การกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด

นายสราวุฒิ พยุงธรรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-637-939-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- 6 ก.พ. 2545

I18045327

FLUORIDE REMOVAL BY CRYSTALLIZATION IN A FLUIDIZED BED

Mr. Saravut Phayoongtham

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

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-637-939-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด
โดย	นายสราวุฒิ พยุงธรรม
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สราวุฒิ พยุงธรรม : การกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด
(FLUORIDE REMOVAL BY CRYSTALLIZATION IN A FLUIDIZED BED)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช, 164 หน้า. ISBN 974-637-939-9

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด กลไกที่ใช้กำจัดคือ การเติมแคลเซียมเพื่อให้เกิดผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์บนเม็ดทรายในฟลูอิดไดซ์เบด สภาวะที่ทำการศึกษาคือ ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเข้า ค่าพีเอชและความสูงของชั้นทราย การวิจัยทำที่ระดับความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 50, 100, 200, 300 และ 400 มก./ล. โดยพีเอชที่ทำการศึกษาคือ 7.0, 7.5, 8.0, 8.5 และ 9.0 และที่ความสูงของชั้นทราย 0.5, 1.0, 1.5 และ 2 ม. สารเคมีที่ใช้เพิ่มปริมาณแคลเซียมคือ แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และสารเคมีที่ใช้เพิ่มค่าพีเอชคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.85-1.0 มม. ใช้ความเร็วน้ำไหลขึ้นเท่ากับ 66 ม./ชม. ซึ่งเป็นค่าความเร็ว 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาพเสมือนของไหล

การวิจัยทำโดยการป้อนน้ำเสียเข้าที่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ซม. ความสูง 2.8 ม. ซึ่งบรรจุทรายตามขนาดความสูงที่ต้องการศึกษา และป้อนแคลเซียมคลอไรด์ในปริมาณ 1.5 เท่า ของปริมาณแคลเซียมที่จุดสตอยชิโอเมตริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่ให้ค่าพีเอชได้ตามที่ต้องการ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในช่วงระหว่าง 50 ถึง 200 มก./ล. ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาวะการทำงานที่เหมาะสมคือ ค่าพีเอชระหว่าง 7 ถึง 8 ความสูงชั้นทราย 2 เมตร โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้น 50, 100 และ 200 มก./ล. คือร้อยละ 74.0, 80.5 และ 76.0 ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นฟลูออไรด์ 300 และ 400 มก./ล. พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์เพียงร้อยละ 42.0 และ 31.3 ตามลำดับ เนื่องจากที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์สูงจะเกิดการตกเป็นผลึกของแคลเซียมฟลูออไรด์ในน้ำ (Spontaneous nucleation) แทนที่จะเกิดผลึกเกาะกันบนเม็ดทราย

หลังจากการกำจัดฟลูออไรด์แล้วได้นำน้ำที่บำบัดแล้วมาผ่านการกรองทราย โดยใช้ทรายขนาด 0.60 - 0.84 มม. ที่อัตราการกรอง 5 ม./ชม. พบว่าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นฟลูออไรด์ 50, 100 และ 200 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 77.6, 91.0 และ 93.8 ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์น้ำเข้า 50 และ 100 มก./ล. มีค่าน้อยกว่า 5 มก./ล. และที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์น้ำเข้า 200 มก./ล. ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกเท่ากับ 18 มก./ล.

