การกำจัดไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์

นางสาว สุรีรัตน์ ถมยาศิริกุล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-637-263-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17555704X

REMOVAL OF HEAVY METAL IONS FROM COD WASTEWATER BY THE FERRITE PROCESS

MISS SUREERAT THOMYASIRIGUL

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Guaduate School

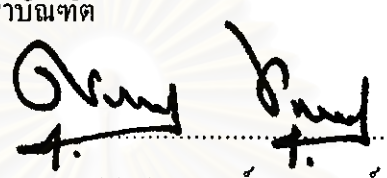
Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-637-263-7

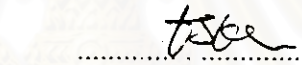
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์
โดย	นางสาว สุรีรัตน์ ถมยาศิริกุล
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

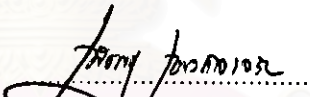


.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ธงชัย พรรณสวัสดิ์)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ พรประภา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

. ที่มหาวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

สุรีรัตน์ ถมยาศิริกุล : การกำจัดไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ (REMOVAL OF HEAVY METAL IONS FROM COD WASTEWATER BY THE FERRITE PROCESS) อ.ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, 143 หน้า.
ISBN 974-637-263-7.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ การทดลองจะแสดงผลของประสิทธิภาพการกำจัด, ความเสถียรของตะกอนเฟอร์ไรต์ และการยืนยันความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนเฟอร์ไรต์ โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ (1)การทดลองหาพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยแปรค่าพีเอชเป็น 9, 10, 11, 12 และแปรค่าอุณหภูมิเป็น 55, 60, 65, 70 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณเฟอรัสซัลเฟตคงที่เท่ากับ 0.025 โมล (2)การทดลองหาอัตราส่วนโมลที่เหมาะสม โดยแปรปริมาณเฟอรัสซัลเฟตเป็น 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1 โมล และใช้พีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1 ในงานวิจัยนี้กำหนดให้อัตราการเติมอากาศคงที่ 10 ลิตร/นาที

ผลการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมคือ พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของเฟอรัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมดในน้ำเสียเท่ากับ 18.65 ปรอท, โครเมียม, และเหล็กหลังบำบัดมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.097, 0.329 และ 0.180 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กเท่ากับ 99.86%, 97.87%, และ 99.53% ตามลำดับ ปรอทยังคงเหลืออยู่เกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมเล็กน้อย ส่วนโครเมียมมีปริมาณเหลืออยู่ต่ำกว่ามาตรฐานดังกล่าว ผลการทดสอบการชะละลายพบว่า ความเข้มข้นของปรอทและโครเมียมในน้ำสกัดต่ำกว่ามาตรฐานสารมีพิษของกระทรวงอุตสาหกรรม ลวดลายการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่า สารประกอบหลักของตะกอนที่ได้คือ แมกนีไทต์ ในกรณีที่มีการใช้ไนโตรเจนจะได้ตะกอนเฟอร์ไรต์ที่มีความเป็นสารแม่เหล็กดีกว่าการไม่ใช้ไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ แต่ให้ผลประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักไม่แตกต่างกันอย่างเด่นชัด สำหรับค่าใช้จ่ายเฉพาะสารเคมีในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์โดยใช้ไนโตรเจนมีค่าประมาณ 10.62 บาทต่อลิตร (10,620 บาทต่อลูกบาศก์เมตรหรือ 3.18 บาทต่อ 1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่าซีโอดี) ในกรณีไม่มีการใช้ไนโตรเจนมีค่าใช้จ่ายประมาณ 9.35 บาทต่อลิตร (9,350 บาทต่อลูกบาศก์เมตรหรือ 2.80 บาทต่อ 1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่าซีโอดี)

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2540	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C718031 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEY WORD: FERRITE / FERRITE PROCESS / COD WASTEWATER / HEAVY METAL IONS
SUREERAT THOMYASIRIGUL : REMOVAL OF HEAVY METAL IONS FROM COD WASTEWATER BY THE FERRITE PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D. 143 pp. ISBN 974-637-263-7.

