

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การบำบัดน้ำเสียทองแดงและน้ำเสียนิกเกิลโดยวิธีรีดักชัน
ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์



นางสาวเมย์ แซ่ดี
นางสาวอรุณลักษณ์ จิรธนภิญโญ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 55574
วัน,เดือน,ปี 19 พ.ค. 2548

.b.....
.i.....

**Copper and Nickel ions Treatment from Wastewater by Chemical Reduction
with Sodium Borohydride**

Miss Miey

Saelee

Miss Aroonluck

Jirathanapinyo

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of

Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2003

หัวข้อโครงการพิเศษ การบำบัดน้ำเสียของแควและน้ำเสียนิกเกิล โดยวิธีรีดักชัน
ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์


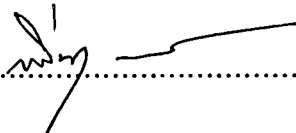
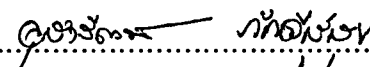
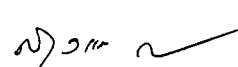
นักศึกษา นางสาวเมย์ แซ่ลี
นางสาวอรุณลักษณ์ จิรชนกัญญา

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์	
กรรมการ อาจารย์ กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
กรรมการ ดร. อุตารัตน์ ภักดีสุข	
กรรมการ ผศ.ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์	



(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)
หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงการพิเศษเรื่อง	การบำบัดน้ำเสียทองแดงและน้ำเสียนิกเกิลโดยวิธีรีดักชันด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์
นักศึกษา	นางสาวเมย์ แซ่ลี่ นางสาวอรุณลักษณ์ จิรชนิกุลโย
ภาควิชา	เคมี
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2546
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์

บทคัดย่อ

การศึกษาการกำจัดไอออนของโลหะจากน้ำเสีย ที่มีสารออกซิไดซ์เจือปน โดยวิธีรีดักชันด้วย SBH (NaBH_4 1.2% ใน NaOH 4%) การทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ 2 ชนิด คือน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}

ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัด น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เป็น 30 และ 20 นาที ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} คือ พีเอชเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cu^{2+} เท่ากับ 300 มก./ล. และอัตราส่วนโดยโมลของ SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4 ตะกอนที่เกิดขึ้นจมตัวได้ดี โดยให้เปอร์เซ็นต์การบำบัด เท่ากับ 99.98 เปอร์เซ็นต์

ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดเสียน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} มีค่าพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ni^{2+} และอัตราส่วนโดยโมลของ SBH : Ni^{2+} เป็น 3, 300 มก./ล. และ 2 : 2 ตามลำดับ ตะกอนที่เกิดขึ้นจมตัวได้ค่อนข้างดี โดยให้เปอร์เซ็นต์การบำบัด เท่ากับ 99.96 เปอร์เซ็นต์

Special Project Title	Copper and Nickel Ions Treatment from Wastewater by Chemical Reduction with Sodium Borohydride
Name	Miss Miei Saelee Miss Aroonluck Jirathanapinyo
Department	Chemistry
Program	Environment Resources Chemistry
Academic Year	2003
Special Project Advisor	Asst.Prof.Dr. Suwan Chaiyasith

Abstract

In this work, the removal of metal ions from wastewater by chemical reduction with sodium borohydride have been investigated. The results showed that the time for treatment of Cu^{2+} and Ni^{2+} for synthetic wastewater were 30 and 20 minutes, respectively. At a pH of 3, the Cu^{2+} concentration of 300 mg/L and the SBH: Cu^{2+} molar ratio of 3:4, the removal efficiency of Cu^{2+} was found to be 99.98 %.

The optimum conditions for removal of Ni^{2+} were at the pH of 3, the Ni^{2+} concentration of 300 mg/L and the SBH: Ni^{2+} molar ratio of 2:2. The removal efficiency of Ni^{2+} was found to be 99.96 %.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือในการให้คำปรึกษา และ คำชี้แนะต่างๆ ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่ ผศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษในครั้งนี้ทุกท่าน สำหรับคำแนะนำ และ ท้วงติงให้มีการแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในทุกด้าน ขอขอบคุณเพื่อน ๆ รวมถึงรุ่นพี่ รุ่นน้องทุก ๆ คน ที่ให้ความช่วยเหลือ และ ให้ความหวังดีต่อกันเสมอ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติ พี่น้อง ที่ให้ความรัก ความห่วงใย คอยช่วยเหลือในด้านปัจจัยต่าง ๆ รวมทั้งให้กำลังใจตลอดมาจนก้าวพ้นอุปสรรคทุกอย่างมาได้ด้วยดี

นางสาวเมย์ แซ่ลี

นางสาวอรุณลักษณ์ จิรธนภิญโญ

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	สารออกซิไดซ์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมี	11
ตารางที่ 2.2	สารรีดิวซ์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมี	11
ตารางที่ 2.3	ข้อดีและข้อจำกัดของการตกตะกอน โลหะ ไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์	18
ตารางที่ 2.4	อัตราส่วนน้ำหนักของโลหะที่ถูกรีดิวซ์ต่อน้ำหนักของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ใช้	20
ตารางที่ 2.5	การควบคุมกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยพีเอช	21
ตารางที่ 2.6	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดเฉื่อย (E^0) ที่ 25 องศาเซลเซียส ที่ใช้ในระบบบำบัดแบบเคมี	24
ตารางที่ 3.1	แสดงถึงปริมาณของสารละลายสต็อกที่ต้องใช้เพื่อเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	35
ตารางที่ 3.2	แสดงถึงปริมาณของแบลจก์และน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หรือน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ที่ต้องใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ก่อนทดลอง	37
ตารางที่ 3.3	วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการทดลอง	44
ตารางที่ 4.1	แสดงค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ ค่าพีเอชหลังบำบัด และตะกอนทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+}	49
ตารางที่ 4.2	แสดงความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ค่าพีเอชหลังบำบัด และตะกอนทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+}	52
ตารางที่ 4.3	แสดงอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ต่าง ๆ ที่ใช้ ค่าพีเอชหลังบำบัด ตะกอนทั้งหมดที่เกิดหลังบำบัด และเปอร์เซ็นต์ทองแดงในตะกอนที่เกิดทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+}	56
ตารางที่ 4.4	แสดงค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ ค่าพีเอชหลังบำบัด และตะกอนทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	64
ตารางที่ 4.5	แสดงความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ค่าพีเอชหลังบำบัด และตะกอนทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	67
ตารางที่ 4.6	แสดงอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} ต่าง ๆ ค่าพีเอชหลังบำบัด และตะกอนทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า	
ตารางที่ ก.1	แสดงปริมาณสารละลายสตัด้อมมาตรฐานเข้มข้น 100 มก./ล. ที่ใช้เตรียม สารละลายมาตรฐานเข้มข้น 2-10 มก./ล. ปริมาตร 25 มล.	79
ตารางที่ ก.2	แสดงถึงปริมาณของสารละลาย SBH (มล.) ที่ใช้ทดลองกับน้ำเสีย สังเคราะห์ Cu^{2+}	81
ตารางที่ ก.3	แสดงถึงปริมาณของสารละลาย SBH (มล.) ที่ใช้ทดลองกับน้ำเสีย สังเคราะห์ Ni^{2+}	81
ตารางที่ ข.1	ค่า ORP และ ค่าพีเอช ที่เวลาต่าง ๆ ในการหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ใน การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cu^{2+} และ Ni^{2+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น ต่าง ๆ	83
ตารางที่ ข.2	ผลการทดลองการหาสถานะและปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์ Cu^{2+}	85
ตารางที่ ข.3	ผลการทดลองการหาสถานะและปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์ Ni^{2+}	87
ตารางที่ ง.1	แสดงถึงส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน	104

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	ความสามารถในการละลายของโลหะหนักที่พีเอชต่าง ๆ 14
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักต่าง ๆ 15
รูปที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายกับความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์ 16
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ORP (mV.) กับเวลา (นาท) ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 45
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา (นาท) ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 46
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Cu^{2+} ที่เหลือ (มก./ล.) และมาตรฐาน Cu^{2+} ในน้ำทิ้ง กับพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} 47
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัด Cu^{2+} กับพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} 48
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) กับพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ 48
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Cu^{2+} ที่เหลือ (มก./ล.) และมาตรฐาน Cu^{2+} ในน้ำทิ้งกับความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} 50
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัด Cu^{2+} กับความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} 51
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) กับความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} 51
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Cu^{2+} ที่เหลือ (มก./ล.) และมาตรฐาน Cu^{2+} ในน้ำทิ้ง กับอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ต่าง ๆ ที่ใช้กับน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} 53
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัด Cu^{2+} กับอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ต่าง ๆ ที่ใช้ กับน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} 54

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) กับอัตราส่วน โดยโมล SBH : Cu^{2+} ต่าง ๆ ที่ใช้ กับน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+}	54
รูปที่ 4.12	น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หลังบำบัด ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4	56
รูปที่ 4.13	น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หลังบำบัด ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 4 : 4	57
รูปที่ 4.14	ตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4	59
รูปที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ORP (mV.) กับเวลา (นาทิจ) ในการเกิดปฏิกิริยา รีดักชันของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	60
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา (นาทิจ) ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	61
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Ni^{2+} ที่เหลือ (มก./ล.) และมาตรฐาน Ni^{2+} ในน้ำทิ้งกับพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	62
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัด Ni^{2+} กับพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ ของ น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	63
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) กับพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	63
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Ni^{2+} ที่เหลือ (มก./ล.) และมาตรฐาน Ni^{2+} ในน้ำทิ้งกับความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	65
รูปที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัด Ni^{2+} กับความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	66
รูปที่ 4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) กับความเข้มข้น เริ่มต้นต่าง ๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	66
รูปที่ 4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Ni^{2+} ที่เหลือ (มก./ล.) และมาตรฐาน Ni^{2+} ในน้ำทิ้งกับอัตราส่วน โดยโมล SBH : Ni^{2+} ต่าง ๆ ที่ใช้ กับน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	68

สารบัญรูปรู (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัด Ni^{2+} กับอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} ต่าง ๆ ที่ใช้ กับน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	69
รูปที่ 4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) กับอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} ต่าง ๆ ที่ใช้ กับน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}	69
รูปที่ 4.26	น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} หลังบำบัด ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และ อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2	71
รูปที่ 4.27	น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} หลังบำบัด ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และ อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 3 : 2	71
รูปที่ 4.28	ตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2	73
รูปที่ ค.1	ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และปริมาณ SBH ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4	90
รูปที่ ค.2	ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และปริมาณ SBH ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4	91
รูปที่ ค.3	ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และปริมาณ SBH ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 4 : 4	92
รูปที่ ค.4	ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และปริมาณ SBH ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 1 : 2	93
รูปที่ ค.5	ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และปริมาณ SBH ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2	94

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ ค.6	ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และปริมาณ SBH ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 3 : 2	95
รูปที่ ง.1	ส่วนประกอบของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	100
รูปที่ ง.2	การเกิดทรานซิชันของอิเล็กตรอน โดยใช้อะตอมมิกโมเดล (atomic model)	108
รูปที่ ง.3	แผนภาพองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่อง XRFS	109

สัญลักษณ์และคำย่อ

มก./ล.	หน่วยของความเข้มข้นของสารละลายหนึ่ง ๆ โดยมีปริมาณของตัวถูกละลาย หน่วยเป็นมิลลิกรัม ละลายอยู่ในสารละลายนั้น ๆ โดยมีปริมาตรของสารละลาย หน่วยเป็นลิตร (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Cu^{2+}	โลหะทองแดงที่อยู่ในสถานะ ที่มีประจุบวก 2 ซึ่งจะอยู่ในสถานะที่ละลายน้ำได้ โดยมีมาตรฐานในน้ำทิ้งทั่วไป คือ 2 มก./ล. (Copper II Ion)
E°	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโตรดเดี่ยว
K_{sp}	ค่าคงที่ของผลคูณของการละลาย (Solubility Product Constants)
ISP	ประเภทของการตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์ในรูปที่ละลายน้ำได้น้อย เช่น เฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) (Insoluble Sulfide Precipitation)
mV.	หน่วยมิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นหน่วยของความต่างศักย์ที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างที่มีการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Milli Volt)
Ni^{2+}	โลหะนิกเกิลที่อยู่ในสถานะที่มีประจุบวก 2 ซึ่งจะอยู่ในสถานะที่ละลายน้ำได้ โดยมีมาตรฐานในน้ำทิ้งทั่วไป คือ 1 มก./ล. (Nickel II Ion)
ORP	ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential)
SBH	โซเดียมโบโรไฮไดรด์ นิยมใช้เป็นรีดิวซิงส์เอเจนต์ในการเปลี่ยนโลหะที่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปไม่ละลายน้ำ (Sodium Borohydride)
SSP	ประเภทของการตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์ในรูปสารละลาย เช่น โซเดียมซัลไฟด์ (NaS) หรือโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) (Soluble Sulfide Precipitation)
UV	คลื่นแสงที่ดวงตาไม่อาจมองเห็นได้ มีความถี่สูงกว่าแสงสีม่วง (Ultraviolet)
%(w/v)	หน่วยของความเข้มข้นของสารละลายเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของตัวถูกละลายต่อปริมาตรของสารละลายทั้งหมด เช่น SBH 1.2 %(w/v) หมายความว่า ในสารละลาย SBH 100 มล. จะมีเนื้อสารของ SBH อยู่ 1.2 กรัม
XRD	เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction)
XRFS	เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (X-ray Fluorescence Spectroscopy)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

บทเรียนเกี่ยวกับปัญหาน้ำเสียของประเทศไทย คือ ปัญหาที่เกิดขึ้นกับแม่น้ำแม่กลอง ระหว่าง ปี พ.ศ. 2512 - 2516 ซึ่งมีการตั้งโรงงานเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย คุณภาพน้ำในแม่น้ำก็เสื่อมโทรมลงตามลำดับ จนในฤดูแล้งได้เกิดภาวะน้ำเน่าเสียอย่างรุนแรงในแม่น้ำแม่กลอง รวมระยะทางประมาณ 100 กิโลเมตร ก่อความกระทบกระเทือนต่อความเป็นอยู่ของราษฎรตามริมน้ำเป็นอันมาก จนทำให้กระทรวงอุตสาหกรรมเริ่มบีบบังคับให้โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย ประวัติศาสตร์ของการบำบัดน้ำเสียในประเทศไทย จึงได้เริ่มขึ้นมาจากเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นต้นมา (มันสิน, 2542) จวบจนปัจจุบัน วิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างมาก และมีของเสียเกิดขึ้นมากมายเป็นเงาตามตัว โลหะหนักก็เป็นปัญหาอย่างหนึ่งที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก เช่น ทองแดง นิกเกิล โปรท ตะกั่ว และโครเมียม ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม โรงงานชุบโลหะ หรือโรงงานผลิตแบตเตอรี่ เป็นต้น นับว่าเป็นของเสียที่เกิดอันตรายต่อมนุษย์ สิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศ เมื่อรับโลหะหนักเหล่านี้เข้าไป อาจก่อให้เกิดโรค หรือหากได้รับเข้าสู่ร่างกายครั้งละมาก ๆ อาจเสียชีวิตทันที ดังนั้น จึงจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งเหล่านี้ให้อยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย ซึ่งวิธีการกำจัดนั้นมีหลายวิธี ยกตัวอย่าง เช่น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน การตกตะกอนทางเคมี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545) และวิธีออกซิเดชันรีดักชัน (เสริมพล และ ไชยยุทธ, 2518)

โดยทั่วไป ในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปนนิยมใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้ปูนขาว เนื่องจากปูนขาวมีราคาถูก แต่วิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น การรีดน้ำออกจากสลัดจ์นั้นทำได้ยาก ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีอัตราการไหลเปลี่ยนแปลงสูง (Talbot, 1984) ในขณะที่โรงงานอุตสาหกรรมต้องดำเนินการผลิตอย่างต่อเนื่อง และบางครั้งก็ต้องเพิ่มกำลังการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์มากที่สุดเพียงพอที่จะตอบสนองความต้องการของลูกค้า และเพื่อให้ได้มาซึ่งกำไรสูงสุด จนบ่อยครั้งที่ระบบบำบัดน้ำเสียไม่สามารถรองรับน้ำเสียที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด (มันสิน, 2542) ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย คือ ทองแดงและนิกเกิล โดยใช้วิธีรีดักชันด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (SBH) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดให้มีโลหะหนักอยู่ในระดับต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง เกิดตะกอนหลังบำบัดที่จับตัวได้ดี

และรีดน้ำออกง่าย (Freeman, 1989) โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดโลหะหนัก เหล่านี้ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ หากประสิทธิภาพในการบำบัด มีสูงพอที่จะนำไปบำบัดน้ำเสียจริง และเป็นที่ยอมรับได้ใน ทางเศรษฐศาสตร์ ก็จะเป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียที่มีประโยชน์ อีกทางเลือกหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ที่มีตัวออกซิไดซ์ โดยวิธีรีดักชันด้วย SBH
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ที่มีตัวออกซิไดซ์ โดยวิธีรีดักชันด้วย SBH
3. เพื่อวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดหลังการบำบัด โดยวิธีรีดักชันด้วย SBH จากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งสองชนิด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cu^{2+} และ Ni^{2+} ด้วย SBH ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตัวออกซิไดซ์ โดยวัดจากค่า ORP (หน่วย mV.) และค่าพีเอช
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} โดยแปรค่าพีเอช, ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ และปริมาณ SBH
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ในสภาวะต่าง ๆ ที่ทำการแปรค่า โดยประเมินจากความเข้มข้นของ Cu^{2+} และ Ni^{2+} ที่เหลือในน้ำเสียหลังบำบัด และตะกอนแขวนลอยที่ไม่จมตัว
4. ศึกษาลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และปริมาณของทองแดงหรือนิกเกิลในตะกอน ซึ่งเกิดจากการบำบัดโดยใช้สภาวะที่เหมาะสม

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลอง จัดหาอุปกรณ์และสารเคมี
3. ดำเนินการทดลอง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน
ตอนที่ 1 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}
ตอนที่ 2 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัด Cu^{2+} และ Ni^{2+} ในน้ำเสียสังเคราะห์
4. สรุปและรายงานผล

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cu^{2+} และ Ni^{2+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีตัวออกซิไดซ์
2. ทราบสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด
3. ทราบลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้น และปริมาณโลหะในตะกอน ซึ่งเกิดจากการบำบัด โดยใช้สถานะที่เหมาะสม เพื่อเป็นประโยชน์ต่อไปในการนำโลหะในตะกอนกลับมาใช้ใหม่

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ลักษณะของน้ำเสีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

ลักษณะของน้ำเสีย โดยทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.1.1 ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ (Physical Characteristics of Wastewater)

2.1.1.1 ของแข็ง

ของแข็ง หมายถึง สารทุกอย่างในของเหลวยกเว้นน้ำ ของแข็งแบ่งได้เป็นหลายชนิด ดังนี้

1. ของแข็งจมตัวได้ (Settleable Solids) หมายถึง ของแข็งที่จมตัวสู่ก้นภาชนะ เมื่อตั้งทิ้งไว้ในเวลา 1 ชั่วโมง มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร (มล./ล.) ปริมาณของแข็งที่ตกตะกอนได้มีประโยชน์ต่อการออกแบบ และควบคุมประสิทธิภาพของถังตะกอน
2. ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids หรือ TDS) หมายถึง ของแข็งที่สามารถผ่านกระดาษกรองใยแก้วมาตรฐาน แล้วยังคงเหลืออยู่ หลังจากระเหยไอน้ำจนแห้ง แล้วอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส
3. ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids หรือ SS) หมายถึง ส่วนของของแข็งที่เหลืออยู่บนกระดาษกรองใยแก้วมาตรฐาน หลังจากกรองน้ำตัวอย่าง และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำตัวอย่างที่ได้กำจัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำออกแล้ว จะใช้ในการหาปริมาณสารอินทรีย์ที่จะเข้าสู่ระบบบำบัดขั้นที่ 2 และใช้ในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย
4. ของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solids หรือ VS) หมายถึง ของแข็งส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ ตรวจวัดโดยนำกระดาษกรองที่วิเคราะห์หาของแข็งแขวนลอยแล้ว หรือด้วยกระเบื้องระเหยที่วิเคราะห์ของแข็งละลายน้ำทั้งหมดแล้ว ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส น้ำหนักของแข็งที่ระเหยไป คือ ปริมาณของแข็งที่ระเหยได้

2.1.1.2 กลิ่น (Odor)

กลิ่นจากน้ำเสีย มักเกิดจากก๊าซของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ก๊าซส่วนใหญ่เป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งเกิดจากการที่แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนเปลี่ยนสภาพของซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ ส่วนสารอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดกลิ่นในสภาพไร้ออกซิเจนในน้ำเสีย ได้แก่ Organic Sulfides, Organic Amines, Phosphorus และ Organic Acids

2.1.1.3 อุณหภูมิ (Temperature)

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยมากจะมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ จะทำให้สภาพแวดล้อมในแหล่งน้ำนั้น ๆ เปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

- ปริมาณออกซิเจนละลายจะลดลงจนน้อยกว่าปกติ เนื่องจากค่าอิ่มตัวของออกซิเจนละลาย จะลดลงเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น
- ปฏิกริยาชีวเคมีของจุลินทรีย์ในน้ำจะสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการใช้ออกซิเจนในน้ำสูงขึ้นด้วย
- การเจริญเติบโตของพืชที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำจะสูงขึ้นกว่าปกติ

2.1.1.4 สี (Color)

โรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น โรงงานกระดาษและโรงงานฟอกย้อม มักมีปัญหาเรื่องสีในน้ำเสีย นอกจากนี้ การเกิดสาหร่ายปริมาณมาก ๆ ในแหล่งน้ำก็จะทำให้เกิดปัญหาเรื่องสีในน้ำ ซึ่งนอกจากจะทำให้แหล่งน้ำไม่น่าดูแล้ว ยังขวางกั้นแสงแดดไม่ให้ส่องลงมาได้ผิวน้ำ ทำให้การสังเคราะห์แสงลดลง นอกจากนี้ สีที่เกิดจากสารอินทรีย์ จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงอีกด้วย

2.1.1.5 ความขุ่น (Turbidity)

ความขุ่น คือ สารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำที่กั้นหรือขวางแสงแดด น้ำที่มีความขุ่นสูงจะทำให้ยากต่อการกรอง

2.1.2 ลักษณะน้ำเสียทางเคมี (Chemical Characteristics of Wastewater)

2.1.2.1 สารอินทรีย์

ได้แก่ น้ำเสียที่ประกอบด้วย สารคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน น้ำมัน รวมทั้งสารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และยาปราบศัตรูพืช ซึ่งย่อยสลายได้ยาก สารเหล่านี้มักพบในน้ำเสียอุตสาหกรรม

2.1.2.2 สารอนินทรีย์

- พีเอช (pH) หมายถึง ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ค่าพีเอชจะแสดงถึงความเป็นกรดหรือด่างของน้ำเสียนั้น ๆ เป็นค่าที่มีประโยชน์มากต่อการบำบัดน้ำเสีย ทั้งทางชีวภาพ และวิธีทางเคมี เช่น น้ำเสียที่มีค่าพีเอชเป็นกลาง จะเหมาะสมต่อการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพและพีเอชยังมีผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ
- ความเป็นด่าง (Alkalinity) หมายถึง ปริมาณด่างที่มีอยู่ในน้ำ โดยทั่วไปเป็นผลมาจากไฮดรอกไซด์ ไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต ค่าความเป็นด่างจะมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชและมีประโยชน์ต่อการบำบัดน้ำเสีย

- ไนโตรเจน (Nitrogen) สารประกอบไนโตรเจนที่เกี่ยวข้องกับน้ำเสีย แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น กรดอะมิโน โปรตีน และสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต สารประกอบไนโตรเจนรูปต่างๆ มีความสัมพันธ์กัน โดยสามารถเปลี่ยนรูปกลับไปกลับมาได้โดยปฏิกิริยาชีวเคมีของแบคทีเรีย
- ฟอสฟอรัส (Phosphorus) ฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่สำคัญ สำหรับสิ่งมีชีวิตในการสร้างเซลล์ใหม่ ฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่เหมาะสมจะทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การปล่อยน้ำทิ้งที่มีฟอสฟอรัสลงในแหล่งน้ำอาจกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชน้ำอย่างรวดเร็ว จนเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ก่อปัญหาต่อแหล่งน้ำได้
- โลหะหนัก (Heavy Metals) เช่น โครเมียม ทองแดง เหล็กและสังกะสี เป็นต้น สารโลหะหนักบางชนิด อาจจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต แต่ต้องมีในปริมาณที่พอเหมาะ แต่โลหะหนักบางชนิด เป็นสารที่สิ่งมีชีวิตไม่ต้องการและเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ แคดเมียม ปรอท ตะกั่ว นิกเกิล เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบถึงชนิด และปริมาณของสาร โลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำเสีย เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเลือกกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีความเหมาะสม

2.1.3 ลักษณะน้ำเสียทางชีววิทยา (Biological Characteristics of Wastewater)

ได้แก่ สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำเสีย ส่วนใหญ่จะเป็นพวกจุลินทรีย์ที่ปนมากับอุจจาระต่างๆ จะมีทั้งชนิดที่ก่อให้เกิดโรค และไม่ทำให้เกิดโรค จุลินทรีย์เหล่านี้มีบทบาทอย่างมากในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสีย

2.2 โลหะหนัก

2.2.1 นิกเกิล (Ni)

นิกเกิลเป็นธาตุทรานซิชันมีเลขออกซิเดชันหลายค่า คือ +1 +2 +3 และ +4 แต่ส่วนใหญ่มีเลขออกซิเดชันเป็น +2 นิกเกิลเป็นโลหะสีชาวล้ำเงิน มีความอ่อนสามารถคดงอได้ เป็นสารพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) ทนต่อการกัดกร่อนของด่างได้ดี แต่ละลายได้อย่างช้าๆ ในกรดเจือจาง เช่น กรดไฮโดรคลอริก และละลายได้เร็วในกรดไนตริก

2.2.1.1 การนำมาใช้ประโยชน์

นิกเกิลถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น ใช้เป็นขั้วแอโนดในตู้ด้านทานของวิทยุและอิเล็กทรอนิกส์ และเนื่องจากนิกเกิลเป็นโลหะสีชาวล้ำเงิน และทนการกัดกร่อนได้ดี

นิกเกิลจึงถูกนำมาใช้ในการชุบและเคลือบโลหะ เพื่อรักษาเนื้อโลหะที่ถูกชุบให้อยู่ได้นานและสวยงามยิ่งขึ้น ในด้านอื่นๆ นิกเกิลถูกนำมาใช้ในการทำแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม หัวเทียน แผงวงจรไฟฟ้า เซรามิก เครื่องสำอางค์ นอกจากนี้ นิกเกิลยังถูกนำมาทำเป็นโลหะผสม เช่น นิกเกิลผสมทองแดงใช้ทำเหรียญกษาปณ์ (Parker, 1993)

2.2.1.2 การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

โดยส่วนใหญ่เกิดจากการใช้นิกเกิลและสารประกอบนิกเกิลในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ แบตเตอรี่ โลหะผสม และการถลุงนิกเกิล จากการกระทำของมนุษย์ เช่น การสูบบุหรี่ การนำขยะซึ่งเป็นเครื่องใช้ หรืออุปกรณ์ต่างๆที่ไม่ใช้แล้วและมีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบไปกำจัดโดยการฝังกลบไว้ในดิน ซึ่งเมื่อเข้าสู่สิ่งแวดล้อมเกิดการปนเปื้อนก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้

2.2.1.3 ความเป็นพิษ

นิกเกิลเป็นสารที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ สัตว์และพืช โดยจัดเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ แต่เป็นสารที่ไม่รุนแรงมากนักในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เนื่องจากทางเดินอาหารดูดซึมนิกเกิลได้ต่ำ

สำหรับมนุษย์นิกเกิลสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทางผิวหนัง การหายใจ และการรับประทาน ซึ่งอาจแสดงพิษอย่างเฉียบพลัน โดยมีอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ และเจ็บหน้าอก เกิดขึ้นภายใน 2-3 ชั่วโมง หลังจากนั้น 12-23 ชั่วโมง หรือมากกว่า 5 วัน จะมีอาการเกี่ยวกับปอดอย่างรุนแรง หัวใจเต้นแรง อ่อนเพลีย และเสียชีวิตภายใน 4-13 วัน หรืออาจเกิดการสะสมในร่างกายเป็นเวลานานจนถึงระดับหนึ่งค่อยแสดงพิษออกมา โดยมีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ การทำงานของปอดสมอง ตับ ไต และม้าม สารประกอบนิกเกิลที่เป็นพิษต่อมนุษย์มากที่สุด คือ นิกเกิลคาร์บอนิล (NiCO_4) ซึ่งเป็นของเหลวไม่มีสี กลายเป็นไอง่าย ใช้ประโยชน์ในการทำปิโตรเลียมให้บริสุทธิ์ (ศุภมาส, 2539)

2.2.2 ทองแดง (Cu)

ทองแดงเป็นองค์ประกอบของแร่หลายชนิดในธรรมชาติซึ่งแร่ต่างๆ เหล่านี้สลายตัวได้ง่าย การสลายตัวและผุพังของแร่ จะให้ประจุบวกของทองแดงออกมา โดยเฉพาะสภาวะที่เป็นกรด ทองแดงจะละลายออกมาได้มาก (Pandias และ Pendias, 1992)

2.2.2.1 การนำมาใช้ประโยชน์

ทองแดงกว่า 50% ใช้ในการทำอุปกรณ์ไฟฟ้า ใช้เป็นโลหะผสมในส่วนประกอบของยา รักษาโรคหลายประเภท ยาสมานแผล และยาทำให้อาเจียน เป็นส่วนประกอบของยาม่าเชื้อรา

ยากันแมลง อุตสาหกรรมทอผ้า และผลิตภัณฑ์เซรามิก นอกจากนี้ยังใช้เกลือทองแดงในการกำจัดสาหร่าย และหอยที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อแหล่งน้ำ

2.2.2.2 การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

การปนเปื้อนของทองแดงสู่ธรรมชาติ บางส่วนเกิดจากการละลายจากแหล่งธรรมชาติ แต่เป็นเพียงส่วนน้อย โดยส่วนใหญ่แล้ว เกิดจากการกระทำของมนุษย์ที่มีการนำทองแดงไปใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การถลุงแร่ ซึ่งทำให้ทองแดงฟุ้งกระจายขึ้นไปในอากาศแล้วถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ การใช้ทองแดงในอุตสาหกรรมโลหะผสม เป็นต้น

2.2.2.3 ความเป็นพิษ

ทองแดงเข้าสู่ร่างกายได้โดยการปนเปื้อนทางอาหารและการหายใจ การดูดซับส่วนใหญ่เกิดที่กระเพาะอาหาร แล้วเก็บสะสมไว้ที่ตับ ไต สมอง หัวใจ และผม หากร่างกายได้รับทองแดงมากเกินไปเกินความต้องการ จะมีอาการอ่อนเพลีย อาเจียน ท้องร่วง เม็ดเลือดแดงถูกทำลาย เกิดอาการตัวบวม และมีเลือดออกในทางเดินอาหาร หากทองแดงที่ได้รับอยู่ในรูปคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) จะทำให้เกิดพิษเฉียบพลัน อาเจียน บางครั้งจะมีสีเขียวปนมากับอาเจียน ความดันโลหิตต่ำ ดีซ่าน และหมดสติ

2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

2.3.1 การบำบัดน้ำเสียทางเคมี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีเหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้

1. มี pH สูงหรือต่ำเกินไป
2. มีโลหะหนักเป็นพิษ เช่น สังกะสี ดีบุก นิกเกิล และทองแดง เป็นต้น
3. มีสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ยาก
4. มีสารประกอบอินทรีย์ละลายน้ำที่เป็นพิษ เช่น ซัลไฟด์
5. มีไขมันหรือน้ำมันละลายน้ำ

กระบวนการทางเคมีที่ใช้บำบัดน้ำเสีย ได้แก่ โคแอกกูเลชัน (Coagulation) การตกตะกอนผลึก (Precipitation) การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) และการออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction)

2.3.1.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

กระบวนการโคแอกกูเลชัน เป็นกระบวนการ ประสานคอลลอยด์ ซึ่งเป็นสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ช้ามาก คอลลอยด์มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1 – 1 นาโนเมตร ซึ่งไม่

สามารถแยกตัวออกจากน้ำได้โดยวิธีตกตะกอนตามธรรมชาติ เนื่องจากอนุภาคของคอลลอยด์มีขนาดเล็กเกินไป หลักการของกระบวนการโคแอกกูเลชัน คือ การเติมสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) เช่น สารส้ม (Aluminum Sulfate $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) ลงไปในน้ำเสียทำให้คอลลอยด์หลาย ๆ อนุภาคจับตัวกันเป็นกลุ่ม เรียกว่า ฟล็อก (Floc) จนมีน้ำหนักมากและสามารถตกตะกอนลงมาได้รวดเร็ว สารโคแอกกูแลนต์ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวประสานให้อนุภาคมารวมตัวกันเป็นฟล็อก

นอกจากนี้ยังสามารถเติมสารโคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulant Aid) ซึ่งเป็นสารเคมีประเภทพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) และเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยโคแอกกูแลนต์เอ็ดทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคหรือฟล็อกให้เกิดเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ และตกตะกอนได้ง่าย สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน มีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่

1. พอลิเมอร์ประจุบวก (Cationic Polymer)
2. พอลิเมอร์ประจุลบ (Anionic Polymer)
3. พอลิเมอร์ที่ไม่มีประจุ (Non Ionic Polymer)

2.3.1.2 การตกตะกอนผลึก (Precipitation)

โลหะหนักที่พบในน้ำเสียและที่เป็นปัญหามักอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถบำบัดออกจากน้ำเสียได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือกรองเพียงลำพัง การกำจัดโลหะหนักจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนผลึกของแข็ง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้ไอออนประจุบวกและลบรวมกันเป็นตะกอนของแข็ง ไม่ละลายน้ำเสียก่อน จากนั้นจึงทำให้ผลึกของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อก เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้โดยวิธีตกตะกอนและวิธีกรอง ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการกำจัดโลหะหนักต้องใช้วิธีการตกตะกอนผลึกร่วมกับวิธีโคแอกกูเลชัน และตามด้วยวิธีตกตะกอน และวิธีกรอง

โลหะหนัก เช่น สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม ฯลฯ จะเป็นปัญหาเฉพาะกับน้ำเสียที่มีค่าพีเอชต่ำเนื่องจากโลหะหนักสามารถละลายน้ำได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำ การเพิ่มค่าพีเอชจะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักลดลงและสามารถตกผลึกได้ ดังนั้นการเติมสารเคมีประเภทต่าง ๆ เช่น โซดาไฟ หรือปูนขาว ให้กับน้ำเสียจนมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นถึงระดับที่เหมาะสมจะทำให้โลหะหนักตกตะกอนผลึกร่วมกับไอออนของไฮดรอกไซด์ (OH^-) ได้ จากนั้นจึงทำให้ผลึกของของแข็งรวมตัวกันเป็นฟล็อกด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน แล้วจึงแยกฟล็อกออกจากน้ำด้วยถังตกตะกอน ปริมาณปูนขาวหรือโซดาไฟ ที่ต้องใช้อาจคำนวณคร่าว ๆ ได้จากสมการเคมีของปฏิกิริยาการสร้างตะกอน แต่ทางที่ดีควรทำการทดสอบกำจัดโลหะหนักในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาระดับค่าพีเอชที่เหมาะสมและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม สำหรับกำจัดโลหะหนักของแต่ละงาน

โดยทำ Titration Curve ของน้ำเสียที่เกิดจากการเติมค่าและทำจาร์เทสต์ (Jar Test) เพื่อหาระดับค่าพีเอชและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมที่สุด

นอกจากการตกตะกอนร่วมกับผลึกไฮดรอกไซด์แล้ว โลหะหนักอาจจะตกตะกอนผลึกร่วมกับไอออนประจุลบอื่นได้ เช่น ซัลไฟด์ (S^{2-}) ซึ่งโลหะซัลไฟด์ มีความสามารถในการละลายน้ำน้อยกว่าโลหะไฮดรอกไซด์ จึงมีการใช้โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) หรือ โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ($NaHS$) ทำปฏิกิริยากับโลหะหนัก เพื่อตกตะกอนผลึก แต่ข้อเสียของการตกตะกอนผลึกของโลหะหนักร่วมกับซัลไฟด์ คือ ตะกอนมีขนาดเล็ก และเกิดฟล็อกขนาดเล็กมาก ทำให้การตกตะกอนเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นยังทำให้เกิดก๊าซพิษ ดังนั้นการตกตะกอนผลึกโลหะหนักด้วยปูนขาวหรือโซดาไฟจึงได้รับความนิยมมากกว่า โดยที่การใช้ปูนขาวจะได้รับความนิยมมากกว่า เพราะเวลาเมื่อใช้ปูนขาวจะได้ตะกอนผลึกของโลหะหนักหรือฟล็อกขนาดใหญ่กว่าการใช้โซดาไฟ

2.3.1.3 การทำให้เป็นกลางหรือการปรับพีเอช (Neutralization)

ค่าพีเอช มีบทบาทสำคัญมากในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นในการเติมกรดหรือด่างเพื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจึงเป็นสิ่งจำเป็น น้ำเสียที่มีค่าพีเอชต่ำสามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ปูนขาว ($Ca(OH)_2$) โซดาไฟ ($NaOH$) หรือ โซดาแอช (Na_2CO_3) ส่วนน้ำที่มีค่าพีเอชสูงทำให้เป็นกลางได้โดยใช้กรดชนิดต่าง ๆ เช่น กรดกำมะถัน (H_2SO_4) กรดเกลือ (HCl) กรณีที่ต้องการเปลี่ยนพีเอชเพียงเล็กน้อย อาจใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

2.3.1.4 การออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction) (เสริมพล และ ไชยยุทธ, 2518)

เป็นวิธีทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่าง ๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไป เพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ (เสริมพล, 2518)

สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน ได้แก่ โอโซน ออกซิเจน คลอรีนในรูปแบบต่าง ๆ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) และไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ (H_2O_2)

ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ เกลือซัลไฟด์ เหล็กซัลเฟต และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ตัวอย่างสารออกซิไดซ์ และสารรีดิวซ์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545) แสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

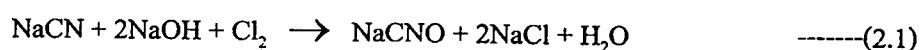
ตารางที่ 2.1 สารออกซิไดซ์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

สารออกซิไดซ์	สารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดออก
อากาศหรือออกซิเจน	Sulfite, Sulfide และ Ferrous
ก๊าซคลอรีน	Sulfide
ก๊าซคลอรีนและค่าง	Cyanide
คลอรีน ไดออกไซด์	Cyanide Pesticides
Sodium Hypochlorite (NaOCl)	Cyanide และ ตะกั่ว
Calcium Hypochlorite [Ca(OCl) ₂]	Cyanide
Potassium Permanganate (KMnO ₄)	Cyanide, ตะกั่ว และกลิ่นจากสารอินทรีย์
Permanganate	Manganese
Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	Phenol, Cyanide, สารประกอบ Sulfur และ ตะกั่ว

ตารางที่ 2.2 สารรีดิวซ์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีเคมี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

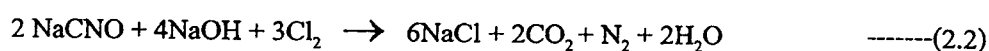
สารรีดิวซ์	สารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดออก
- Sulfur Dioxide (SO ₂) หรือ Sodium Bisulfite หรือ Sodium Metabisulfite (Na ₂ S ₂ O ₃) หรือ Ferrous Sulfate	- Chromium (Cr ⁶⁺)
- Sodium borohydride (NaBH ₄)	- Mercury, Silver

เสริมพล และ ไชยยุทธ (2518) กล่าวถึงการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการออกซิเดชัน เช่น การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะที่มีสารประกอบไซยาไนด์ สารเคมีที่ใช้คือ คลอรีน หรือไฮโปคลอไรต์ ดังสมการ 2.1



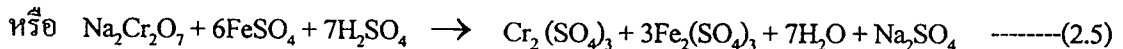
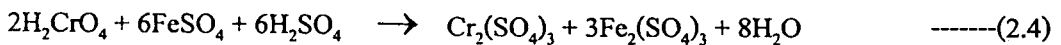
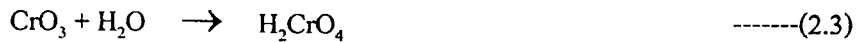
ปฏิกิริยานี้จะเกิดอย่างรวดเร็ว ประมาณ 80-90 % ของไซยาไนด์จะถูกเปลี่ยนเป็นไซยาเนต (NaCNO) ซึ่งไม่เป็นพิษภายใน 2 นาที

หากเติมคลอรีนลงไปมากเกินไปไซยาเนตจะถูกทำลายเป็นไนโตรเจน ดังสมการ 2.2

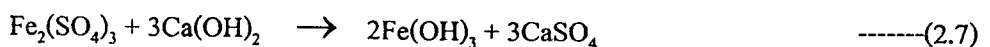
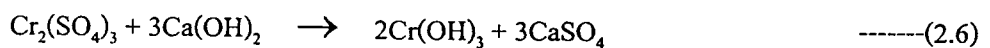


ปฏิกิริยานี้ค่อนข้างช้า ต้องใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

ตัวอย่างการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการรีดักชัน เช่น การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะที่มีสารประกอบโครเมต หรือกรดโครมิกปนเปื้อน (สมการที่ 2.3) การกำจัดใช้เฟอร์รัสซัลเฟตไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบโครเมต ดังสมการ 2.4 และ 2.5



ทั้งสองปฏิกิริยา (สมการ 2.4 และ 2.5) นี้เกิดได้ดีที่ pH ต่ำกว่า 3 จึงต้องเติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ลงไปด้วย จากนั้นจึงเติมปูนขาวลงไปเพื่อตกตะกอน $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ และ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ดังสมการ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



2.4 การตกตะกอนทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมี เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารที่อยู่ในรูปสารละลายให้เป็นรูปของของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ โดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี หรือการเปลี่ยนส่วนประกอบของตัวทำละลายของสาร ซึ่งของแข็งที่ตกตะกอนสามารถแยกออกจากสารละลายนั้นได้โดยการตกตะกอน (Settling) หรือการกรอง (Filtration) (Chung, 1989)

2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนทางเคมี (Eilbeck และ Mattock, 2000)

1. ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะ (Solubility) สารประกอบโลหะแต่ละชนิด จะมีความสามารถในการละลายน้ำที่พีเอชต่างๆ ไม่เท่ากัน โลหะที่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก เช่น ทองแดง สังกะสี โครเมียม และนิกเกิล จะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จนถึงพีเอชค่าหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะนั้นต่ำสุด และเมื่อเลยพีเอชนี้ โลหะแอมโฟเทอริก จะกลับมาละลายน้ำได้มากขึ้นอีก ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2

2. พีเอช (pH) สารช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่พีเอชช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่อยู่ในช่วงนี้ จะทำให้เกิดผลการตกตะกอนไม่ดีเท่าที่ควร

3. คุณสมบัติและชนิดของสารตกตะกอน (Precipitant) สารเคมีแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับสารหรือโลหะที่ต้องการตกตะกอนไม่เหมือนกัน รวมทั้งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น การละลายของไอออนโลหะ (Metal Ion Solubility) ลักษณะของตะกอน ความเร็วของการตกตะกอน ราคา

และความยากง่ายในการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะน้ำเสียที่ต้องการบำบัด

4. ปริมาณของสารตกตะกอน (Precipitant Dosage) มีผลต่อความสามารถในการตกตะกอน เพราะในการละลายของสารประกอบใดๆ ถ้ามีผลคูณความเข้มข้นของไอออน (Ion product) น้อยกว่าค่า K_{sp} จะเกิดการตกตะกอน ดังนั้นปริมาณของสารตกตะกอนที่ใช้จะต้องมากพอ โดยไม่มากเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการละลายกลับ (Resolubilization) ได้

5. อุณหภูมิ (Temperature) ผลของอุณหภูมิขึ้นกับปฏิกิริยาตกตะกอนทางเคมีว่าเป็นปฏิกิริยาคูดหรือคายความร้อน ถ้าเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนจะตกตะกอนทางเคมีได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จะตกตะกอนเคมีได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ

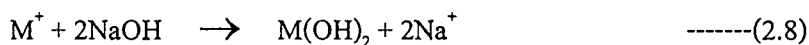
6. การกวน (Mixing) เพื่อให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำ ต้องมีความเร็วที่เหมาะสม การกวนเร็ว (Rapid mixing) ช่วยให้สารเคมีกระจายได้ทั่วถึง ส่วนการกวนช้า (Slow Mixing) จะทำให้สารตกตะกอนทำปฏิกิริยากับสารหรือโลหะที่ต้องการตกตะกอนสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และทำให้มวลรวมตัวเป็นตะกอนได้ดี มีความเสถียรสูงและสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย

7. สารที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complexing Agents) เช่น โซยาไนต์ แอมโมเนีย และสารคีเลตติงเอเจนต์ (Chelating Agent) เช่น EDTA สามารถเกิดไอออนเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ และเสถียรกับโลหะหลายชนิดในน้ำเสีย ซึ่งไอออนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการตกตะกอนทางเคมีของโลหะ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักลดลง

2.4.2 การตกตะกอนทางเคมีในปัจจุบัน (Talbot, 1984)

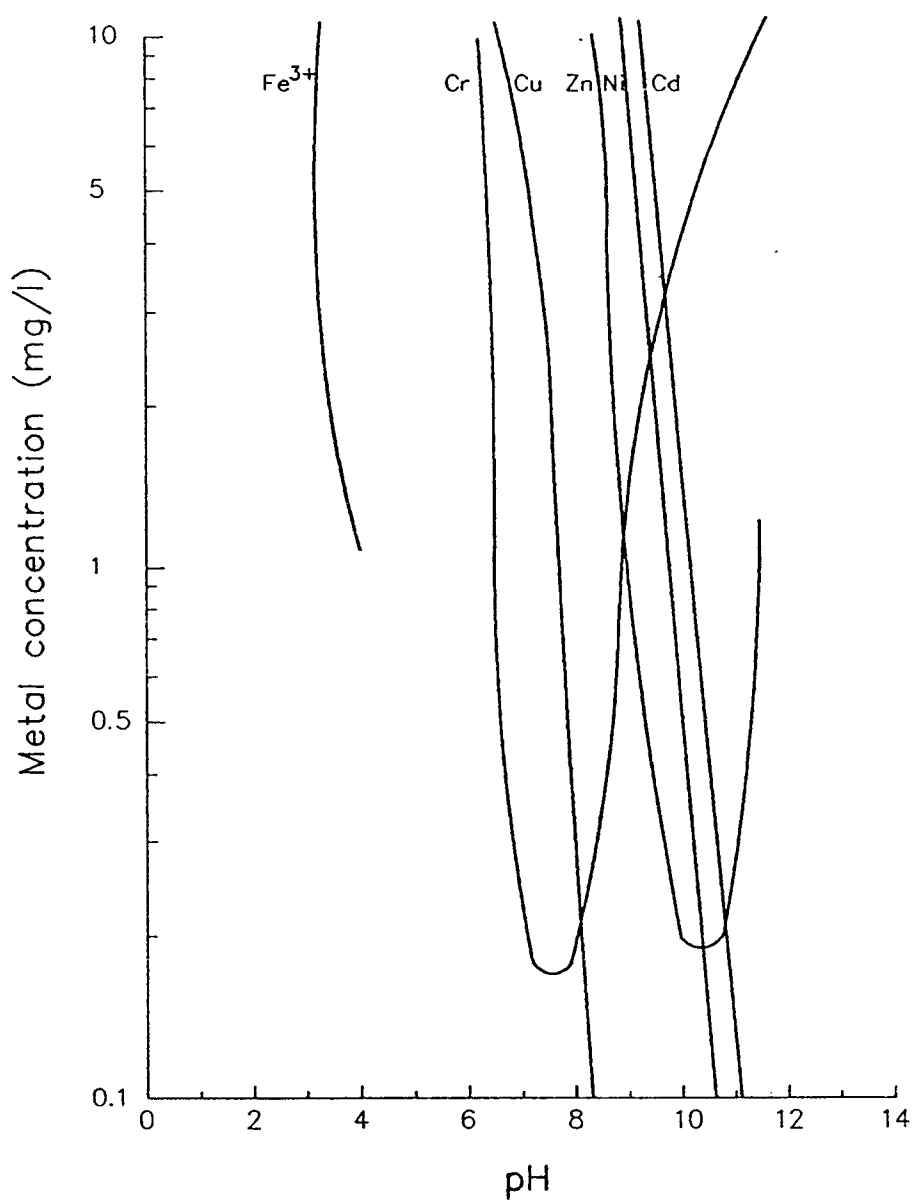
2.4.2.1 การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation)

ในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ โลหะหนักจะถูกกำจัดออกโดยการเติมสารที่เป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาว เพื่อปรับพีเอชของน้ำเสียให้ถึงจุดที่โลหะมีความสามารถในการละลายต่ำสุด ปฏิกิริยาเกิดขึ้น ดังสมการ 2.8 (Freeman, 1989)

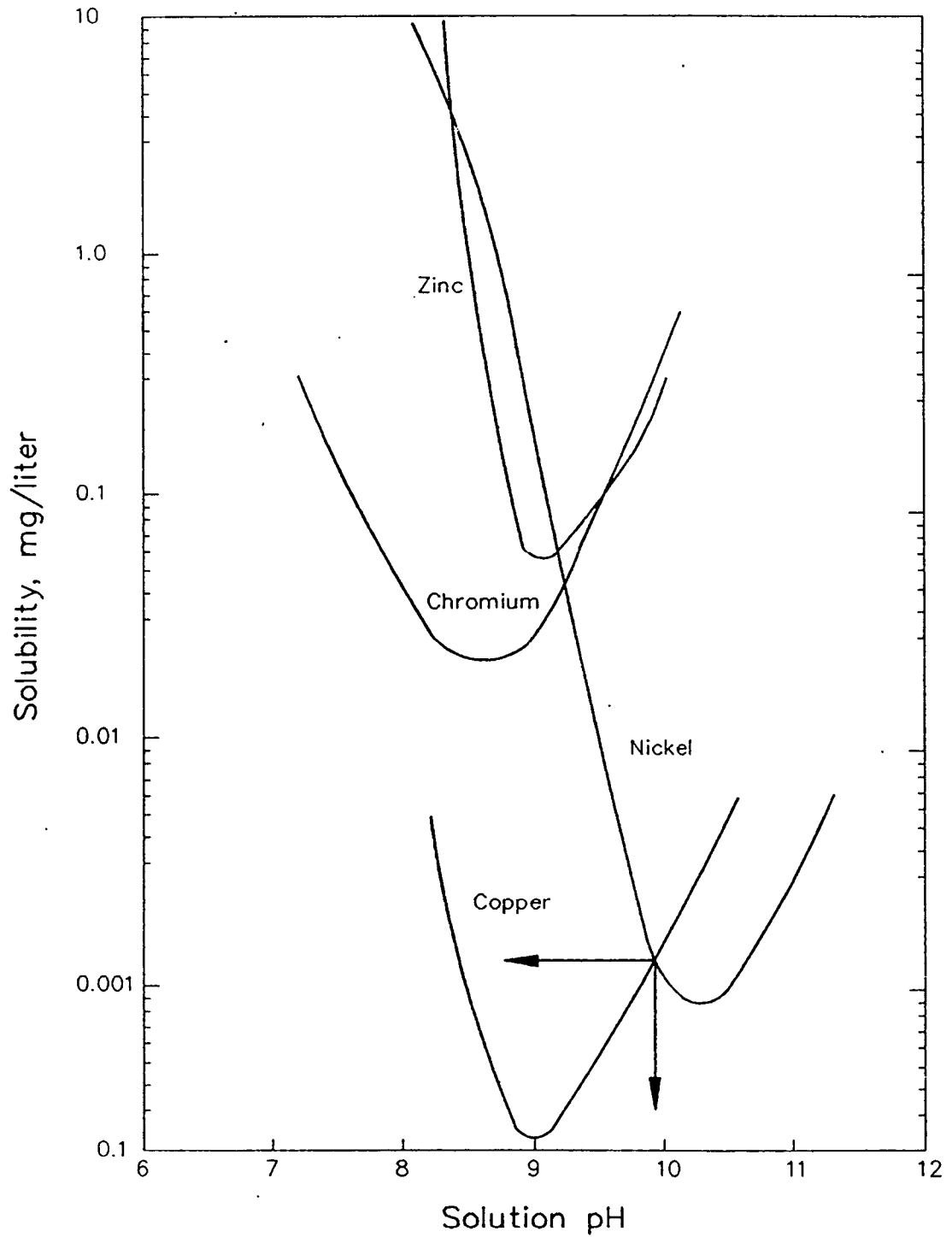


โดยทั่วไปความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ในสารละลายจะลดลงเมื่อปรับพีเอชเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง (Isoelectric Point) หลังจากนั้นโลหะจะกลับมามีความสามารถในการละลายได้อีก เพราะกลายเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งกรดและเบส (Amphoteric) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

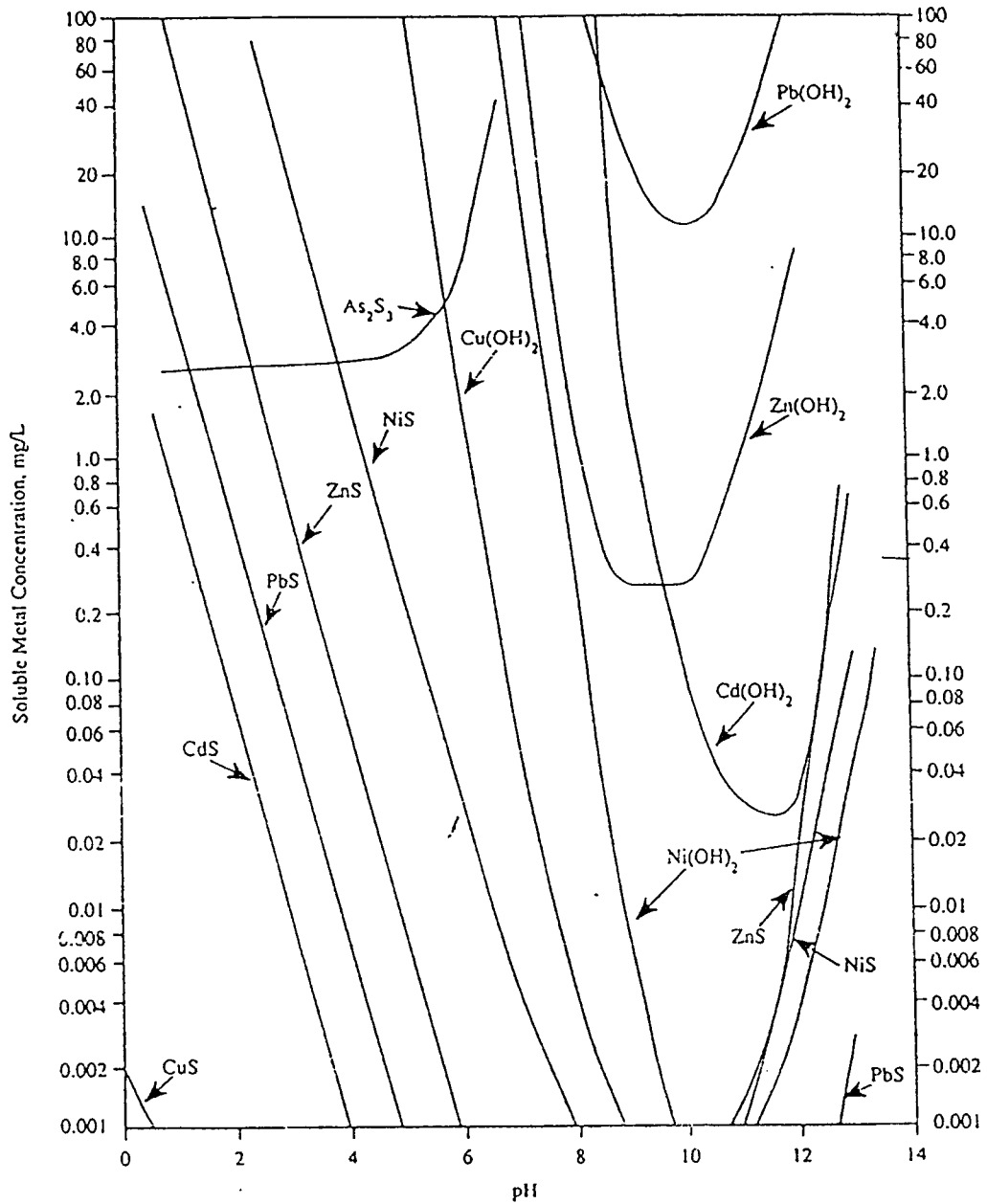
ในการตกตะกอนไฮดรอกไซด์เกือบทุกกรณี ค่าพีเอชที่ใช้ทำจาร์เทสต์ (Jar Test) จะอยู่ระหว่าง 9 – 11 อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ความสามารถในการละลายได้ อาจไม่เป็นไปตามทฤษฎี เพราะอิทธิพลของ Complexing Agents, อุณหภูมิ และค่าความแรงของไอออน (Ionic Strength) ของโลหะที่จะตกตะกอน



รูปที่ 2.1 ความสามารถในการละลายของโลหะหนักที่พีเอชต่าง ๆ (Eckenfelder, 1989)



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักต่าง ๆ (มันสิน, 2534)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายกับความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์ (William, 1994)

เป็นโลหะไฮดรอกไซด์แล้วสามารถกำจัดออกได้ โดยการรวมตะกอนและปล่อยให้ตกตะกอนหรือกรอง ส่วนประสิทธิภาพในการแยกของแข็งหรือของเหลวในระบบ จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น ขนาดและความหนาแน่นของโลหะไฮดรอกไซด์ เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายต่ำและควบคุมได้ง่ายด้วยค่าพีเอช

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหลายชนิดปนกัน ควรใช้การตกตะกอนที่ละชั้น เพราะความสามารถในการละลายของโลหะแต่ละชนิดเกิดขึ้นที่พีเอชไม่เท่ากัน

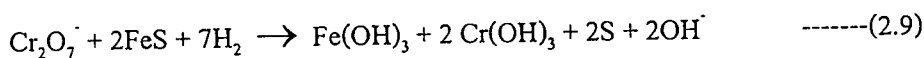
2.4.2.2 การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

การตกตะกอนซัลไฟด์ พบว่า ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ไฮดรอกไซด์ในการกำจัดโลหะหนักออกจากรน้ำเสียอุตสาหกรรม ข้อดีและข้อจำกัดของการตกตะกอนทั้ง 2 วิธี แสดงดังตารางที่ 2.3

การตกตะกอนด้วยซัลไฟด์แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ Soluble Sulfide Precipitation (SSP) และ Insoluble Sulfide Precipitation (ISP) ซึ่งจะแตกต่างกันตรงที่ไอออนซัลไฟด์ในกระบวนการ SSP จะใช้ซัลไฟด์ในรูปสารละลายซัลไฟด์ เช่น โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) หรือ โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS)

ในกระบวนการ ISP เฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) ที่ละลายน้ำได้น้อยในรูปของเหลวข้น ๆ (Slurry) จะถูกเติมลงในน้ำเสีย ซึ่งจะให้อิออนซัลไฟด์ที่ต้องการสำหรับตกตะกอนโลหะหนัก เนื่องจากโลหะหนักส่วนใหญ่จะละลายน้ำได้น้อยกว่าเฟอร์รัสซัลไฟด์ ฉะนั้นจึงสามารถตกตะกอนเป็นโลหะซัลไฟด์

ในทางปฏิบัติ FeS จะเตรียมจากการผสมระหว่าง FeSO_4 และ NaHS ซึ่งข้อดีของกระบวนการ ISP คือ ไม่ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และยังสามารถรีดิวซ์ Cr^{6+} เป็น Cr^{3+} ได้ ดังสมการ 2.9 (Freeman, 1989)



แต่ข้อเสียก็คือ ต้องใช้สารเคมีในปริมาณที่มากกว่าความต้องการทางทฤษฎีและเกิดสลัดจ์จำนวนมาก อันเนื่องมาจากเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ อัตราการเกิดเฟอร์รัสซัลไฟด์ได้จากการทำอาร์เทสต์ ซึ่งตามธรรมชาติจะใช้ปริมาณ 2 - 4 เท่าของความต้องการทางทฤษฎี ทำให้สิ้นเปลืองค่าสารเคมีจำนวนมากและเกิดสลัดจ์มากด้วย

ในกระบวนการ SSP ความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่สูงจะก่อให้เกิดการตกตะกอนโลหะซัลไฟด์อย่างรวดเร็ว (High Nucleation Rates) ทำให้เกิดอนุภาคที่เล็กละเอียด และอนุภาคแขวนลอยซึ่งตกตะกอนและกรองได้ยาก สารละลายซัลไฟด์ที่นิยมใช้ เช่น โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) สมการทั่วไปของโลหะหมู่ 2 กับ Na_2S ดังสมการ 2.10 (Freeman, 1989)



ในกรณีที่มี Chelating Agents จะทำการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ไม่ได้ถึงแม้จะปรับพีเอชสูงขึ้นก็ตาม แต่สามารถกำจัดโลหะหนักได้ด้วยการตกตะกอนซัลไฟด์แทน กรณีที่ไม่มี Chelating Agents โลหะไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นเล็กน้อยที่พีเอชต่ำกว่า 6 ส่วนโลหะซัลไฟด์สามารถเกิดได้ที่ช่วงพีเอชกว้างมาก ตั้งแต่ 2 ถึง 12 เนื่องจากโลหะซัลไฟด์ละลายน้ำได้น้อยกว่าโลหะไฮดรอกไซด์และเกิดสภาพ Amphoteric น้อยกว่าด้วย นอกจากนี้จะเกิดสลัดจ์โลหะซัลไฟด์น้อยและคังน้ำออกได้ง่ายกว่า

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อจำกัดของการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์

Hydroxide precipitation	Sulfide precipitation
<p>ข้อดี</p> <ul style="list-style-type: none"> - ง่ายต่อการควบคุมด้วยค่าพีเอช - การทำงานของระบบค่อนข้างง่าย - สารเคมีมีราคาถูก (ปูนขาว) <p>ข้อจำกัด</p> <ul style="list-style-type: none"> - ตะกอนไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มที่จะสามารถละลายกลับได้ ถ้าพีเอชสารละลายเปลี่ยนไป - การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหลายชนิดปนกัน จะให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดี - กรณีน้ำเสียมี Chelating Agents จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะลดลง - ไม่สามารถกำจัด Cr(VI) ได้ - ไชยาไนต์ จะรบกวนการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ - คังน้ำออกจากสลัดจ์ได้ยาก เนื่องจากโครงสร้างของอนุภาคไม่มีรูปร่างที่แน่นอน (Amorphous) - ที่พีเอช < 6 จะเกิดโลหะไฮดรอกไซด์ได้น้อย - ไม่เหมาะที่จะใช้กับน้ำเสียที่มีอัตราการไหลสูง และมีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลง - เวลาที่ใช้เริ่มเดินและหยุดระบบจะนานกว่ากระบวนการ Packed-Bed และเมมเบรน 	<p>ข้อดี</p> <ul style="list-style-type: none"> - สามารถใช้กำจัดโลหะที่มีพีเอช 2-3 ได้ - ต้องการเวลากักน้ำในถังปฏิกิริยาน้อย เนื่องจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง - สลัดจ์ซัลไฟด์มีคุณสมบัติที่ดีกว่า คือ มีความเข้มข้น (Thickening) สูง - อิทธิพลของ Chelating Agents ต่อการตกตะกอนโลหะซัลไฟด์มีน้อย - ปริมาณสลัดจ์โลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อย และง่ายต่อการคังน้ำออก (Dewatering) - สามารถเลือกกำจัดโลหะที่ต้องการและนำส่วนที่เหลืออยู่กลับมาใช้ใหม่ (Recovery) ได้ <p>ข้อจำกัด</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทำให้เกิดก๊าซ H_2S - ปัญหาคือความเป็นพิษของซัลไฟด์ - กระบวนการค่อนข้างซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายสูง เมื่อเทียบกับการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์

2.4.2.3 การตกตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate Precipitation)

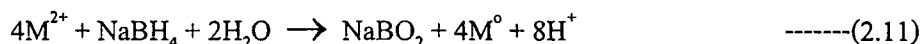
การตกตะกอนด้วยคาร์บอเนตสามารถทำได้โดยการเติม โซดาแอซ (Na_2CO_3) ซึ่งข้อได้เปรียบของเทคนิคนี้เมื่อเทียบกับการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ คือ

- จุดที่เหมาะสมในการบำบัดอยู่ที่สภาวะพีเอชต่ำกว่า
- โลหะที่ตกตะกอนมีความหนาแน่นกว่าของเหลว ซึ่งทำให้ง่ายต่อการแยกของแข็ง
- คุณสมบัติในการคั่งน้ำออกจากสลัดจ์ทำได้ดีกว่า

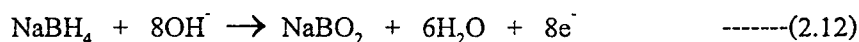
Patterson และ คณะ (1977) พบว่าการกำจัดนิกเกิลและสังกะสี ด้วยการตกตะกอนคาร์บอเนต ไม่มีประโยชน์เมื่อเทียบกับการใช้ไฮดรอกไซด์ นั่นคือ ไม่ได้ช่วยให้สลัดจ์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นหรือกรองออกได้ดีกว่า แต่จะมีผลดีในการกำจัดแคดเมียม(Cd) และตะกั่ว(Pb) พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือ เมื่อบำบัดที่พีเอช 2 ค่า การใช้คาร์บอเนตจะให้ความเข้มข้นที่เหลือต่ำกว่าการใช้ไฮดรอกไซด์ ส่วนการกำจัดตะกั่วที่ค่าประสิทธิภาพเท่ากันจะต้องใช้ค่าพีเอชเท่ากับ 10.5 สำหรับ $\text{Pb}(\text{OH})_2$ แต่ใช้พีเอช 7.5 สำหรับ PbCO_3 นอกจากนี้ PbCO_3 เป็นตะกอนที่แน่น ซึ่งช่วยการกรองให้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับ $\text{Pb}(\text{OH})_2$

2.4.2.4 การตกตะกอนโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride Precipitation) (Freeman, 1989)

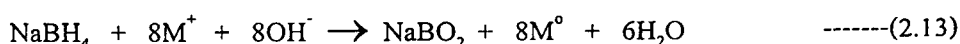
โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4 , SBH) เป็นรีดิวซ์เอเจนต์ ที่ละลายน้ำได้ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮไดรด์ หรือ โซเดียมเมทอกไซด์กับไดโบเรน มีคุณสมบัติละลายได้ในน้ำ และสามารถใช้ตกตะกอนโลหะได้ ดังสมการ 2.11 (Gomez และ คณะ, 1992)

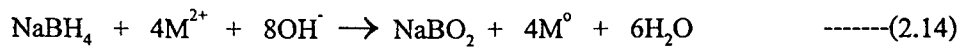


สารละลาย SBH ใช้เป็นรีดิวซ์เอเจนต์ สำหรับเปลี่ยนไอออนของโลหะที่ละลายน้ำ หรือสารประกอบอินทรีย์โลหะ (Organometallic Compound) ให้เป็นโลหะในสภาวะพื้นฐาน ซึ่งไม่ละลายน้ำ (Insoluble Element Metal) SBH จะมีความเสถียรในสภาวะที่เป็นเบสและทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ดังสมการ 2.12



จากสมการ 2.13 แสดงให้เห็นว่า SBH 1 โมล จะรีดิวซ์ Monovalent Metal ได้ 8 โมล และ SBH 1 โมล จะรีดิวซ์ Bivalent Metal ได้ 4 โมล ดังสมการ 2.14 (Freeman, 1989)





กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพสูง ในช่วงพีเอช 8-11 ที่พีเอชต่ำกว่า 8 การตกตะกอนด้วย SBH ให้ได้ประสิทธิภาพต้องใช้ปริมาณ SBH มากขึ้น ที่พีเอชมากกว่า 11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโบโรไฮไดรด์จะลดลง

ตารางที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนน้ำหนักของโลหะที่ถูกรีดิวซ์ต่อน้ำหนักของ SBH ในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัตินั้น อาจต้องใช้ SBH เพิ่มขึ้น เนื่องจากอาจมีสารประกอบอื่นที่สามารถถูกรีดิวซ์ได้ด้วยโบโรไฮไดรด์ และถ้าในน้ำทิ้งมีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะเป็นส่วนใหญ่ (Strongly Complexed Metals) เช่น สารประกอบไซยาไนด์ ต้องกำจัดสารประกอบเหล่านี้ก่อนที่จะบำบัดด้วย SBH นอกจากนี้ SBH ยังสามารถรีดิวซ์สารประกอบที่มีน้ำและแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายได้อีกด้วย เช่น ทีโตน กรดอินทรีย์ เอไมด์ และใช้ในกระบวนการดีฮาโลจีนชัน (Dehalogenation) สารปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์

ตารางที่ 2.4 อัตราส่วนน้ำหนักของโลหะที่ถูกรีดิวซ์ต่อน้ำหนักของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ใช้

Metal	Valency	Weight ratio*
Lead	Pb ²⁺	22
Cadmium	Cd ²⁺	12
Mercury	Hg ²⁺	21
	Hg ⁺	42
Copper	Cu ²⁺	7
Silver	Ag ⁺	22
Gold	Au ³⁺	14
Nickel	Ni ²⁺	6
Palladium	Pd ²⁺	11
Platinum	Pt ⁴⁺	10
Cobalt	Co ²⁺	6
Rhodium	Rh ³⁺	7
Iridium	Ir ⁴⁺	10

*Weight ratio = maximum kilograms of metal reduced per kilogram of sodium borohydride.

2.4.2.5 การตกตะกอนร่วม (Combined Precipitation) (McAnally และ คณะ, 1984)

เป็นระบบที่ใช้การตกตะกอนแต่ละประเภทร่วมกัน เช่น การใช้ซัลไฟด์ชนิดละลายน้ำและคาร์บอเนตเพื่อรีดิวซ์นิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ จากผลการทำจาร์เทสต์ พบว่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกำจัดนิกเกิลเท่ากับ 11 และใช้อัตราส่วนซัลไฟด์ไอออนต่อนิกเกิล(II)ไอออน ($S^{2-} : Ni^{2+}$) เป็น 2 และคาร์บอเนตไอออนต่อนิกเกิล(II)ไอออน ($CO_3^{2-} : Ni$) เท่ากับ 20 (โดยน้ำหนัก) จะได้ความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลือ 0.1 มก./ล. ซึ่งคาดว่ากลไกการกำจัดนิกเกิลอาจเกิดจากการตกตะกอนร่วม (Coprecipitation)

2.5 พีเอช (pH) และโออาร์พี (ORP) (เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม, 2542)

ในบรรดาพารามิเตอร์ทั้งหลาย ที่บอกถึงลักษณะสมบัติของน้ำเสีย พีเอชเป็นพารามิเตอร์ที่มีประโยชน์มากที่สุดและวัดได้ง่าย ใช้ควบคุมกระบวนการบำบัดน้ำเสีย แทบทุกประเภท (ตารางที่ 2.5) เนื่องจากมีการนำเอาพีเอชมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายกันมากจนบางครั้งไม่ทราบถึงความหมายที่แท้จริง

ตารางที่ 2.5 การควบคุมกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยพีเอช (เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม, 2542)

กระบวนการหรือระบบ	ระดับพีเอชที่เหมาะสม	หลักการ
โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม	6-7	
โคแอกกูเลชันด้วยสารประกอบเหล็ก	5-7	
ดีแอเรชันกำจัดแอมโมเนีย	สูงกว่า 11	$NH_4^+ \rightarrow NH_3 + H^+$
ดีแอเรชันกำจัด HCN	ต่ำกว่า 5 หรือ 6	$H^+ + CN^- \rightarrow HCN$
ดีแอเรชันกำจัด H_2S	ต่ำกว่า 3 หรือ 4	$2H^+ + S^{2-} \rightarrow H_2S$
แอเรชันกำจัดเหล็ก	7.5	
แอเรชันกำจัดแมงกานีส	ประมาณ 9.5	
การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน	พีเอชต่ำ	
รีคาร์บอเนชัน	8.6	
การกำจัดความกระด้างด้วยปูน-โซดา	สูงกว่า 10 หรือ 11	
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ	6-8	

เมื่อพิจารณาถึงความหมายของค่าพีเอชแล้ว จะเห็นได้ว่าค่าของไฮโดรเจนไอออน (H^+) เหมือนกับโลหะหนักที่เป็นพิษ ยกตัวอย่าง เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพสามารถเจริญเติบโตได้ดีในระดับพีเอชที่เป็นกลาง หมายความว่า ภายในน้ำจะต้องมี H^+ ต่ำมาก ๆ แบคทีเรียจะเริ่มเจริญเติบโตได้ช้า เมื่อมีพีเอชน้อยลง ซึ่งหมายถึงการมี H^+ เพิ่มขึ้นนั่นเอง

ในขณะที่พีเอช ใช้วัดปฏิกิริยากรด-ด่าง ซึ่งเกี่ยวข้องกับสภาพกรดและสภาพด่าง ส่วนค่า ORP นั้น จะใช้วัดปฏิกิริยารีดอกซ์ เพื่อให้สามารถเข้าใจเกี่ยวกับปฏิกิริยารีดอกซ์หรือค่าโออาร์พีได้ง่ายขึ้น จำเป็นต้องพิจารณาค่าพีเอชและค่า ORP ควบคู่กันไป

ความหมายของค่าพีเอช เป็นดังสมการ 2.15

$$\text{พีเอช} = -\log[H^+] \quad \text{-----}(2.15)$$

นั่นคือค่าพีเอชบอกถึงความเข้มข้นของ H^+ ในหน่วยโมล/ลิตร แต่ไม่ใช่ความเข้มข้นตามความหมายปกติ จากสมการข้างต้น H^+ มีความเข้มข้นดังสมการ 2.16

$$[H^+] = 10^{-\text{pH}} \quad \text{-----}(2.16)$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าพีเอช = 3 ความเข้มข้น $H^+ = 10^{-3}$ โมล/ลิตร และถ้าพีเอชเท่ากับ 11 ความเข้มข้น H^+ จะเท่ากับ 10^{-11} โมล/ลิตร

ในการวัดค่าพีเอชมีข้อกำหนดว่า (สมการ 2.17 และ 2.18)

$$[H^+][OH^-] = 10^{-14} \quad \text{-----}(2.17)$$

$$\text{หรือ} \quad \text{pH} + \text{pOH} = 14 \quad \text{-----}(2.18)$$

และยังมีข้อกำหนดอีกว่า พีเอช = 7 ถือว่าน้ำเป็นกลาง ถ้าพีเอชน้อยกว่า 7 ถือว่าน้ำเป็นกรด ส่วนพีเอชมากกว่า 7 ถือว่าน้ำเป็นด่าง

พารามิเตอร์ pE กำหนดคล้ายคลึงกับพีเอช ดังสมการ 2.19

$$\text{pE} = -\log E \text{ หรือ } -\log [e] \quad \text{-----}(2.19)$$

อย่างไรก็ตาม การบอกความเข้มข้นของอิเล็กตรอนไม่ได้ใช้ค่า pE แต่นิยมใช้ค่า ORP (Oxidation Reduction Potential) และมีหน่วย มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นหน่วยของความต่างศักย์ใน ขณะที่มีการกำหนดค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 0-14 ค่า ORP จะอยู่ในช่วง -1400 ถึง +1400 มิลลิโวลต์

ความคล้ายคลึงกันอีกประการหนึ่งของพีเอชและ ORP คือ ลักษณะของ Titration Curve ที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น โซดาไฟเพิ่มค่าพีเอชของน้ำเสียได้ ส่วนสารละลายคลอรีนหรือ

Oxidizing Agen ชนิดอื่น ๆ ก็สามารถเพิ่มค่า ORP ของของน้ำเสียได้ จะเห็นได้ว่าในขณะที่พีเอช ใช้เป็นพารามิเตอร์ที่มีการควบคุมปริมาณกรด-เบสได้ ค่า ORP ก็เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุม ปริมาณสาร Oxidizing Agent หรือ Reducing Agent ได้เช่นกัน

เครื่องวัดพีเอชสามารถวัดค่าพีเอชและค่า ORP ของน้ำหรือสารละลายได้ โดยปกติอิเล็กโทรด ที่เตรียมไว้มักใช้วัดค่าพีเอชมากกว่าค่า ORP อิเล็กโทรดที่วัดค่าพีเอช คือ Glass Electrode แต่หากต้องการวัดค่า ORP ต้องใช้ Platinum Electrode ถ้าวัดค่า ORP ได้เป็นบวก แสดงว่าสารละลายอยู่ในสภาวะออกซิเดชัน ยกตัวอย่าง เช่น น้ำธรรมชาติจะวัดค่า ORP ได้เป็นบวก เนื่องจากมีออกซิเจน (ซึ่งเป็น Oxidizing Agent และเป็นสารรับอิเล็กตรอน) อยู่ในน้ำ ถ้าค่า ORP เป็นลบจะพบว่าไม่มีออกซิเจนละลายและไม่มีไนเตรต (NO_3^-) ด้วย แต่จะมีบีโอดี (BOD) ซึ่งเป็น Reducing Agent น้ำเสียส่วนใหญ่ มักจะวัดค่า ORP ได้เป็นลบ แสดงว่าอยู่ในสภาวะรีดิวซ์ ซึ่งพร้อมจะมอบอิเล็กตรอนที่จะเติมเข้าไป โดยน้ำเสียที่มี CN^- จะวัดค่า ORP ได้เป็นลบ แต่เมื่อเติมคลอรีน ซึ่งเป็น Oxidizing Agent ค่า ORP ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดยุติของ ปฏิกริยารีดอกซ์ระหว่าง CN^- และ Cl_2

2.5.1 การใช้ ORP ในการบำบัดน้ำเสียทางเคมี

ปฏิกริยารีดอกซ์ มีความเกี่ยวข้องเป็นอันมากกับการบำบัดน้ำและน้ำเสีย การกำจัดสารอินทรีย์ หรือบีโอดีออกจากน้ำเสียล้วนเป็นปฏิกริยารีดอกซ์ โดยสารอินทรีย์หรือบีโอดีเป็น Reducing Agent และมีออกซิเจนหรือสารอื่นเป็น Oxidizing Agent การบำบัดน้ำเสียทางเคมีด้วยวิธีออกซิเดชัน หรือวิธีรีดักชันก็เป็นปฏิกริยารีดอกซ์ทั้งสิ้น ตารางที่ 2.6 เป็นตัวอย่างสมการรีดักชันพร้อมค่า E^0 ซึ่งใช้บ่อยในปฏิกริยาบำบัดน้ำและน้ำเสียทางเคมี

ตารางที่ 2.6 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด (E^0) ที่ 25 องศาเซลเซียส ที่ใช้ในระบบบำบัดแบบเคมี (เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม, 2542)

สมการรีดักชัน	E^0 (โวลต์)
1. $O_3 + 2H^+ + 2e^- = O_2 + H_2O$	2.07
2. $H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- = 2H_2O$	1.78
3. $HClO + H^+ + e^- = 0.5Cl_2 + H_2O$	1.63
4. $MnO_4^- + 4H^+ + 3e^- = MnO_2 + 2H_2O$	1.59
5. $HClO + H^+ + 2e^- = Cl^- + H_2O$	1.50
6. $MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- = Mn^{2+} + 4H_2O$	1.49
7. $Cl_2 + 2e^- = 2Cl^-$	1.36
8. $Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- = 2Cr^{3+} + 7H_2O$	1.33
9. $O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O$	1.23
10. $2SO_3^{2-} + 2H_2O + 2e^- = S_2O_4^{2-} + 4OH^-$	1.12
11. $SO_4^{2-} + H_2O + 2e^- = SO_3^{2-} + 2OH^-$	0.93
12. $ClO_2 + 2H_2O + 2e^- = Cl^- + 2OH^-$	0.89
13. $Hg^{2+} + 2e^- = Hg$	0.86
14. $Cu^{2+} + I^- + e^- = CuI$	0.85
15. $Fe^{3+} + e^- = Fe^{2+}$	0.77
16. $O_2 + 2H^+ + 2e^- = H_2O_2$	0.68
17. $Cu^{2+} + Cl^- + e^- = CuCl$	0.566
18. $S + 2e^- = S^{2-}$ (pH > 7)	0.48
19. $2CO_2 + N_2 + 2H_2O + 6e^- = 2CNO^- + 4OH^-$	0.40
20. $Cu^{2+} + 2e^- = Cu$	0.337
21. $Hg_2Cl_2 + 2e^- = 2Hg + 2Cl^-$ (Sat. KCl)	0.24
22. $AgCl + e^- = Ag + Cl^-$ (1 M. KCl)	0.23
23. $AgCl + e^- = Ag + Cl^-$ (4 M. KCl)	0.20
24. $SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- = H_2SO_3 + H_2O$	0.17
25. $2H^+ + S + 2e^- = H_2S$	0.17
26. $Cu^{2+} + e^- = Cu^+$	0.15

ตารางที่ 2.6 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด (E^0) ที่ 25 องศาเซลเซียส ที่ใช้ในระบบบำบัดแบบเคมี (ต่อ)

สมการรีดักชัน	E^0 (โวลต์)
27. $2H^+ + 2e^- = H_2$	0.00
28. $S + 2H^+ + 2e^- = H_2S$ (pH<7)	-0.14
29. $CuI + e^- = Cu + I^-$	-0.17
30. $Ni^{2+} + 2e^- = Ni$	-0.25
31. $Cd^{2+} + 2e^- = Cd$	-0.41
32. $Fe^{2+} + 2e^- = Fe$	-0.44
33. $S + 2e^- = S^{2-}$	-0.51
34. $Cr^{2+} + 2e^- = Cr$	-0.60
35. $Zn^{2+} + 2e^- = Zn$	-0.76
36. $CNO^- + H_2O + 2e^- = CN^- + 2OH^-$	-0.97
37. $Na^+ + 2e^- = Na$	-2.71

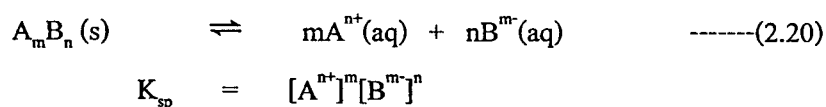
2.6 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการละลายของตะกอน (สุภชัย, 2536)

การคงสภาพของโลหะในตะกอน พิจารณาได้จากการละลายของตะกอนภายหลังการตกตะกอนแล้ว ถ้าโลหะสามารถละลายได้ใหม่จำนวนมาก ถือว่าตะกอนของโลหะนั้นมีความเสถียรน้อย ดังนั้นในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงทฤษฎีของการละลาย

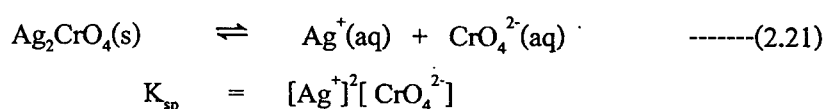
ตะกอนที่เป็นสารไอออนิก เมื่อละลายเป็นสารละลายแล้ว ตะกอนส่วนที่ละลายอยู่ในสารละลาย พบว่าส่วนใหญ่จะแตกตัวเป็นแคทไอออนและแอนไอออนหมด ไม่อยู่ในรูปของโมเลกุล ตะกอนของสารไอออนิกน้อยชนิดที่ไม่เป็นไปตามนี้ แคทไอออนและแอนไอออนที่เกิดจากการละลายตะกอนในสารละลายจันอิมตัวจะอยู่ในสมดุลกับตะกอนที่เป็นของแข็ง ซึ่งสัมพันธ์กับสารละลายอยู่ตลอดเวลา

การละลายของตะกอนนั้น ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของการละลาย (K_{sp}) ของตะกอน ค่านี้เป็นค่าผลคูณของความเข้มข้นในหน่วยโมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตรของไอออนทั้งสอง ที่เป็นองค์ประกอบของตะกอน การที่สารละลายอยู่ในสภาวะจันอิมตัวด้วยตะกอนนั้น ๆ ค่านี้จะแปรผันไปตามอุณหภูมิ

สำหรับตะกอนที่มีสูตร A_mB_n เมื่อละลายเป็นสารละลายอิมตัว สมดุลที่เกิดขึ้นระหว่าง สารละลายและของแข็งจะเป็น ดังสมการ 2.20



$[A^{n+}][B^{m-}]$ เป็นความเข้มข้นที่อิมตัวของ A^{n+} และ B^{m-} ในสารละลายตามลำดับ เช่น ในกรณีของ Ag_2CrO_4 ละลายในน้ำจนเป็นสารละลายอิมตัว ดังสมการ 2.21



ที่อุณหภูมิคงที่ ถ้าสารละลายอยู่ในสภาพอิมตัว คือ ในสารละลายมีไอออนทั้งสองนี้ละลาย อยู่และอยู่ในสมดุลกับตะกอนของ Ag_2CrO_4 โดยไม่คำนึงว่าในสารละลายนั้นจะมีไอออนอื่น ๆ ละลายร่วมอยู่ด้วยหรือไม่ก็ตาม ดังสมการ 2.22

$$[Ag^+]^2[CrO_4^{2-}] = K_{sp} = \text{ค่าคงที่เสมอ} \quad \text{-----(2.22)}$$

2.6.1 การละลายของตะกอนในน้ำบริสุทธิ์

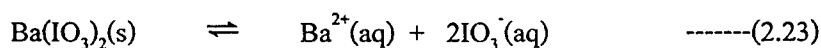
การละลายของสารในตัวทำละลาย จะแสดงในรูปของความเข้มข้นของสารนั้น ในสารละลาย ซึ่งเกิดจากสารนั้นละลายในตัวทำละลายดังกล่าวจนอิมตัว การละลายของสารถ้าไม่ระบุตัวทำละลาย เป็นสารใด จะหมายถึงตัวทำละลายเป็นน้ำบริสุทธิ์ ในการคำนวณโดยทั่วไป การละลายของสาร จะแสดงในหน่วยของจำนวนโมลของตัวถูกละลายในสารละลาย 1 ลูกบาศก์เดซิเมตร (โมลต่อ ลูกบาศก์เดซิเมตร)

การแบ่งชนิดของสารไอออนิกตามเกณฑ์การละลายในน้ำได้เป็น 3 แบบ คือ

1. แบบที่ 1 เป็น สารที่ละลายน้ำได้ดี (Soluble) ความเข้มข้นของสารเหล่านี้ในสารละลายอิมตัวมีค่าสูง K_{sp} มีค่าสูง เช่น สารไอออนิกของโลหะหมู่ 1 ในตารางธาตุ เช่น NaCl และ K_2SO_4 เป็นต้น
2. แบบที่ 2 เป็น สารไอออนิกที่ละลายได้เล็กน้อย (Slightly Soluble) ตัวอย่าง เช่น $CaSO_4$, Ag_2SO_4 และ $PbCl_2$ เป็นต้น
3. แบบสุดท้าย เป็น สารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble) แต่ในความเป็นจริงสารแบบนี้ก็ยังมี ส่วนที่ละลายในน้ำได้ แต่น้อยมาก สารสองแบบสุดท้ายจะเป็นสารที่ เรียกว่า “ตะกอน” ซึ่งมีค่า K_{sp} ก่อขึ้นต่ำ

2.6.2 การละลายของตะกอนในสารละลายที่มีไอออนที่เป็นองค์ประกอบของตะกอนละลายอยู่ (ผลของไอออน, Common Ion Effect)

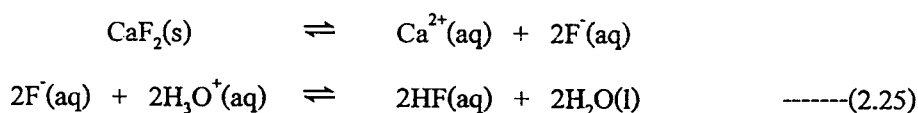
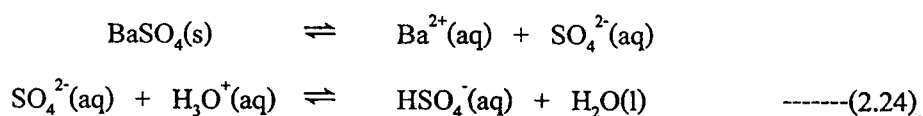
ในสารละลายที่ปราศจากสารอื่นรบกวน การละลาย $\text{Ba}(\text{IO}_3)_2$ จะไม่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากสมมูลเคมี ดังสมการ 2.23 ข้างล่างนี้ไม่ถูกรบกวน



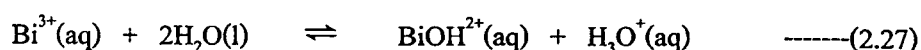
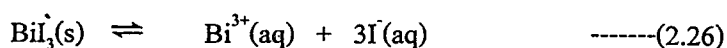
แต่ถ้านำตะกอน $\text{Ba}(\text{IO}_3)_2$ ไปละลายในสารละลายที่มี Ba^{2+} หรือ IO_3^- หรือทั้งสองไอออนละลายอยู่ เช่น ใช้สารละลาย $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ หรือ KIO_3 เป็นตัวทำละลาย Ba^{2+} หรือ IO_3^- ในสารละลายจะมีผลทำให้การละลายของ $\text{Ba}(\text{IO}_3)_2$ ลดน้อยลง ตามหลักของเลชาเตอลิเยร์ (Lechaterlier) Ba^{2+} หรือ IO_3^- จะไปผลักดันทำให้สมมูลเปลี่ยนแปลงจากขวาไปซ้าย ซึ่งมีผลทำให้การละลายของ $\text{Ba}(\text{IO}_3)_2$ มีค่าน้อยกว่าที่ละลายในน้ำ

2.6.3 ผลของ pH ต่อการละลายของตะกอน

การละลายของตะกอนส่วนใหญ่จะถูกกระทบกระเทือน โดยความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ในสารละลาย เนื่องจากแคทไอออน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของตะกอนจะแสดงความเป็นกรดอ่อนและเบสอ่อนตามลำดับในสารละลาย ตัวอย่างเช่น ตะกอนของ BaSO_4 และ CaF_2 จะละลายในสารละลายที่เป็นกรดได้ดีกว่าในน้ำ เนื่องจากแคทไอออนของตะกอนทั้งสองนี้เมื่อละลายอยู่ในสารละลายจะแสดงสมบัติเป็นเบส ดังสมการ 2.24 และ 2.25



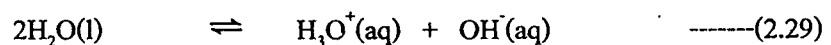
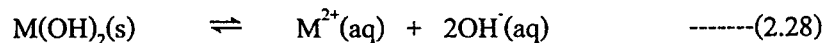
ข้อสังเกต แอนไอออนที่แสดงสมบัติเป็นเบสได้นั้น จะเป็นแอนไอออนที่เป็นองค์ประกอบของกรดอ่อน การละลายของตะกอนแบบนี้จะละลายได้ดีขึ้นในสารละลายที่เป็นกรด ในทางตรงกันข้ามแคทไอออนบางชนิดที่เป็นองค์ประกอบของตะกอน จะแสดงสมบัติเป็นกรดเมื่อละลายอยู่ในสารละลาย เช่น บิสมีทไฮโอไคด์ จะละลายในน้ำได้ดีกว่ากรด ดังสมการ 2.27



เมื่อเติมกรดลงไปในการละลายจะทำให้ BiI_3 กลายเป็น Bi^{3+} มากขึ้น (สมการ 2.27) และมีผลทำให้สมดุลแรก (สมการ 2.26) ถูกผลักไปทางซ้ายมือมากขึ้น จึงทำให้การละลายของ BiI_3 ลดน้อยลง

2.6.4 การละลายของตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะ

ไฮดรอกไซด์ของโลหะไดวาเลนต์ (Divalent Metal Ion, M^{2+}) เมื่อละลายในน้ำ สมดุลเคมีที่เกิดขึ้น คือ (สมการ 2.28)



สมการที่ขจัดคิจากค่าคงที่ของสมดุล (สมการ 2.30 และ 2.31)

$$[\text{M}^{2+}][\text{OH}^-]^2 = K_{\text{sp}} \quad \text{-----}(2.30)$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-] = K_{\text{w}} \quad \text{-----}(2.31)$$

การละลายของตะกอน $\text{M(OH)}_2 = [\text{M}^{2+}]$

สมการดุลโดยประจุ (สมการ 2.32)

$$2[\text{M}^{2+}] + [\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] \quad \text{-----}(2.32)$$

การคำนวณหาการละลายของตะกอน M(OH)_2 แบ่งออกเป็น 2 กรณี

- สำหรับ M(OH)_2 ที่ละลายได้พอสมควรจนทำให้ OH^- ในสารละลายมีค่าแตกต่างไปจาก H_3O^+ มาก คือ $[\text{OH}^-] \gg [\text{H}_3\text{O}^+]$ จากสมการที่ 2.32 จะได้

$$2[\text{M}^{2+}] = [\text{OH}^-] \quad \text{-----}(2.33)$$

แทนค่าของ $[\text{OH}^-]$ ในสมการ 2.33 ลงในสมการ 2.30 จะได้

$$[\text{M}^{2+}] = (K_{\text{sp}}/4)^{1/3}$$

- สำหรับ M(OH)_2 ที่ละลายได้น้อยมากจน OH^- ที่มาจากการแตกตัวของตะกอนไม่ทำให้ OH^- ที่มาจากการแตกตัวของน้ำไม่กระทบกระเทือนเลย จะได้

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] = 1.00 \times 10^{-7}$$

การละลายของตะกอน M(OH)_2 คำนวณได้จากสมการ (2.30) จะได้

$$\begin{aligned} \text{การละลายของ } \text{M(OH)}_2 &= [\text{M}^{2+}] = K_{\text{sp}} / [\text{OH}^-]^2 \\ &= K_{\text{sp}} / (1.0 \times 10^{-7})^2 \end{aligned}$$

ถ้าการละลายของ $M(OH)_2$ ไม่เป็นไปตามทั้ง 2 แบบ คือ OH^- ที่มาจากตะกอนมีค่าไม่แตกต่างกันไปมาจากค่า OH^- ที่มาจากการแตกตัวของน้ำ การคำนวณการละลายของตะกอนจะต้องคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.30 2.31 และ 2.32

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 Cook และ คณะ (1980)

สรุปรวบรวมการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (SBH, $NaBH_4$) บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ได้แก่

2.7.1.1 Removal และ Recovery Lead

ทดลองใช้ SBH กำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียของโรงงานผลิต Tetraalkyl Lead ซึ่งตะกั่วที่ปนเปื้อนจะอยู่ในรูป Alkyl Lead และสารประกอบอินทรีย์ตะกั่ว การบำบัดขั้นแรกจะปรับพีเอชของน้ำเสียเป็น 9 เพื่อตกตะกอนตะกั่วไฮดรอกไซด์บางส่วน โดยใช้โพลีเมอร์ช่วยตกตะกอนร่วมด้วย สามารถลดความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้นจาก 500 - 3,500 มก./ล. หลังจากนั้นจึงบำบัดด้วย SBH ที่พีเอชเท่ากับ 9 โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักของ SBH ต่อ ตะกั่ว เป็น 0.3 - 0.5 จะให้ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำออกเหลือต่ำกว่า 0.1 มก./ล.

2.7.1.2 Mercury Removal

ทดลองใช้ SBH กำจัดปรอทออกจากน้ำเสียของโรงงานผลิตก๊าซคลอรีน และโซดาไฟ ซึ่งใช้ปรอทเป็นสารอิเล็กทรอนิกส์ มีความเข้มข้นของปรอทในน้ำเสีย 10 - 50 มก./ล. ขั้นแรกจะกำจัดสารออกซิไดซ์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียก่อนด้วยโซโอสัลเฟต แล้วจึงบำบัดด้วย SBH โดยใช้ปริมาณ SBH ที่เกินพอเพื่อป้องกันการรีออกซิเดชันของปรอท น้ำออกหลังจากผ่านการกรองจะเหลือความเข้มข้นปรอท 0.1 - 0.8 มก./ล.

2.7.1.3 Silver Recovery

การทดลองนำโลหะเงินจากน้ำเสียโรงงานผลิตฟิล์มถ่ายรูปกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งน้ำเสียดังกล่าว จะมีเงินและแคดเมียมเจือปนอยู่ 10 - 120 มก./ล. และ 5 - 60 มก./ล. ตามลำดับ เงินจะอยู่ในรูป Silver Halides ที่ไม่ละลายน้ำและเงินบางส่วนที่ละลายน้ำ การบำบัดขั้นแรกจะเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ตามด้วยโซดาไฟเพื่อปรับพีเอชเป็น 11 แล้วจึงใช้ SBH ฟล็อกเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะช่วยแยกของแข็งออกจากของเหลวได้ดี อย่างไรก็ตามเมื่อใช้โพลีเมอร์แทนจะให้ข้อดีมากกว่าคือตะกอนที่เกิดขึ้นจะสามารถสกัดเอาเงินกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่า น้ำออกขั้นสุดท้ายจะเหลือความเข้มข้นเงินและแคดเมียมประมาณ 0.09 มก./ล.

2.7.2 Gomez และ คณะ (1993)

ได้ศึกษาการกำจัดโคบอลต์ (II) ไอออนออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียม โดยใช้ $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ด้วยวิธีรีดักชัน โดยใช้ SBH 12 เปอร์เซ็นต์ ละลายในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะได้โบโรไฮไดรด์ไอออน (BH_4^-) เกิดขึ้น และนำไปใช้ร่วมกับโซเดียมไดไฮโอไนต์ ควบคุมอุณหภูมิขณะทดลองให้ต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส (± 1 องศาเซลเซียส) ปั่นกวนแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch) ด้วยความเร็วรอบ 450 รอบ/นาที เมื่อเริ่มต้นการทดลองตั้งสมมติฐานว่า ตะกอนที่เกิดขึ้น ควรจะเป็นตะกอนของ Co_2B (ที่พีเอชต่ำกว่า 7 ตะกอนนี้สามารถเกิดการรื้อออกซิเดชันกลายเป็น Co^{2+} ละลายกลับเข้าไปในน้ำ)

ผลการทดลอง พบว่า เมื่อเติมสารละลาย SBH ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ พีเอชจะเพิ่มขึ้น จากนั้นจะลดลงก่อนที่ปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุล และพีเอชจะเพิ่มขึ้น เมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล การทดลองนี้สามารถกำจัดโคบอลต์ (II) ได้อย่างสมบูรณ์ ความเข้มข้นสูงสุดที่บำบัดได้เป็น 760 ไมโครโมล/ลิตร ใช้ปริมาณ SBH เท่ากับ 1420 ไมโครโมล/ลิตร และตะกอนที่เกิดขึ้นไม่เป็นไปตามสมมติฐาน เนื่องจากพบว่าเป็นตะกอนของ $\text{Co}(\text{OH})_2$

2.7.3 Lindsay และ Stennick (1996)

ศึกษาการใช้ SBH รีดิวซ์โลหะที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโรงงาน เช่น ตะกั่ว โคบอลต์ และสังกะสี ในระบบบำบัดแบบ Batch และ แบบต่อเนื่อง โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ ลดปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น น้ำล้างและน้ำทิ้งที่เป็น Chelating และ Nonchelating จะบำบัดด้วยโซเดียมไบซัลไฟด์ร่วมกับ SBH (12 % SBH ใน 40 % NaOH) ภายใต้สภาวะพีเอชและ ORP ที่เหมาะสมและใช้โพลีเมอร์เป็น โคแอกกูแลนต์เอ็ด ผลการทดลอง จะได้ตะกอนโลหะที่มีคุณสมบัติยึดตัวกันแน่น ทำให้รีดน้ำออกได้ง่าย และสามารถนำโลหะในตะกอน กลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนน้ำเสียหลังการบำบัดจะมีปริมาณ โลหะต่ำกว่า 1 มก./ล.

2.7.4 Lee และ คณะ (2003)

ศึกษาผลของปฏิกิริยาระหว่างไอออนของโลหะกับโบโรไฮไดรด์ ภายใต้สภาวะ Reductive Bleaching โดยใช้ตัวอย่างไอออนของโลหะ ได้แก่ เหล็ก (III) และ Mn (II) ซึ่งเป็นไอออนที่พบมาก ในการทำเยื่อกระดาษ พบว่าไอออนของโลหะเหล่านี้ จะตกตะกอนออกมาเมื่อทำปฏิกิริยากับ SBH และไฮดรอกไซด์ (OH^-) หรือเมื่อเติม SBH เพียงอย่างเดียว และเมื่อตรวจสอบ Oxidation State ของโลหะ ด้วย X-Ray Photoelectron Spectroscopy จะเห็นว่า Fe (III) ถูกรีดิวซ์เป็น Fe (0) เมื่อเติม 12 % SBH ใน 40 % NaOH และถูกรีดิวซ์เป็น Fe (II) เมื่อเติมเฉพาะ SBH 0.038 % (โดยน้ำหนัก) ส่วนผลของ Mn (II) ยังไม่เป็นที่แน่ชัด

2.7.5 Ghorieshi และ Haghghi (2003)

ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ไม่ย่อยสลายทางชีวภาพจากโรงงานฟอกย้อม โดยการรีดักชันด้วย SBH เพื่อลดค่าใช้จ่ายและปัญหาที่เกิดจากน้ำเสีย

ศึกษาจากการบำบัดแบบ Activated Sludge โดยใช้ SBH เป็นตัวรีดิวซ์ และใช้ไบซัลไฟด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การบำบัดโดยการรีดักชันด้วย SBH และการออกซิเดชันด้วยวิธีทางชีวภาพ ทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้น 20 มก./ล. ประกอบด้วยสีที่มีโครงสร้าง 5 ชนิด คือ สีเบสิก (Basic) สีโคเรกท์ (Direct) สีดีสเพิร์ส (Disperse) สีเอซิด (Acid) และ สีรีแอกทีฟ (Reactive) ส่วนน้ำเสียจริงเก็บตัวอย่างมาจากโรงงานฟอกย้อม 2 แห่งในเมืองอิสฟาฮาน ประเทศอิหร่าน

ทำการทดลองบำบัดที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ จากผลการทดลองพบว่า โครงสร้างของสีที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ถูกรีดิวซ์ไปเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ เช่น Alkane และ Alkyl แล้วถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย การทดลองนี้พบว่าสามารถกำจัดสารประกอบชนิดที่ไม่อิมตัวบางชนิดได้ เช่น สารประกอบที่มีวงอะโรมาติก คีโตน เบนซิลิก และ สารฟีนอลิก

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. โซเดียมโบโรไฮไดรด์, (NaBH_4) ชนิดผง เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
2. คอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต [$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$] ชนิดผง เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
3. นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต [$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] ชนิดผง เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
4. โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ชนิดผง เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเม็ด เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
6. สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 65 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Merck
7. สารละลายมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์โลหะหนักทองแดงและนิกเกิล เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บีกเกอร์พลาสติก (Plastic Beaker) ขนาด 10 50 100 และ 500 มล.
2. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 10 25 50 100 500 และ 1,000 มล.
3. ปิเปต (Pipette) ขนาด 2 10 และ 20 มล.
4. กระบอกตวง (Measuring Cylinder) ขนาด 10 50 และ 500 มล.
5. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 องศาเซลเซียส
6. เครื่องชั่งสารแบบละเอียด (Analytical Balance) ยี่ห้อ SWISS QUALITY รุ่น PRECISA 205A
7. กระดาษกรองใยแก้ว GF/C (Glass Fiber Filter) ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 ซม.
8. ชุดกรองบุชเนอร์ (Buchner Funnel)
9. เครื่องดูดสูญญากาศ (Vacuum Pump)
10. ขวดดูดสูญญากาศ (Suction Flask) ขนาด 1000 มล.
11. เครื่องกวนชนิดใช้แม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)

12. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic Absorption Spectrophotometer) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น 760
13. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer) รุ่น D8 Advance บริษัท Bruker AG
14. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (X-Ray Fluorescence Spectrophotometer) รุ่น SRS 3400 บริษัท Bruker AG
15. เครื่องจาร์เทสต์ (Jar Test Apparatus)
16. เครื่องวัดพีเอช รุ่น Model 250 บริษัท Denver Instrument
17. เครื่องวัดไออาร์พี (เครื่องวัดพีเอช ชนิดที่วัดค่าไออาร์พีได้) รุ่น 654 บริษัท Metrohm Herisau Switzerland
18. ช้อนตักสาร (Spatula)
19. แท่งแก้วคนสาร (Glass Rod)
20. หลอดหยด (Dropper)
21. กรวยกรองพลาสติก (Plastic Funnel)
22. ปากคีบ (Forceps)
23. ตู้ดูดควัน (Hood)
24. เดซิกเคเตอร์ (Desiccator)
25. กระบอกน้ำกลั่น
26. กระจกนาฬิกา

3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

3.3.1 การเตรียมสารละลายสต็อก ปริมาตร 1,000 มล.

เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำเสียโลหะต่าง ๆ ส่วนมากจะมีสารเจือปนอยู่มากมาย เช่น ตัวออกซิไดซ์ต่าง ๆ ดังนั้น น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนี้ จึงมีส่วนประกอบของตัวออกซิไดซ์ด้วย ซึ่งในที่นี้จะเลือกโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เป็นตัวออกซิไดซ์

องค์ประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง จึงมีส่วนประกอบของไอออนโลหะที่สนใจ คือ Cu^{2+} หรือ Ni^{2+} และตัวออกซิไดซ์ คือ $Cr_2O_7^{2-}$

3.3.1.1 การเตรียมสารละลายสต็อกของ Cu^{2+} เข้มข้น 10,000 มก./ล.

ชั่งคอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต [$Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$] ที่อบแห้งแล้ว จำนวน 38.0233 กรัม

ละลายด้วยน้ำกลั่น 500 มล. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตรของขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วปรับ pH ให้มีค่าต่ำกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 12.5 มล. จากนั้นเก็บสารละลายในขวดพลาสติกโพลีเอทิลีน ที่ผ่านการแช่ด้วยกรดไนตริกเจือจาง 6 เปอร์เซ็นต์

3.3.1.2 การเตรียมสารละลายสต็อกของ Ni^{2+} เข้มข้น 10,000 มก./ล.

ซึ่ง निकเกิดไนเตรตเฮกซะไฮเดรต $[\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ ที่อบแห้งแล้ว จำนวน 49.5316 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 500 มล. ทำการปรับปริมาตรตามขั้นตอนคั้งข้อ 3.3.1.1

3.3.1.3 การเตรียมสารละลายสต็อกของ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 10,000 มก./ล.

ซึ่ง $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ที่อบแห้งแล้วมา 13.6205 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตรของขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร จากนั้นเก็บสารละลายในขวดแก้วสีชาและเก็บสารละลายนี้ให้พ้นแสง

3.3.2 น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 200 300 และ 400 มก./ล ปริมาตร 500 มล.

3.3.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. จะประกอบด้วย Cu^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. และ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 100 มก./ล. ซึ่งเตรียมได้จากการเปิดสารละลายสต็อก Cu^{2+} เข้มข้น 10,000 มก./ล. และสารละลายสต็อก $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 10,000 มก./ล. จำนวน 10 มล. และ 5 มล. ตามลำดับ (ตารางที่ 3.1) ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มล. จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

3.3.2.2 น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. จะประกอบด้วย Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. และ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 100 มก./ล. ซึ่งเตรียมได้จากการเปิดสารละลายสต็อก Cu^{2+} เข้มข้น 10,000 มก./ล. และสารละลายสต็อก $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 10,000 มก./ล. ดังตาราง 3.1 และทำการปรับปริมาตรตามขั้นตอนคั้งข้อ 3.3.2.1

3.3.2.3 น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 400 มก./ล. จะประกอบด้วย Cu^{2+} เข้มข้น 400 มก./ล. และ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 100 มก./ล. ซึ่งเตรียมได้จากการเปิดสารละลายสต็อก Cu^{2+} เข้มข้น 10,000 มก./ล. และสารละลายสต็อก $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 10,000 มก./ล. ดังตาราง 3.1 และทำการปรับปริมาตรตามขั้นตอนคั้งข้อ 3.3.2.1

3.3.3 น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 200 300 และ 400 มก./ล. ปริมาตร 500 มล.

3.3.3.1 น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. จะประกอบด้วย Ni^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. และ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 100 มก./ล. ซึ่งเตรียมได้จากการเปิดสารละลายสต็อก Ni^{2+} เข้มข้น 10,000 มก./ล. และสารละลายสต็อก $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 10,000 มก./ล. จำนวน 10 มล. และ 5 มล. ตามลำดับ (ตารางที่ 3.1) ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มล. จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

3.3.3.2 น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. จะประกอบด้วย Ni^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. และ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 100 มก./ล. ซึ่งเตรียมได้ตามขั้นตอนคั้งข้อ 3.3.3.1

3.3.3.3 น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 400 มก./ล. จะประกอบด้วย Ni^{2+} เข้มข้น 400 มก./ล. และ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 100 มก./ล. ซึ่งเตรียมได้ตามขั้นตอนดังข้อ 3.3.3.1

3.3.4 แบลงค์ ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 100 มก./ล) ปริมาตร 500 มล.

องค์ประกอบในแบลงค์ จะมีเพียงตัวออกซิไดซ์ ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) อย่างเดียว เพื่อเปรียบเทียบผลการบำบัดของ SBH กับตัวออกซิไดซ์ที่ไม่มีไอออนของโลหะที่สนใจศึกษา (แบลงค์) และตัวออกซิไดซ์ที่มีไอออนของโลหะที่สนใจศึกษา (น้ำเสียสังเคราะห์) โดยแบลงค์จะมีความเข้มข้นลงที่ตลอดทุกการทดลอง ซึ่งเตรียมแบลงค์ได้จากการปิเปตสารละลายสต็อก $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 10,000 มก./ล. จำนวน 5 มล. ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มล. จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงถึงปริมาตรของสารละลายสต็อกที่ต้องใช้เพื่อเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ปริมาตร 500 มล.

ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หรือน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} และแบลงค์ (มก./ล.)		ปริมาตรสารละลายสต็อกที่ต้องปิเปต (มล.)	
ความเข้มข้นของ Cu^{2+} หรือ Ni^{2+}	ความเข้มข้นของ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	สารละลายสต็อก Cu^{2+} หรือ Ni^{2+}	สารละลายสต็อก $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$
200	100	10	5
300	100	15	5
400	100	20	5
แบลงค์	100	-	5

3.4 การดำเนินการทดลอง

3.4.1 การเตรียมสารละลาย SBH เข้มข้น 1.2 % (w/v) ใน NaOH 4 % (w/v) ปริมาตร 50 มล.

1. ชั่ง NaOH จำนวน 40 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรจนได้ปริมาตร 1,000 มล. จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 4 % (w/v) จากนั้นเก็บสารละลายนี้ในขวดพลาสติกโพลีเอทิลีน
2. นำ SBH ที่อบแห้งแล้ว จำนวน 0.6 กรัม ละลายด้วย NaOH 4% (w/v) จากข้อ 1 จนมีปริมาตรของสารละลายรวมทั้งหมดเป็น 50 มล. ด้วยขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 มล. โดยจะต้องทำการเตรียมสารละลาย SBH นี้ใหม่ทุกครั้งที่ทำทดลองและต้องใส่สารละลายในบีกเกอร์พลาสติกเสมอ

3.4.2 วิธีการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน Cu^{2+} เข้มข้น 2-10 มก./ล.

3.4.2.1 การเตรียมสารละลายสต็อกของ Cu^{2+} มาตรฐานเข้มข้น 100 มก./ล. ปริมาตร 100 มล.

เปิดสารละลายมาตรฐาน Cu^{2+} เข้มข้น 1,000 มก./ล. ที่ใช้ในการวิเคราะห์มา จำนวน 10 มล. ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล. เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร แล้วปรับพีเอชให้ต่ำกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 1.25 มล. ทำการเก็บสารละลายนี้ในขวดพลาสติกโพลีเอทิลีน

3.4.2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน Cu^{2+} มาตรฐานเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มก./ล. ปริมาตร 25 มล.

เปิดสารละลายสต็อก Cu^{2+} มาตรฐานเข้มข้น 100 มก./ล. ในข้อ 3.4.2.1 ปริมาตร 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 มล. ตามลำดับ ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มล. แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร (ทำการเตรียมใหม่ทุกครั้ง เมื่อต้องการจะวิเคราะห์ความเข้มข้นของ Cu^{2+} ในน้ำเสียตัวอย่าง)

3.4.2.3 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

วัดการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน Cu^{2+} ในข้อ 3.4.2.2 ทั้ง 5 ความเข้มข้นที่ความยาวคลื่น 324.8 นาโนเมตร

3.4.2.4 กราฟมาตรฐานของสารละลาย Cu^{2+} เข้มข้น 2-10 มก./ล.

พลอตกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Cu^{2+} ทั้ง 5 ความเข้มข้น

3.4.3 วิธีการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน Ni^{2+} เข้มข้น 2-10 มก./ล.

เปลี่ยนสารละลายมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์โลหะหนัก Cu^{2+} เป็นสารละลายมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์โลหะหนัก Ni^{2+} แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน Ni^{2+} ทั้ง 5 ความเข้มข้น โดยเปลี่ยนความยาวคลื่นเป็น 232.0 นาโนเมตร ตามขั้นตอนทั้งหมดดังข้อ 3.4.2

3.4.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตัวอย่างที่ต้องการหาความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cu^{2+} และ Ni^{2+} ก่อนบำบัด ปริมาตร 25 มล.

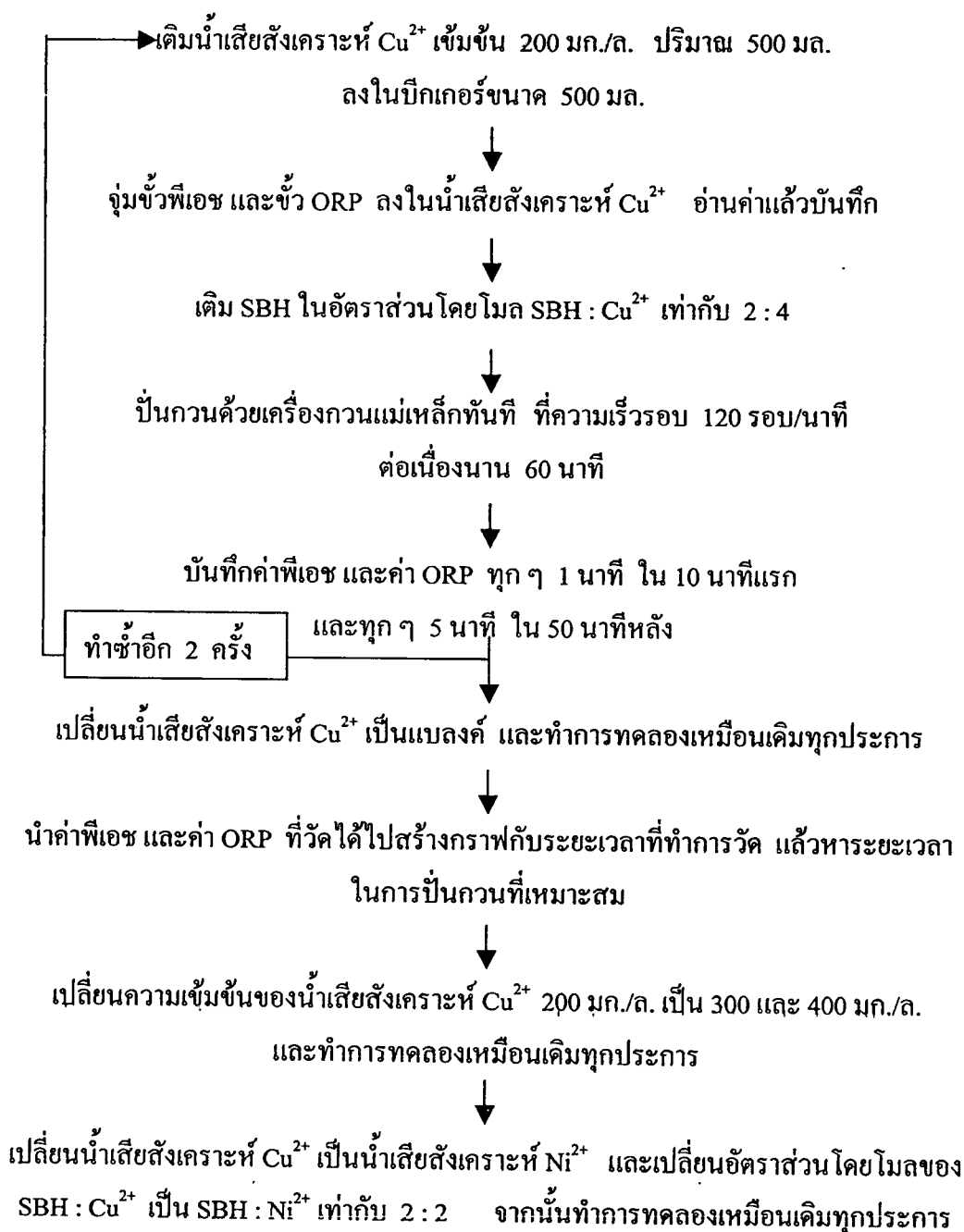
เพื่อให้ทราบถึงความเข้มข้นที่แท้จริงของ Cu^{2+} หรือ Ni^{2+} ในน้ำเสียสังเคราะห์และแปลงค์ ดังนั้น จึงต้องมีการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ที่มีความเข้มข้นสูงให้อยู่ในช่วงความเข้มข้นของกราฟมาตรฐาน โดยปฏิบัติได้ดังนี้

เปิดแปลงค์และน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หรือน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ก่อนบำบัด ดังตาราง 3.2 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกริมาตร จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้น 0.3 มล. เพื่อรักษาสภาพของน้ำตัวอย่าง แล้วเก็บน้ำตัวอย่างในขวดพลาสติกโพลีเอทิลีน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส กรณีที่ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ทันทีหลังการทดลอง

ตารางที่ 3.2 แสดงถึงปริมาณของแบลงค์และน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หรือน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ที่ต้องใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ก่อนทดลอง

ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หรือน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} และแบลงค์ (มก./ล.)	ปริมาณที่ต้องปิเปต (มล.)
200	1.0
300	0.7
400	0.6
แบลงค์	1.0

3.4.5 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ด้วย SBH



3.4.6 การศึกษาหาสภาวะของปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสม ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}

3.4.6.1 การศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการบำบัด

เติมน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. ปริมาณ 500 มล. ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มล.

1 ใบ และเติมแบลจค์ ปริมาณ 500 มล. ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มล. อีก 1 ใบ

ปรับพีเอชให้เท่ากับ 2 ทั้ง 2 บีกเกอร์

เติม SBH ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4 ทั้ง 2 บีกเกอร์

ใช้เครื่องจาร์ทดสอบความเร็วที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที ตามเวลาที่เหมาะสมในข้อ 3.4.5

และกวนช้าที่ความเร็วรอบ 40 รอบ/นาที เป็นเวลาอีก 40 นาที

บันทึกค่าพีเอช

ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง

น้ำใสส่วนบน ปริมาตร 30 มล.

- หาปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ไม่จมตัว
โดยกรองน้ำเสียด้วยกระดาษกรองใยแก้ว

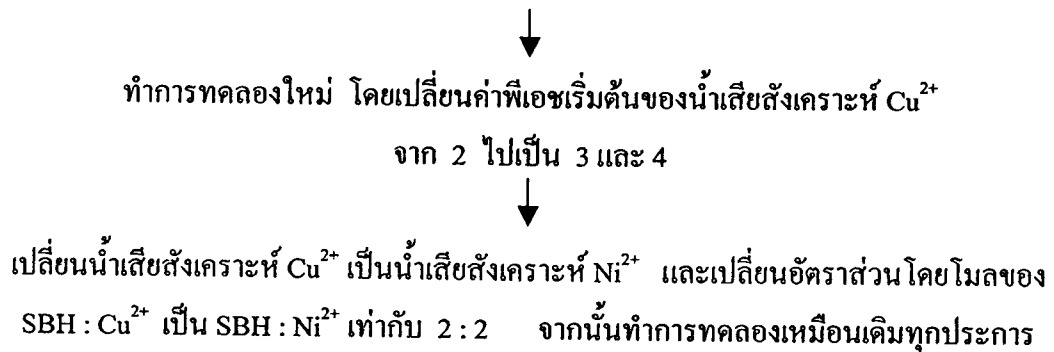
น้ำที่ผ่านการกรอง

- วิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Cu^{2+}
ที่เหลือ ด้วยเครื่อง AAS

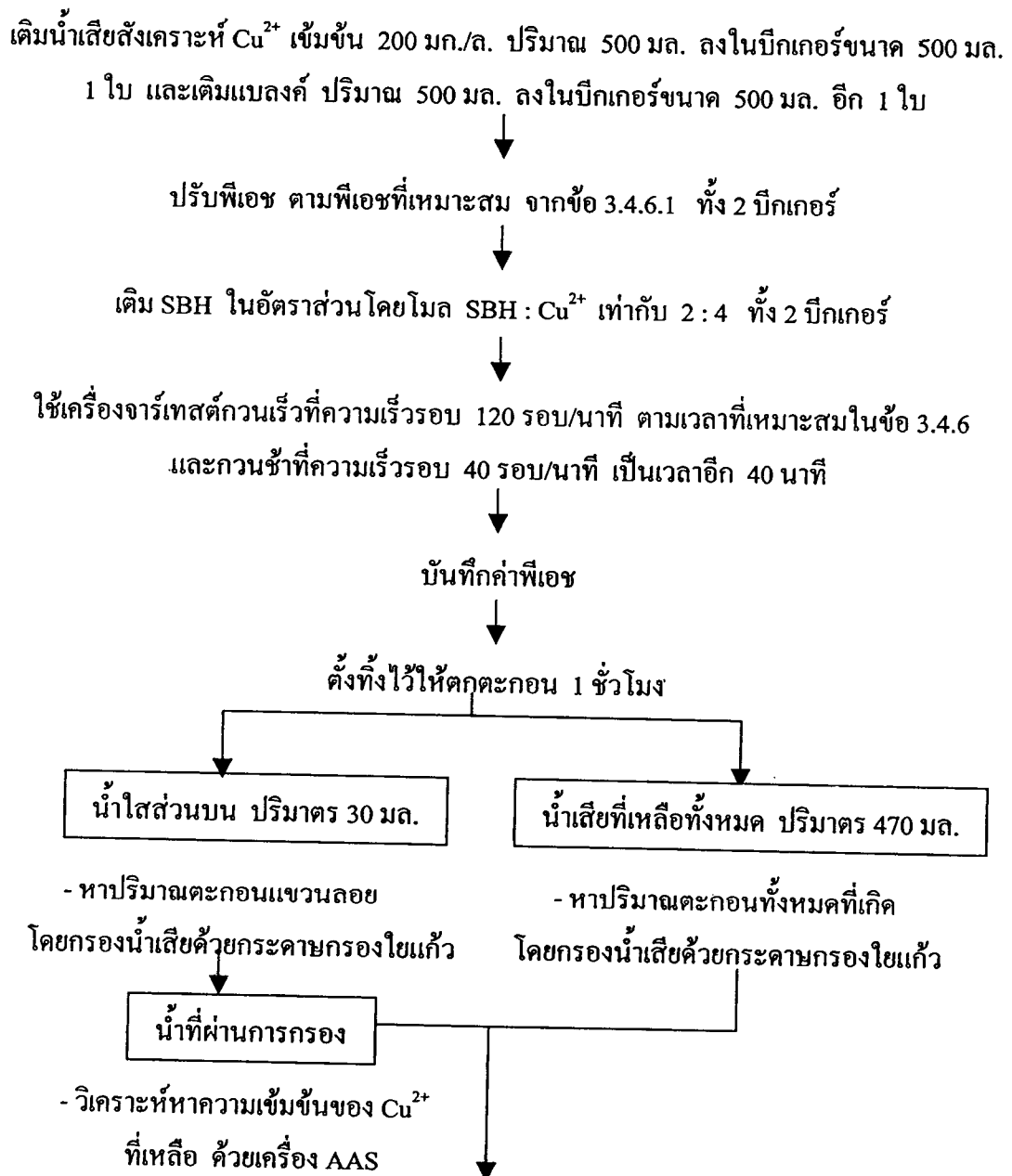
น้ำเสียที่เหลือทั้งหมด ปริมาตร 470 มล.

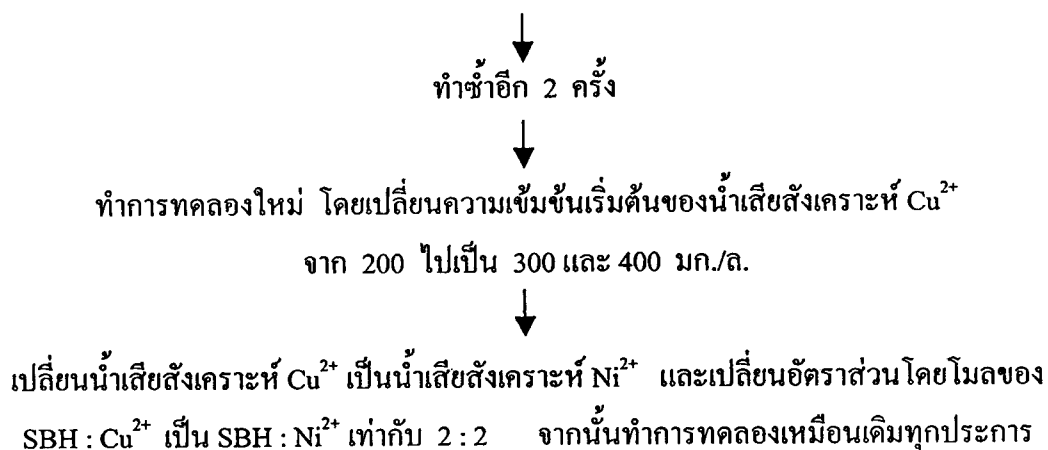
- หาปริมาณตะกอนทั้งหมดที่เกิด
โดยกรองน้ำเสียด้วยกระดาษกรองใยแก้ว

ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง



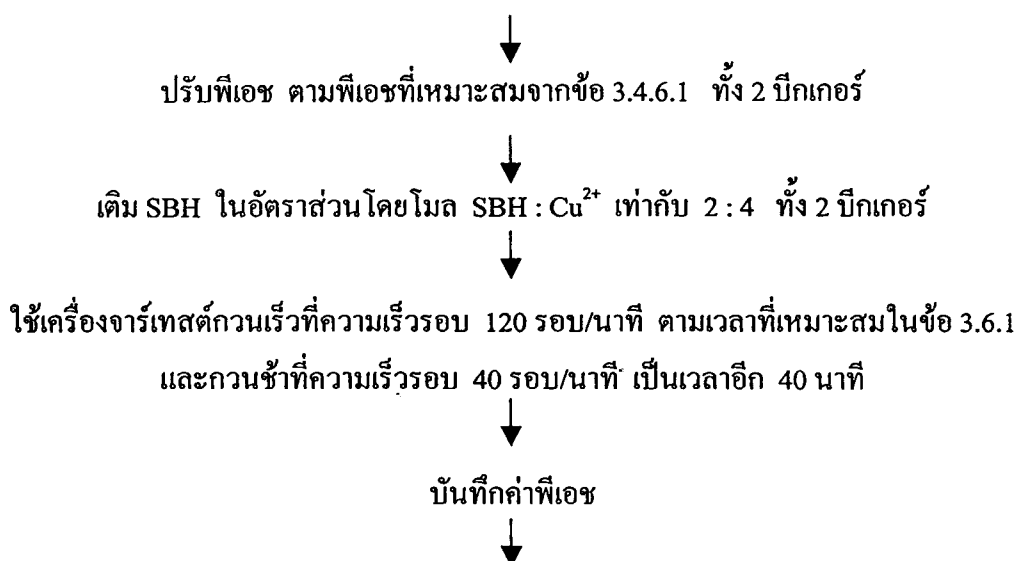
3.4.6.2 การศึกษาหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการบำบัด

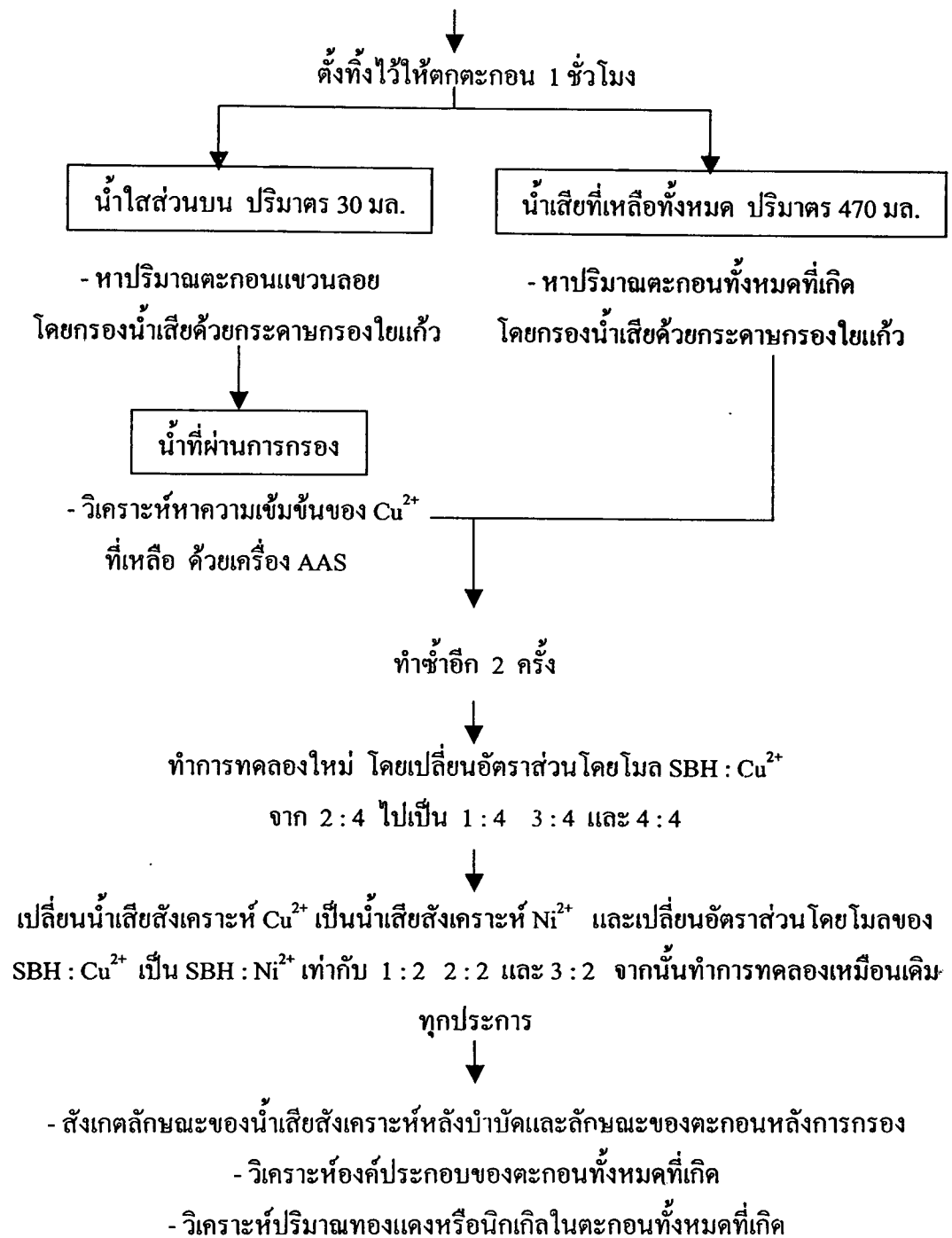




3.4.6.3 การศึกษาปริมาณ SBH ที่เหมาะสมในการบำบัด

เติมน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ซึ่งมีความเข้มข้นที่เหมาะสมตามข้อ 3.4.6.2 ปริมาณ 500 มล.
ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มล. 1 ใบ และเติมแบลงค์ ปริมาณ 500 มล. ลงในบีกเกอร์
ขนาด 500 มล. อีก 1 ใบ





3.5 พารามิเตอร์

การทดลองดังกล่าวได้ศึกษาถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

1. พารามิเตอร์อิสระ ได้แก่

- ประเภทของน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}
- ปริมาณสารเคมีที่ใช้
- พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หรือน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หรือน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}

2. พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง ได้แก่

- ค่าพีเอช
- ค่า ORP
- ความเข้มข้น Cu^{2+} หรือ Ni^{2+} ที่เหลืออยู่
- ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นทั้งหมด
- ตะกอนแขวนลอยที่ไม่จมตัว
- เปอร์เซ็นต์ทองแดงหรือนิกเกิลทั้งหมดในตะกอนอบแห้ง
- ประเภทของสารประกอบทองแดงหรือนิกเกิลในตะกอนอบแห้ง

3. พารามิเตอร์คงที่ ได้แก่

- ความเร็วรอบในการกวน
- เวลาที่ใช้ในการกวน

3.6 วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์

ตารางที่ 3.3 วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการทดลอง

พารามิเตอร์	วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> - ค่าพีเอช - ค่า ORP (mV) - ความเข้มข้นของ Cu^{2+} หรือ Ni^{2+} (มก./ล.) - ตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) 	<ul style="list-style-type: none"> - วัดด้วยเครื่องวัดพีเอช - วัดด้วยเครื่องวัด โออาร์พี - วัดด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนของแสงของอะตอม - กรองน้ำใส่ส่วนบนของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ตั้งทิ้งไว้นาน 1 ชม. หลังการทดลอง ปริมาตร 30 มล. ผ่านกระดาษกรอง GF/C อบตะกอนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักตะกอนที่ได้ด้วยเครื่องชั่งละเอียด
<ul style="list-style-type: none"> - ปริมาณตะกอนทั้งหมดที่เกิดขึ้น (มก./ล.) 	<ul style="list-style-type: none"> - กรองน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลือทั้งหมด หลังจากผ่านการหาตะกอนแขวนลอยไม่จมตัวด้วยกระดาษกรอง GF/C อบตะกอนที่ได้จากการกรองที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักตะกอนทั้งหมดด้วยเครื่องชั่งละเอียด
<ul style="list-style-type: none"> - ประเภทของสารประกอบโลหะหนักในตะกอนอบแห้ง 	<ul style="list-style-type: none"> - นำตะกอนที่เกิดทั้งหมด หลังการอบแห้งไปวัดด้วยวิธี X-Ray Diffraction
<ul style="list-style-type: none"> - เปอร์เซ็นต์ของโลหะหนักในตะกอนอบแห้ง 	<ul style="list-style-type: none"> - นำตะกอนที่เกิดทั้งหมดที่ผ่านการวัดด้วยวิธี X-Ray Diffraction ไปวัดต่อด้วยวิธี X-Ray Fluorescence

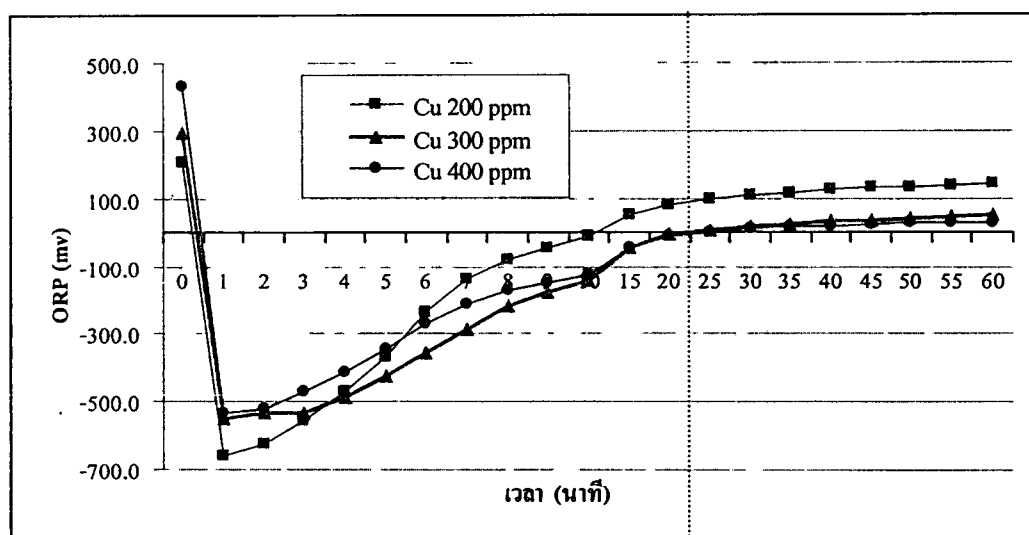
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การหาสถานะและปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} แสดงผลการทดลองในหัวข้อ 4.1-4.5 และการหาสถานะและปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} แสดงผลการทดลองในหัวข้อ 4.6-4.10

4.1 ผลการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ด้วย SBH

จากการทดลองศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ที่มีความเข้มข้นของ Cu^{2+} เท่ากับ 200 300 และ 400 มก./ล. โดยพิจารณาจากค่า ORP (mV.) พบว่า ค่า ORP ที่วัดได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ดังรูปที่ 4.1



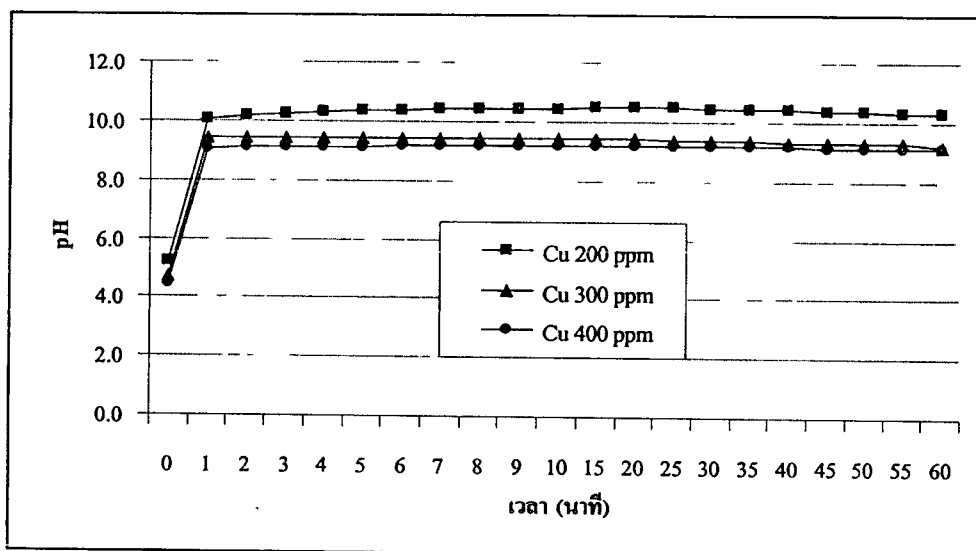
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ORP (mV.) กับเวลา (นาที) ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ที่ความเข้มข้น 200 300 และ 400 มก./ล. อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ก่อนเติม SBH (นาทีที่ 1) ค่า ORP จะมีค่าเป็นบวก นั่นคือน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} อยู่ในสถานะออกซิเดชัน เนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} มีไอโคโรเมนต์

($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) และ Cu^{2+} ซึ่งสารทั้งสองตัวนี้ มีความต้องการอิเล็กตรอน โดยที่ความเข้มข้น 400 มก./ล. จะมีค่า ORP เป็นบวกสูงที่สุด เพราะมีปริมาณ Cu^{2+} มากที่สุด รองลงมาคือ ความเข้มข้น 300 และ 200 มก./ล. ตามลำดับ (ความเข้มข้นของ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ในน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} มีความเข้มข้นเท่ากัน คือ 100 มก./ล.)

หลังจากเติม SBH พบว่า ค่า ORP ลดลงจนเป็นลบอย่างเห็นได้ชัด (นาที่ที่ 1) เนื่องจาก SBH เป็นตัวรีดิวซ์ที่ให้อิเล็กตรอนได้ดี ทำให้ค่า ORP ลดลง บ่งบอกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} อยู่ในสภาวะรีดักชัน หลังจากนั้น ค่า ORP จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ที่เวลาเดียวกันทั้ง 3 ความเข้มข้น คือ 25 นาที แสดงว่าปฏิกิริยาเริ่มเข้าสู่สมดุล ดังนั้น จึงกำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมในการกวนผสมของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เป็น 30 นาที เพื่อให้ SBH ทำปฏิกิริยากับ Cu^{2+} ได้อย่างสมบูรณ์

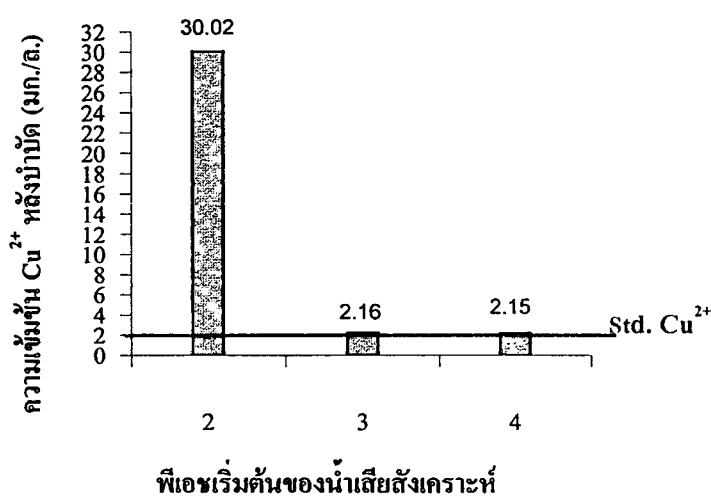
เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ด้วย SBH เป็นการบำบัดที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังนั้น การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกวนผสม ควรพิจารณาจากค่า ORP ดังเช่นในข้างต้นจึงจะถูกต้องและเหมาะสม หากพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช อาจเกิดความผิดพลาดได้ จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า เมื่อเติม SBH ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} จะเริ่มคงที่ตั้งแต่ นาที่ที่ 1 ค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งเป็นตัวทำละลายของ SBH นั้นเอง



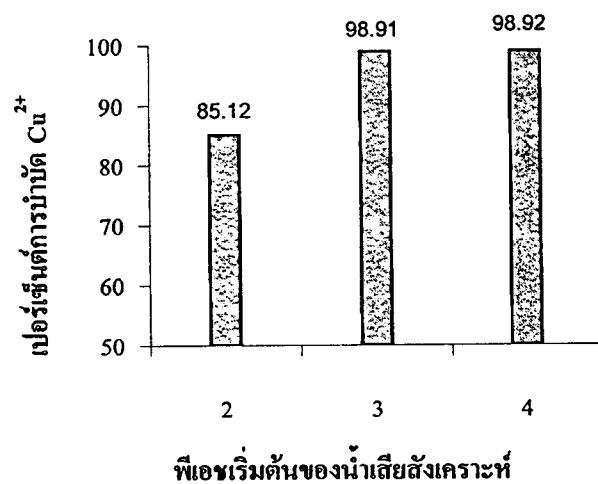
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา (นาที) ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ที่ความเข้มข้น 200 300 และ 400 มก./ล. อัตราส่วนโดยโมล SBH: Cu^{2+} เท่ากับ 2:4

4.2 ผลการหาพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ด้วย SBH

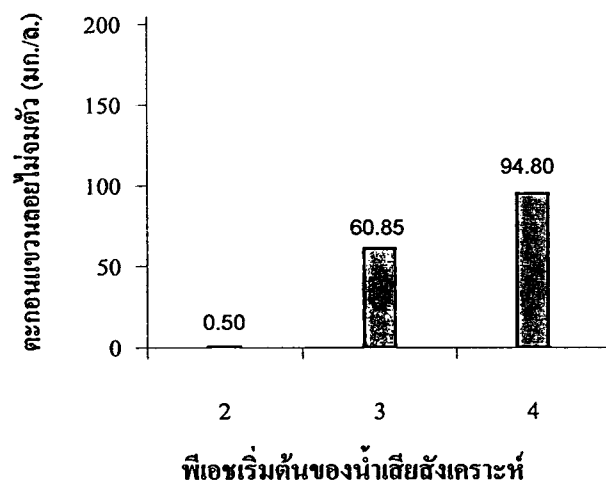
จากการศึกษาพีเอชที่เหมาะสม โดยน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} มีความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cu^{2+} และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากัน คือ 200 มก./ล. และ 2 : 4 ตามลำดับ แต่แปรค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 2 3 และ 4 (น้ำเสียจากโรงงานโดยส่วนมากมักมีสภาพเป็นกรด จึงกำหนดค่าพีเอชเริ่มต้นให้อยู่ในสถานะที่เป็นกรดตามสภาพพีเอชจริงของน้ำเสียจากโรงงาน) พบว่า ความเข้มข้นของ Cu^{2+} หลังบำบัดมีค่าแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.3 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การบำบัด และตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) เปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Cu^{2+} ที่เหลือ (มก./ล.) และมาตรฐาน Cu^{2+} ในน้ำทิ้งกับพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัด Cu^{2+} กับพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยไม่จับตัว (มก./ล.) กับพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4

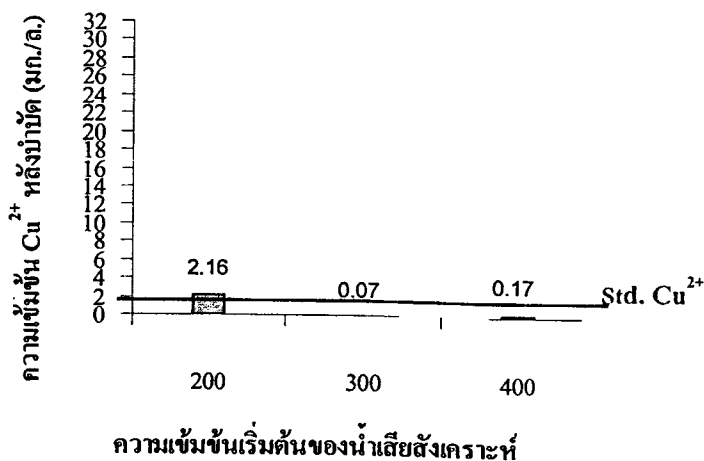
จากรูปที่ 4.3 พบว่า ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2 จะมีความเข้มข้นของ Cu^{2+} ที่เหลือสูงมาก คือ 30.02 มก./ล. เนื่องจาก SBH จะรีดิวซ์ไอออนของโลหะได้ดีในสภาวะที่เป็นเบส แต่ในน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} กลับมีสภาวะความเป็นกรดที่สูงมาก และมีในปริมาณที่มาก (500 มล.) เมื่อเทียบกับความเป็นเบสของสารละลาย SBH ที่มีในปริมาณที่น้อยกว่า ดังนั้น น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} จึงมีสภาวะโดยรวมเป็นกรด ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะต่อการรีดิวซ์ Cu^{2+} ด้วย SBH เป็นอย่างมาก ส่วนที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 จะมีความเข้มข้นของ Cu^{2+} ที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ค่าที่สุด คือ 2.15 มก./ล. แต่เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบำบัดระหว่างที่พีเอชระหว่างที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และ 4 จากรูปที่ 4.4 พบว่า มีเปอร์เซ็นต์การบำบัดที่ใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อพิจารณาตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว จากรูปที่ 4.5 ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 จะมีตะกอนแขวนลอยไม่จมตัวเท่ากับ 60.85 มก./ล. ซึ่งน้อยกว่าตะกอนแขวนลอยไม่จมตัวที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 โดยจะมีตะกอนแขวนลอยเท่ากับ 94.80 มก./ล. เมื่อพิจารณา ค่าพีเอชหลังบำบัด จากตารางที่ 4.1 พบว่า กรณีที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 จะทำให้พีเอชหลังบำบัด เท่ากับ 9.04 ซึ่งสามารถเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ขึ้นได้ ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) เป็นเหตุให้เกิดตะกอนแขวนลอยไม่ จมตัวมากกว่า ดังรูปที่ 4.5 จึงเลือกค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 เป็นพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัด น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+}

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ค่าพีเอชหลังบำบัด และตะกอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4

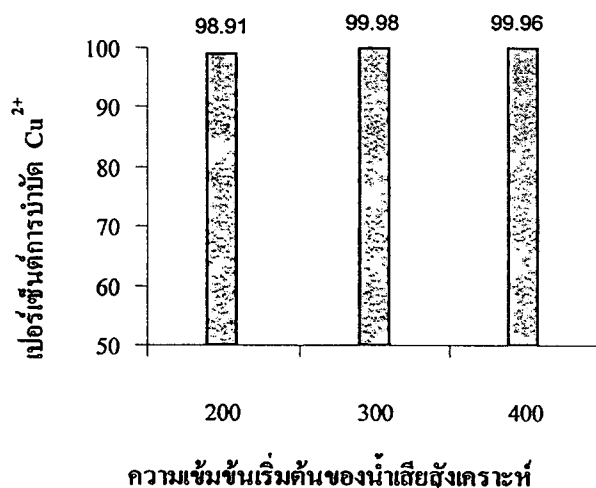
พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลังบำบัด	ตะกอนทั้งหมด (มก./ล.)
2	4.36	0.8
3	7.10	386.4
4	9.04	372.8

4.3 ผลการหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ด้วย SBH

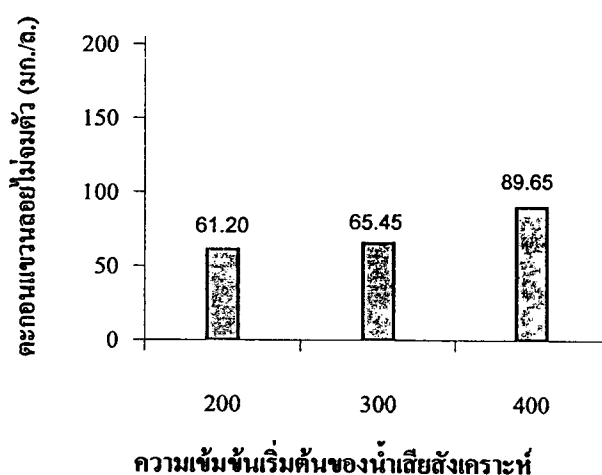
จากการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} จะใช้พีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 3 (จากข้อ 4.2) และใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ของทุกความเข้มข้นเท่ากัน คือ 2 : 4 (ตารางผนวก ก.2) แต่แปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เป็น 200 300 และ 400 มก./ล. พบว่า ความเข้มข้นของ Cu^{2+} หลังบำบัด มีค่าแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.6 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การบำบัด และตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) เปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Cu^{2+} ที่เหลือ (มก./ล.) และมาตรฐาน Cu^{2+} ในน้ำทิ้ง กับความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} พีเอชเริ่มต้น 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัด Cu²⁺ กับความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำเสี้ยวเคราะห์ Cu²⁺ ที่เอชเริ่มต้น 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu²⁺ เท่ากับ 2 : 4



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) กับความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำเสี้ยวเคราะห์ Cu²⁺ ที่เอชเริ่มต้น 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu²⁺ เท่ากับ 2 : 4

จากรูปที่ 4.6 พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสี้ยวเคราะห์ Cu²⁺ เป็น 300 มก./ล. จะมีความเข้มข้น Cu²⁺ เหลือในน้ำเสี้ยวเคราะห์หลังบำบัดต่ำที่สุด ทั้งยังมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน Cu²⁺ ในน้ำทิ้ง คือ 0.07 มก./ล. ให้เปอร์เซ็นต์การบำบัดสูงสุด คือ 99.98 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.7) และเกิดตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว คือ 65.45 มก./ล. (รูปที่ 4.8)

เมื่อสังเกตค่าพีเอชหลังบำบัด (ตารางที่ 4.2) พบว่า ที่ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เป็น 200 มก./ล. มีพีเอชหลังบำบัดเป็น 7.07 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ตะกอนไฮดรอกไซด์ ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) อันเกิดจากตัวทำละลายของ SBH ที่เติมลงไป สามารถละลายกลับเข้าสู่ น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ได้อีกครั้งหนึ่ง (ตะกอน $\text{Cu}(\text{OH})_2$ สามารถละลายกลับได้ที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 8) ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของ Cu^{2+} เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หลังบำบัดยังมีค่าเกินมาตรฐาน Cu^{2+} ในน้ำทิ้งอยู่ คือ 2.16 มก./ล. ให้เปอร์เซ็นต์การบำบัดเท่ากับ 98.91 เปอร์เซ็นต์ และให้ปริมาณตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว 61.20 มก./ล. ส่วนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เป็น 400 มก./ล. มีพีเอชหลังบำบัดเท่ากับ 9.14 ก่อให้เกิดตะกอนไฮดรอกไซด์แขวนลอยที่จมตัวได้ยากอยู่ในน้ำในปริมาณที่มากกว่ากรณีที่ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เท่ากับ 300 มก./ล. (รูปที่ 4.8) ถึงแม้จะสามารถบำบัดให้ความเข้มข้นของ Cu^{2+} ที่เหลือมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน Cu^{2+} ในน้ำทิ้งแล้วก็ตาม คือ 0.17 มก./ล. ดังนั้น จึงเลือกความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เท่ากับ 300 มก./ล. เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+}

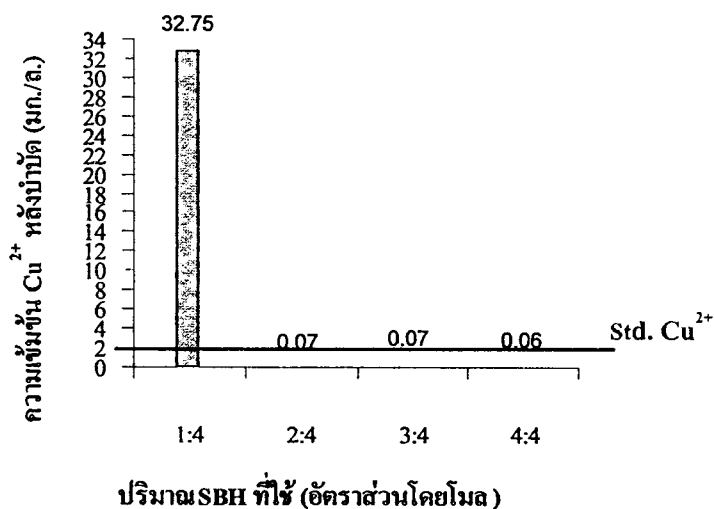
จากตารางที่ 4.2 ค่าพีเอชหลังบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เนื่องจากการเติม SBH : Cu^{2+} นั้นเดิมเป็นจำนวนเท่าของโมล เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} มีความเข้มข้นของ Cu^{2+} สูงขึ้น ปริมาณ SBH ที่เติมก็จะมากตาม ซึ่งหมายความว่า จะมีปริมาณ NaOH มากตามไปด้วย ในการเกิดปฏิกิริยาจะมีไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่ไม่ได้ถูกใช้ในปฏิกิริยารีดอกซ์ OH^- ดังกล่าวนี้ คือ สาเหตุที่ทำให้พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หลังบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 แสดงความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ค่าพีเอชหลังบำบัด และตะกอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} พีเอชเริ่มต้น 3 และอัตราส่วน โดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4

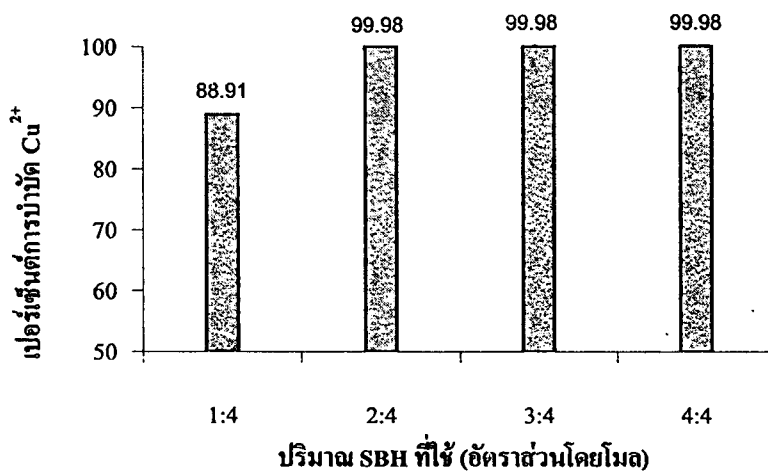
ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	พีเอชหลังบำบัด	ตะกอนทั้งหมด (มก./ล.)
200	7.07	400.0
300	8.23	521.1
400	9.14	615.0

4.4 ผลการหาอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+}

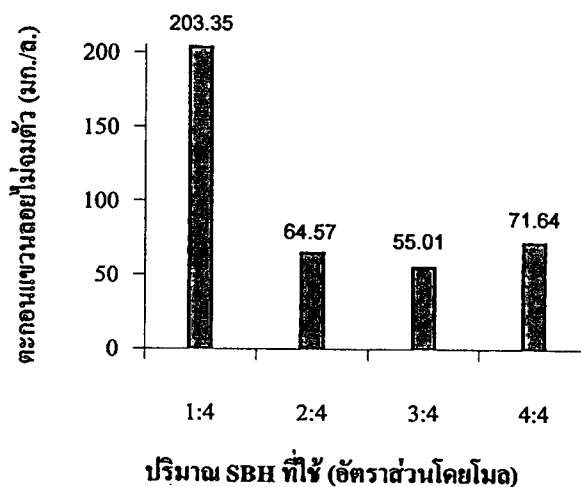
จากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} จะใช้พีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 3 (ข้อ 4.2) และให้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ที่เหมาะสม จากข้อ 4.4 คือ 300 มก./ล. แต่แปรค่าอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เป็น 1 : 4 2 : 4 3 : 4 และ 4 : 4 (ตารางผนวก ก-2) พบว่า ความเข้มข้นของ Cu^{2+} หลังบำบัด มีค่าแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.9 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การบำบัด และตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) เปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Cu^{2+} ที่เหลือ (มก./ล.) และมาตรฐาน Cu^{2+} ในน้ำทิ้ง กับอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ต่าง ๆ ที่ใช้กับน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} พีเอชเริ่มต้น 3 และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} 300 มก./ล.



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัด Cu^{2+} กับอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ต่าง ๆ ที่ใช้ พีเอชเริ่มต้น 3 และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} 300 มก./ล.



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยไม่จับตัว (มก./ล.) กับอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ต่าง ๆ ที่ใช้ พีเอชเริ่มต้น 3 และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} 300 มก./ล.

จากรูปที่ 4.9 พบว่า กรณิที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH เท่ากับ 1 : 4 จะมีความเข้มข้นของ Cu^{2+} ที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หลังบำบัดสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งถึง 32.75 มก./ล. เเปอร์เซ็นต์การบำบัดเท่ากับ 88.91 เเปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของ Cu^{2+} หลังบำบัดมีค่าสูง เนื่องจากปริมาณ SBH มีไม่มากพอที่จะบำบัด Cu^{2+} ให้ต่ำกว่ามาตรฐานได้ และพีเอชหลังบำบัดของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เท่ากับ 5.03 (ตารางที่ 4.3) ซึ่งมีสถานะเป็นกรด ทำให้ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ กลายเป็นตัวออกซิไดซ์ได้ดี ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ จะออกซิไดซ์ได้ดีในสถานะที่เป็นกรด) ส่งผลให้ทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} อยู่ในรูป Cu^{2+} ในปริมาณที่มาก

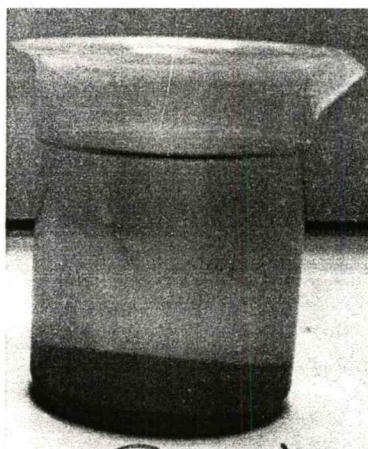
ส่วนกรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4 3 : 4 และ 4 : 4 สามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ให้มีความเข้มข้นของ Cu^{2+} หลังบำบัดต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งได้ โดยอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ทั้ง 3 อัตราส่วนนี้ให้เปอร์เซ็นต์บำบัดเท่ากัน คือ 99.98 เเปอร์เซ็นต์ จึงพิจารณาตะกอนแขวนลอยไม่จมน้ำ จากรูปที่ 4.11 พบว่า อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4 จะมีตะกอนแขวนลอยไม่จมน้ำน้อยที่สุด จึงเลือกใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4 เป็นอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ที่ดีที่สุดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หากต้องการประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดอาจเลือกอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4 ได้ แต่จะมีตะกอนแขวนลอยไม่จมน้ำเกิดขึ้นมากกว่า

อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4 สามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ได้ดีกว่าที่อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4 เนื่องจากมีปริมาณ SBH มากกว่า ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันให้ตะกอนที่จมน้ำได้ง่ายในปริมาณที่มากกว่า หากอ้างในเหตุผลเดียวกันนี้ อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 4 : 4 น่าจะให้ผลการบำบัดที่มีตะกอนแขวนลอยไม่จมน้ำน้อยกว่า แต่ผลการทดลองกลับไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากการเติมอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 4 : 4 แม้จะมี SBH มากขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันก็มี OH^- เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาพีเอชหลังบำบัดจากตารางที่ 4.3 พบว่า มีค่าสูงถึง 12.15 ซึ่ง OH^- นี้ สามารถทำให้ Cu^{2+} เกิดเป็นตะกอน $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ได้มากขึ้นเช่นกัน

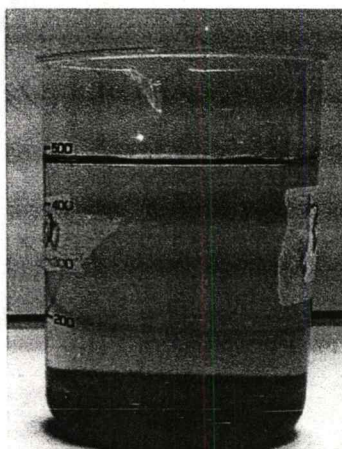
รูปภาพแสดงลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หลังบำบัดระหว่างอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4 และ 4 : 4 แสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ต่าง ๆ ที่ใช้ ค่าพีเอชหลังบำบัด ตะกอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังการบำบัด และเปอร์เซ็นต์ทองแดงในตะกอนที่เกิดหลังบำบัดทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+}

SBH: Cu^{2+} (โดยโมล)	พีเอชหลังบำบัด	ตะกอนทั้งหมด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์ทองแดง ในตะกอนทั้งหมด
1:4	5.03	485.0	0.0
2:4	8.21	520.8	82.0
3:4	9.02	522.4	85.5
4:4	12.15	524.5	86.3



รูปที่ 4.12 แสดงน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หลังบำบัด ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4



รูปที่ 4.13 แสดงน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หลังบำบัด ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 4 : 4

4.5 ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ด้วย SBH

ผลการทดลองทุกครั้ง พบว่า จะมีตะกอนเกิดขึ้นอย่างน้อย 2 ชนิด คือ ตะกอนแขวนลอยที่จมตัวได้คืออย่างเห็นได้ชัด และมีตะกอนที่เบาแขวนลอยอยู่ในน้ำไม่สามารถจมตัวได้ ซึ่งตะกอนชนิดหลังนี้ คือ ตะกอนไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น จาก NaOH ซึ่งเป็นตัวทำลาย SBH

กรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 1 : 4

น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หลังบำบัด มีความขุ่นสูงมาก สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีตะกอนแขวนลอยอยู่เป็นจำนวนมาก แม้จะตั้งทิ้งไว้นาน 1 ชั่วโมง ตะกอนแขวนลอยดังกล่าวจะตกตะกอนได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น การกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วทำได้ยาก เป็นลักษณะน้ำทิ้งที่ไม่ได้คุณภาพ จึงไม่ทำการวิเคราะห์โลหะทองแดง ในตะกอนที่เกิดขึ้น

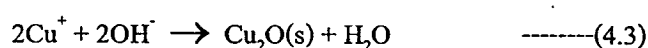
กรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4

พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หลังบำบัด ค่อนข้างใส ตะกอนที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่เป็นตะกอนสีดำและมีขนาดใหญ่ มีตะกอนสีเหลืองปนเล็กน้อย การกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วทำได้ง่ายกว่ากรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 1 : 4 มาก

ผลการวิเคราะห์ตะกอนด้วยเครื่อง XRD พบว่า ตะกอนโดยส่วนใหญ่เป็นตะกอนของ Cu_2O โดยทฤษฎีแล้ว SBH สามารถรีดิวซ์ Cu^{2+} ให้เป็น Cu^0 ได้ตามสมการ 4.1



แต่ผลจากการวิเคราะห์ตะกอน พบว่าไม่เป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} มีตัวออกซิไดส์ คือ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ซึ่งขัดขวางการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cu^{2+} ทำให้ BH_4^- ไม่สามารถรีดิวซ์ Cu^{2+} ให้เป็นโลหะทองแดง (Cu^0) ได้ และเนื่องจาก BH_4^- สามารถรีดิวซ์ Cu^{2+} ได้เป็นเพียง Cu^+ เท่านั้น ดังสมการ 4.2 (Leckie และ Davis III, 1980) ซึ่ง Cu^+ ไม่เสถียรในสารละลาย จึงเกิดปฏิกิริยากับ OH^- ที่ได้จากการเติม SBH (NaBH_4 1.2 % ใน NaOH 4 %) แทนที่ ดังสมการ 4.3 (Leckie และ Davis III, 1980)



และผลจากการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของทองแดงในตะกอนด้วยเครื่อง XRF พบว่า มีปริมาณทองแดงทั้งหมด 82 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณธาตุทองแดง 0.427 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ปริมาตร 1 ลิตร

กรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4

พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หลังบำบัด มีความใสมากกว่า กรณีที่ใช้อัตราส่วน SBH : Cu^{2+} โดยโมล เท่ากับ 2 : 4 ตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นตะกอนขนาดใหญ่สีดำ กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วได้ง่าย (รูปที่ 4.12)

ผลการวิเคราะห์ตะกอนด้วยเครื่อง XRD พบว่า ตะกอนโดยส่วนใหญ่เป็นตะกอนของ Cu_2O เช่นเดียวกับตะกอนในกรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4 แต่ในกรณีที่ใช้อัตราส่วน SBH : Cu^{2+} โดยโมล เท่ากับ 3 : 4 จะได้ตะกอนที่เป็น Cu_2O (รูปที่ 4.14) ในปริมาณที่มากกว่า

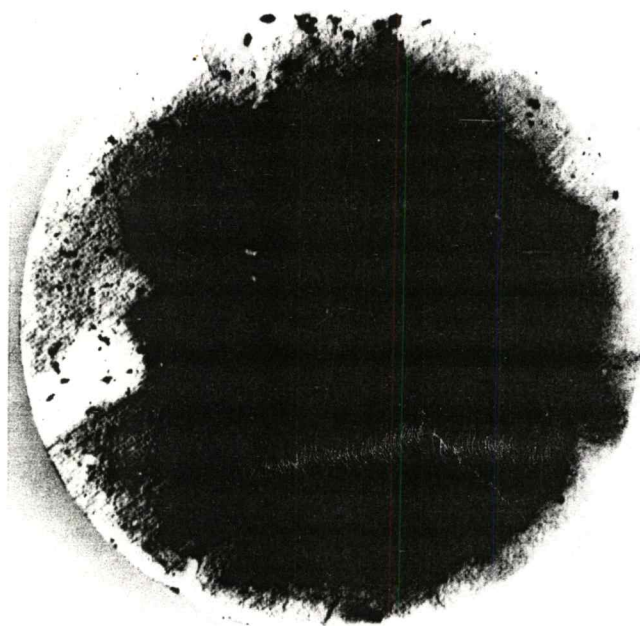
เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น น่าจะเป็นปฏิกิริยาเดียวกันกับกรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4 แต่เนื่องจากการใช้อัตราส่วน SBH : Cu^{2+} โดยโมล เท่ากับ 3 : 4 จะให้ปริมาณ BH_4^- ได้มากกว่า จึงเกิดการรีดิวซ์ Cu^{2+} ไปเป็น Cu^+ ได้มากกว่า เป็นเหตุให้ได้ตะกอน Cu_2O เพิ่มขึ้นมาก

และผลจากการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของทองแดงในตะกอนด้วยเครื่อง XRF พบว่า มีปริมาณทองแดงทั้งหมด 85.5 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณธาตุทองแดง 0.447 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ปริมาตร 1 ลิตร

กรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 4 : 4

พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} หลังบำบัด มีความขุ่นมากกว่า กรณีที่ใช้อัตราส่วน SBH : Cu^{2+} โดยโมล เท่ากับ 3 : 4 ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่เป็นตะกอนสีดำ ขนาดใหญ่ กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วได้ง่าย (รูปที่ 4.13)

ผลการวิเคราะห์ตะกอนด้วยเครื่อง XRD พบว่า ตะกอนโดยส่วนใหญ่เป็นตะกอนของ Cu_2O แต่มีปริมาณน้อยกว่าในกรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4 และผลจากการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ทองแดงด้วยเครื่อง XRF พบว่า มีปริมาณทองแดงทั้งหมด 86.3 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณธาตุทองแดงเท่ากับ 0.453 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ปริมาตร 1 ลิตร

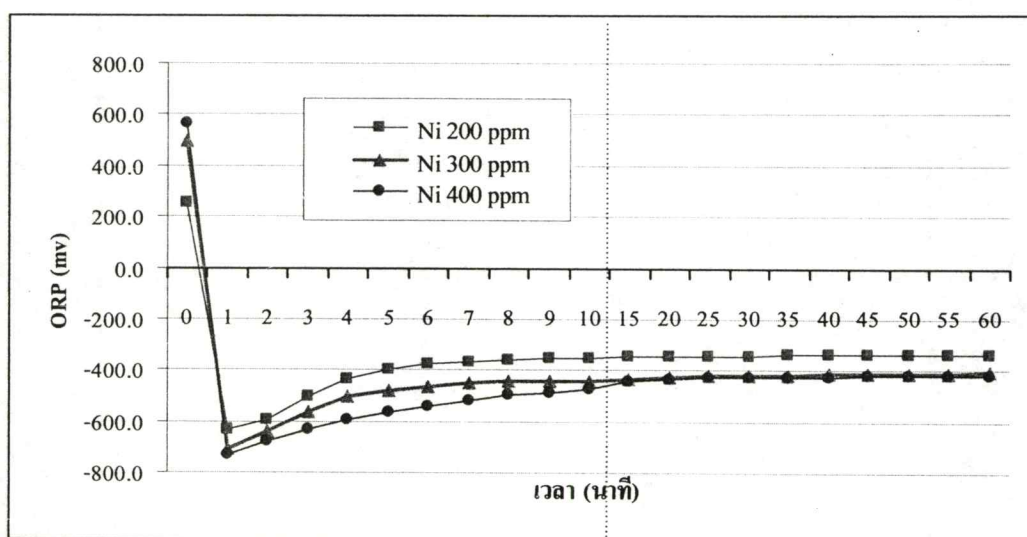


รูปที่ 4.14 แสดงตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4

4.6 ผลการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ด้วย SBH

จากการทดลองศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ที่มีความเข้มข้นของ Ni^{2+} เท่ากับ 200 300 และ 400 มก./ล. โดยพิจารณาจากค่า ORP (mV.) พบว่า ค่า ORP ที่วัดได้มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับในกรณีที่เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ดังรูปที่

4.15



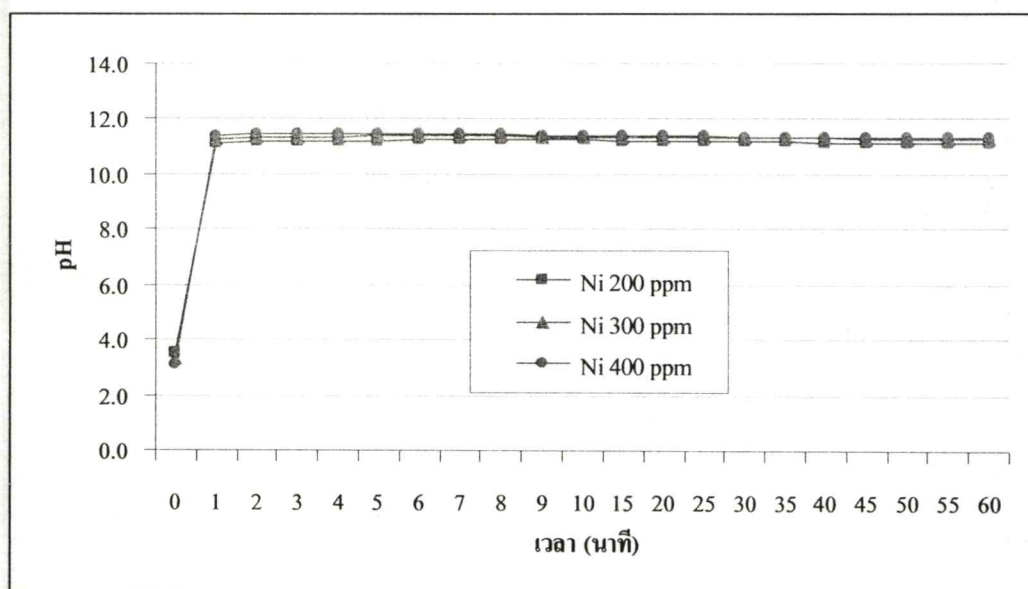
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ORP (mV.) กับเวลา (นาที) ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ที่ความเข้มข้น 200 300 และ 400 มก./ล. อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ก่อนเติม SBH (นาทีที่ 1) ค่า ORP จะมีค่าเป็นบวก นั่นคือน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} อยู่ในสถานะออกซิเดชัน เนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} มีไดโครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) และ Ni^{2+} ซึ่งสารทั้งสองตัวนี้ มีความต้องการอิเล็กตรอน โดยที่ความเข้มข้น 400 มก./ล. จะมีค่า ORP เป็นบวกสูงที่สุด เพราะมีปริมาณ Ni^{2+} มากที่สุด รองลงมาคือ ความเข้มข้น 300 และ 200 มก./ล. ตามลำดับ (ความเข้มข้นของ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ในน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} มีความเข้มข้นเท่ากันคือ 100 มก./ล.)

หลังจากเติม SBH พบว่า ค่า ORP ลดลงจนเป็นลบอย่างเห็นได้ชัด (นาทีที่ 1) เนื่องจาก SBH เป็นตัวรีดิวซ์ที่ให้อิเล็กตรอนได้ดี ทำให้ค่า ORP ลดลง บ่งบอกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} อยู่ในสถานะ

รีดักชัน หลังจากนั้น ค่า ORP จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ในเวลาเดียวกันทั้ง 3 ความเข้มข้น คือ 15 นาที แสดงว่าปฏิกิริยาเริ่มเข้าสู่สมดุล ดังนั้น จึงกำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมในการกวนผสมของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เป็น 20 นาที เพื่อให้ SBH ทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์

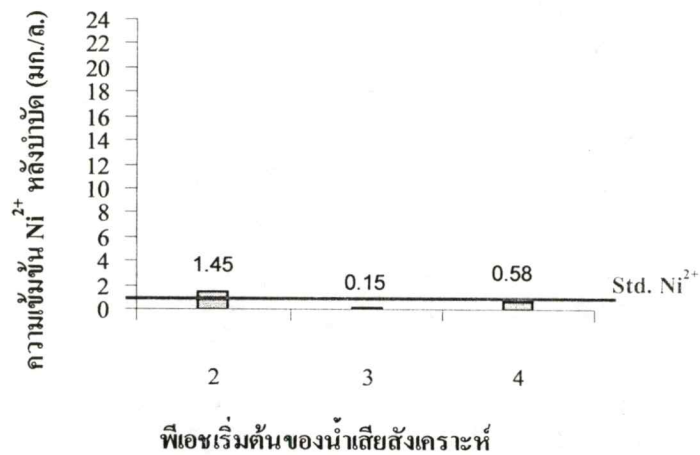
เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ด้วย SBH เป็นการบำบัดที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังนั้น การหาระยะเวลาที่เหมาะสม ควรพิจารณาจากค่า ORP ดังเช่นในข้างต้น จึงจะถูกต้องและเหมาะสม หากพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช อาจเกิดความผิดพลาดได้ จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่า เมื่อเติม SBH ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} จะเริ่มคงที่ตั้งแต่เวลาที่ 1 (เช่นเดียวกับกับน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+}) ค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจาก NaOH ซึ่งเป็นตัวทำลายของ SBH นั่นเอง



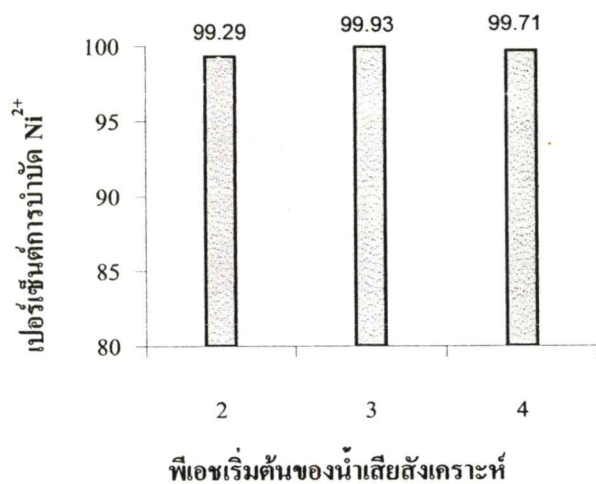
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช กับเวลา (นาที) ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ที่ความเข้มข้น 200 300 และ 400 มก./ล. อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2

4.7 ผลการหาพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ด้วย SBH

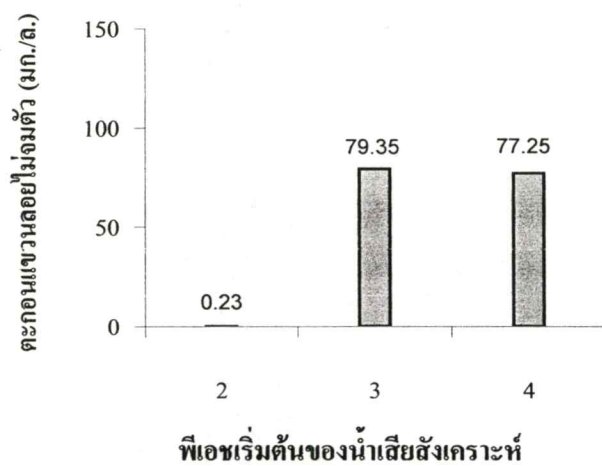
จากการศึกษาพีเอชที่เหมาะสม โดยน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} มีความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ni^{2+} และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากัน คือ 200 มก./ล. และ 2 : 2 ตามลำดับ แต่แปรค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 2 3 และ 4 พบว่า ความเข้มข้นของ Ni^{2+} หลังบำบัด มีค่าแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.17 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การบำบัด และตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) เปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Ni^{2+} ที่เหลือ (มก./ล.) และมาตรฐาน Ni^{2+} ในน้ำทิ้งกับพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัด Ni²⁺ กับพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni²⁺ เข้มข้น 200 มก./ล. อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni²⁺ เท่ากับ 2 : 2



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) กับพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni²⁺ เข้มข้น 200 มก./ล. และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni²⁺ เท่ากับ 2 : 2

จากรูปที่ 4.17 พบว่า ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2 จะมีความเข้มข้นของ Ni^{2+} ที่เหลือสูงที่สุด คือ 1.45 มก./ล. เนื่องจาก SBH จะรีดิวซ์ไอออนของโลหะได้ดีในสถานะที่เป็นเบส แต่ในน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} มีสถานะความเป็นกรดที่สูงมาก และมีในปริมาณที่มาก (500 มล.) เมื่อเทียบกับความเป็นเบสของสารละลาย SBH ที่มีในปริมาณที่น้อยกว่า ดังนั้น น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} จึงมีสถานะโดยรวมเป็นกรด ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เหมาะต่อการรีดิวซ์ Ni^{2+} ด้วย SBH เป็นอย่างมาก ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 จะมีความเข้มข้นของ Ni^{2+} ที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ต่ำที่สุด คือ 0.15 มก./ล.

ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 จะเห็นว่ามีความเข้มข้นของ Ni^{2+} ที่เหลือในน้ำทิ้งเท่ากับ 0.58 มก./ล. ซึ่งสูงกว่าที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และมีตะกอนแขวนลอยไม่จมตัวน้อยกว่า (รูปที่ 4.19) หากมีตะกอนไฮดรอกไซด์ ($\text{Ni}(\text{OH})_2$) เกิดขึ้น ดังเช่น ในกรณีของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ที่เกิดตะกอน ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) ก็ควรจะมีตะกอนแขวนลอยไม่จมตัวมากกว่า แต่เมื่อพิจารณาค่าพีเอชหลังบำบัดจากตารางที่ 4.4 พบว่ามีค่าเท่ากับ 11.86 ซึ่งที่พีเอชดังกล่าว ตะกอน ($\text{Ni}(\text{OH})_2$) สามารถละลายกลับเข้าสู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ได้ สังเกตได้จากปริมาณตะกอนทั้งหมดมีค่าลดลง

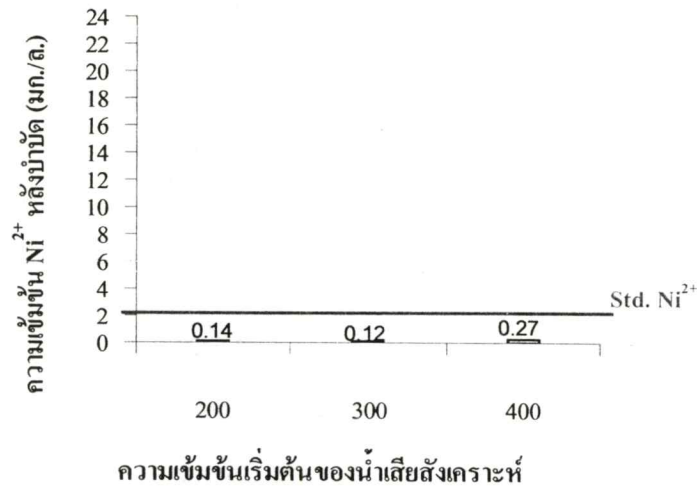
และเมื่อเปรียบเทียบตะกอนแขวนลอยไม่จมตัวจากรูปที่ 4.19 กับ ความเข้มข้น Ni^{2+} หลังบำบัดจากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่า ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 มีตะกอนแขวนลอยไม่จมตัวมากกว่าที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 เพียงเล็กน้อย แต่มีความเข้มข้น Ni^{2+} หลังบำบัดต่ำกว่ามาก จึงเลือกพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 เป็นพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย Ni^{2+}

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ ค่าพีเอชหลังบำบัด และตะกอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2

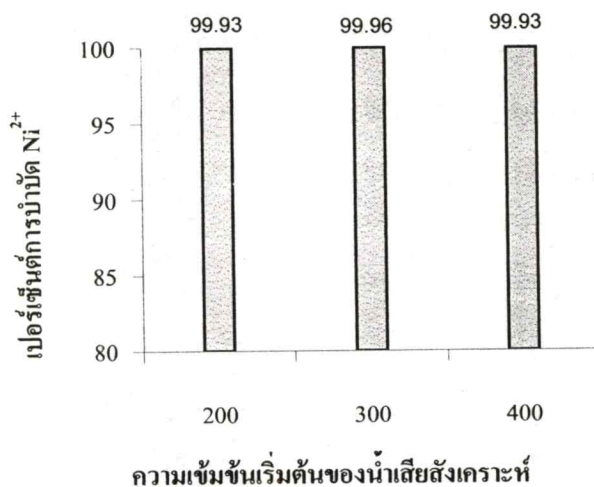
พีเอชเริ่มต้น	พีเอชหลังบำบัด	ตะกอนทั้งหมด (มก./ล.)
2	8.93	0.5
3	9.57	636.5
4	11.86	579.5

4.8 ผลการความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ด้วย SBH

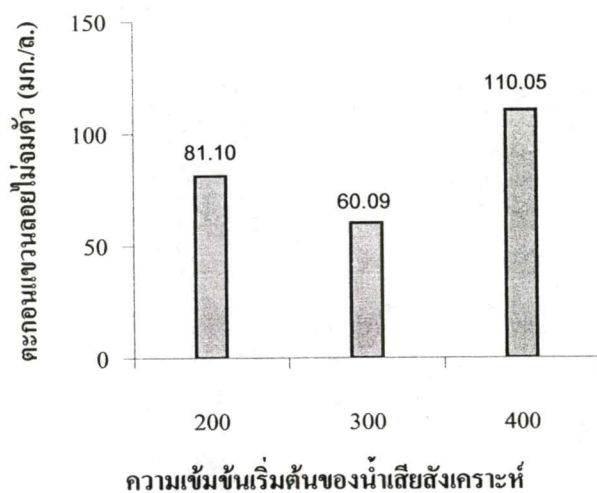
จากการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} จะใช้พีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 3 (จากข้อ 4.7) และใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} ของทุกความเข้มข้นเท่ากัน คือ 2 : 2 (ตารางผนวก ก-3) แต่แปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เป็น 200 300 และ 400 มก./ล. พบว่า ความเข้มข้นของ Ni^{2+} หลังบำบัด มีค่าแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.20 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การบำบัด และตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) เปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Ni^{2+} ที่เหลือ (มก./ล.) และมาตรฐาน Ni^{2+} ในน้ำทิ้งกับความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} พีเอชเริ่มต้น 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัด Ni²⁺ กับความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni²⁺ พีเอชเริ่มต้น 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni²⁺ เท่ากับ 2 : 2



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยไม่จมน้ำ (มก./ล.) กับความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni²⁺ พีเอชเริ่มต้น 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni²⁺ เท่ากับ 2 : 2

จากรูปที่ 4.20 พบว่า ที่ทุก ๆ ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni²⁺ SBH สามารถบำบัดให้มีความเข้มข้นของ Ni²⁺ หลังบำบัดต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์

Ni^{2+} เป็น 300 มก./ล. จะมีความเข้มข้น Ni^{2+} เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์หลังบำบัดต่ำที่สุด คือ 0.12 มก./ล. ให้เปอร์เซ็นต์การบำบัดสูงที่สุด คือ 99.96 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.21) และเกิดตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว น้อยที่สุด คือ 60.09 มก./ล. (รูปที่ 4.22) จึงเลือกความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เท่ากับ 300 มก./ล. เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}

ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เป็น 200 มก./ล. มีพีเอชหลังบำบัดเป็น 9.56 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ตะกอนไฮดรอกไซด์ ($\text{Ni}(\text{OH})_2$) อันเกิดจาก ตัวทำละลายของ SBH ที่เติมลงไป สามารถละลายกลับเข้าสู่ น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ได้อีกครั้งหนึ่ง (ตะกอน $\text{Ni}(\text{OH})_2$ สามารถละลายกลับได้ที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 9.90 และ ที่พีเอชมากกว่า 11.20 (William,1994) จึงทำให้มีความเข้มข้นของ Ni^{2+} หลังบำบัดมากกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เป็น 300 มก./ล.

ส่วนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เป็น 400 มก./ล. จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 พบว่ามีความเข้มข้น Ni^{2+} หลังบำบัดและตะกอนแขวนลอยมากที่สุด เมื่อพิจารณาค่าพีเอชสุดท้ายจาก ตารางที่ 4.5 จะเห็นว่า มีพีเอชสูงถึง 12.11 สามารถเกิดการละลายกลับของตะกอนได้ เช่นเดียวกับใน กรณีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เท่ากับ 200 มก./ล.

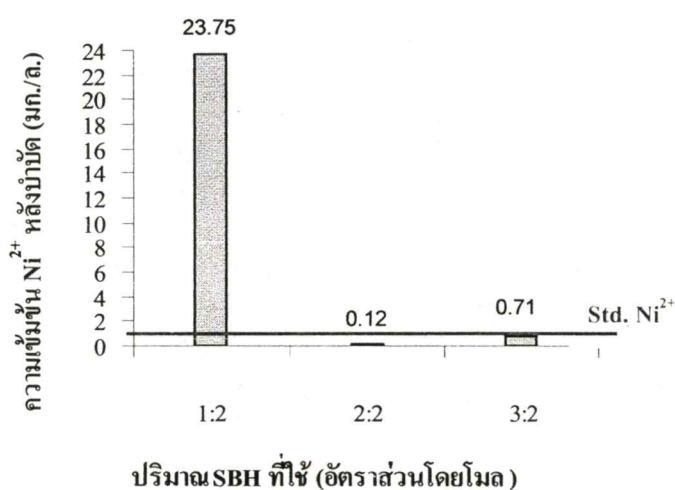
จากตารางที่ 4.5 ค่าพีเอชหลังบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เนื่องจากการเติม SBH : Ni^{2+} นั้นเติมเป็นจำนวนเท่าของโมล เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} มีความเข้มข้นสูง ปริมาณ SBH ที่เติมก็จะมาก ซึ่งหมายความว่า จะมีปริมาณ NaOH มากตามไปด้วย ในการเกิดปฏิกิริยาจะมี OH^- ที่ไม่ได้ถูกใช้ในปฏิกิริยา OH^- ดังกล่าวนี้นี้ คือสาเหตุที่ทำให้พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 แสดงความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ ค่าพีเอชหลังบำบัด และตะกอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} พีเอชเริ่มต้น 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2

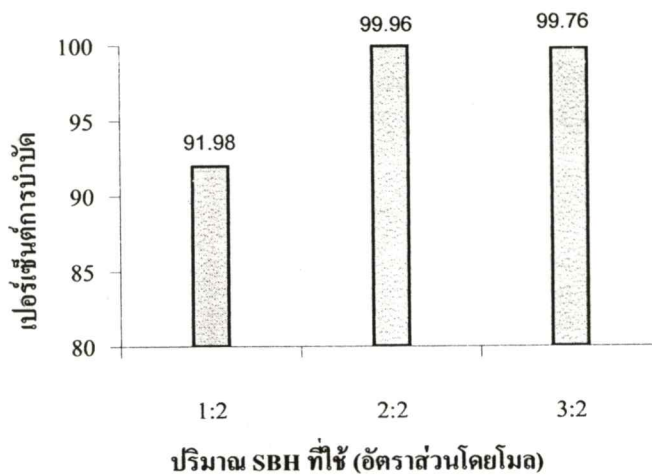
ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	พีเอชหลังบำบัด	ตะกอนทั้งหมด (มก./ล.)
200	9.56	637.1
300	10.89	705.0
400	12.11	755.0

4.9 ผลการหาอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni²⁺ ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni²⁺ ด้วย SBH

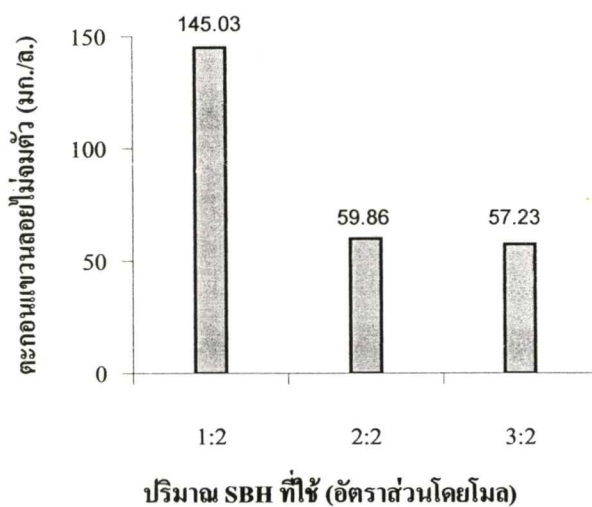
จากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni²⁺ ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni²⁺ จะใช้พีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 3 (จากข้อ 4.7) และให้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni²⁺ ที่เหมาะสม จากข้อ 4.8 คือ 300 มก./ล. แต่แปรค่าอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni²⁺ เป็น 1 : 2 2 : 2 และ 3 : 2 (ตารางผนวก ก-3) พบว่า ความเข้มข้นของ Ni²⁺ หลังบำบัด มีค่าแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.23 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การบำบัด และตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) เปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น Ni²⁺ ที่เหลือ (มก./ล.) และมาตรฐาน Ni²⁺ ในน้ำทิ้ง กับอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni²⁺ ต่างๆ ที่ใช้กับน้ำเสียสังเคราะห์ Ni²⁺ พีเอช เริ่มต้นเท่ากับ 3 และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni²⁺ เป็น 300 มก./ล.



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัด Ni^{2+} กับอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} ต่างๆ ที่ใช้ พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เป็น 300 มก./ล.



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.) กับอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} ต่างๆ ที่ใช้ พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เป็น 300 มก./ล.

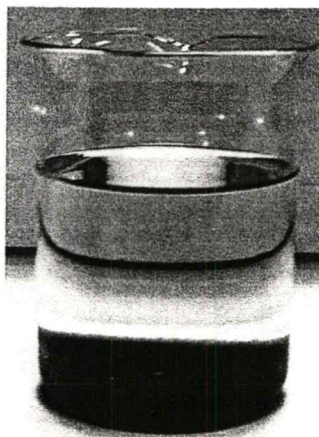
จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 พบว่า กรณิที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 1 : 2 มีปริมาณ Ni^{2+} ที่เหลือ 23.75 มก./ล. และให้เปอร์เซ็นต์การบำบัดเท่ากับ 91.98 เปอร์เซ็นต์ น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} หลังบำบัดขุ่น และมีสีเหลืองเกือบเท่ากับก่อนบำบัด สาเหตุมาจากปริมาณ SBH ที่เดิมมีปริมาณที่น้อยเกินไป จะสามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ได้ดี ส่วนกรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 3 : 2 พบว่า มีปริมาณ Ni^{2+} ที่เหลือเท่ากับ 0.71 มก./ล. และให้เปอร์เซ็นต์การบำบัดเท่ากับ 99.76 เปอร์เซ็นต์ น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} หลังบำบัดค่อนข้างใสและมีฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซดังกล่าว พาให้ตะกอนบางส่วน ลอยฟุ้งกลับขึ้นไปยังส่วนใสของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เมื่อสังเกตค่าพีเอชหลังบำบัดจากตารางที่ 4.6 พบว่า มีค่าเท่ากับ 12.72 ซึ่งอยู่ในช่วงพีเอชที่ตะกอนไฮดรอกไซด์สามารถละลายกลับสู่น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ได้ เป็นสาเหตุให้มีความเข้มข้นของ Ni^{2+} หลังบำบัดสูงขึ้น และมีตะกอนแขวนลอยไม่จมตัวน้อยลง

และกรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2 ทำให้มีปริมาณ Ni^{2+} เหลือในน้ำน้อยที่สุด และให้เปอร์เซ็นต์การบำบัดสูงสุด คือ 0.12 มก./ล. และ 99.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ น้ำหลังบำบัดค่อนข้างใส และไม่มีฟองก๊าซเกิดขึ้น จึงเลือกอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}

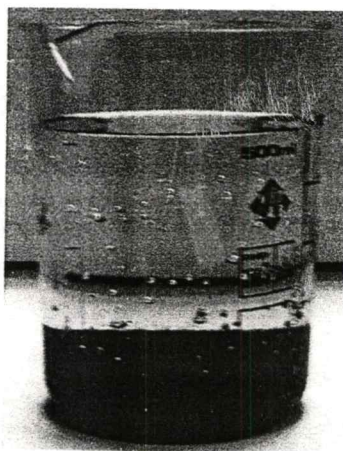
รูปภาพแสดงน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} หลังบำบัดระหว่างอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2 และ 3 : 2 แสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} ต่าง ๆ ที่ใช้ ค่าพีเอชหลังบำบัด ตะกอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นหลังการบำบัด และเปอร์เซ็นต์นิกเกิลในตะกอนที่เกิดหลังบำบัดทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}

SBH : Ni^{2+} (โดยโมล)	พีเอชหลังบำบัด	ตะกอนทั้งหมด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์นิกเกิล ในตะกอนทั้งหมด
1 : 2	8.20	576.6	87.0
2 : 2	10.85	699.0	93.1
3 : 2	12.72	607.4	93.4



รูปที่ 4.26 แสดงน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} หลังบำบัด ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และ อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2



รูปที่ 4.27 แสดงน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} หลังบำบัด ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และ อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 3 : 2

4.10 ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}

ผลการทดลองทุกครั้ง พบว่า จะมีตะกอนเกิดขึ้นอย่างน้อย 2 ชนิด คือ ตะกอนที่จมตัวได้ดี อย่างเป็นได้ชัด และมีตะกอนที่เบาแขวนลอยอยู่ในน้ำไม่สามารถจมตัวได้เล็กน้อย ซึ่งตะกอนชนิดหลังนี้ คือ ตะกอนไฮดรอกไซด์ ($Ni(OH)_2$) ที่เกิดขึ้น จาก NaOH ซึ่งเป็นตัวทำลายของ SBH

ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ด้วย SBH โดยใช้เครื่อง XRD ไม่สามารถระบุได้ว่า เป็นตะกอนของผลึกชนิดใด เนื่องจากไม่มีพีคที่เด่นชัด เพียงแต่มีแนวโน้มที่อาจจะเกิดเป็นผลึกได้เท่านั้น ดังรูปที่ 4.27

และผลจากการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของนิกเกิลในตะกอนด้วยเครื่อง XRF มีดังต่อไปนี้

กรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 1 : 2

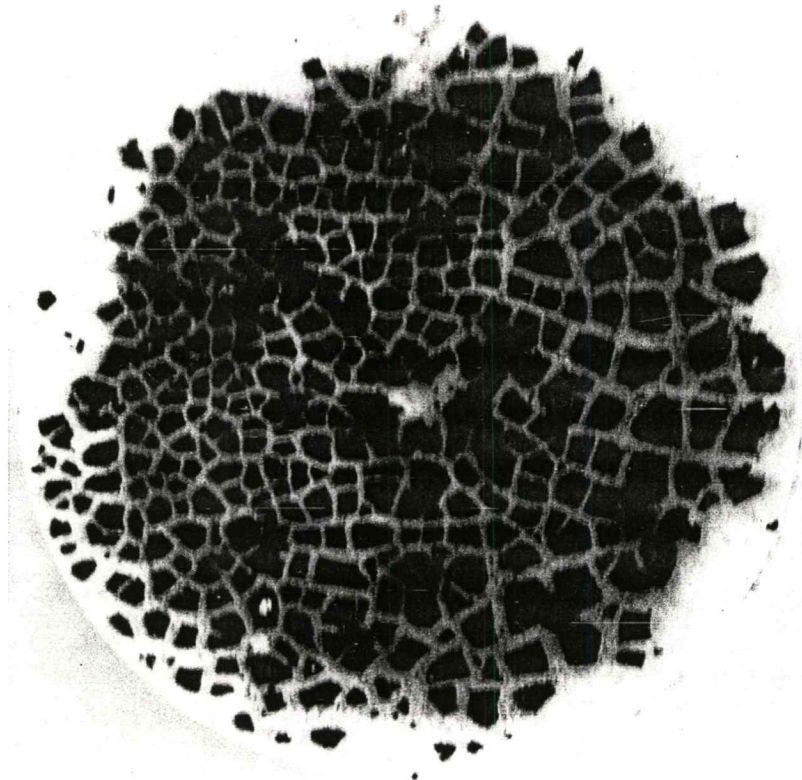
พบว่า ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณนิกเกิลทั้งหมด 87.0 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณธาตุนิกเกิลเท่ากับ 0.502 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ปริมาตร 1 ลิตร

กรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2

พบว่า ตะกอนที่เกิดขึ้นจมตัวได้ดี และอัดตัวกันค่อนข้างดี มีปริมาณนิกเกิลทั้งหมดเท่ากับ 93.1 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณธาตุนิกเกิล 0.651 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ปริมาตร 1 ลิตร

กรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 3 : 2

พบว่า ตะกอนที่เกิดขึ้นอัดตัวกันไม่ดีนัก เมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2 มีปริมาณนิกเกิลทั้งหมด 93.4 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณธาตุนิกเกิลได้เท่ากับ 0.567 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ปริมาตร 1 ลิตร



รูปที่ 4.28 แสดงตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ด้วย SBH (1.2 % NaBH_4 ใน 4 % NaOH) มีระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดเท่ากับ 30 นาที พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 300 มก./ล. และอัตราส่วนโดยโมลของ SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4 ให้เปอร์เซ็นต์การบำบัดเท่ากับ 99.98 เปอร์เซ็นต์ ตะกอนที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่เป็นตะกอนของ Cu_2O มีปริมาณทองแดงในตะกอนเท่ากับ 85.5 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณธาตุทองแดงเท่ากับ 0.447 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ปริมาตร 1 ลิตร
2. การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ด้วย SBH (1.2 % NaBH_4 ใน 4 % NaOH) มีระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดเท่ากับ 20 นาที พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 300 มก./ล. และอัตราส่วนโดยโมลของ SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2 ให้เปอร์เซ็นต์การบำบัดเท่ากับ 99.96 เปอร์เซ็นต์ ตะกอนที่เกิดขึ้นไม่สามารถระบุองค์ประกอบของตะกอนที่เกิดขึ้นได้ แต่ทราบว่าตะกอนที่เกิดขึ้น มีปริมาณนิกเกิลในตะกอน เท่ากับ 93.1 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณธาตุนิกเกิลเท่ากับ 0.651 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ปริมาตร 1 ลิตร

5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการค้นคว้าวิจัยครั้งต่อไป

1. การทดลองควรใช้ตัวรีดิวซ์ที่มีราคาถูกลง และกำจัดตัวออกซิไดส์ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ เช่น โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ เพื่อช่วยลดการใช้ SBH อาจช่วยให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้น และลดปัญหาการเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ อันเนื่องมาจากตัวทำละลายของ SBH รบกวน
2. ในการวิจัยครั้งต่อไป ควรทดลองบำบัดโลหะหนักที่มีมูลค่า เช่น เงิน โปรท เป็นต้น
3. ในการวิจัยครั้งต่อไป ควรศึกษาวิธีการนำโลหะที่เกิดจากการบำบัดด้วย SBH กลับมาใช้ใหม่

บรรณานุกรม

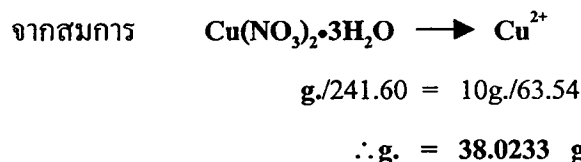
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษทางน้ำ. กรุงเทพฯ. บทที่ 5. หน้า 4-8, 15, 17 และ 21.
- มันสิน ตันจุลเวศม์. 2534. เอกสารการฝึกอบรมผู้ควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. หน้า 148-166.
- มันสิน ตันจุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเล่ม 1. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. บทที่ 4. หน้า 8-15.
- ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2539. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. หน้า 327.
- ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์. 2536. เคมีวิเคราะห์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. หน้า 56-59.
- สิทธิชัย ดันชนะสฤณี. 2528. พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม. โครงการสหวิทยาการบัณฑิตศึกษา สาขา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. หน้า 428.
- เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2518. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ประยุกต์แห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ. หน้า 118-119.
- Chung, N.K. 1989. Chemical Precipitation. In H.M. Freeman. **Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal**. McGraw-Hill Book Company. New York. pp 7-21.
- Cook, M.M.; Lander, J.A. and Littlehale D.S. 1980. **Reviewing the Use of Sodium Borohydride for Control of Heavy Metal Discharge in Industrial Wastewater**. Purdue University. Indiana. pp 514-519.
- Eckenfelder, W.W. 1989. **Industrial Water Pollution Control**. McGraw-Hill, Inc. Singapore. pp 400.
- Eilbeck, W.J. and Mattock, G. 2000. **Chemical Processes in Wastewater Treatment**. Ellis Horwood Limited. England. pp 331.
- Fleming, M. and Ulman, J. 1985. Sodium Borohydride Environmental Control Application : Reduction of Nickel (II) Complexes in Spent Electroless Plating Baths. **Proceedings of the Electroless Conference IV**. Chicago. pp 22-24.
- Freeman, H.M. 1989. **Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal**. McGraw Hill Book. U.S.A. pp 177-190.
- Ghoreishi, S.M. and Haghghi, R. 2003. Chemical Catalytic Reaction and Biological Oxidation for Treatment of Non-biodegradable Textile Effluent. **Chem. Eng. J.** 95(1-3), 163-169.

- Gomez, L.C., Garcia, H.F., Rodriguez-Maroto, J.M. and Rodriguez, J.J. 1992. Heavy Metal Removal by Chemical Reduction with Sodium Borohydride. A Pilot-Plant Study. **Separ. Sci. Technol.** 449-1468.
- Gomez, L.C., Garcia, H.F., Rodriguez-Maroto, J.M. and Rodriguez, J.J. 1993. Cobalt (II) Removal from Water by Chemical Reduction with Sodium Borohydride. **Water Res.** 27(6), 985-992.
- Lawrence, A.S., Jeffery, L.M. and Abraham, C. 1995. **Remedial Options for Metals Contaminated Sites.** CRC Press. Florida. pp 143-147.
- Leckie, J.O. and Davis III, J.A. 1980. Aqueous Environmental Chemistry of Copper. In J.O. Nriagu (ed.). **Copper in the Environment Part I : Ecological Cycling.** U.S. : John Wiley & Sons. pp 89-105.
- Lee, C.L., Hatton, J.V., Berry, R.M., Hu, H.U. and Frost D.C. 2003. An X-ray Photoelectron Study of the Reaction of Metal Ions with Borohydride under Reductive Bleaching Conditions. **Tappi Journal.** [CD-ROM] 76, 129-133.
- Lindsay, M.J. and Stennick, R.S. 1996. **Pollution Control Using Sodium Borohydride.** Annual Technical Conference. American Electroplaters Society. pp 1-11.
- McAnally, S.L., Benefield, L. and Reed, R.B. 1984. Nickel Removal from A Synthetic Nickel Planting Wastewater Using Sulfide and Carbonate for Precipitation and Coprecipitation. **Sep. Sci. Technol.** 191-217.
- Pandias, A.K. and Pendias, H. 1992. **Trace Elements in Soil and Plants.** 2nd ed. CRC. Pree, Inc., London. pp 365.
- Parker, S.P. 1993. **McGraw-Hill Encyclopedie of Chemistry.** 2nd ed. McGraw-Hill, Inc., U.S.A. pp 1236.
- Parmeggiany, L. 1983. **Encyclopaedia of Occupational Health and Safety.** 1 : pp 241-250.
- Patterson, J.W., Allen, H.E. and Scala, J.J. 1997. Carbonate Precipitation for Heavy Metals Pollution. **J. Water pollut. Control Fed.** 49(12), 2397-2410.
- Talbot, R.S. 1984. Process for Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution. **US. Patent. 4**
- William, C.A. 1994. **Innovation Site Remendation Technology Chemistry Treatment.** American Academy of Environmental Engineers. U.S. pp 197-199.

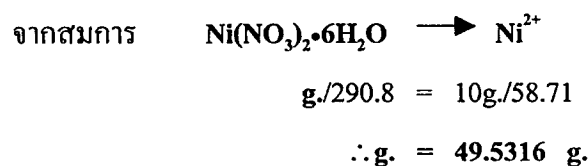
ภาคผนวก ก
การคำนวณสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. การคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 1 ลิตร

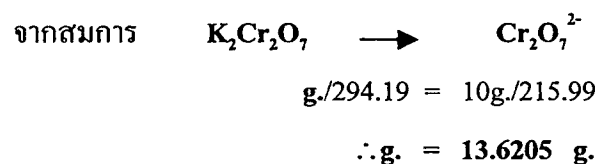
1.1 ปริมาณ $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 10 กรัม/ลิตร



1.2 ปริมาณ $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 10 กรัม/ลิตร



1.3 ปริมาณ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เข้มข้น 10 กรัม/ลิตร



2. การเตรียมน้ำเสียมาตรฐาน Cu^{2+} หรือ Ni^{2+} เข้มข้น 2-10 มก./ล.

2.1 การคำนวณหาปริมาณสารละลายมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์โลหะหนัก Cu^{2+} และ Ni^{2+} เข้มข้น 1,000 มก./ล. ที่ใช้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์มาตรฐานเข้มข้น 100 มก./ล. ที่มีปริมาตร 100 มล.

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad & M_1V_1 = M_2V_2 \\ & (1,000 \text{ mg./L.}) \times V_1 = (100 \text{ mg./L.})(100) \\ & \therefore V_1 = 10 \text{ ml.} \end{aligned}$$

2.2 ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานที่ใช้เตรียมน้ำเสียมาตรฐานเข้มข้น 2-10 มก./ล. ที่มีปริมาตร 25 มล. (ตารางผนวก ก-1)

เช่น สารละลายมาตรฐานเข้มข้น 100 มก./ล. เจือจางให้มีความเข้มข้น 2 มก./ล.

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad & M_1V_1 = M_2V_2 \\ & (100 \text{ mg./L.}) \times V_1 = (2 \text{ mg./L.})(25) \\ & \therefore V_1 = 0.5 \text{ ml.} \end{aligned}$$

ตารางผนวก ก-1 แสดงปริมาณสารละลายสต็อกมาตรฐานเข้มข้น 100 มก./ล. ที่ใช้เตรียม
สารละลายมาตรฐานเข้มข้น 2-10 มก./ล. ปริมาตร 25 มล.

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (มก./ล.)	ปริมาณสารละลายสต็อกมาตรฐานที่ใช้ (มล.)
2	0.5
4	1.0
6	1.5
8	2.0
10	2.5

3. การคำนวณหาปริมาณสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ใช้กับน้ำเสียตัวอย่าง (ตารางผนวก ก-2)

1.2 % (w/v) NaBH_4 ใน 4.0 % (w/v) NaOH

3.1 เมื่อทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+}



NaBH_4 1 โมล จะพอดีกับ Cu^{2+} 4 โมล

จาก $\text{mol.} = \text{M.V.} / 1,000$

เมื่อ - น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. ปริมาตร 500 มล.

- มีปริมาณ NaBH_4 1.2 กรัม ในสารละลาย 100 มล. (12 กรัม/1 ลิตร)

โมลของ $\text{NaBH}_4 = (\text{โมลของ } \text{Cu}^{2+})/4$

$$(12 / 37.83) \times [V_1 / (1 \times 1,000)] = [(0.2 \text{ g./L.}) / 63.54] \times [(500 \text{ ml.}) / (4 \times 1,000)]$$

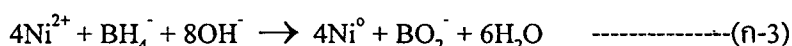
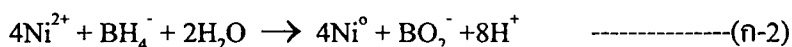
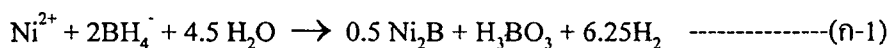
$$\therefore V_1 = 1.2410 \text{ ml.}$$

จะได้ว่า ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 1 : 4 ต้องเติมสารละลาย SBH
ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เท่ากับ 1.2410 มล.

\therefore ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4 ต้องเติมสารละลาย SBH
ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 200 มก./ล. ปริมาตร 500 มล. เท่ากับ 1.2410×2
 $= 2.5 \text{ มล.}$

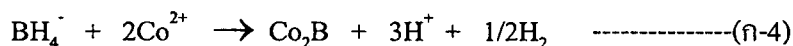
3.2 เมื่อทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+}

ปฏิกิริยาระหว่าง Ni^{2+} และ SBH มีความแตกต่างจากปฏิกิริยาระหว่าง Cu^{2+} และ SBH โดย Fleming และ Ulman (1985) พบว่า ปฏิกิริยาระหว่าง Ni^{2+} และ BH_4^- สามารถเกิดเป็นนิกเกิลโบไรด์ (Ni_2B) หรือ โลหะนิกเกิล (Ni^0) ได้ตามสมการ ก-1 ก-2 และ ก-3



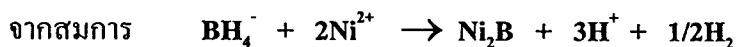
แต่การเกิดปฏิกิริยาจริงนั้น มักเป็นไปตามสมการแรกได้ผลิตภัณฑ์เป็น Ni_2B มากกว่าที่จะเกิดเป็น Ni^0

Gomez – Lahoz (1993) พบว่า ปฏิกิริยาระหว่าง Co^{2+} กับ SBH นั้น มีความคล้ายคลึงกับในกรณีของ Ni^{2+} คือ แม้ว่าจะใช้ SBH ซึ่งละลายอยู่ในตัวทำละลายที่เป็นเบส (NaOH) แต่ก็มักจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ ก-4



สาเหตุที่ Ni^{2+} และ Co^{2+} เกิดปฏิกิริยาได้คล้ายคลึงกัน อาจเนื่องมาจากมีค่า E^0 ใกล้เคียงกัน (Ni^{2+} มีค่า E^0 เท่ากับ -0.25 V . ส่วน Co^{2+} มีค่า E^0 เท่ากับ -0.28 V .)

จากข้อมูลดังกล่าวจึงใช้สมการในการคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ตามปฏิกิริยาที่มักจะเกิดขึ้น คือ สมการที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Ni_2B (สมการ ก-1)



NaBH_4 1 โมล จะพอดีกับ Ni^{2+} 2 โมล

จาก $\text{mol.} = \text{M.V.} / 1,000$

เมื่อให้ - น้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ปริมาตร 500 มล.

- มีปริมาณ NaBH_4 1.2 กรัม ในสารละลาย 100 มล. (12 กรัม/1 ลิตร)

$$\text{โมลของ NaBH}_4 = (\text{โมลของ Ni}^{2+})/2$$

$$(12 / 37.83) \times [V_1 / (1 \times 1,000)] = [(0.3 \text{ g./L.}) / 58.71] \times [(500 \text{ ml.}) / (2 \times 1,000)]$$

$$\therefore V_1 = 4.027 \text{ ml.}$$

จะได้ว่า ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 1 : 2 ต้องเติมสารละลาย SBH ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} 4.027 มล.

∴ ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni²⁺ เท่ากับ 3 : 2 ต้องเติมสารละลาย SBH ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ Ni²⁺ เข้มข้น 300 มก./ล. ปริมาตร 500 มล. เท่ากับ $4.027 \times 3 = 12.2$ มล.

ตารางผนวก ก-2 แสดงถึงปริมาณของสารละลาย SBH (มล.) ที่ใช้ทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ Cu²⁺

อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu ²⁺	1 : 4	2 : 4	3 : 4	4 : 4
ความเข้มข้น ของน้ำเสียสังเคราะห์ Cu ²⁺				
200	1.3	2.5	3.8	5.0
300	1.9	3.8	5.6	7.5
400	2.5	5.0	7.5	10.0

ตารางผนวก ก-3 แสดงถึงปริมาณของสารละลาย SBH (มล.) ที่ใช้ทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ Ni²⁺

อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni ²⁺	1 : 2	2 : 2	3 : 2
ความเข้มข้น ของน้ำเสียสังเคราะห์ Ni ²⁺			
200	2.7	5.4	8.1
300	4.1	8.1	12.2
400	5.4	10.8	16.2

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองเจือยการหาสถานะของปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัด

น้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} และน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}

โดยวิธีรีดักชันด้วย SBH

ตารางที่ ข.1 ค่า ORP และ ค่าพีเอช ที่เวลาต่าง ๆ ในการหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cu^{2+} และ Ni^{2+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

เวลา (นาที)	Cu 200 ppm		Cu 300 ppm		Cu 400 ppm		Ni 200 ppm		Ni 300 ppm		Ni 400 ppm	
	ORP	pH	ORP	pH	ORP	pH	ORP	pH	ORP	pH	ORP	pH
0.00	209.20	5.19	295.70	4.71	433.70	4.48	255.20	3.52	495.40	3.30	562.80	3.10
1.00	-661.00	10.05	-530.70	9.40	-551.00	9.05	-630.50	11.15	-712.10	11.28	-734.40	11.39
2.00	-625.40	10.19	-532.60	9.40	-521.60	9.08	-594.50	11.18	-637.40	11.35	-675.70	11.47
3.00	-554.60	10.25	-534.80	9.41	-473.20	9.11	-505.50	11.21	-561.50	11.36	-631.20	11.48
4.00	-472.10	10.30	-485.00	9.42	-415.30	9.13	-438.40	11.22	-501.40	11.36	-594.20	11.48
5.00	-369.40	10.35	-423.00	9.42	-343.70	9.14	-395.90	11.22	-481.70	11.37	-562.90	11.47
6.00	-236.40	10.38	-355.30	9.44	-269.30	9.16	-374.40	11.23	-468.00	11.37	-538.40	11.46
7.00	-140.10	10.40	-284.80	9.44	-211.60	9.17	-368.10	11.23	-451.40	11.37	-518.10	11.45
8.00	-79.30	10.42	-218.30	9.44	-172.10	9.17	-361.80	11.23	-446.80	11.37	-499.90	11.44
9.00	-42.60	10.43	-175.20	9.44	-147.70	9.18	-356.30	11.23	-446.40	11.36	-486.50	11.43
10.00	-13.20	10.44	-143.20	9.44	-124.50	9.18	-353.00	11.23	-443.30	11.36	-473.50	11.43
15.00	54.30	10.47	-44.40	9.43	-43.70	9.19	-347.50	11.22	-434.50	11.36	-445.20	11.40
20.00	83.70	10.47	-7.80	9.41	-12.50	9.19	-346.10	11.20	-429.20	11.35	-435.70	11.39
25.00	98.00	10.47	8.90	9.39	1.80	9.18	-342.70	11.19	-423.40	11.33	-428.80	11.38

ตารางที่ ข.1 ค่า ORP และ ค่าพีเอช ที่เวลาต่าง ๆ ในการหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cu^{2+} และ Ni^{2+}
 ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ต่อ)

30.00	109.10	10.46	17.40	9.39	10.20	9.17	-342.20	11.18	-421.60	11.33	-425.30	11.36
35.00	116.50	10.44	26.10	9.34	16.40	9.16	-341.10	11.16	-418.90	11.32	-425.10	11.35
40.00	124.20	10.42	32.20	9.32	20.50	9.15	-340.70	11.15	-416.50	11.30	-430.60	11.34
45.00	130.10	10.37	37.30	9.30	23.70	9.14	-338.90	11.13	-414.60	11.29	-422.30	11.33
50.00	134.70	10.35	42.30	9.28	26.80	9.14	-338.40	11.12	-412.10	11.28	-422.40	11.32
55.00	139.10	10.32	46.60	9.27	29.40	9.13	-337.60	11.10	-410.70	11.26	-422.10	11.31
60.00	143.90	10.28	50.40	9.20	31.80	9.12	-337.20	11.09	-409.20	11.26	-420.50	11.31

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองการหาสถานะและปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+}

1. ผลการหาพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ด้วย SBH								
ปัจจัยที่ศึกษา	ผลการทดลอง							
พีเอชเริ่มต้น	ความเข้มข้น Cu^{2+} เริ่มต้น (มก./ล.)	ความเข้มข้น Cu^{2+} หลังบำบัด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	ตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.)	พีเอชหลังบำบัด	ตะกอนทั้งหมด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์ทองแดงในตะกอนทั้งหมด *	ปริมาณธาตุทองแดง (ก./ล.) *
2	201.70	30.020	85.12	0.50	4.36	0.8	-	-
3	198.29	2.160	98.91	60.85	7.10	386.4	-	-
4	197.95	2.145	98.92	94.80	9.04	372.8	-	-
2. ผลการหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ด้วย SBH								
ปัจจัยที่ศึกษา	ผลการทดลอง							
ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	ความเข้มข้น Cu^{2+} เริ่มต้น (มก./ล.)	ความเข้มข้น Cu^{2+} หลังบำบัด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	ตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.)	พีเอชหลังบำบัด	ตะกอนทั้งหมด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์ทองแดงในตะกอนทั้งหมด *	ปริมาณธาตุทองแดง (ก./ล.) *
200	198.06	2.157	98.91	61.20	7.07	400.0	-	-
300	302.65	0.065	99.98	65.45	8.23	521.1	-	-
400	403.35	0.173	99.96	89.65	9.14	615.0	-	-

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองการหาสภาวะและปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} (ต่อ)

3. ผลการหาอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} ด้วย SBH								
ปัจจัยที่ศึกษา	ผลการทดลอง							
SBH : Cu^{2+} (โดยโมล)	ความเข้มข้น Cu^{2+} เริ่มต้น (มก./ล.)	ความเข้มข้น Cu^{2+} หลังบำบัด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์ การบำบัด	ตะกอนแขวนลอย ไม่จมตัว (มก./ล.)	พีเอชหลัง บำบัด	ตะกอนทั้งหมด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์ ทองแดงในตะกอน ทั้งหมด *	ปริมาณธาตุทองแดง (ก./ล.) *
1 : 4	295.36	32.754	88.91	203.35	5.03	485.0	0.0	0.386
2 : 4	305.48	0.070	99.98	64.57	8.21	520.8	82.0	0.427
3 : 4	304.04	0.065	99.98	55.01	9.02	522.4	85.5	0.447
4 : 4	304.33	0.059	99.98	71.64	12.15	524.5	86.3	0.453

* ทำการศึกษาที่สภาวะและปัจจัยตัวสุดท้าย (อัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+})

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองการหาสถานะและปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+}

1. ผลการหาพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ด้วย SBH								
ปัจจัยที่ศึกษา	ผลการทดลอง							
พีเอชเริ่มต้น	ความเข้มข้น Ni^{2+} เริ่มต้น (มก./ล.)	ความเข้มข้น Ni^{2+} หลังบำบัด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	ตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.)	พีเอชหลังบำบัด	ตะกอนทั้งหมด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์นิกเกิลในตะกอนทั้งหมด *	ปริมาณธาตุนิกเกิล (ก./ล.) *
2	204.641	1.449	99.29	0.23	8.93	0.5	-	-
3	203.695	0.148	99.93	79.35	9.57	636.5	-	-
4	198.678	0.577	99.71	77.25	11.86	579.5	-	-
2. ผลการความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ด้วย SBH								
ปัจจัยที่ศึกษา	ผลการทดลอง							
ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	ความเข้มข้น Ni^{2+} เริ่มต้น (มก./ล.)	ความเข้มข้น Ni^{2+} หลังบำบัด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	ตะกอนแขวนลอยไม่จมตัว (มก./ล.)	พีเอชหลังบำบัด	ตะกอนทั้งหมด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์นิกเกิลในตะกอนทั้งหมด *	ปริมาณธาตุนิกเกิล (ก./ล.) *
200	204.325	0.143	99.93	81.10	9.56	637.1	-	-
300	298.560	0.123	99.96	60.09	10.89	705.0	-	-
400	398.985	0.265	99.93	110.05	12.11	755.0	-	-

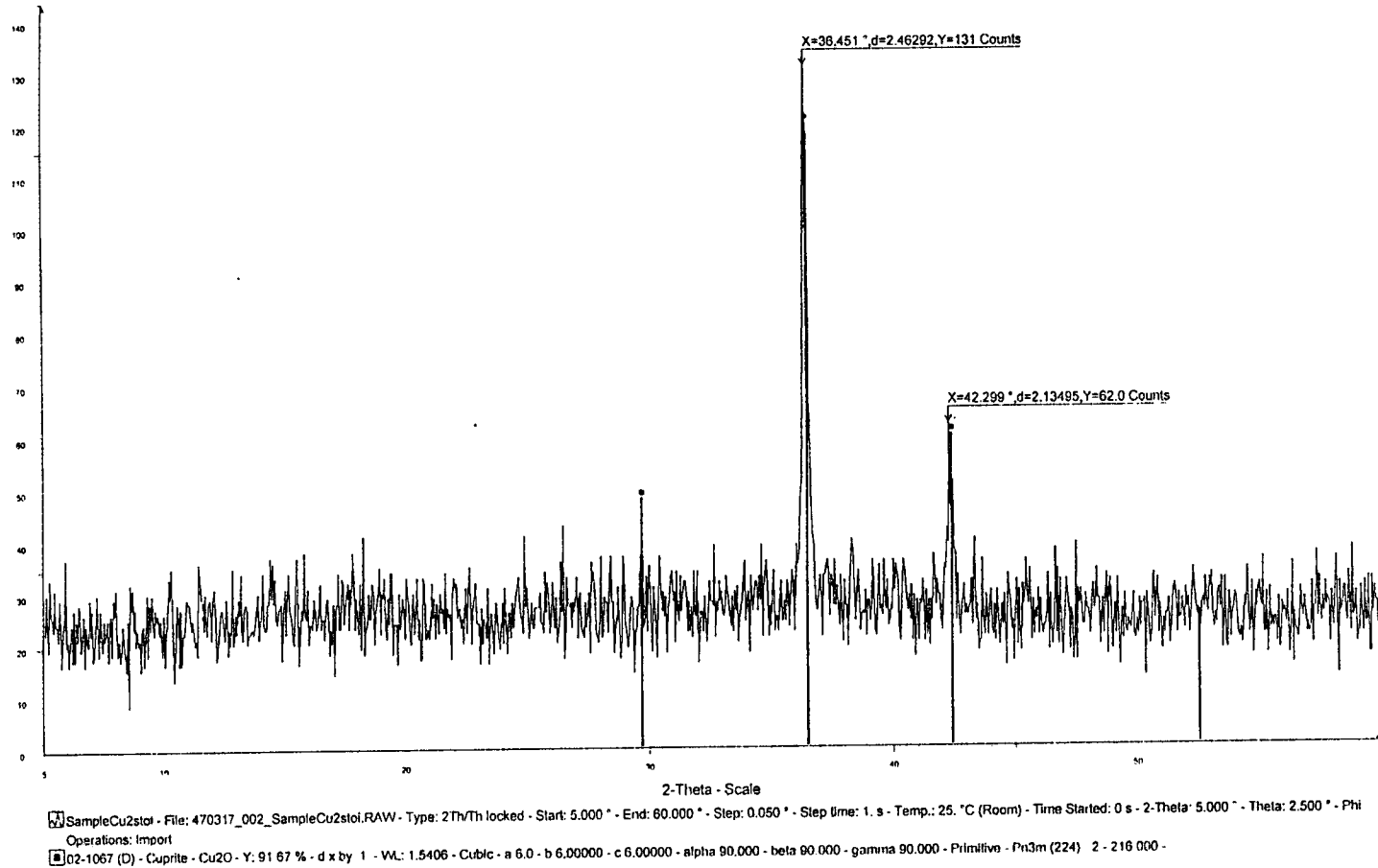
ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองการหาสภาวะและปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} (ต่อ)

3. ผลการหาอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} ด้วย SBH								
ปัจจัยที่ศึกษา	ผลการทดลอง							
SBH : Ni^{2+} (โดยโมล)	ความเข้มข้น Ni^{2+} เริ่มต้น (มก./ล.)	ความเข้มข้น Ni^{2+} หลังบำบัด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์ การบำบัด	ตะกอนแขวนลอย ไม่จมตัว (มก./ล.)	พีเอชหลัง บำบัด	ตะกอนทั้งหมด (มก./ล.)	เปอร์เซ็นต์ นิกเกิลในตะกอน ทั้งหมด *	ปริมาณธาตุนิกเกิล (ก./ล.) *
1 : 2	296.108	23.753	91.98	145.029	8.20	576.6	87.0	0.502
2 : 2	296.778	0.119	99.96	59.860	10.85	699.0	93.1	0.651
3 : 2	300.169	0.713	99.76	57.230	12.72	607.4	93.4	0.567

* ทำการศึกษาที่สภาวะและปัจจัยตัวสุดท้าย (อัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+})

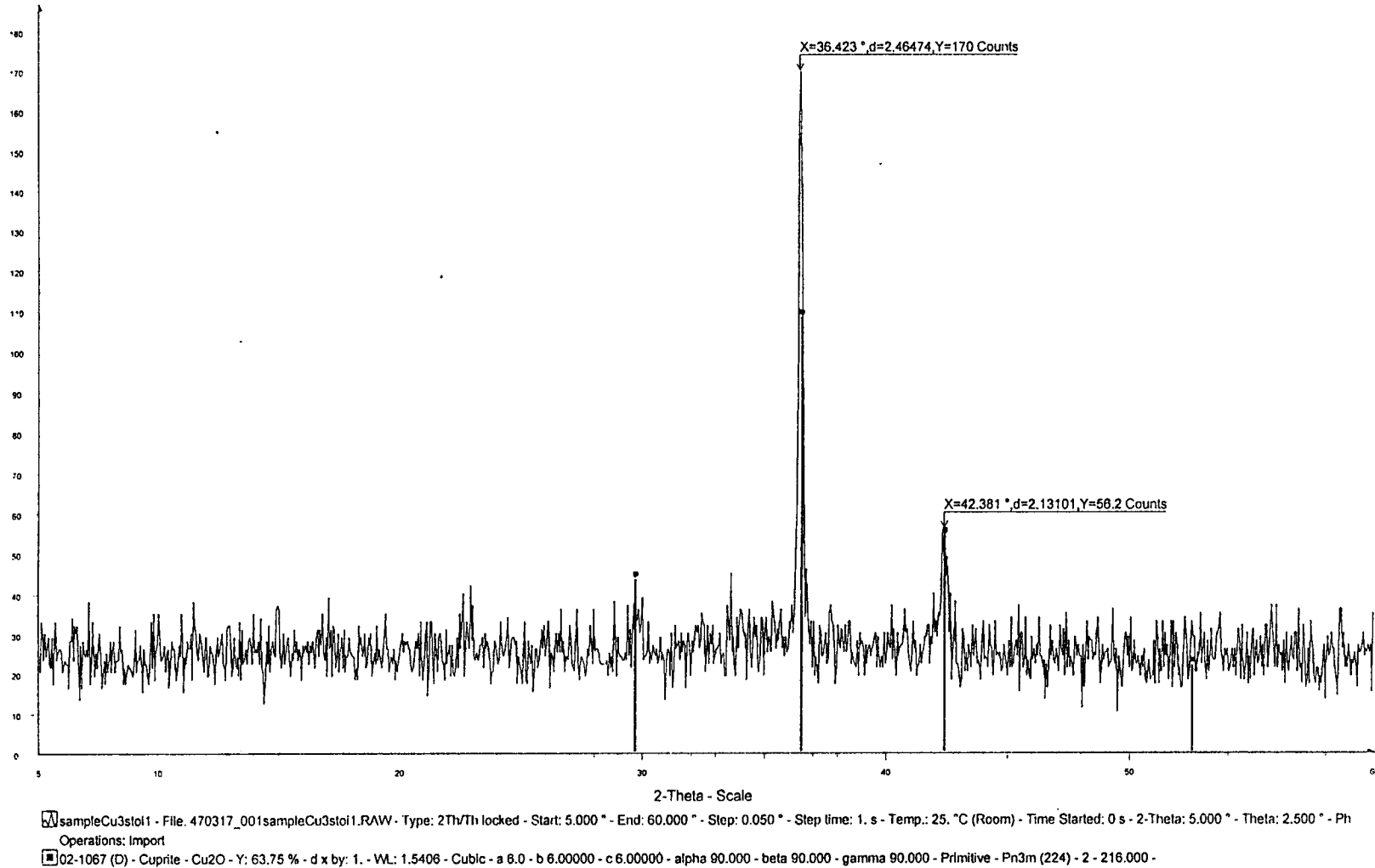
ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์ตะกอนด้วยวิธี X-Ray Diffraction

SampleCu2stoi



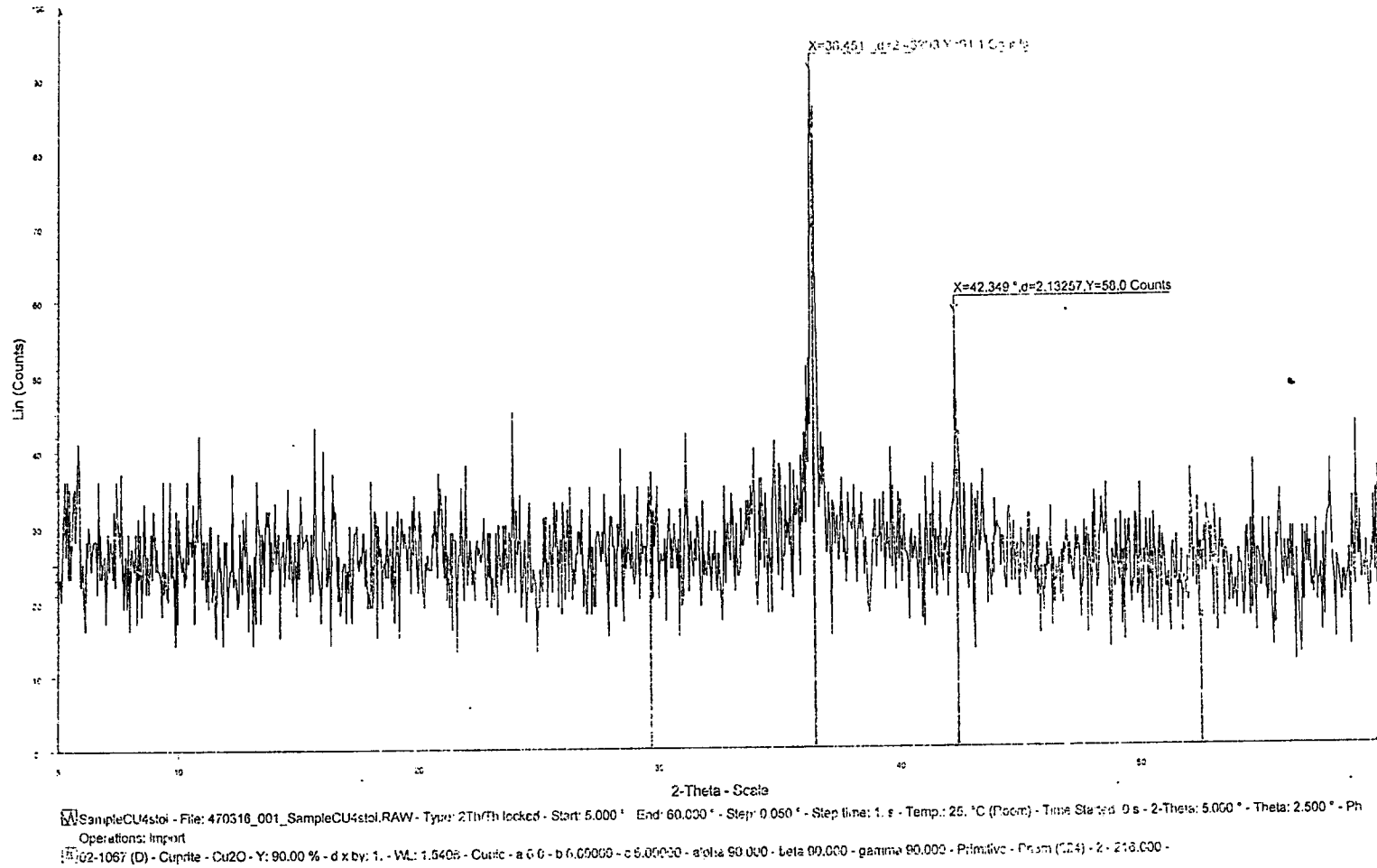
รูปที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และปริมาณ SBH ในอัตราส่วน โดย โมล
SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 2 : 4

sampleCu3stoi1

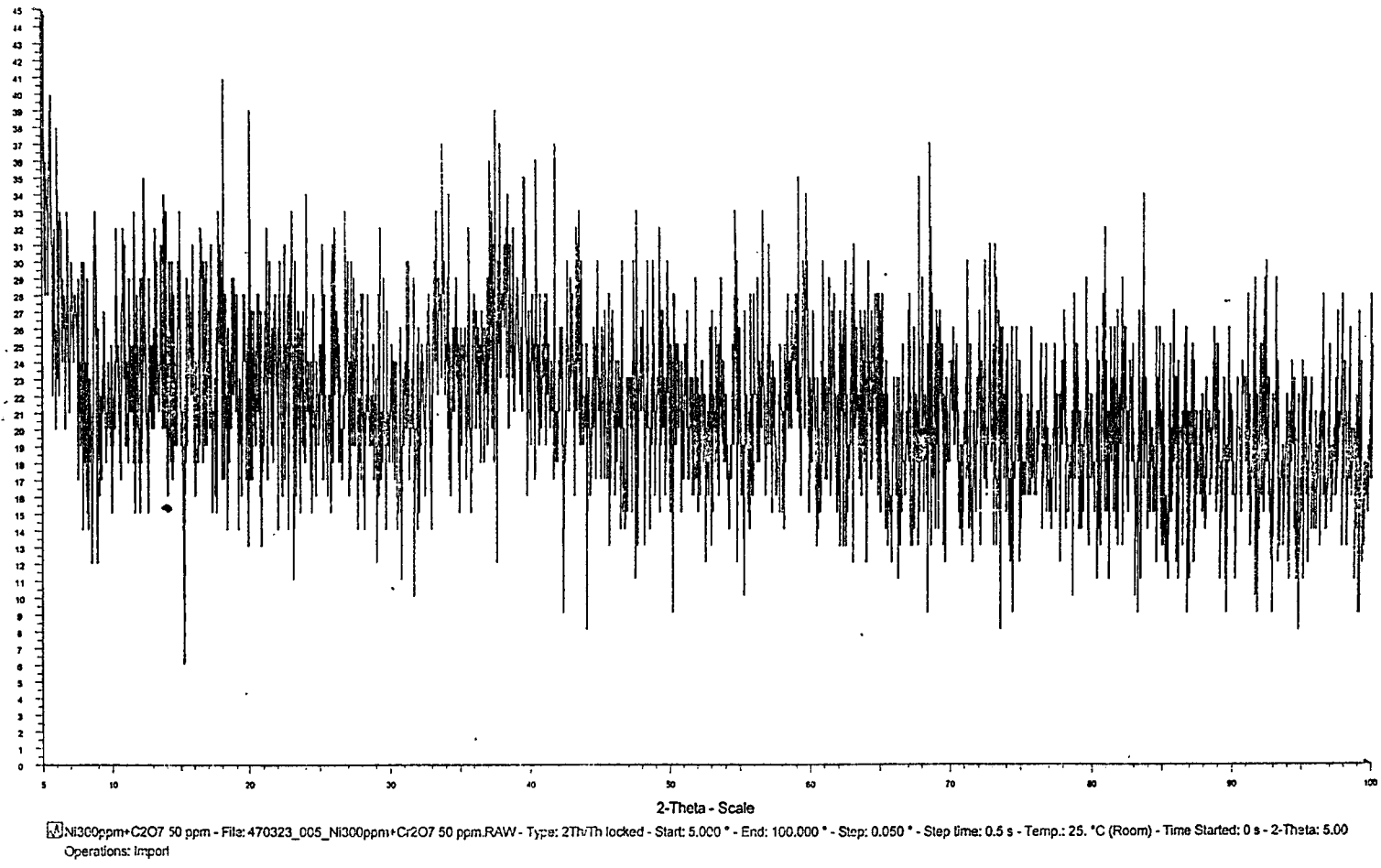


รูปที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และปริมาณ SBH ในอัตราส่วนโดยโมล
SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 3 : 4

SampleCU4stoi

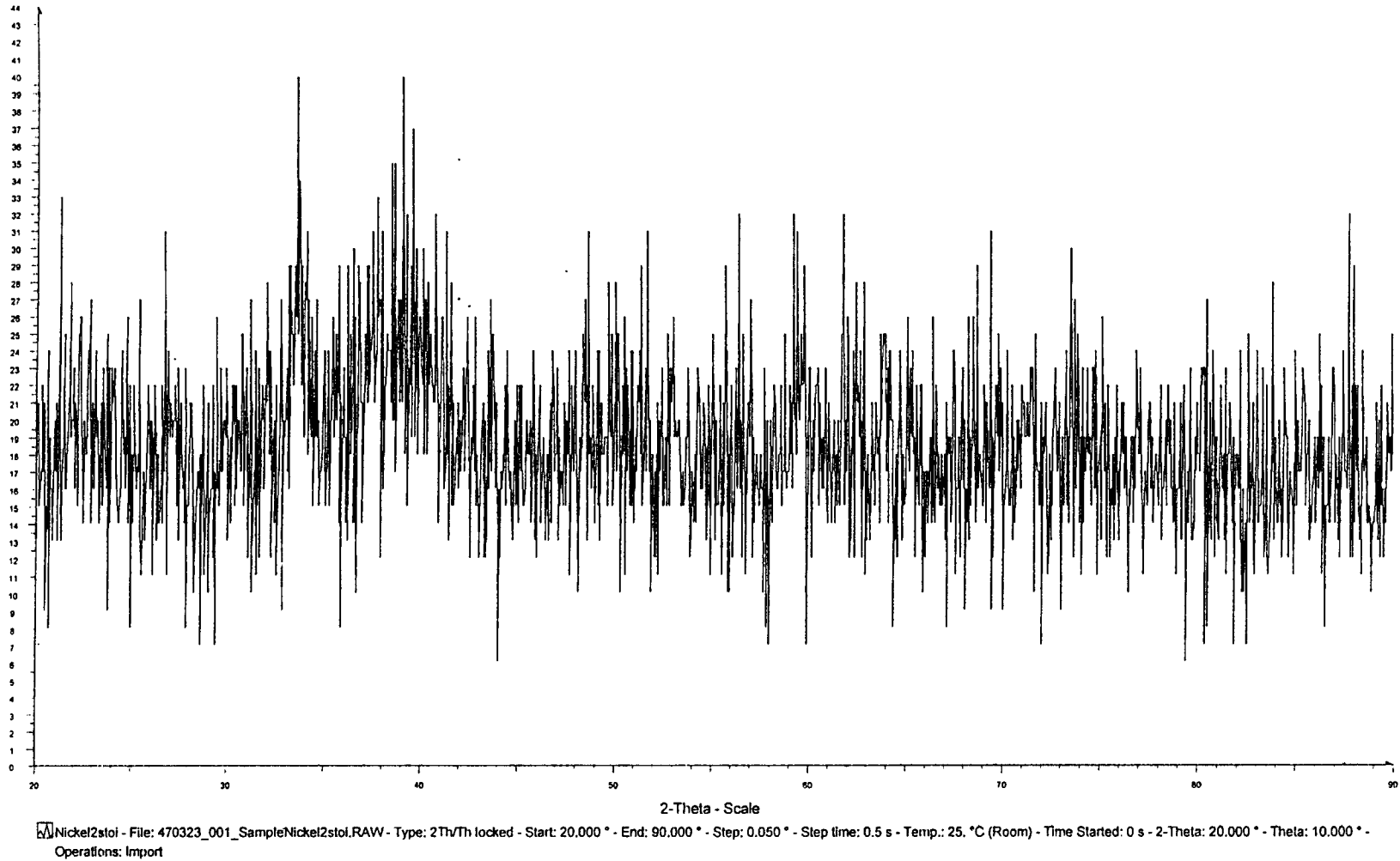


รูปที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และปริมาณ SBH ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Cu^{2+} เท่ากับ 4 : 4

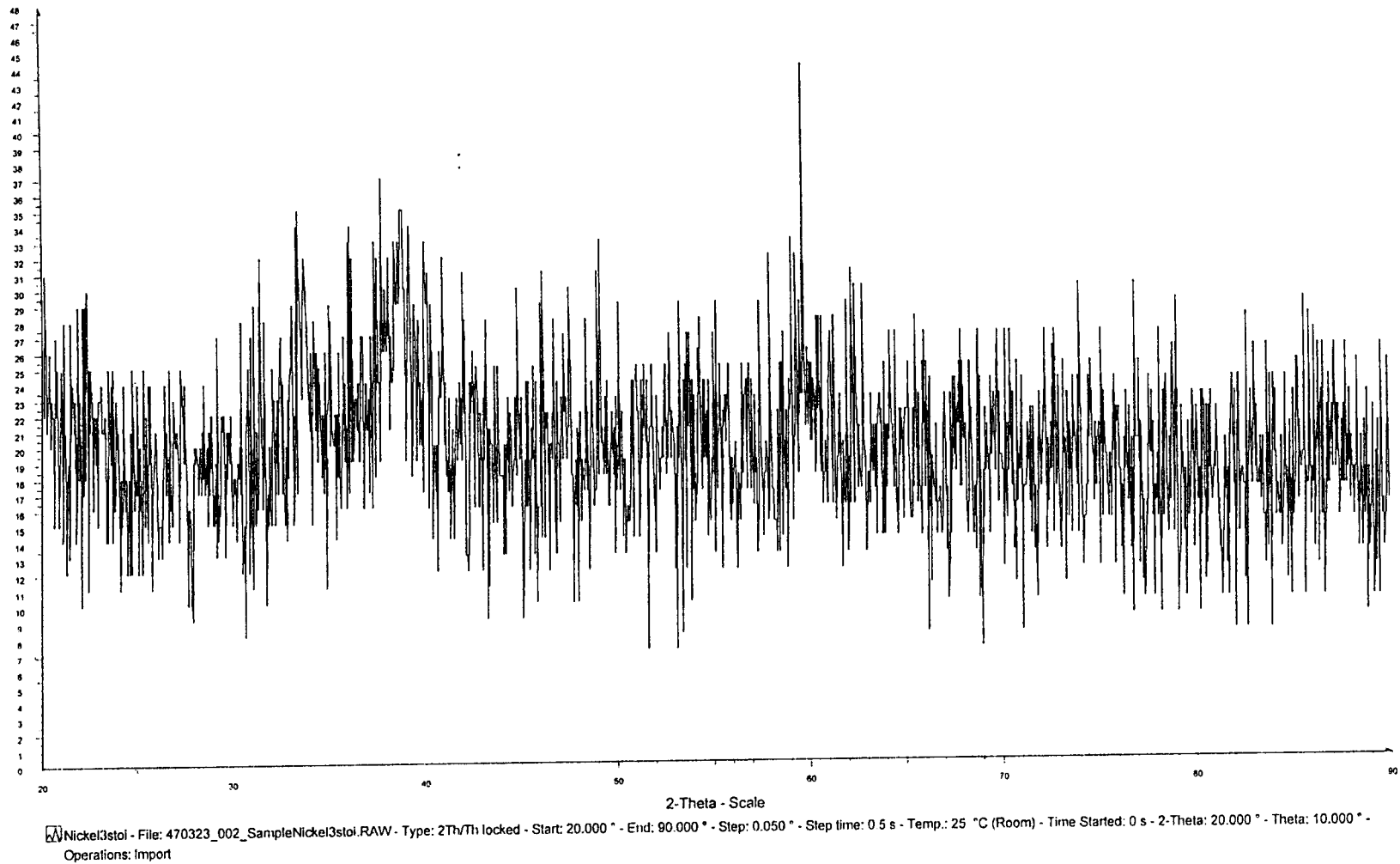


รูปที่ ๓.๔ ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และปริมาณ SBH ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 1 : 2

Nickel2stoi



รูปที่ ค.5 ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Ni^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และปริมาณ SBH ในอัตราส่วนโดยโมล SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 2 : 2



รูปที่ ๑.๖ ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ Cu^{2+} เข้มข้น 300 มก./ล. ที่พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 3 และปริมาณ SBH ในอัตราส่วนโดยโมล
SBH : Ni^{2+} เท่ากับ 3 : 2

ภาคผนวก ง
หลักการและเทคนิคของเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลอง

1. อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic absorption spectroscopy)

เทคนิคทาง AAS เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถทำได้ทั้งในเชิงคุณภาพ และปริมาณวิเคราะห์ที่ได้รับความนิยมมากอีกวิธีหนึ่ง เพราะเป็นเทคนิคที่ให้ความเที่ยง ความแม่นยำ มีสภาพไวสูง และเป็นเทคนิคที่เฉพาะดีมาก ประกอบกับค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ก็ไม่สูงมาก ดังนั้นห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ที่ทันสมัย โดยทั่วไปจะมีเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ อยู่ด้วยเสมอ ความสามารถของเทคนิคนี้มีสูงมาก เพราะสามารถใช้วิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ได้ถึง 67 ธาตุ ซึ่งนับว่ามากพอสมควรสำหรับเครื่องมือเพียงอย่างเดียว ทำให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ปี ค.ศ. 1953 Walsh ได้สร้างความสนใจและแสดงให้เห็นถึงประโยชน์และข้อดีต่างๆ ของการใช้อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี เพื่อการวิเคราะห์ทางด้านเคมี ซึ่งในขณะนั้น เทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ธาตุทางสเปกโทรสโกปี ได้แก่ เทคนิคคัลเลอร์ิเมทรี (colorimetry) และเทคนิคทางอะตอมมิกอิมิสชันสเปกโทรสโกปี (atomic emission spectroscopy) และในปี ค.ศ. 1955 walsh ได้พัฒนาเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปีขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์ธาตุได้อย่างกว้างขวาง ช่วยทำให้การวิเคราะห์รวดเร็วขึ้น และได้เปรียบกว่าการใช้วิธีการทางอะตอมมิกอิมิสชัน ซึ่งต้องขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้มาก

1.1 หลักการของอะตอมมิกแอบซอร์พชัน (Principles of Atomic Absorption)

อะตอมมิกแอบซอร์พชันเป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมเสรีของธาตุดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่นอันหนึ่งโดยเฉพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ โดยธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับพลังงานแตกต่างกัน จึงมีการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน เช่น อะตอมของโซเดียมจะดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาว คลื่น 589 นาโนเมตร เพราะแสงที่ความยาวคลื่นนี้เป็นแสงที่มีพลังงานพอดีที่จะทำให้อิเล็กตรอนของโซเดียมอะตอมเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้น ซึ่งจะเห็นว่าความยาวคลื่นเหล่านี้จัดเป็น spectroscopicline ของอะตอมมิกสเปกตรัม ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด

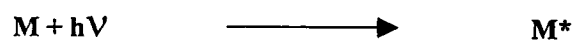
ในการทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมเสรีได้นั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไปซึ่งอาจจะอยู่ในรูปต่าง ๆ กัน เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ หรือความร้อนจากไฟฟ้าเป็นต้น ความร้อนจะทำให้เกิดกระบวนการแตกตัว (dissociation) หรือเปลี่ยนให้เป็นไอ (vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม หรือทำให้อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น หรืออาจกลายเป็นไอออนก็ได้

เมื่อพ่นสารละลายให้เป็นละอองน้ำเล็ก ๆ เข้าไปในเปลวไฟ ตัวทำละลายจะระเหยออกไปเหลือเป็นเกลือ ซึ่งถูกทำให้กลายเป็นไอและแตกตัวเป็นอะตอมอิสระในสถานะแก๊ส โดยอะตอมที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะอยู่ในสถานะพื้น (ground state) จากสมการของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann)

$$N_e / N_0 = g_e / g_0 e^{-(E_e - E_0) / kT}$$

เมื่อ	N_e และ N_0	=	จำนวนอะตอมที่สถานะกระตุ้นและสถานะพื้นตามลำดับ
	g_e และ g_0	=	statistical weight ของสถานะกระตุ้นและสถานะพื้นตามลำดับ
	E_e และ E_0	=	พลังงานที่สถานะกระตุ้นและสถานะพื้นตามลำดับ
	k	=	ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (1.3805×10^{-16} erg K^{-1})
	T	=	อุณหภูมิเคลวิน

เช่น N_e / N_0 ของ Na เท่ากับ 9.9×10^6 ที่ความยาวคลื่น 589.0 นาโนเมตร และอุณหภูมิ 2,000 เคลวิน อะตอมจะดูดกลืนแสงจากแหล่งแสงภายนอกที่ให้เส้นสเปกตรัมแคบๆ และเหมาะสมที่จะวิเคราะห์ แล้วอะตอมที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ก็จะไปอยู่ในสถานะเร้า (excited state) ซึ่งจะเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้



เมื่อ	M	=	อะตอมอิสระของธาตุในสถานะพื้น
	$h\nu$	=	แสงจากแหล่งแสงภายนอก (พลังงานที่อะตอมดูดกลืน)
	M^*	=	อะตอมอิสระของธาตุในสถานะเร้า

เมื่อแสงจากแหล่งแสงถูกดูดกลืนโดยอะตอม ความเข้มแสงจะลดลง ถ้าอะตอมในสถานะพื้นมีจำนวนมากจะทำให้ความเข้มของแสงยิ่งลดลงมากขึ้น ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณอะตอมที่ดูดกลืนแสง หรือกล่าวได้ว่าความเข้มของแสงที่ลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายตามกฎของเบียร์

$$\log I_0 / I = \epsilon bC$$

เมื่อ	I_0	=	ความเข้มแสงก่อนถูกดูดกลืนโดยอะตอม
	I	=	ความเข้มแสงหลังถูกดูดกลืนโดยอะตอม
	ϵ	=	Molar absorptivity
	b	=	ความยาวของอะตอมเซลล์
	C	=	ความเข้มข้นของสารละลาย

พลังงานที่ใช้กระตุ้นนี้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของอะตอมที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะอย่างหนึ่งของเทคนิค AAS เช่น ถ้าต้องการกระตุ้นอะตอมโซเดียมต้องใช้พลังงานที่มีความยาวคลื่น 5,890 อังสตรอม แต่ถ้าต้องการกระตุ้นอะตอมแมกนีเซียมต้องใช้ความยาวคลื่น 2,852 อังสตรอม

ปกติแล้วสเปกตรัมดูดกลืนแสงของอะตอมจะเป็นเส้นแคบ ๆ แสงที่อะตอมดูดกลืนจะเป็นแสงคลื่นเดียว สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้แสงที่มีความยาวคลื่นแบบต่อเนื่องผ่านมายังอะตอมโซเดียม ในสถานะแก๊สจะได้สเปกตรัมดูดกลืนแสงแคบ ๆ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแสงที่ใช้กระตุ้นอะตอมโซเดียมนี้มีพลังงานเฉพาะเพียงค่าเดียวเท่านั้น

1.2 เทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี AAS

เทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุนั้นสามารถทำได้หลายวิธี คือ

1. ใช้ **Flame Atomization Technique** เทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมด้วยเปลวไฟ (flame) ที่เหมาะสม

2. ใช้ **Flameless Technique** หรือ **Non-flame Atomization Technique** ซึ่งเทคนิคนี้ ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างแตกตัวด้วยอะตอมได้ด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้า (electrother -mal atomizer หรือ graphite furnace) โดยสามารถกำหนดให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ค่าต่าง ๆ กัน และใช้เวลาต่าง ๆ กันได้

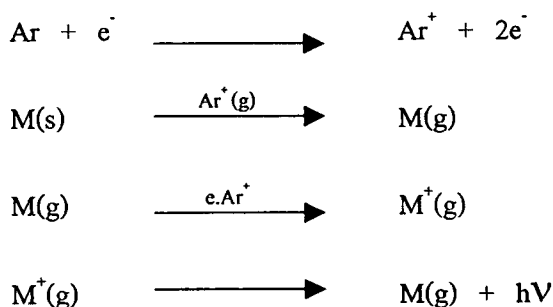
3. ใช้ **Hydride Generation Technique** เนื่องจากมีธาตุบางชนิดจะเปลี่ยนให้เป็นอะตอมโดยตรงด้วยเทคนิค 1 และ 2 ไม่ได้ แต่จำเป็นต้องใช้วิธีทำให้แตกตัวในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนเพื่อป้องกันการรวมตัวกับออกซิเจนของธาตุนั้น ดังนั้น จึงต้องใช้วิธีทำให้ธาตุนั้นกลายเป็นสารที่มีไอได้ง่าย ๆ ที่อุณหภูมิห้องด้วยการรีดิวซ์ให้เป็นไฮไดรด์ แล้วให้ไฮไดรด์นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจน ความร้อนจากเปลวไฟไฮโดรเจนจะทำให้ธาตุนั้นกลายเป็นอะตอมเสรีได้ เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ของธาตุ As, Te, Ge, Bi, และ Sb

4. ใช้ **Cold Vapor Generation Technique** สำหรับเทคนิคนี้เหมาะจะใช้วิธีวิเคราะห์ธาตุนั้นที่เปลี่ยนเป็นไอได้ง่าย ๆ ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์ปรอทที่มีปริมาณน้อยโดยเฉพาะ

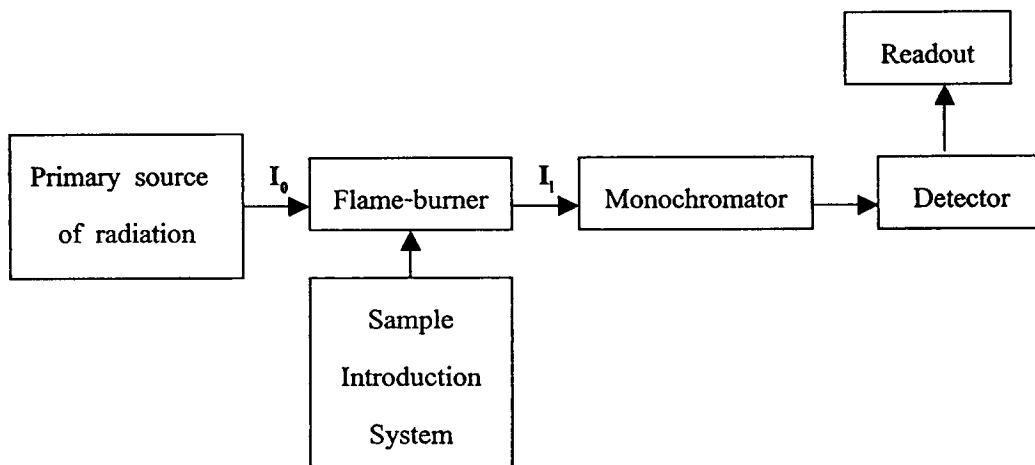
เครื่องมือที่ใช้วัดการดูดกลืนแสงของอะตอม เรียกว่า เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งมีส่วนประกอบดังรูปที่ 1

แหล่งแสงที่เลือกใช้ต้องให้แถบสเปกตรัมแคบ ๆ และมีความเข้มคงที่ ได้แก่ Hollow cathode lamp เป็นแหล่งแสงที่นิยมใช้กันมาก ประกอบด้วยขั้วแคโทดที่ทำจากโลหะชนิดเดียวกับธาตุนั้นที่ต้องการจะวิเคราะห์ ภายในหลอดบรรจุแก๊สเฉื่อยที่มีความดันต่ำ เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า

ระหว่างขั้ว แก๊สจะถูกทำให้แตกตัวและถูกเร่งเข้าชนขั้วแคโทด ทำให้อะตอมหลุดออกมาแล้วถูกกระตุ้นและปล่อยแสงออกมาตามลำดับดังนี้



เมื่อ Ar และ M คือแก๊สเฉื่อยและโลหะตามลำดับ



รูปที่ ง.1 ส่วนประกอบของเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

โดยทั่วไปมักเลือกสเปกตรัมจากแหล่งแสง ที่มีความยาวคลื่นที่อะตอมดูดกลืนแสงได้มากที่สุด เรียก สเปกตรัมนี้ว่า resonance line แต่บางครั้งจะพบว่าการดูดกลืนแสงเบี่ยงเบนไปจากกฎของเบียร์เนื่องจากการเกิด self absorption ซึ่งสามารถแก้ไขโดยใช้สเปกตรัมเส้นอื่นที่ให้ความไว น้อยกว่า resonance line

ในการวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม มีแฟกเตอร์หลายอย่างที่มีผลต่อจำนวนอะตอมที่ถูกผลิตขึ้นในเปลวไฟ ได้แก่

1. อัตราการไหลของสารละลายที่ถูกดูดเข้าสู่เปลวไฟ (aspiration rate)
2. ความหนืดของสารละลาย (viscosity)
3. ชนิดของตัวทำละลาย (solvent)
4. แรงตึงผิวของสารละลาย (surface tension)

5. อุณหภูมิของเปลวไฟ (flame temperature)

6. ความสูงของเตา (burner height)

ผลของการวิเคราะห์จะดีเพียงใด ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ดังกล่าวข้างต้น การปรับอัตราการใช้ของสารละลายให้เหมาะสม การเลือกตัวทำละลายให้เหมาะสม และแรงดึงผิวของสารละลาย จะมีผลต่อปริมาณสารที่ถูกดูดเข้าสู่เปลวไฟ ถ้าสารละลายเข้าสู่เปลวไฟมาก โอกาสที่จะคอมจะ ถูกผลิตขึ้นก็เพิ่มมากขึ้น การเลือกชนิดของเปลวไฟและการปรับสัดส่วนของเชื้อเพลิงและสารเพิ่ม ออกซิเจนให้เหมาะสม รวมทั้งการปรับความสูงของเตาให้เหมาะสมจะช่วยทำให้ปริมาณอะตอม เพิ่มขึ้นและสามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุดตามลำดับ

การวัดการดูดกลืนแสงมักประสบปัญหาจากการแทรกสอด (interference) ต่าง ๆ ทำให้ การวิเคราะห์มีข้อผิดพลาด ซึ่งการแทรกสอดนี้มาจากสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้

1. การดูดกลืนแสงของโมเลกุล ซึ่งเกิดจากออกไซด์ของโลหะหรือสารประกอบที่ทนต่อ ความร้อนและไม่สลายตัว

2. การกระเจิงแสงหรือการดูดกลืนแสงของอนุภาคของแข็ง หรือสารที่สลายตัวกลายเป็น ไอได้ยาก

3. การแตกตัวของอะตอมของโลหะ มีผลทำให้จำนวนอะตอมลดลง และทำให้การดูดกลืน แสงลดลง

4. การเกิดสารประกอบที่สลายตัวได้ยาก ทำให้การดูดกลืนแสงลดลง

การดูดกลืนแสงของสปีชีส์อื่น ๆ ที่ไม่ใช่อะตอมที่สนใจ เรียกว่า Background absorption การแก้ไข Background absorption วิธีหนึ่งก็คือการใช้ Hollow cathode lamp เพื่อวัดการดูดกลืน แสงของอะตอมและ Background ไปลบออกจากค่าการดูดกลืนแสงทั้งหมดก็จะได้ค่าการดูดกลืน แสงของอะตอมเพียงอย่างเดียว และพบว่าการดูดกลืนแสงของอะตอมในช่วงอัลตราไวโอเล็ต จะให้ Background absorption มาก

ดังนั้นในการทดลองจึงจำเป็นต้องตั้งสถานะของเครื่องมือให้เหมาะสมก่อนใช้งาน และ ควรแก้ไขค่าการดูดกลืนแสงให้ถูกต้อง เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

1.3 ขั้นตอนของการทำวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS

ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างนั้น ถ้าตัดสินใจที่จะใช้เทคนิคทาง AAS ขั้นตอนต่าง ๆ ที่จะ เตรียมให้พร้อมควรจะเป็นดังนี้

1. เตรียมสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปสารละลายที่เหมาะสมและพร้อมที่จะกับเครื่อง AAS

2. ตัดสินใจว่าจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาอะไร และเลือกวิธีการให้เหมาะสม ทั้งใน

เชิงคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์

3. จัดเครื่องมือให้พร้อมที่จะทำงานได้ ซึ่งถ้าเป็นเครื่องสมัยใหม่ที่ใช้คอมพิวเตอร์ หรือไมโครโพรเซสเซอร์ควบคุม จะมี software ที่เก็บข้อมูลของธาตุแต่ละชนิดไว้แล้ว เป็นเสมือน cook book ให้ผู้วิเคราะห์เลือกใช้ได้ ซึ่งมี

ก. เลือก HCL ของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์ใส่เข้าไปในเครื่อง และเลือก กระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้

ข. จัดเครื่องมือให้มีสภาพที่เหมาะสมกับเทคนิคที่ใช้ เช่น ใช้ flame หรือ flameless atomization การปรับอัตราการไหลของออกซิเจนที่อากาศ และเชื้อเพลิง เป็นต้น

ค. จัดความกว้างของช่องแสงเข้าออกจากโมโนโครเมเตอร์ (slit width) ให้เหมาะสม

4. เลือกโปรแกรมการวัดผล การคำนวณ ตลอดจนการรายงานผลวิเคราะห์

1.4 การทำคุณภาพวิเคราะห์ด้วย AAS (Qualitative Analysis)

โดยทั่วไปแล้วเทคนิคทาง AAS นั้นไม่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับทำคุณภาพวิเคราะห์ เพราะ เสียเวลาไม่สะดวก เนื่องจากต้องเปลี่ยน HCL และต้อง scan ความยาวคลื่นด้วย ประกอบกับต้อง เสียค่าใช้จ่ายสูง จึงไม่นิยมใช้สำหรับตรวจหา อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ก็สามารถใช้ได้ เช่น ต้องการ ตรวจสอบว่าสารละลายตัวอย่างมี Ni เป็นองค์ประกอบหรือไม่ เราก็ใช้ HCL เป็น Ni และใช้ flame (air/C₂H₂) เป็น atomizer ใช้ความยาวคลื่นของธาตุ Ni คือ 232 นาโนเมตร สำหรับตรวจหลังจาก นำสารละลายตัวอย่างพ่นเข้าไปในเปลวไฟแล้วดูว่าที่ความยาวคลื่น 232 นาโนเมตร มีการดูดกลืน แสงหรือไม่ ถ้ามีก็แสดงว่าสารตัวอย่างมีธาตุ Ni แต่ถ้าไม่มีสารดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นนี้ ก็ แสดงว่าสารตัวอย่างไม่มี Ni เป็นต้น ดังนั้นถ้าต้องการตรวจหาธาตุใดก็สามารถทำได้ในทำนอง เดียวกัน

1.5 การทำปริมาณวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS (Quantitative Analysis)

สามารถทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

Calibration Method

ในกรณีที่สารตัวอย่างไม่ค่อยมีสิ่งรบกวนและสารตัวอย่างเจือจาง อาจจะทำการวิเคราะห์ ได้ง่ายๆ โดยเทียบกับสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนแล้ว วิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยปรับสัญญาณที่ได้จาก blank ให้เป็นศูนย์ แล้วจึงวัดค่าแอมพลิจูดของสารละลายมาตรฐาน ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (4-5 ความเข้มข้น) เมื่อใช้ flameless atomization technique อาจใช้ วัด peak area หรือความสูงของพีก (peak height) แล้วนำผลมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์กับ ความเข้มข้นของสารละลาย จะได้ calibration curve ซึ่งอาจเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งก็ได้ ใน

การเขียนกราฟ อาจให้เครื่องคอมพิวเตอร์หรือเครื่องคำนวณทำงานให้ ถ้าเป็นเส้นตรง ใช้ least squares fit แต่ถ้าเป็นเส้นโค้ง อาจใช้เครื่องลากเส้นโค้งให้ได้ พร้อมคำนวณความเข้มข้นให้ด้วยจากค่าที่วัดได้ของสารตัวอย่างซึ่งสะดวกมาก ลักษณะ curve สิ่งที่สำคัญจะต้องไม่ลืมว่า calibration curve ที่ได้ ใช้ได้เฉพาะการวิเคราะห์แต่ละครั้งเท่านั้น เมื่อจะวิเคราะห์ใหม่จะต้องทำใหม่ ทั้งนี้เพราะ parameters ต่าง ๆ ที่ใช้อาจเปลี่ยนแปลงไปได้

ใช้ Standard Addition Method

จะเห็นว่าการทำ calibration curve ในการวิเคราะห์สารนั้น สัญญาณที่วัดได้ไม่ใช่เป็นแค่เพียงสารที่ทำการวิเคราะห์เท่านั้น แต่มันรวมถึงสัญญาณต่าง ๆ ที่ได้จากสารอื่น ๆ ที่มีอยู่สารตัวอย่าง

ใช้วิธี Internal Standard Method

วิธีวิเคราะห์นี้อาศัยหลักการเติมสารมาตรฐาน (reference element) ซึ่งเป็นคนละธาตุกับสารที่จะวิเคราะห์ลงไปในสารตัวอย่าง และ blank หลังจากวัดค่าแอมพลิจูดแล้วหาอัตราส่วนของแอมพลิจูดระหว่างสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน (Au/As) จากนั้นไปเขียนกราฟกับความเข้มข้นของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์จะได้ calibration curve เพื่อใช้หาความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างต่อไป สำหรับวิธีนี้จะใช้ได้เมื่อ

- (1) สารตัวอย่างจะต้องไม่มีธาตุที่ใช้เป็นมาตรฐาน (reference element)
- (2) ทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องมีลักษณะและคุณสมบัติทางเคมีเหมือนกัน

เทคนิคนี้อาจจะค่อนข้างลำบากในการทำ แต่สามารถทำได้ง่ายถ้าเป็นเครื่อง atomic absorption spectrophotometer ชนิดนี้มี 2 channel

2. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffractometer) ।

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุพื้นฐานชนิดการวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย(non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (crystal structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) โดยอาศัยการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์และความรู้เกี่ยวกับวิชาการระบบโครงสร้างผลึก(crystallography) เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิตสำหรับตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ

2.1 ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้น

รังสีเอกซ์ (X Rays) จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูงมีความยาวคลื่นสั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1 ถึง 100 อังสตรอม หรือ 0.01 ถึง 10 นาโนเมตร ถูกค้นพบขึ้นเป็นครั้งแรกในปีค.ศ. 1895 โดยเรินต์เกน (W.C. Rontgen) ต่อมาได้มีการศึกษาสมบัติและ

การเกิดอันตรกิริยาของรังสีต่อสสาร ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวงการวิทยาศาสตร์อย่างมาก และการเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสารนั้นก่อให้เกิด ปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น เกิดการเปล่งแสง (emission) การดูดกลืน การกระเจิง หรือการเลี้ยวเบน (diffraction) เป็นต้น ปรากฏการณ์เหล่านี้ ล้วนเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด ซึ่งหลักการดังกล่าวนี้ จึงสามารถนำมาใช้วิเคราะห์สาร ได้ดังนี้

1. ใช้วิเคราะห์หาลองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ในสารทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ
2. ใช้ศึกษาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (electronic structure) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมี (chemical bonding)
3. ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก (crystal structure) หรือ โมเลกุลของสารโดยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

2.2 ส่วนประกอบของเครื่องเอกซ์เรย์

ตารางที่ ๑.1 แสดงถึงส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน

อุปกรณ์	หน้าที่
-เอกซ์เรย์ เจเนอเรเตอร์ (X-ray generator) และหลอด รังสีเอกซ์ (X-ray tube)	- ผลิตรังสีเอกซ์
- แผ่นกรองเบต้า (β -filter)	- กรองรังสี $K\beta$ ออกจากรังสีเอกซ์
- ไซเวอร์เจเนสลิต (divergence slit)	- ควบคุมพื้นที่ที่แสงตกกระทบตัวอย่างและปรับความสามารถ ในการแยกและความเข้ม (intensity) ของรังสีให้เหมาะสม
- โซลเลอร์สลิต (soller slit)	- ควบคุมความสามารถในการแยกที่มุมต่ำ
- รีซีฟวิงสลิต (receiving slit)	- ปรับความสามารถในการแยกและความเข้มของรังสีให้เหมาะสม
- สแคตเตอร์สลิต (scatter slit)	- ลดพื้นที่หลัง (background)
- โมโนโครเมเตอร์ (monochromator)	- ลดพื้นที่หลังและกรอง $K\beta$
- หน่วยรับสัญญาณ	- รับรังสีเอกซ์ที่หักเหและแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้ว ส่งต่อไปยังหน่วยประมวลผล

2.3 หลักการทำงานของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

การทำงานของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน โดยเริ่มจากหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าแรงสูง (high-tension transformer) ทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขั้วแคโทดทำให้ไส้ร้อนขึ้น อิเล็กตรอนไปจับกับหนาแน่นบริเวณไส้ ดังนั้นค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดเพิ่มสูงขึ้นทำให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนเป้า (target) ที่ขั้วแอโนด มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาผ่านหน้าต่างที่ทำด้วยเบอริลเลียม (Be window) หลอดรังสีเอกซ์มีหลายชนิด เรียกชื่อตามชนิดของโลหะที่ใช้ทำแอโนด เช่น Mo W Cr Cu Co Ag และ Fe ซึ่งจะให้รังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ แต่โดยทั่วไปมักนิยมใช้ Cu ซึ่งให้ค่าความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 1.542 อังสตรอม จะมีทั้ง $K\alpha$ และ $K\beta$

ปัจจุบันมีองค์กร JCPD (Joint Committee on Power Diffraction Standard) ได้ทำการวัดและเก็บรวบรวมข้อมูลของสารประกอบต่าง ๆ มากกว่า 66,000 ชนิด ทั้งในรูปแบบการ์ด (card) และคอมแพคดิส (compact disk หรือ CD) ซึ่งง่ายและสะดวกมากขึ้นในการวิเคราะห์เฟสของสารตัวอย่าง โดยนำดิฟแฟรกโตแกรมและค่าระยะห่างระหว่างระนาบ ที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับดิฟแฟรกโตแกรมและข้อมูลมาตรฐานจากฐานข้อมูลของ JCPD

2.4 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

สารตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของของแข็งเป็นผงละเอียดขนาดเล็กลงกว่า 45 ไมครอน และอัดด้วยแรงกระทำสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทาง บริเวณผิวหน้าของตัวอย่างจะต้องเรียบสม่ำเสมอ ตัวอย่างที่ดีจะต้องมีการจัดเรียงตัวของผลึกอย่างอิสระ (random orientation)

1. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

- 1.1 นำชิ้นตัวอย่างมาบดเป็นผงละเอียดด้วยครกบดอลูมินา (alumina mortar)
- 1.2 ร่อนผงละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมช
- 1.3 นำผงที่ได้มาทำการอัดลงในที่ใส่ตัวอย่าง

2. ข้อควรระวัง

- 2.1 การอัดผงตัวอย่างควรอัดด้วยแรงที่สม่ำเสมอ ไม่ควรกดแรงมากนักเพราะอาจทำให้ผลึกตัวอย่างเกิดความเครียดและให้ค่ามุมที่ผิดพลาดได้
- 2.2 ตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ ต้องมีผิวหน้าเรียบ มีความหนาไม่ต่ำกว่า 20 ไมครอน
- 2.3 ตัวทำละลาย (solvent) หรือตัวยึดประสานที่ใช้ในการเตรียมจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสาร

3. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (X-ray Fluorescence Spectroscopy)

รังสีเอกซ์ จัดว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในการศึกษาทางวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติและการเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสารทั้งสิ้น การเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสารนั้นก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น การเปล่งแสงบางชนิด (emission) การดูดกลืน (absorption) การกระเจิง (scattering) หรือการเลี้ยวเบน (diffraction) เป็นต้น

ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละสาร ที่เราสามารถนำมาวิเคราะห์ทางเคมีได้ดังนี้

1. ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ในสาร (elemental analysis) ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative)
2. ใช้ศึกษาหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (electronic structure) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับพันธะเคมี
3. ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (crystal structure) หรือโมเลกุลของสารด้วยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (diffraction)

X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRFS) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีแบบไม่ต้องทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุแบบทีละธาตุหรือหลาย ๆ ธาตุพร้อม ๆ กัน (simultaneous) โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ทันสมัย มีความสามารถสูง ช่วยทำให้เทคนิคนี้ได้รับความนิยมมากขึ้น ทั้งในด้านอุตสาหกรรมและการวิจัย เพราะสามารถนำไปวิเคราะห์ทางเคมีได้แทบทุกชนิดของสารตัวอย่างในระดับความเข้มข้นสูงถึงระดับความเข้มข้นต่ำ บางครั้งสามารถวิเคราะห์ได้ถึงระดับ ppm ซึ่งวิเคราะห์ได้ง่ายและรวดเร็ว

3.1 หลักการทั่วไปและการเกิดสเปกตรัมรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์เกิดได้จากการระดมยิงวัตถุ เช่น โลหะ หรือสารประกอบเป็นต้น ด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เช่น ลำอิเล็กตรอน หรือโปรตรอน หรือโพตรอน อิเล็กตรอนของอะตอมที่ประกอบอยู่ในวัตถุนั้นเมื่อถูกระดมยิงจะทำให้อิเล็กตรอนในเชลล์ (shell) หลุดออกไป เมื่อเกิดที่ว่าง อิเล็กตรอนจากเชลล์นอก ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าก็จะเข้ามาแทนที่ เช่น จาก L หรือ $M \rightarrow K$, $M \rightarrow L$ หรือ $N \rightarrow M$ จะทำให้เกิดรังสีเอกซ์ขึ้น ดังรูปที่ 3.2

3.2 ลักษณะและองค์ประกอบต่าง ๆ ของเครื่อง XRFS

เครื่อง XRFS โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

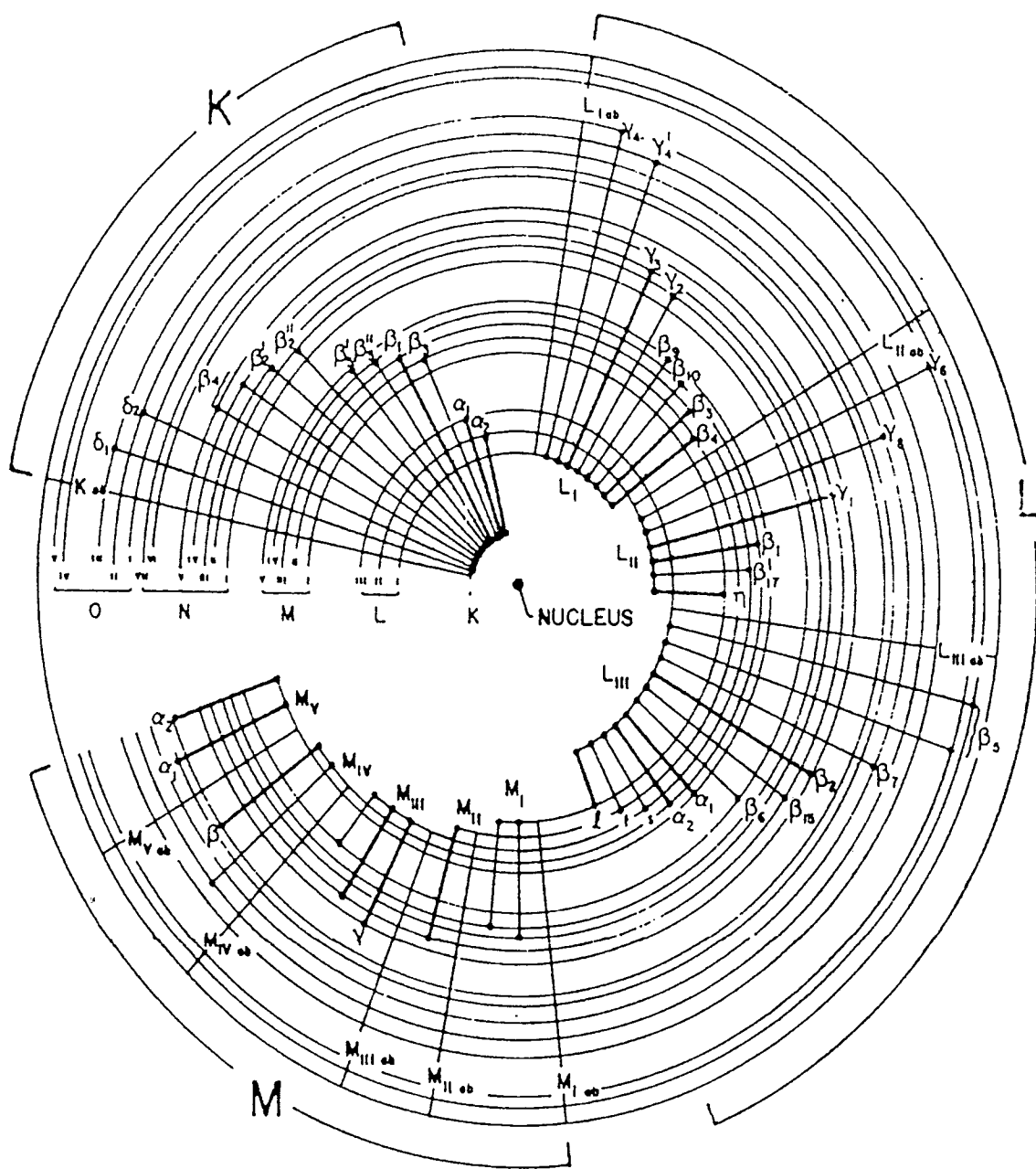
1. X-ray Generator ประกอบด้วย

- X-ray tube
- X-ray power controller
- X-ray tube cooling unit
- High voltage transformer
- Filter

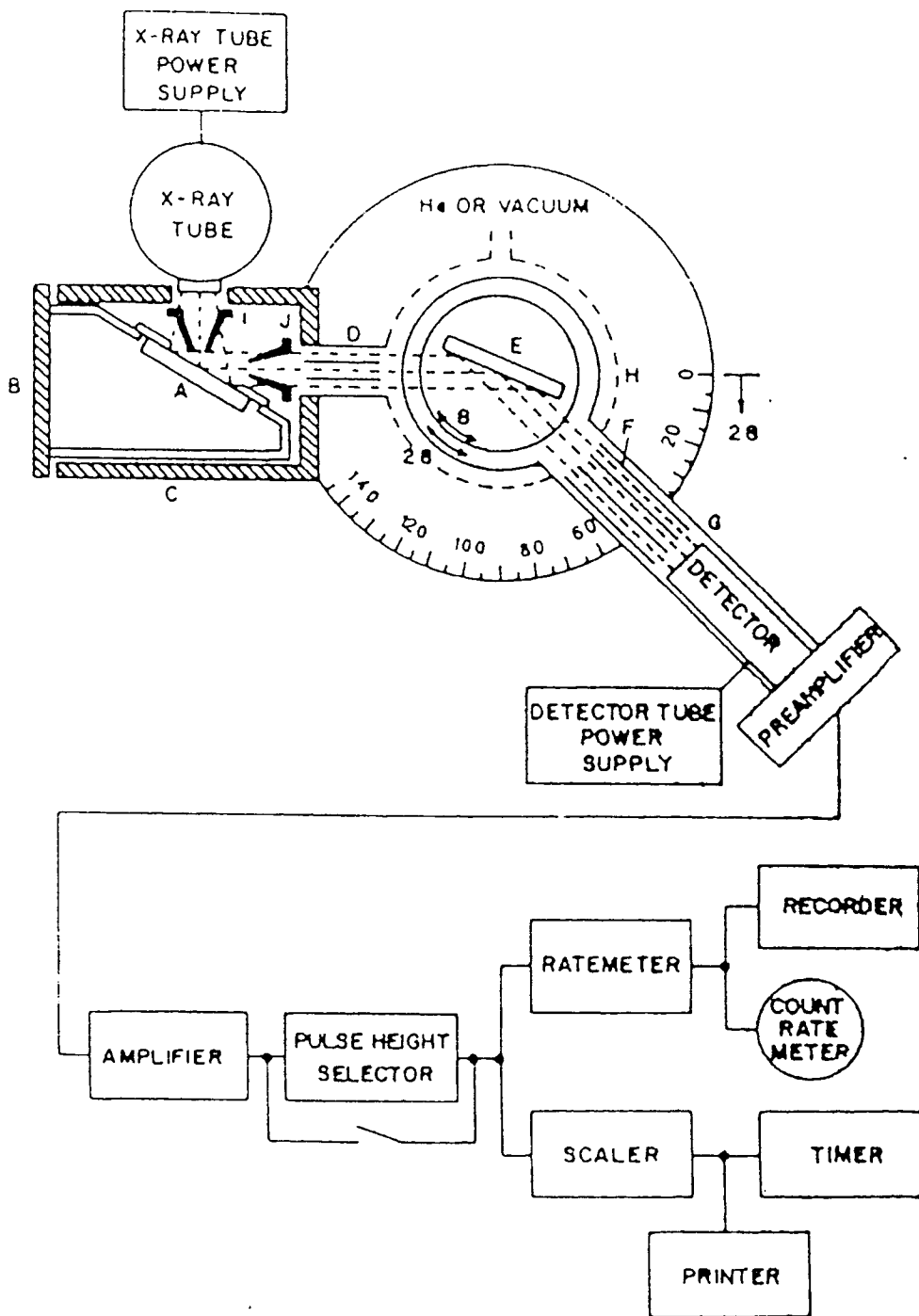
2. Spectrometer ประกอบด้วย

- Sample compartment
- Collimators
- Analysing crystals
- Goniometer
- Detectors
- data system
- Computer
- Printer
- Recorder

ในการวิเคราะห์สารด้วยเทคนิคทาง XRF นั้นมีขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการดังนี้ คือ ลำรังสีเอกซ์ที่ได้จากเครื่อง X-ray generator ซึ่งมีหลอดรังสีเอกซ์อยู่ จะถูกส่งไปยังสารตัวอย่าง เพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุต่าง ๆ ในสารตัวอย่าง แล้วเกิดเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ขึ้น ให้เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ผ่านคอลลิเมเตอร์ (Collimator) เพื่อให้ได้ลำรังสีเอกซ์เป็นลำขนานและไปในทิศทางที่ต้องการ คือ ไปกระทบกับ analysing crystals ซึ่งอยู่ในสเปกโตรมิเตอร์ที่ทำเป็นสูญญากาศหรือความกดดันต่ำมาก ๆ analysing crystals นี้จะทำหน้าที่กระจายหรือแยกรังสีเอกซ์เรย์ออกไปให้มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน คล้ายกับเกรตติง ทำหน้าที่แยกแสงรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กันจะถูกวัดความเข้มหรือกำลัง (Power) ด้วย การสแกนของดีเทคเตอร์ สัญญาณที่วัดจะถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูลแล้วถ่ายทอดออกมาเป็น สเปกตรัมด้วยเครื่อง Printer หรือ Recorder จากข้อมูลที่ได้ทั้งของสารมาตรฐานและสารตัวอย่างสามารถนำไปวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณได้ ดังรูปที่ ๓.3



รูปที่ ๖.2 แสดงการเกิดทรานซิชั่นของอิเล็กตรอน โดยใช้อะตอมมิกโมเดล (atomic model)



รูปที่ ง.3 แสดงแผนภาพองค์ประกอบต่าง ๆ ของเครื่อง XRFs

(A) = sample (B และ C) = sample compartment (D, F, I และ J) = collimators
 (E) = analysing crystal (G) = detector (H) = goniometer