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

C718015 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEY WORD: FLUORIDE REMOVAL / CRYSTALLIZATION / FLUIDIZED BED REACTOR

MR. SARAVUT PHAYOONGTHAM : FLUORIDE REMOVAL BY CRYSTALLIZATION IN A FLUIDIZED BED.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SURAPOL SAIPANICH, Dr. Ing.,

164 pp., ISBN 974-637-939-9

The objectives of this research were to investigate the optimal conditions and efficiency of fluoride removal by crystallization in a fluidized bed. The removal mechanism was using calcium to crystallize calcium fluoride on silica sand in the fluidized bed reactor. The experiments were carried out to determine 3 parameters; pH, fluoride concentration and fixed bed height. The fluoride concentrations of this study were 50, 100, 200, 300 and 400 mg/l. The studied pH were varied from 7.0, 7.5, 8.0, 8.5 and 9.0. The fixed bed height were set at 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 m. The chemical substance for increasing calcium concentration was calcium chloride ($CaCl_2$). The pH value was adjusted by sodium hydroxide (NaOH). The internal seeding material was silica sand with diameter ranged from 0.85 to 1.0 mm. The upflow velocity was 66 m/hr which was 1.5 times of minimum velocity of fluidization.

The synthetic wastewater was fed to the bottom of cylindrical reactor which having an internal diameter of 3 cm, 2.8 m height. The column was filled with sand at the desired height. Calcium chloride was fed at 1.5 time of the stoichiometric reaction. The desired pH was adjusted by sodium hydroxide.

The result has been shown that this process could treated the wastewater which had fluoride concentrations from 50 to 200 mg/l effectively. The optimal conditions were at pH 7 - 8 and fixed bed height at 2.0 m. The fluoride removal efficiency at fluoride concentrations 50,100 and 200 mg/l were 74.0, 80.5 and 76.0%, respectively. Whereas the fluoride removal efficiency at fluoride concentrations 300 and 400 mg/l were only 42.0 and 31.3%, respectively. Because at high fluoride concentrations calcium fluoride crystals would formed in liquid phase (Spontaneous nucleation) instead of forming on silica sand.

After fluoride removal process, treated wastewater was fed to sand filter which using silica sand with diameter ranged from 0.60 to 0.84 mm at filtration rate 5 m/hr. At fluoride concentrations 50, 100 and 200 mg/l, fluoride removal efficiency were increased to 77.6, 91.0 and 93.8%, respectively. The suspended solids in the effluent at fluoride concentrations 50 and 100 mg/l were lower than 5 mg/l and at fluoride concentration 200 mg/l, the suspended solids in the effluent was 18 mg/l.

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2540	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้เนื่องมาจากหลายฝ่าย บุคคลแรกที่จะต้องขอกราบขอบพระคุณคือ รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้การช่วยเหลือ ให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดเวลา จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จออกมาในที่สุด

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการที่ช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้ ได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ และอาจารย์วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ๆของข้าพเจ้า ที่สนับสนุนการเรียน และให้กำลังใจโดยตลอดระยะเวลาที่ศึกษาเล่าเรียน

ขอขอบพระคุณ คุณสุชาติ สถิตมั่นในธรรม ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณปริยดา เหล่ารุจิจินดา ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาตลอด

คุณความดีใดๆที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบให้กับบุคคลข้างต้นทั้งหมด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูป ..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา 2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินศึกษา 3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 ฟลูออไรด์ 4
2.2 กระบวนการทั่วไปที่ใช้กำจัดฟลูออไรด์ 6
2.3 การกำจัดฟลูออไรด์โดยการตกผลึกในกระบวนการ
ฟลูอิดไดซ์เบด 9
2.4 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการตกผลึกในกระบวนการ
ฟลูอิดไดซ์เบด 18
2.5 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด 26
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย 27
3.1 ลำดับการทดลอง 27
3.2 พารามิเตอร์ในการทดลอง 28
3.3 วัสดุอุปกรณ์ในการวิจัย 29
3.4 การดำเนินการทดลอง 34
3.5 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำ 36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย 37

4.1 การหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดสภาวะเสมือนของไหล 37

4.2 การกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด 38

4.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด..... 39

4.2.2 ความเข้มข้นของฟลูออไรด์คงเหลือหลังผ่านกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด..... 65

4.2.3 กระบวนการกรองตามหลัง..... 74

4.3 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน..... 83

บทที่ 5 ความสำคัญทางวิศวกรรม..... 85

5.1 ความสำคัญทางวิศวกรรม..... 85

5.2 การนำไปใช้งาน..... 85

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 88

6.1 สรุปผลการวิจัย..... 88

6.2 ข้อเสนอแนะ..... 90

รายการอ้างอิง 91

ภาคผนวก ก ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วน้ำไหลขึ้นกับความดันสูญเสีย..... 94

ภาคผนวก ข ผลการทดลองกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด..... 96

ภาคผนวก ค รายการคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน 157

ภาคผนวก ง รูปตัวอย่างน้ำและทรายจากการทดลอง..... 160

ประวัติผู้วิจัย 164

สารบัญตาราง

ตารางที่

2.1 ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ 5

2.2 กระบวนการต่างๆ ที่ใช้กำจัดฟลูออไรด์ 7

2.3 ผลการกำจัดความกระด้างในน้ำโดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด ในเนเธอร์แลนด์ 21

3.1 พารามิเตอร์ที่แปรเปลี่ยนในการวิจัย 28

3.2 รายละเอียดการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำและการเก็บตัวอย่างน้ำ 36

4.1 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยการตกผลึก และปริมาณฟลูออไรด์ คงเหลือก่อนการกรองที่ความสูงของชั้นทราย 0.5 เมตร..... 41

4.2 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยการตกผลึก และปริมาณฟลูออไรด์ คงเหลือก่อนการกรองที่ความสูงของชั้นทราย 1.0 เมตร..... 41

4.3 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยการตกผลึก และปริมาณฟลูออไรด์ คงเหลือก่อนการกรองที่ความสูงของชั้นทราย 1.5 เมตร..... 43

4.4 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยการตกผลึก และปริมาณฟลูออไรด์ คงเหลือก่อนการกรองที่ความสูงของชั้นทราย 2.0 เมตร..... 44

4.5 ค่าของแข็งแขวนลอยภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูงชั้นทราย 0.5 เมตร..... 47

4.6 ค่าของแข็งแขวนลอยภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูงชั้นทราย 1.0 เมตร..... 48

4.7 ค่าของแข็งแขวนลอยภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูงชั้นทราย 1.5 เมตร..... 49

4.8 ค่าของแข็งแขวนลอยภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความสูงชั้นทราย 2.0 เมตร..... 50

4.9 ค่าความเป็นด่างและปริมาณแคลเซียมภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ ที่ความสูงชั้นทราย 0.5 เมตร..... 52

4.10 ค่าความเป็นด่างและปริมาณแคลเซียมภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ ที่ความสูงชั้นทราย 1.0 เมตร..... 53

4.11 ค่าความเป็นด่างและปริมาณแคลเซียมภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ ที่ความสูงชั้นทราย 1.5 เมตร..... 54

4.12 ค่าความเป็นด่างและปริมาณแคลเซียมภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ ที่ความสูงชั้นทราย 2.0 เมตร..... 55

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

4.13 ประสิทธิภาพ และค่าฟลูออไรด์คงเหลือภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50 มก./ล. 67

4.14 ประสิทธิภาพ และค่าฟลูออไรด์คงเหลือภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 100 มก./ล. 68

4.15 ประสิทธิภาพ และค่าฟลูออไรด์คงเหลือภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ ในน้ำเข้า 200 มก./ล. 69

4.16 ประสิทธิภาพ และค่าฟลูออไรด์คงเหลือภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ ในน้ำเข้า 300 มก./ล. 70

4.17 ประสิทธิภาพ และค่าฟลูออไรด์คงเหลือภายหลังการกำจัดฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 400 มก./ล. 71

4.18 ค่าฟลูออไรด์คงเหลือ ประสิทธิภาพของเครื่องกรอง ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์รวมการกรองที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50 มก./ล. 74

4.19 ค่าฟลูออไรด์คงเหลือ ประสิทธิภาพของเครื่องกรอง ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์รวมการกรองที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 100 มก./ล. 75