This research investigated the optimum conditions for removal of mercury, chromium and iron in COD wastewater by the ferrite process. The experimentals were performed to determine the removal efficiencies of the heavy metal ions and the extraction tests of the ferrite sludge. In addition the magnetic property confirmation of the ferrite sludge were also carried out. The experiments were divided into two stages. The first stage was carried out to determine the optimum pH and temperature by varying pH of 9, 10, 11, 12 and temperature of 55°, 60°, 65°, 70°C. The amount of ferrous sulphate used was fix at 0.025 mole. The second stage was carried out in order to determine the optimum mole ratio by varying the amount ferrous sulphate of 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1 mole by using the optimum pH and temperature from the first stage. The air rate was kept constant at 10 l/min throughtout all experiments.

The results indicated that the optimum conditions for removal of mercury, chromium and iron in COD wastewater were at pH 9 and temperature of 65°C and the mole ratio of ferrous sulphate to metal ions in COD wastewater was 18.65. Under these conditions, the concentrations of mercury, chromium and iron in treated water were 0.097, 0.329 and 0.180 mg/l respectively. The removal efficiences for mercury, chromium and iron were 99.86%, 97.87% and 99.53%, respectively. The residual contents of mercury were exceeded the effluent standard promulgated by the Ministry of Industry in Thailand while the residual contents of chromium were insignificantly low. The results on the leaching test showed that the concentration of mercury and chromium in the extracted solution were lower than the toxic substances standard promulgated by the Ministry of industry. The X-ray diffraction pattern of ferrite sludge revealed that the major component of the magnetic precipitate was magnetite. Addition of nitrogen gas in the process lead to the higher magnetic property of the ferrite sludge than without adding nitrogen gas, while the removal efficiencies of heavy metal ions was insignificantly different. The cost estimation of only chemicals used in the aforementioned ferrite process with adding nitrogen gas was about 10.62 baht per litre (10,620 baht per cubic metre or 3.18 baht per one COD sample). The process without adding nitrogen gas cost about 9.35 baht per litre (9,350 baht per cubic metre or 2.80 baht per one COD sample).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ พรประภา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำที่มีคุณค่ายิ่ง และคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ให้ ขอขอบคุณความอนุเคราะห์จาก ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ และเนื่องจากงานวิจัยนี้กรมควบคุมมลพิษ, บริษัทไทย-อาซาฮีเคมีภัณฑ์ จำกัด และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ให้ทุนอุดหนุนในงานวิจัย จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คุณพงศ์ธร รุ่งเจริญ คุณมานพ ติระรัตน์สมโภช และคุณดวงสมร ผดุงเกียรติชัย ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้ได้สำเร็จลง ขอขอบคุณเป็นพิเศษสำหรับความช่วยเหลือ, กำลังใจ และความห่วงใยถึงกัน จากพี่สาวและพี่ชาย และจากคุณศศิธร ทินบาล และอยากขอบคุณพลังที่นำมาซึ่งความอดทนอดกลั้น ความเข้าใจตนเองและผู้อื่น การเรียนรู้และประสบการณ์ของชีวิต และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้กำลังใจ ความห่วงใย และสนับสนุนการศึกษาของบุตรตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญตาราง.....ญ

สารบัญรูป.....ฐ

บทที่ 1 บทนำ.....1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....3

ขอบเขตการวิจัย.....3

วิธีดำเนินการวิจัย.....4

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....4

บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร.....5

เทคนิคการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....5

กระบวนการเฟอร์ไรต์.....6

ก. เฟอร์ไรต์.....6

ข. โครงสร้างเฟอร์ไรต์.....7

ค. การเกิดสารประกอบเฟอร์ไรต์.....10

ง. กลไกการเกิดสารประกอบเฟอร์ไรต์.....13

จ. การประยุกต์ใช้ตะกอนเฟอร์ไรต์.....14

ฉ. การศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์.....15

ความต้องการออกซิเจนทางเคมี.....30

ก. การวิเคราะห์ค่าซีโอดี.....30

ข. ลักษณะน้ำเสียซีโอดี.....31

ค. การศึกษาการบำบัดน้ำเสียซีโอดี.....32

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....39
อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....39
ก. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....39
ข. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....40
วิธีดำเนินการ.....41
ก. การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียก่อนการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์.....41
ข. การกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์.....42
ค. วิธีทดสอบการชะละลายโลหะหนัก.....43
ง. การวิเคราะห์.....43
จ. วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์.....44
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....45
ลักษณะสมบัติน้ำเสียซีโอดี.....45
การแยกไอออนเงินออกจากน้ำเสียซีโอดี.....45
เงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์..46
ก. การศึกษาหาพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสม.....46
1. ผลของพีเอช.....48
2. ผลของอุณหภูมิ.....48
3. ผลร่วมของพีเอชและอุณหภูมิ.....49
ข. การศึกษาหาอัตราส่วนโมลที่เหมาะสม.....54
1. ผลของปริมาณเฟอรัสซัลเฟต.....55
1.1. ความเสถียรของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอรไรต์.....60
1.2 ยืนยันความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์.....62
1.3 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์.....65
2. การพิจารณาเลือกอัตราส่วนโมลที่เหมาะสม.....67

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอดีระหว่างกระบวนการเฟอร์ไรต์กับกระบวนการตกตะกอนผลึกและการทำตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์..67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย....70
บทสรุป....70
ข้อเสนอแนะ....71
รายการอ้างอิง....72
บรรณานุกรม....79
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง....80
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองด้วยสถิติ....101
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สถิติ....116
ภาคผนวก ง อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรสโคปี....127
ภาคผนวก จ อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคปี....130
ภาคผนวก ฉ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เพาเดอร์....139
ประวัติผู้เขียน....143

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ลักษณะน้ำเสียซีโอดี....2
ตารางที่ 2.1 การกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย....17
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสีย....23
ตารางที่ 2.3 ปริมาณน้ำเสียและตะกอนเฟอร์ไรต์....23
ตารางที่ 2.4 ความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว....23
ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักโดยการเกิดเฟอร์ไรต์ที่อุณหภูมิห้อง....27
ตารางที่ 2.6 ผลการกำจัดโลหะหนักในสารละลายด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์....28
ตารางที่ 2.7 ปริมาณและความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้กับขนาดตัวอย่างต่างๆ....31
ตารางที่ 2.8 การประมาณความเข้มข้นของเงิน, ปรอท, โครเมียม และเหล็กในการวิเคราะห์ค่าซีโอดี....32
ตารางที่ 2.9 ปริมาณสารมลทินในผงเงิน....33
ตารางที่ 2.10 ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทจากน้ำเสียซีโอดี....34
ตารางที่ 2.11 ประสิทธิภาพการกำจัดเงินและปรอทจากน้ำเสียซีโอดี....35
ตารางที่ 4.1 ผลการกำจัดปรอท, โครเมียมและเหล็กในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอรไรต์ที่พีเอชและอุณหภูมิต่างๆ ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล....47
ตารางที่ 4.2 ผลการกำจัดปรอท, โครเมียมและเหล็กในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอรไรต์ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และที่ค่าอัตราส่วนโมลต่างๆ....56
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการชะละลายตะกอนที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์....60
ตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอดี 1 ลิตร ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และที่ค่าอัตราส่วนโมลต่างๆ....65
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้ไนโตรเจนของผลการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอดี ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ค่าอัตราส่วนโมล 149.20 และผลทดสอบการสกัดสารที่พีเอช 5.8 ในเวลา 6 ชั่วโมง....66

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แบบจำลองผลึกของเซลล์หน่วยสไปเนล....8

รูปที่ 2.2 โครงสร้างสไปเนลของ 2 ออคแทน....9

รูปที่ 2.3 แผนผังแสดงเฟสของระบบเหล็ก-น้ำในเงื่อนไขการออกซิเดชันสำหรับการเกิดแมกนีไทต์....11

รูปที่ 2.4 แผนผังแสดงขั้นตอนกระบวนการเฟอร์ไรต์....11

รูปที่ 2.5 แผนผังแสดงปริมาณการเกิดเฟอร์ไรต์โดยกระบวนการเฟอร์ไรต์....12

รูปที่ 2.6 หน่วยบำบัดของกระบวนการเฟอร์ไรต์ที่ Tokyo Institute of Technology....22

รูปที่ 2.7 ความเข้มข้น Fe^{2+} ที่ต้องการน้อยที่สุดสำหรับการเกิดเฟอร์ไรต์....26

รูปที่ 2.8 อัตราส่วนของ Fe^{2+} ต่อโลหะหนักที่ต้องการในเกิดเฟอร์ไรต์....26

รูปที่ 2.9 อัตราการเติมอากาศสูงสุดที่ต้องการสำหรับการเกิดตะกั่วเฟอร์ไรต์....27

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์สำหรับทำปฏิกิริยาในการทดลองกระบวนการเฟอร์ไรต์....40

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองกระบวนการเฟอร์ไรต์....41

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นปรอทหลังการบำบัดกับอุณหภูมิและพีเอช ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล....50

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโครเมียมหลังการบำบัดกับอุณหภูมิและพีเอช ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล....50

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเหล็กหลังการบำบัดกับอุณหภูมิและพีเอช ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล....51

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดปรอทกับอุณหภูมิและพีเอช ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล....51

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมกับอุณหภูมิและพีเอช ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล....52

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กกับอุณหภูมิและพีเอช ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล....52

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบความเป็นสารแม่เหล็กของตะกอนเฟอร์ไรต์พิจารณาจากจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่ ที่ค่าพีเอชและอุณหภูมิต่างๆ ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล.....53
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าศักดิ์รีดอกซ์ของการกำจัดปรอท, โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ปริมาณเฟอรัสซัลเฟต 0.025 โมล.....53
รูปที่ 4.9 การดูดติดตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ด้วยแท่งแม่เหล็ก.....54
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นปรอทหลังการบำบัดกับอัตราส่วนโมลของเฟอรัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส.....57
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโครเมียมหลังการบำบัดกับอัตราส่วนโมลของเฟอรัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส.....57
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเหล็กหลังการบำบัดกับอัตราส่วนโมลของเฟอรัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส.....58
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดปรอทกับอัตราส่วนโมลของเฟอรัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส.....58
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมกับอัตราส่วนโมลของเฟอรัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส.....59
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กกับอัตราส่วนโมลของเฟอรัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส.....59
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิเล็กตรอนไร้คู่กับอัตราส่วนโมลของเฟอรัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส.....60
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปรอทในน้ำสกัดกับอัตราส่วนโมลของเฟอรัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 5.8 เวลา 6 ชั่วโมง.....61
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดกับอัตราส่วนโมลของเฟอรัสซัลเฟตต่อไอออนโลหะทั้งหมด ที่พีเอช 5.8 เวลา 6 ชั่วโมง.....62

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.19 ลวดลายการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และค่าอัตราส่วนโมลต่างๆ.....63
รูปที่ 4.20 ลวดลายการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ เมื่อเปรียบเทียบความสูงยอดที่ 2θ = 35.4 ที่ค่าอัตราส่วนโมลต่างๆ ที่พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส 64
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอดี 1 ลิตรของกระบวนการเฟอร์ไรต์กับ กระบวนการตกตะกอนผลึกและทำตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์.....68

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย