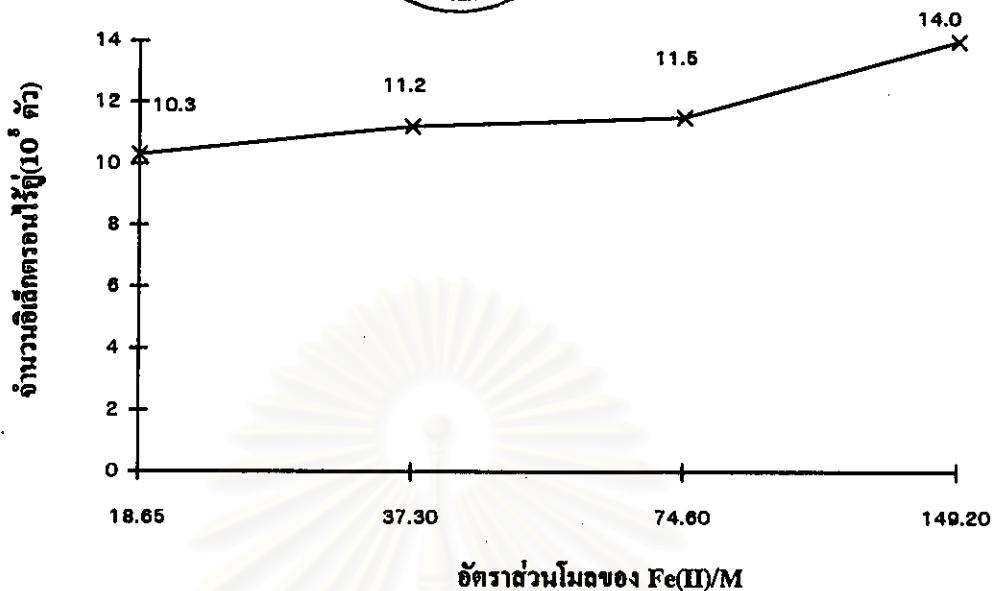
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดปรอทกับอัตราส่วน โมลของเฟอร์ริซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมกับอัตราส่วน โมลของเฟอร์รัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กกับอัตราส่วน โมลของเฟอร์รัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่กับอัตราส่วนโมลเฟอร์รัสซัลเฟต ต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

1.1 ความเสถียรของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์

ศึกษาความเสถียรของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และที่ค่าอัตราส่วนโมล Fe(II)/M เท่ากับ 18.65, 37.30, 74.60 และ 149.20 ด้วยวิธีการสกัดสาร น้ำสกัดมีค่าพีเอชเป็น 5.8 เขย่าเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำการกรองแยกน้ำ สกัด (น้ำใสส่วนบน) และตะกอนออกจากกัน นำน้ำสกัดไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของปรอท และโครเมียมที่เหลือ ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการชะละลายตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์

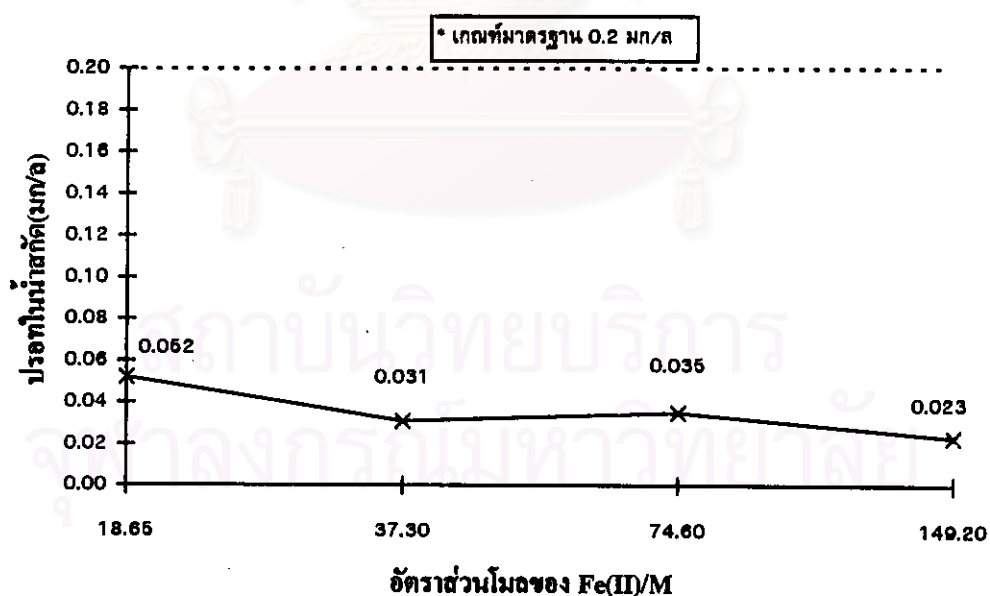
ความเข้มข้นโลหะหนัก ในน้ำสกัด	อัตราส่วนโมล Fe(II)/M				เกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2531)
	18.65	37.30	74.60	149.20	
ปรอท (มก/ล)	0.052	0.031	0.035	0.023	มากกว่า 0.2
โครเมียม (มก/ล)	0.069	0.031	0.012	0.012	มากกว่า 5

ก) การชะละลายปรอท จากผลการทดลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 พบว่า ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดมีค่าระหว่าง 0.023-0.052 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษที่กำหนดไว้ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในทุกค่าอัตราส่วนโมลของ Fe(II)/M ที่ทำการ

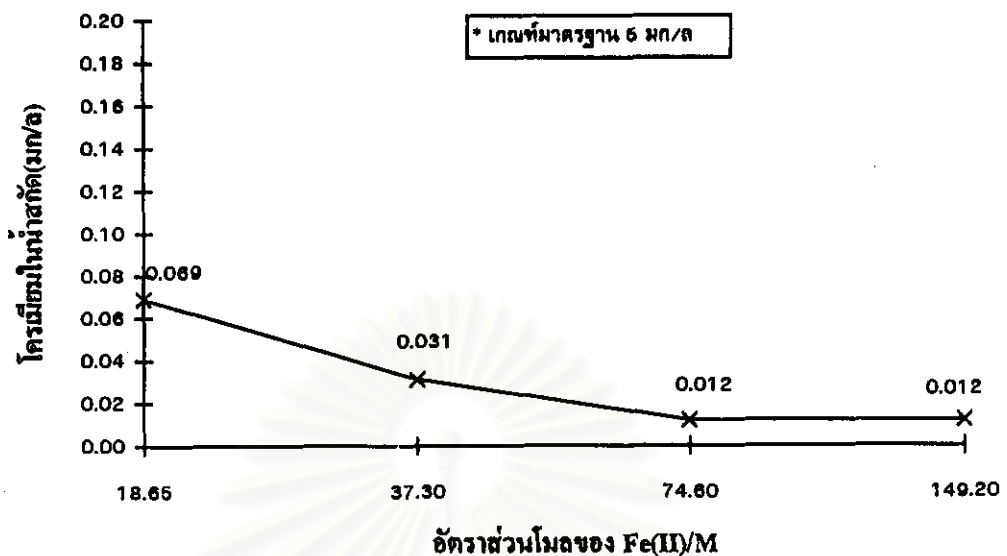
ทดลอง จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนโมลของ Fe(II)/M มากขึ้น มีแนวโน้มให้ความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดลดลง

ข) การชะละลายโครเมียม จากผลการทดลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 พบว่า ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดมีค่าระหว่าง 0.012-0.069 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษที่กำหนดไว้ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในทุกค่าอัตราส่วนโมลของ Fe(II)/M ที่ทำการทดลอง จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนโมลของ Fe(II)/M มากขึ้น มีแนวโน้มให้ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดลดลง

การที่ปรอทและโครเมียมสามารถถูกชะละลายออกมาจากตะกอนเฟอร์ไรต์ได้นั้น Tamaura, Tu และคณะ. (1991) กล่าวว่า เนื่องจากโลหะหนักเหล่านี้ถูกดูดซับอยู่บนผิวของเฟอร์ไรต์ หรืออยู่ในช่องในจุดแลตทิซอย่างหลวมๆ ใกล้ผิวของเฟอร์ไรต์ ทั้งนี้เพราะเมื่อใกล้จุดยุติของปฏิกิริยา (ในช่วงซึ่งค่าศักย์รีดอกซ์เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว) ปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างไม่สมบูรณ์ในการที่ทำให้ไอออนโลหะหนักเข้าไปอยู่ในแลตทิซผลึกสไปเนลเฟอร์ไรต์ การที่ตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์นี้มีโลหะหนักถูกชะละลายออกมาน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานสารพิษของกระทรวงอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงสามารถนำตะกอนไปถมหรือฝังได้ทันทีหรือนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ได้ต่อไปเนื่องจากมิใช่สารมีพิษ



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดกับอัตราส่วนโมลของเฟอร์รัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอชของน้ำชะละลายเท่ากับ 5.8 เวลา 6 ชม.

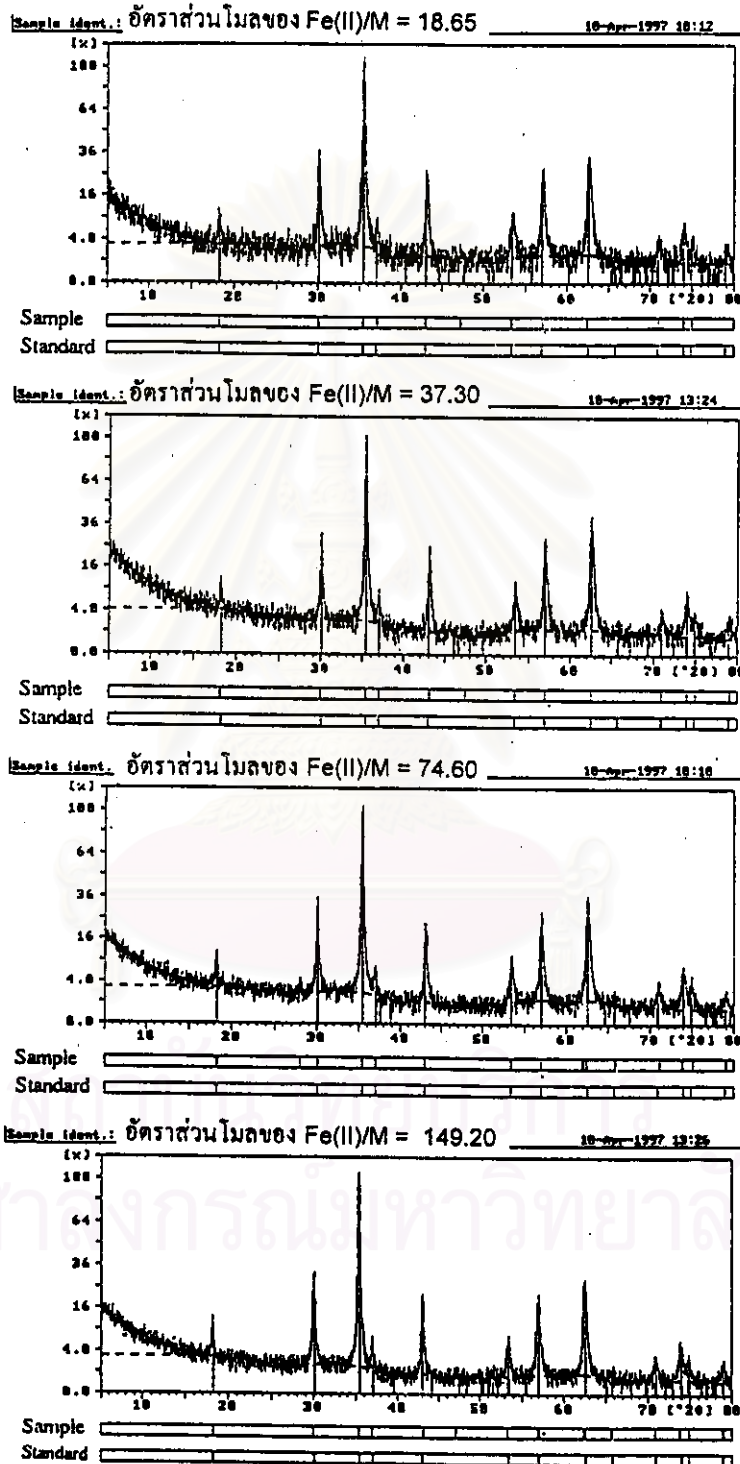


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดกับอัตราส่วนโมลของเฟอร์ริซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอชของน้ำชะละลายเท่ากับ 5.8 เวลา 6 ชม.

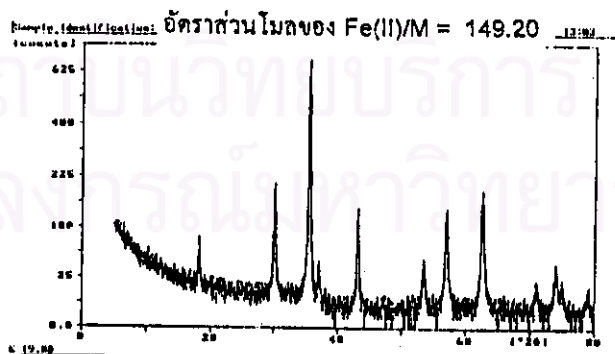
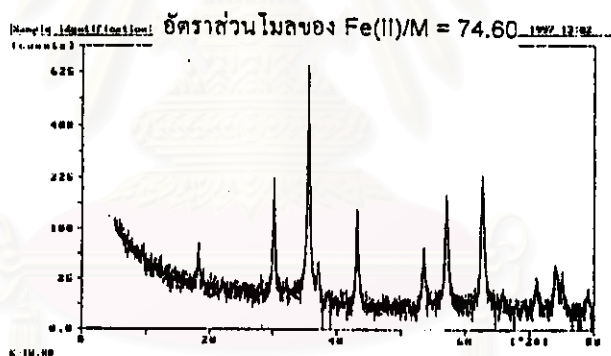
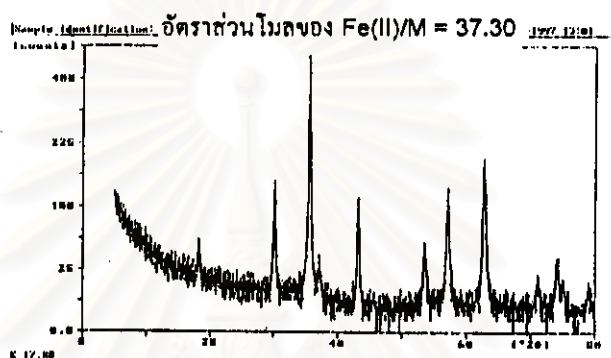
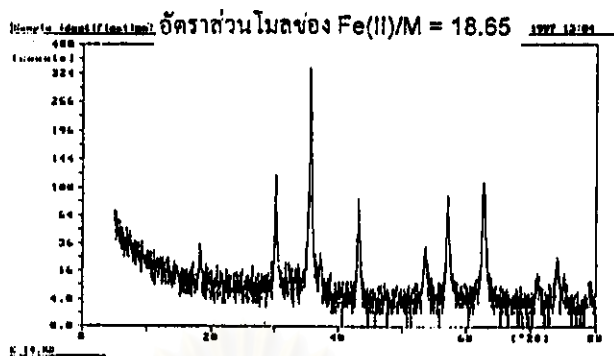
1.2 ยืนยันสมบัติความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์

ศึกษาตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ที่เงื่อนไข พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และค่าอัตราส่วนโมล 18.65, 37.30, 74.60 และ 149.20 โดยนำไปทดสอบยืนยันความเป็นสารแม่เหล็กด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เพาเตอร์ จากรูปที่ 4.19 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มของเส้นจากลวดลายการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์(X-ray diffraction pattern) ของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ในทุกค่าอัตราส่วนโมลของ Fe(II)/M กับความเข้มของเส้นของสารมาตรฐานแมกนีไทต์อย่างน้อย 3 เส้นพบว่า ตรงกัน จึงเป็นการยืนยันได้ว่าตะกอนที่ได้ในทุกค่าอัตราส่วนโมลมีสารประกอบหลักคือ แมกนีไทต์(Fe_3O_4) ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติความเป็นสารแม่เหล็กและมีโครงสร้างแบบสไปเนลเฟอร์ไรต์ ลวดลายการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ในทุกอัตราส่วนโมลของ Fe(II)/M จะปรากฏยอด(peak) 100% ของแมกนีไทต์ ที่ $2\theta = 35.4$ และไม่พบยอดของเกอไทต์ที่ตำแหน่ง $2\theta = 28.4$ ซึ่งไม่ใช่สารแม่เหล็กเลย นอกจากนี้จากลวดลายการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนที่ได้ระหว่างค่าอัตราส่วนโมลของ Fe(II)/M ที่ 18.65, 37.30, 74.60 และ 149.20 โดยเปรียบเทียบจากความสูงยอด 100% ของแมกนีไทต์ ที่ $2\theta = 35.4$ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่า เมื่อค่าอัตราส่วนโมลของ Fe(II)/M มากขึ้น ความสูงยอดที่ $2\theta = 35.4$ สูงขึ้นหรือความเป็นสารแม่เหล็กสูงขึ้น ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับเมื่อวิเคราะห์ด้วย ESR โดยดูผลจากจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่ และเนื่องจากคุณสมบัติ

ความเป็นสารแม่เหล็กนี้เอง ผลพลอยได้จากตะกอนเฟอร์ไรต์ที่ได้นี้จึงนำไปใช้ประโยชน์ทางสารแม่เหล็กได้



รูปที่ 4.19 ลวดลายการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และที่ค่าอัตราส่วน โมลต่างๆ



รูปที่ 4.20 ลวดลายการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ เมื่อเปรียบเทียบความสูงยอดที่ $2\theta = 35.4$ ที่ค่าอัตราส่วนโมลต่างๆ ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

1.3 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสียซีโอไซด์ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์

ในการบำบัดน้ำเสียซีโอไซด์ 1 ลิตร เมื่อทำการแยกเงินออกไปแล้ว น้ำเสียมีความเข้มข้นของปรอท 682 มิลลิกรัมต่อลิตร, โครเมียม 417 มิลลิกรัมต่อลิตร และเหล็ก 973 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาคำนวณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ที่ค่าอัตราส่วนโมล 18.65, 37.30, 74.60 และ 149.20 ในการคำนวณค่าใช้จ่ายนี้คิดเฉพาะสารเคมีที่ใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ราคา 37.45 บาทต่อกิโลกรัม, เฟอร์รัสซัลเฟต ราคา 26.75 บาทต่อกิโลกรัม และแก๊สไนโตรเจน ราคา 21.14 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ราคาสารเคมีนี้เป็นราคา ณ เดือนมิถุนายน 2540 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้คำนวณได้จากอัตราส่วนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 6.8 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองข้อ ข1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้และค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอไซด์ 1 ลิตร(ไม่รวมการบำบัดเงิน)ที่ค่าอัตราส่วนโมล Fe(II)/M 18.65, 37.30, 74.60 และ 149.20 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอไซด์ 1 ลิตรด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

Fe(II)/M	ปริมาณสารเคมีที่ใช้(กิโลกรัม)			ค่าใช้จ่าย(บาท)			ค่าใช้จ่ายรวม (บาท)
	NaOH	FeSO ₄ ·7H ₂ O	N ₂ (ลิตร)	NaOH	FeSO ₄ ·7H ₂ O	N ₂	
18.65	0.144	0.148	60	5.39	3.96	1.27	10.62
37.30	0.290	0.297	60	10.86	7.94	1.27	20.07
74.60	0.600	0.616	60	22.47	16.48	1.27	40.22
149.20	1.17	1.19	60	43.82	31.83	1.27	76.92

กรณีที่ไม่ใช้แก๊สไนโตรเจนในกระบวนการเฟอร์ไรต์ ที่ค่าอัตราส่วนโมล 18.65, 37.30, 74.60 และ 149.20 จะมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอไซด์ 1 ลิตรดังนี้คือ 9.35, 18.8, 38.95 และ 75.65 บาท ตามลำดับ และเมื่อคิดค่าไฟฟ้าในการปรับอุณหภูมิให้สูงถึง 65°C (250 วัตต์) และค่าไฟฟ้าของปั๊มอากาศ(10 วัตต์) จะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกไม่เกิน 1.51% และ 1.71% ของกรณีการใช้และไม่ใช้แก๊สไนโตรเจนตามลำดับ เช่นในกรณีที่อัตราส่วนโมล 18.65 ต้องใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 0.0625 หน่วย เมื่อคิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 2.50 บาท ดังนั้นต้องเสียค่าไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลิตร เท่ากับ 0.16 บาท ดังนั้นรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดเท่ากับ 10.78 บาท(ใช้ N₂) และ 9.51 บาท(ไม่ใช้ N₂)การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะ, ความเป็นสารแม่เหล็ก และความเสถียรของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ของการใช้และไม่ใช้ในโตรเจนแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้ในโตรเจนของผลการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็ก ในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมล 149.20 และผลการทดสอบการสกัดสารที่พีเอช 5.8 ในเวลา 6 ชั่วโมง

ลักษณะสมบัติ	ใช้ในโตรเจน	ไม่ใช้ในโตรเจน
ความเข้มข้นปรอทที่เหลือ (มก/ล)	0.025	0.039
ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (มก/ล)	0.201	0.117
ความเข้มข้นเหล็กที่เหลือ (มก/ล)	0.036	0.021
ประสิทธิภาพการกำจัดปรอท (%)	99.97	99.95
ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (%)	98.70	99.24
ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก (%)	99.91	99.95
จำนวนอิเล็กตรอน ไร้คู่ (10^8 ตัว)	14.0	12.3
เวลากักเก็บ (นาที)	60	60
สีและลักษณะตะกอน	ดำ, หนัก	ดำ, หนัก
ความเข้มข้นปรอทในน้ำสกัด (มก/ล)	0.023	0.016
ความเข้มข้นโครเมียมในน้ำสกัด(มก/ล)	0.012	0.021

จากตารางที่ 4.5 พบว่าการใช้และไม่ใช้แก๊สในโตรเจนในการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโมล 149.20 ให้ผลในการกำจัดปรอทและโครเมียม และความเป็นสารแม่เหล็กแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผลการกำจัดเหล็กไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามการให้ผลที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของการใช้และไม่ใช้แก๊สในโตรเจน ไม่แสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่า ในการกำจัดโลหะนั้นการใช้แก๊สในโตรเจนดีกว่าไม่ใช้แก๊สในโตรเจนหรือกลับกันในกระบวนการเฟอร์ไรต์ สำหรับการไม่ใช้แก๊สในโตรเจนให้ปรอทเหลืออยู่ 0.039 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดให้มีปรอทไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับการใช้ในโตรเจนในกระบวนการเฟอร์ไรต์ ก็มีปรอทเหลืออยู่ 0.025 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนผลการกำจัดโครเมียมพบว่า การไม่ใช้แก๊สในโตรเจนในกระบวนการเฟอร์ไรต์ให้โครเมียมเหลืออยู่ 0.117 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดให้มีโครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่นเดียวกับการใช้ในโตรเจนในกระบวนการเฟอร์ไรต์ซึ่งให้โครเมียมเหลืออยู่ 0.201 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่สำหรับผลความเป็นสารแม่เหล็ก การใช้แก๊สในโตรเจน

ให้ตะกอนมีจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่เท่ากับ 14.0×10^8 ตัว ส่วนการไม่ใช้ในโตรเจนให้ตะกอนที่มีจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่เท่ากับ 12.3×10^8 ตัว จะเห็นได้ว่าการใช้แก๊สในโตรเจนให้ตะกอนที่มีความเป็นสารแม่เหล็กดีกว่าการไม่ใช้ในโตรเจน 12.14% ทั้งนี้เนื่องจากการใช้แก๊สในโตรเจนเพื่อทำการไล่ออกซิเจนที่มีอยู่ในน้ำเสียก่อนใส่สารเคมี(เฟอร์รัสซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์)และเติมอากาศจะทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนผลการทดสอบการชะละลายทั้งใช้และไม่ใช้ในโตรเจนในกระบวนการเฟอร์ไรต์ปรอทถูกชะละลายออกมาน้อยกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และโครเมียมถูกชะละลายออกมาน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงไม่ต้องนำไปทำลายฤทธิ์อีกเนื่องจากมีไซสารมีพิษ นำไปถมหรือฝังได้เลยหรือนำไปใช้ประโยชน์ทางสารแม่เหล็กได้ต่อไป

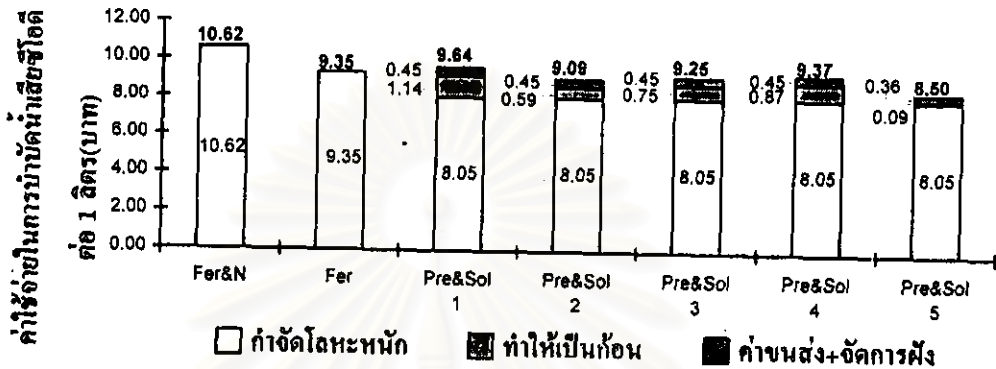
2. การพิจารณาเลือกอัตราส่วนโมลที่เหมาะสม

ตามที่กล่าวไว้ตอนต้นว่าอัตราส่วนโมลของ Fe(II)/M ที่เหมาะสมพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและโครเมียมในน้ำเสียซีโอดี, ความเสถียรของตะกอนที่ได้, ความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนที่ได้ และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนัก ดังนั้นเมื่อพิจารณาตามองค์ประกอบที่กล่าวมาในหัวข้อ 1.1, 1.2 และ 1.3 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนโมลของ Fe(II)/M เท่ากับ 18.65 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและโครเมียมมากกว่า 99% และ 98% ตามลำดับ (รูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14) ให้ตะกอนที่มีความเสถียรสูงซึ่งปรอทและโครเมียมถูกชะละลายออกมามากกว่าเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษของกระทรวงอุตสาหกรรม(รูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18) และได้ตะกอนสไปเนลเฟอร์ไรต์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (ตามรูปที่ 4.19) ได้ดีเช่นเดียวกับที่ค่าอัตราส่วนโมลที่สูงกว่า แต่ให้ค่าใช้จ่ายประหยัดกว่าที่ค่าอัตราส่วนโมลอื่นที่สูงกว่ามาก ดังนั้น จึงเลือกอัตราส่วนโมลของ Fe(II)/M เท่ากับ 18.65 ทีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอดีระหว่างกระบวนการเฟอร์ไรต์กับกระบวนการตกตะกอนผลึกและการทำตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์

ในการบำบัดน้ำเสียซีโอดีไอออนเงินจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ จากงานวิจัยของทวงรัตน์ แก้วล้อม(2537) กระบวนการนำกลับโลหะเงินเสียค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีทั้งหมดเท่ากับ 1.98 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ส่วนโลหะที่เหลือในน้ำเสียหลังจากแยกไอออนเงินออกแล้วจะถูกกำจัดต่อไปด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์หรือกระบวนการตกตะกอนผลึกทางเคมี สำหรับการคำนวณเปรียบเทียบค่า

ใช้จ่ายเฉพาะสารเคมีในการบำบัดน้ำเสียซีโอดี 1 ลิตร (ไม่รวมการนำกลับโลหะเงิน) ของกระบวนการเฟอร์ไรต์กับกระบวนการตกตะกอนผลึกและการทำตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ นั้น กำหนดคิราคาค่าสารเคมี ณ เดือนมิถุนายน 2540 และน้ำเสียซีโอดี 1 ลิตรให้ปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 150 กรัม ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสรุปไว้ในรูปที่ 4.21 และมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอดี 1 ลิตรของกระบวนการเฟอร์ไรต์กับกระบวนการตกตะกอนผลึกและทำตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์

หมายเหตุ Fer&N = ค่าใช้จ่ายกระบวนการเฟอร์ไรต์เมื่อมีการใช้ในโตรเจน

Fer = ค่าใช้จ่ายกระบวนการเฟอร์ไรต์เมื่อไม่มีการใช้ในโตรเจน

Pre&Sol 1 = ค่าใช้จ่ายกระบวนการตกตะกอนผลึกและการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์

Pre&Sol 2 = ค่าใช้จ่ายกระบวนการตกตะกอนผลึกและการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมแกลลอลิกไนต์

Pre&Sol 3 = ค่าใช้จ่ายกระบวนการตกตะกอนผลึกและการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมแกลลอลิกไนต์(เติม Na_2S 1.75 เท่าทุกยี่ห้อ)

Pre&Sol 4 = ค่าใช้จ่ายกระบวนการตกตะกอนผลึกและการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมแกลลอลิกไนต์(เติม Na_2S 3 เท่าทุกยี่ห้อ)

Pre&Sol 5 = ค่าใช้จ่ายกระบวนการตกตะกอนผลึกและบำบัดกากตะกอนโลหะหนักที่ศูนย์กำจัดกากแสมดำ

ค่าใช้จ่ายการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ที่เงื่อนไขพิเศษ 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโมล $Fe(II)/M$ เท่ากับ 18.65 เมื่อมีการใช้ในโตรเจนเท่ากับ 10.62 บาทต่อลิตร และกรณีที่ไม่มีการใช้ในโตรเจนเท่ากับ 9.35 บาทต่อลิตร ส่วนค่าใช้จ่ายการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการตกตะกอนผลึกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่พีเอช 9.5 (พวงรัตน์ แก้วล้อม, 2537) เท่ากับ 8.05 บาทต่อลิตร

สำหรับการทำกากตะกอนโลหะหนักซึ่งได้จากกระบวนการตกตะกอนผลึกให้เป็นก้อนเพื่อทำลายฤทธิ์ก่อนนำไปฝังนั้น จากงานวิจัยของนฤมิตร คินิมาน(2538) เมื่อนำตะกอนโลหะหนักมาทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์โดยใช้สัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อโลหะหนักเท่ากับ 4:1 มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 1.14 บาทต่อน้ำเสียซีโอดี 1 ลิตร ถ้าหากใช้วัสดุประสานเป็นปูนซีเมนต์ผสมแกลลอลิกไนต์(1:1)ในอัตราส่วนต่อตะกอนโลหะหนักเท่ากับ 4:1 จะมีค่าใช้จ่ายลดลงคือเท่ากับ 0.59 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร แต่ทั้ง 2 กรณียังคงมีปรอทถูกชะละลายออกมาได้ซึ่งเข้าข่ายเกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษของกระทรวง



อุตสาหกรรม(2531) ในงานวิจัยของ อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย(2540) จึงได้มีการเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงในตะกอนโลหะหนักก่อนทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์(1:1)ในอัตราส่วนต่อตะกอนโลหะหนักเท่ากับ 4:1 ซึ่งที่การเติมโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของค่าความต้องการทางทฤษฎี มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 0.75 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร และที่การเติมโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 3 เท่าของค่าความต้องการทางทฤษฎี มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 0.87 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร

ค่าใช้จ่ายในการนำตะกอนโลหะหนักที่เป็นก้อนแข็งแล้วนำไปฝังนั้น กำหนดให้จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นหน่วยบำบัดตะกอนโลหะหนัก คิดค่าขนส่งและค่าจัดการฝังตะกอนที่ราชบุรีดังนี้

- ค่าขนส่งจากห้องปฏิบัติการ ไปราชบุรี(K_1) 2.5 บาทต่อตัน-กิโลเมตร
- ค่าจัดการฝังตะกอนก้อนแข็งที่ราชบุรี(K_2) 100 บาทต่อตัน
- ระยะทางจากห้องปฏิบัติการไปราชบุรี(D_1) 200 กิโลเมตร

คิดปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 0.15 กิโลกรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร จะได้ก้อนแข็ง(S_1) 0.75 กิโลกรัม (ปูนซีเมนต์ต่อโลหะหนัก 4:1) ดังนั้นค่าขนส่งก้อนแข็งรวมค่าจัดการฝัง($S_1K_1D_1/1000 + S_1K_2/1000$) เท่ากับ 0.45 บาท

ในกรณีนำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนผลึก ส่งไปกำจัดที่ศูนย์บริการกำจัดกากตะกอนแสมดำ คิดค่าใช้จ่ายดังนี้คือ

- ค่าขนส่งตะกอนจากห้องปฏิบัติการ ไปศูนย์กำจัดกากแสมดำ(K_3) 2.5 บาทต่อตัน-กิโลเมตร
- ค่าบำบัดตะกอนที่ศูนย์กำจัดแสมดำ(K_4) 450 บาทต่อตัน
- ค่าขนส่งจากศูนย์กำจัดกากแสมดำไปราชบุรี(K_5) 2.5 บาทต่อตัน-กิโลเมตร
- ค่าจัดการฝังตะกอนที่ราชบุรี(K_2) 100 บาทต่อตัน
- ระยะทางจากห้องปฏิบัติการไปศูนย์กำจัดกากแสมดำไป-กลับ(D_2) 60 กิโลเมตร
- ระยะทางจากศูนย์กำจัดกากแสมดำไปราชบุรี(D_3) 150 กิโลเมตร

เมื่อคิดกากตะกอนโลหะหนัก(S_2) 0.15 กิโลกรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการบำบัดตะกอนและค่าจัดการฝังรวมค่าขนส่ง($(K_3S_2D_2/1000 + K_4S_2/1000) + (K_5S_1D_3/1000 + K_2S_1/1000)$) เท่ากับ 0.09 และ 0.36 บาท ตามลำดับ

และถ้าหากนำน้ำเสียซีไอดีส่งไปบำบัดที่ศูนย์บริการแสมดำ ซึ่งคิดค่าบำบัดน้ำเสีย(K_6) 45 บาทต่อตัน ดังนั้นปริมาณน้ำเสีย(Q) 1 ลิตร ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดทั้งหมด($K_6QD_2/1000 + K_6Q/1000 + K_5S_1D_3/1000 + K_2S_1/1000$) เท่ากับ 0.48 บาท

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ทั้งหมดนี้เป็นเพียงการคิดเฉพาะค่าใช้จ่ายทางด้านสารเคมีเท่านั้น ในความเป็นจริงต้องมีค่าใช้จ่ายทางด้านอื่นๆอีกเช่น ค่าไฟฟ้า, ค่าบำรุงรักษา, ค่าแรงงาน, ค่าที่ดิน เป็นต้น ในการวิเคราะห์ทางด้านต้นทุน-ผลประโยชน์จึงต้องทำการทดลองกับโรงงานนำร่องต่อไป