4.20 ค่าฟลูออไรด์คงเหลือ ประสิทธิภาพของเครื่องกรอง ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์รวมการกรองที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 200 มก./ล. 76

4.21 ค่าฟลูออไรด์คงเหลือ ประสิทธิภาพของเครื่องกรอง ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์รวมการกรองที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 300 มก./ล. 77

4.22 ค่าฟลูออไรด์คงเหลือ ประสิทธิภาพของเครื่องกรอง ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์รวมการกรองที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 400 มก./ล. 78

5.1 เกณฑ์การออกแบบถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดทั่วไป..... 86

5.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด..... 86

สารบัญรูป

รูปที่		
2.1	ค่าฟลูออไรด์คงเหลือเทียบกับค่าพีเอชโดยกระบวนการตกตะกอนผลึก	8
2.2	ถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด.....	11
2.3	ตัวอย่างหัวฉีด.....	12
2.4	พื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคในฟลูอิดไดซ์เบด.....	12
2.5	ถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดที่มี การเวียนน้ำกลับและการกรองตามหลัง.....	13
2.6	โครงสร้างผลึกแคลเซียมฟลูออไรด์.....	14
2.7	ประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์เทียบกับปริมาณแคลเซียม.....	15
2.8	รูปแบบถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในเนเธอร์แลนด์.....	19
2.9	ค่าความกระด้างคงเหลือที่ความสูงต่างๆของถังปฏิกรณ์.....	20
2.10	ผลการทดลองกำจัดความกระด้างด้วยถังปฏิกรณ์แบบ Amsterdam.....	20
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกระด้างเทียบกับความสูงชั้นทราย.....	24
2.12	ค่าความเป็นด่างที่ความสูงต่างๆของถังปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด.....	24
3.1	ไดอะแกรมอุปกรณ์การกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด.....	31
3.2	ชุดการทดลองกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด.....	32
3.3	ถังกรองทรายที่ใช้กรองตามหลังกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด	33
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วน้ำไหลขึ้นกับความดันสูญเสีย.....	37
4.2	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดกับความเข้มข้นฟลูออไรด์น้ำเข้าที่สภาวะต่างๆ	45
4.3	เปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยหลังการกำจัดฟลูออไรด์กับความเข้มข้นน้ำเข้าที่สภาวะต่างๆ.....	51
4.4	ค่าความเป็นด่างหลังการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด.	56
4.5	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดกับค่าพีเอชที่สภาวะต่างๆ	58
4.6	เปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยหลังการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50, 100 และ 200 มก./ล	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

4.7 เปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยหลังการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้า 50, 100 และ 200 มก./ล. 60

4.8 เปรียบเทียบค่าความเป็นด่างหลังการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดกับค่าพีเอชที่สภาวะต่างๆ..... 61

4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดกับความสูงทรายที่สภาวะต่างๆ..... 63

4.10 เปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยหลังการกำจัดฟลูออไรด์กับความสูงทรายที่พีเอช 7.0, 7.5 และ 8.0 64

4.11 เปรียบเทียบค่าของแข็งแขวนลอยหลังการกำจัดฟลูออไรด์กับความสูงทรายที่พีเอช 8.5 และ 9.0 65

4.12 เปรียบเทียบค่าฟลูออไรด์คงเหลือหลังผ่านกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดกับความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้าที่สภาวะต่างๆ..... 72

4.13 เปรียบเทียบค่าฟลูออไรด์คงเหลือหลังการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดตามด้วยการกรองกับความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้าที่สภาวะต่างๆ..... 79

4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์ของถังกรองที่ตามหลังกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดกับความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้าที่สภาวะต่างๆ 81

4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบดรวมการกรองกับความเข้มข้นฟลูออไรด์ในน้ำเข้าที่สภาวะต่างๆ 82

5.1 รูปแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำจัดฟลูออไรด์โดยกระบวนการตกผลึกในฟลูอิดไดซ์เบด 87

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย