การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม

นางสาวขวัญเนตร สบายใจ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-900-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF HEAVY METALS BY ION EXCHANGE RESIN PRODUCED FROM DYE-TREATED WATER HYACINTH

Miss Kwannet Sabayjai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science
Inter-department of Environmental Science
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1999

ISBN 974-334-900-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม
โดย	นางสาวขวัญเนตร สบายใจ
สหสาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	นายพิธี กระสินธุ์ศรี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา กีระนันทน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำธร ธีรคุปต์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(นายพิธี กระสินธุ์ศรี)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา เลิศปรัชญา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชวัญเนตร สบายใจ : การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม (REMOVAL OF HEAVY METALS BY ION EXCHANGE RESIN PRODUCED FROM DYE-TREATED WATER HYACINTH) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สมใจ เพ็งปรีชา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : นายพิธี กระสินธุ์ศรี ; 146 หน้า. ISBN 974-334-900-6.

การศึกษาการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา โดยปรับสภาพผักตบชวาด้วยสีย้อมผ้า 2 ชนิด คือ Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาก่อนและหลังการปรับสภาพโดยทำการทดลองแบบทีละเทกับน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นของโลหะหนัก 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า การปรับสภาพเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาด้วยสีย้อม Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ความเข้มข้น 0.002 และ 0.001 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทำให้ผักตบชวามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงผลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น ทำให้ผักตบชวาทั้งที่ไม่ได้ปรับสภาพ และที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักลดลง และยังพบอีกว่าผักตบชวามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงมากกว่า สังกะสีและนิกเกิล ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อศึกษาการใช้ผักตบชวาในปริมาณที่แตกต่างกันกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด ปริมาณ 1 กรัม สามารถกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์จนมีค่าต่ำกว่าค่ามาตราฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ และจากการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสีด้วยผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด พบว่าสามารถกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักดังกล่าวด้วยขี้เลื่อยของไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยาง ซึ่งพบว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีเช่นกัน แต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าผักตบชวา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม.. ลายมือชื่อนิสิต.....ชวัญเนตร สบายใจ.....

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา..2542..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

3970175323 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE
KEY WORD: HEAVY METALS REMOVAL / WATER HYACINTH / DYED MATERIAL
KWANNET SABAYJAI : REMOVAL OF HEAVY METALS BY ION EXCHANGE RESIN PRODUCED FROM DYE-TREATED WATER HYACINTH. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. SOMCHAI PENGPRECHA, Ph.D. THESIS COADVISOR : MR. PITEE KRASINSRI. 146 pp. ISBN 974-334-900-6.

Removal of copper, nickel and zinc by ion exchange resin produced from water hyacinth was studied. The water hyacinth was treated with two dyestuffs, Reactive Red 31 and Direct Blue 71. The ion exchange capacity of untreated and treated water hyacinth was studied with batch experiment under various concentrations of heavy metals in synthetic wastewater, 10, 25 and 50 mg/l, respectively. The results showed that the dye treating of water hyacinth with 0.002% Reactive Red 31 and 0.001% Direct Blue 71 dyestuff could increase in ion exchange capacity of water hyacinth. For the effect of concentration of synthetic wastewater on the efficiency of heavy metals removal it showed that increasing of the heavy metal concentration led to a decreasing of removal efficiency in both treated and untreated water hyacinths and the values of ion exchange of copper were higher than zinc and nickel, respectively. Furthermore, the various quantities of water hyacinth used for the study of zinc removal from synthetic wastewater at concentration of zinc 50 mg/l with 1 g of both dye-treated water hyacinths could decrease the concentration of zinc to a level below the water quality standard. For the experiment on Zn-electroplating wastewater treatment, both dye-treated water hyacinths could remove zinc from the wastewater effectively.

Furthermore, this study was carried out by using sawdust of Iron wood, Siamese sal and Yang and the results showed that the removal of heavy metals by sawdusts were lower than of water hyacinth.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม.. ลายมือชื่อนิสิต.....กวัญเนตร สบายใจ.....

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา..2542..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ด้วยการให้คำปรึกษาแนะนำอย่างดียิ่งของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา และ คุณพิธี กระสินธุ์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร.กำธร ธีรคุปต์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา เลิศปรัชญา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเภสัชอุตสาหกรรม ภาควิชาเภสัชเวท คณะเภสัชศาสตร์ และสถาบันวิจัยทรัพยากรทางน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ ในการวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลห้องปฏิบัติการ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทำให้สามารถ ดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบริษัท ไดสตาร์ไทย จำกัด และบริษัท บี เอ เอส เอฟ เอเชียติค จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สีย้อมผ้าเพื่อการทำวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ มูลนิธิชินโสภณพนิช สำหรับเงินทุนสนับสนุนงานวิจัย

และท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณบุคคลในครอบครัว รวมทั้งเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

สารบัญตาราง.....ซ

สารบัญภาพ.....ฌ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์.....3

1.3 สมมติฐาน.....4

1.4 ขอบเขตการศึกษา.....4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....5

บทที่ 2 การสำรวจเอกสาร.....6

2.1 โลหะหนัก.....6

2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน.....8

2.3 สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน.....16

2.4 ผักตบชวา.....18

2.5 สีย้อมผ้า.....23

2.6 การใช้วัสดุธรรมชาติในการกำจัดโลหะหนัก.....35

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....42

3.1 สารเคมี.....42

3.2 เครื่องมือ.....42

3.3 การเตรียมผักตบชวา.....43

3.4 การย้อมสี.....43

3.5 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....45

หน้า

3.6 การศึกษาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวา....45
3.7 การศึกษาปริมาณผักตบชวาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน....46
3.8 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ....46
3.9 การศึกษาเปรียบเทียบชนิดของวัสดุที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน....47
3.10 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก....47
3.11 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ....47
บทที่ 4 ผลการศึกษา และอภิปรายผล....48
4.1 การหาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวา....48
4.2 ผลของปริมาณผักตบชวาต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย....66
4.3 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี....68
4.4 ผลของชนิดของวัสดุที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนต่อประสิทธิภาพในการปรับสภาพด้วยสีย้อม....69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ....76
5.1 สรุปผลการวิจัย....76
5.2 ปัญหาและอุปสรรค....78
5.3 ข้อเสนอแนะ....78
รายการอ้างอิง....79
ภาคผนวก....84
ภาคผนวก ก....85
ภาคผนวก ข....104
ภาคผนวก ค....123
ภาคผนวก ง....126
ภาคผนวก จ....128
ภาคผนวก ฉ....135

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ช.....142
ประวัติผู้วิจัย.....146

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของ Serva Cellulose Ion Exchangers.....18

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของผักตบชวา.....22

ตารางที่ 3.1 ปริมาณโลหะหนักที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....45

ตารางที่ 4.1 ปริมาณโลหะทองแดงที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31.....50

ตารางที่ 4.2 ปริมาณโลหะทองแดงที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71.....50

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโลหะนิกเกิลที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31.....52

ตารางที่ 4.4 ปริมาณโลหะนิกเกิลที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71.....52

ตารางที่ 4.5 ปริมาณโลหะสังกะสีที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31.....54

ตารางที่ 4.6 ปริมาณโลหะสังกะสีที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71.....54

ตารางที่ 4.7 ปริมาณโลหะทองแดงที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31.....58

ตารางที่ 4.8 ปริมาณโลหะนิกเกิลที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31.....59

ตารางที่ 4.9 ปริมาณโลหะสังกะสีที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31.....60

ตารางที่ 4.10 ปริมาณโลหะทองแดงที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71.....63

ตารางที่ 4.11 ปริมาณโลหะนิกเกิลที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71.....64

หน้า

ตารางที่ 4.12 ปริมาณโลหะสังกะสีที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71 65
ตารางที่ 4.13 ผลการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผักตบชวาในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน 67
ตารางที่ 4.14 ผลการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี 68
ตารางที่ 4.15 ประสิทธิภาพของวัสดุชนิดต่าง ๆ ในการกำจัดโลหะหนักที่ความเข้มข้น 10 mg/l 71
ตารางที่ 4.16 ประสิทธิภาพของวัสดุชนิดต่าง ๆ ในการกำจัดโลหะหนักที่ความเข้มข้น 50 mg/l 71
ตารางที่ ก-1-18 ผลการทดลองขั้นต้น 86
ตารางที่ ข-1-18 การกำจัดโลหะหนักโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 105
ตารางที่ ค-1-3 การกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผักตบชวาปริมาณ 1 และ 2 กรัม 124
ตารางที่ ง-1-2 การกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี 127
ตารางที่ จ-1-6 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยาง 129
ตารางที่ ฉ-1-6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 136

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน....9
ภาพที่ 2.2 การแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดแก่....11
ภาพที่ 2.3 การทำรีเจนเนอเรชันของเรซินแบบกรดแก่....11
ภาพที่ 2.4 การแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดอ่อน....12
ภาพที่ 2.5 การแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบด่างแก่....12
ภาพที่ 2.6 การกำจัดไอออนลบและการทำรีเจนเนอเรชันของเรซินแบบด่างอ่อน....13
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส....17
ภาพที่ 2.8 ผักตบชวา....19
ภาพที่ 2.9 กระบวนการวัต....26
ภาพที่ 2.10 การออกซิไดส์สีโซลูบิไลส์วัต....26
ภาพที่ 2.11 เส้นใยและโมเลกุลของสีไดเร็คในน้ำย้อมในภาวะที่ไม่มีเกลือ....31
ภาพที่ 2.12 เส้นใยและโมเลกุลของสีไดเร็คในน้ำย้อมในภาวะที่มีการเติมเกลือลงไป....31
ภาพที่ 2.13 ปฏิกิริยาของสีรีแอคทีฟกับเซลลูโลส....32
ภาพที่ 2.14 ปฏิกิริยายองสีรีแอคทีฟที่มีคลอรีนอะตอมเดียว....33
ภาพที่ 2.15 ปฏิกิริยาของสีรีแอคทีฟที่มีคลอรีน 2 อะตอม....34
ภาพที่.3.1 โครงสร้างทางเคมีของสี Reactive Red 31....44
ภาพที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของสี Direct Blue 71....44
ภาพที่ 4.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยสีย้อม Reactive Red 31....51
ภาพที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยสีย้อม Direct Blue 71....51
ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยสีย้อม Reactive Red 31....53
ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยสีย้อม Direct Blue 71....53

หน้า

ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยสีย้อม Reactive Red 31 55
ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยสีย้อม Direct Blue 71 55
ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยสีย้อม Reactive Red 31 58
ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยสีย้อม Reactive Red 31 59
ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยสีย้อม Reactive Red 31 60
ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยสีย้อม Direct Blue 71 63
ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยสีย้อม Direct Blue 71 64
ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ด้วยสีย้อม Direct Blue 71 65
ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงโดยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/l 72
ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลโดยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/l 72
ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีโดยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/l 73
ภาพที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงโดยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความเข้มข้น 50 mg/l 73
ภาพที่ 4.17 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลโดยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความเข้มข้น 50 mg/l 74

หน้า

ภาพที่ 4.18 ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีโดยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความเข้มข้น 50 mg/l....74
ภาพที่ 4.19 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นภายหลังจากการปรับสภาพด้วยสีย้อมของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 10 mg/l....75
ภาพที่ 4.20 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นภายหลังจากการปรับสภาพด้วยสีย้อมของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 50 mg/l....75
ภาพที่ ช-1 ผักตบชวาขนาด 180 – 250 μm....143
ภาพที่ ช-2 การย้อมสีผักตบชวา....143
ภาพที่ ช-3 ผักตบชวาย้อมสี Reactive Red 31....144
ภาพที่ ช-4 ผักตบชวาย้อมสี Direct Blue 71....144
ภาพที่ ช-5 ชิ้นเลื่อยไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยางก่อนและหลังการย้อมสี....145
ภาพที่ ช-6 การทดสอบความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก....145

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มนุษย์เราต้องเผชิญอยู่ทุกวันนี้ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากน้ำมือของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นความเสื่อมโทรมของทรัพยากรธรรมชาติต่าง ๆ เช่น แร่ธาตุ ป่าไม้ สัตว์ป่า ที่ถูกนำมาใช้ทั้งเพื่อการยังชีพ และเพื่อการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และอุตสาหกรรม หรือจะเป็นการเกิดมลพิษทั้งในดิน น้ำ และอากาศ เนื่องจากการปนเปื้อนของของเสียต่าง ๆ ที่ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม การปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำก็เป็นปัญหาที่สำคัญอีกเรื่องหนึ่ง กิจกรรมของมนุษย์มากมายหลายประเภท เช่น การทำเหมืองแร่ การถลุงโลหะ และอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับโลหะหนัก เป็นแหล่งที่มาของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมชุบโลหะ จะมีน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำเหล่านี้ แม้ว่าบางชนิดจะเป็นแร่ธาตุปริมาณน้อยที่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต แต่ถ้าได้รับในปริมาณที่มากเกินความจำเป็นก็อาจก่อให้เกิดอันตรายกับสิ่งมีชีวิตได้ และถึงแม้ว่าการปนเปื้อนของโลหะหนักจะมีปริมาณน้อยก็สามารถจะเข้าไปสะสมในสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำจนอยู่ในปริมาณที่เป็นอันตราย หรือเกิดการถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารจนท้ายที่สุดก็จะถ่ายทอดผ่านมาถึงมนุษย์ได้ (Nato Science Committee Conference on Ecotoxicology, 1974) ทำให้น่าเป็นห่วงว่าอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ดังเช่นในกรณีที่เกิดมลพิษจากสารปรอทที่อ่าวมินามาตะ ประเทศญี่ปุ่น เมื่อปี ค.ศ. 1952 (เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, 2539)

เพื่อเป็นการป้องกันปัญหามลพิษที่อาจเกิดขึ้นได้จากการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการจัดการที่เหมาะสม ในการควบคุมกิจกรรมของมนุษย์ที่เป็นต้นเหตุหรือเป็นแหล่งที่มาของโลหะหนักเหล่านั้น โดยเฉพาะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี เป็นโลหะหนักที่ใช้มากในอุตสาหกรรมชุบโลหะ และอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ.2525) ได้กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ให้มีปริมาณโลหะสังกะสี (Zn) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทองแดง (Cu)

ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และ นิคเกิล (Ni) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (กองจัดการคุณภาพน้ำ, 2538) ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการที่จะกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมก่อนที่จะปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

วิธีการในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี กระบวนการทางชีววิทยา หรือกระบวนการทางกายภาพ-เคมี ซึ่งวิธีการที่มีการใช้กันอยู่มีหลายวิธี ได้แก่ การทำให้ตกตะกอน (precipitation) การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) การระเหย (evaporation) กระบวนการรีเวิสออสโมซิส (reverse osmosis) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) การแยกด้วยกระแสไฟฟ้า (electrolysis) และการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดิกชัน (oxidation-reduction) (สุรภี โรจน์อารยานนท์, 2530)

การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายเนื่องจากเรซินสังเคราะห์มีราคาแพงมาก และยังมีปัญหาในการจัดการภายหลังจากที่เรซินหมดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนแล้ว เนื่องจากเรซินสังเคราะห์ย่อยสลายได้ยากในธรรมชาติ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาหาสิ่งที่จะมาทดแทนการใช้เรซินสังเคราะห์ การศึกษาจึงได้มุ่งไปที่ วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร หรือวัสดุจากธรรมชาติ ซึ่งหาได้ง่ายและมีราคาถูก ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบสำคัญที่มีอยู่ในพืชก็คือ เซลลูโลส โครงสร้างของเซลลูโลสมีหมู่ฟังก์ชั่นเป็นตัวทำให้เซลลูโลสมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน (Dorfner, 1977) วัสดุที่ถูกนำมาศึกษาและพบว่าสามารถใช้เป็นสารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียอย่างได้ผลมีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น เปลือกไม้ ขี้เลื่อย เปลือกถั่ว เปลือกหัวหอม เปลือกเมล็ดแตงโม กากใบชา กากแอปเปิ้ล กากหัวบีท แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย ซังข้าวโพด กากปาล์ม กาบมะพร้าว เป็นต้น

ผักตบชวาเป็นวัชพืชที่สามารถพบได้ในแหล่งน้ำทั่วไป บางครั้งเป็นตัวก่อให้เกิดปัญหาในแหล่งน้ำเนื่องจากเป็นพืชที่มีการสืบพันธุ์และเจริญเติบโตแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว โดยจะแพร่กระจายครอบคลุมพื้นที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยวันละ 8 เปอร์เซ็นต์ หรือมีพื้นที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ในเวลา 11.2 ถึง 15 วัน และในด้านของการเจริญเติบโตจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 50

เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 7 ถึง 13 วัน (Gopal, 1987) ก่อให้เกิดปัญหาเป็นอุปสรรคในการเดินเรือ การชลประทาน การผลิตไฟฟ้าจากพลังน้ำ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ผักตบชวาจึงเป็นพืชอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้กำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย การศึกษาการใช้ผักตบชวาเพื่อการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย มีทั้งการศึกษาในรูปของบ่อเลี้ยงผักตบชวา (สนธิ คชวัฒน์, 2530) และการใช้ผักตบชวาเป็น สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ขจรศักดิ์ โกศลมนตรี, 2538) การเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากพืชสามารถทำได้โดยการปรับสภาพทางเคมี ตัวทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชั่นต่าง ๆ ในโครงสร้างของเซลลูโลส ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชั่นที่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ (Walton, 1970)

การปรับสภาพเรซินด้วยสีย้อมก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสีย้อมหลายชนิดมีโครงสร้างที่เป็นกรดซัลโฟนิก และ/หรือ กรดคาร์บอกซิลิก เช่น สีในกลุ่มแอซิด กลุ่มไดเร็ค และกลุ่มรีแอคทีฟ (Rangnekar and Singh, 1980) ซึ่งหมู่ซัลโฟนิก และหมู่คาร์บอกซิลิกนี้มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์, 2539) ดังนั้นการปรับสภาพเรซินแลกเปลี่ยนไอออนด้วยสีย้อม จึงน่าจะเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชั่นให้กับเรซิน และทำให้เรซินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงขึ้น การศึกษาในครั้งนี้จึงได้นำสีย้อมในกลุ่มไดเร็ค และกลุ่มรีแอคทีฟซึ่งเป็นสีที่เหมาะกับการย้อมเส้นใยที่เป็นเซลลูโลส (อัจฉราพร ไศละสูต, 2519) มาทำการย้อมผักตบชวา ก่อนที่จะนำมาใช้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยคาดว่าวิธีการดังกล่าวจะทำให้เรซินที่ได้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเพิ่มสูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาด้วยสีย้อมในกลุ่มรีแอคทีฟ และกลุ่มไดเร็ค

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม

1.3 สมมติฐาน

1.3.1 สีย้อมในกลุ่มไดเร็คสามารถใช้ในการปรับสภาพเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาได้ผลดีเช่นเดียวกับสีย้อมในกลุ่มรีแอคทีฟ

1.3.2 การปรับสภาพเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาด้วยสีย้อม จะทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเพิ่มขึ้น

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวา (*Eichhornia crassipes* Solms.) ที่ปรับสภาพด้วยสีย้อม

- ใช้สีย้อม 2 ชนิด คือ Reactive Red 31 และ Direct Blue 71
- แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสีย้อมที่ใช้ 8 ระดับ คือ 0.000, 0.001, 0.002, 0.005, 0.010, 0.020, 0.100 และ 1.000 เปอร์เซ็นต์
- ทำการทดลองกับโลหะหนัก 3 ชนิด คือ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี
- แปรเปลี่ยนความเข้มข้นของโลหะหนัก 3 ระดับ คือ 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.4.2 ศึกษาผลของปริมาณผักตบชวาต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน

- ทำการทดลองโดยใช้ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.002% Reactive Red 31 และ ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.001% Direct Blue 71
- เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยผักตบชวาปริมาณ 0.5, 1.0 และ 2.0 กรัม
- ทำการทดลองกับโลหะสังกะสี
- ความเข้มข้นของโลหะสังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.4.3 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวากับขี้เลื่อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ทำการทดลองกับขี้เลื่อย 3 ชนิด คือ ไม้ตะเคียนทอง (*Hopea odorata* Roxb.) ไม้เต็ง (*Shorea obtusa* Wall.) และไม้ยาง (*Dipterocarpus* sp.)
- ปรับสภาพขี้เลื่อยโดยใช้สีย้อม Reactive Red 31 ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์
- ทำการทดลองกับโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ที่ความเข้มข้น 10 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เป็นแนวทางในการนำวัชพืชหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์

1.5.2 ทำให้ทราบถึงแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาให้เพิ่มสูงขึ้นได้

1.5.3 ทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาด้วยสีย้อม

1.5.4 สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือพืชชนิดอื่นได้

1.5.5 ผลการศึกษาที่ได้เป็นแนวทางที่จะใช้ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยวิธีการที่สะดวก ประหยัด และมีประสิทธิภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การสำรวจเอกสาร

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก (Heavy Metal) หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นสูงกว่า 4 kg/dm^3 ซึ่งโลหะหนักถูกใช้ประโยชน์อย่างมากในงานอุตสาหกรรม และยังเป็นต้นกำเนิดในการผลิตโลหะผสมอีกหลายชนิดด้วยกัน

2.1.1 ทองแดง

ทองแดง (Copper) เป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ IB ในตารางธาตุ เลขอะตอม 29 น้ำหนักอะตอม 63.54 จุดเดือด 2595 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1083 องศาเซลเซียส ค่าความถ่วงจำเพาะ 8.96 เลขออกซิเดชั่น +1 และ +2 มีคุณสมบัติอ่อน ดัดง่าย นำไฟฟ้าได้ดี

<u>การใช้ประโยชน์</u>

ทองแดงมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและความร้อน มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนและง่ายต่อการแปรรูป การใช้ประโยชน์ของทองแดง ได้แก่ การนำไปทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และไฟฟ้า ใช้ในการก่อสร้างอาคาร และเครื่องจักร ใช้เป็นส่วนประกอบของยาปราบศัตรูพืช ทำเม็ดสีในอุตสาหกรรมเส้นใยและเซรามิก

<u>ความเป็นพิษ</u>

ทำให้เกิดโรค Wilson Disease ซึ่งเป็นความผิดปกติเนื่องจากมีระดับทองแดงสะสมอยู่ในร่างกายมาก ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุร่างกายได้รับทองแดงเข้าไปมากจะเกิดอาการเป็นพิษเฉียบพลัน คือ อาเจียน ท้องร่วง ปัสสาวะเป็นเลือด ความดันโลหิตต่ำ และอาจทำให้เสียชีวิตได้

2.1.2 นิกเกิล

นิกเกิล (Nickel) เป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ IIB ในตารางธาตุ เลขอะตอม 28 น้ำหนักอะตอม 58.70 จุดเดือด 2732 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1453 องศาเซลเซียส

ค่าความถ่วงจำเพาะ 8.908 เลขออกซิเดชัน +2 มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดี สามารถนำไปผสมกับโลหะอื่น ๆ ได้เป็นโลหะอัลลอยด์

การใช้ประโยชน์

นิกเกิลส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ประโยชน์โดยนำไปผสมกับโลหะอื่น เป็นโลหะอัลลอยด์ ส่วนนิกเกิลบริสุทธิ์จะใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ใช้ผสมในน้ำมันเบนซิน ในงานชุบโลหะ ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก

ความเป็นพิษ

จะเกิดขึ้นเนื่องจากฝุ่นของนิกเกิล และนิกเกิลคาร์บอนิลซึ่งเป็นสารประกอบในการทำนิกเกิลบริสุทธิ์ เป็นสารที่ทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ การแพร่กระจายของนิกเกิลในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดอาการผื่นคันที่ผิวหนัง

2.1.3 สังกะสี

สังกะสี (Zinc) เป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ IIB ในตารางธาตุ เลขอะตอม 30 น้ำหนักอะตอม 65.37 จุดเดือด 906 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 419.5 องศาเซลเซียส ค่าความถ่วงจำเพาะ 7.14 เลขออกซิเดชั่น +2 มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดี

การใช้ประโยชน์

สังกะสีมีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อน การใช้ประโยชน์ ได้แก่ การนำสังกะสีมาใช้เคลือบผิวโลหะที่เกิดสนิมง่ายแต่มีความแข็งแรงทนทานมากกว่า สารประกอบสังกะสีใช้ในการทำสีย้อม กาว และเรยอน

ความเป็นพิษ

สังกะสีจัดเป็นโลหะที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่ถ้าได้รับในปริมาณมากจะเกิดเป็นพิษต่อร่างกายได้ คือ เกิดอาการปวดท้อง คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการผุกร่อนของเยื่อบุทางเดินอาหาร ไตไม่ทำงาน โลหิตจาง ช็อก และอาจถึงตายได้ (Bailey, 1986)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน

2.2.1 หน้าที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

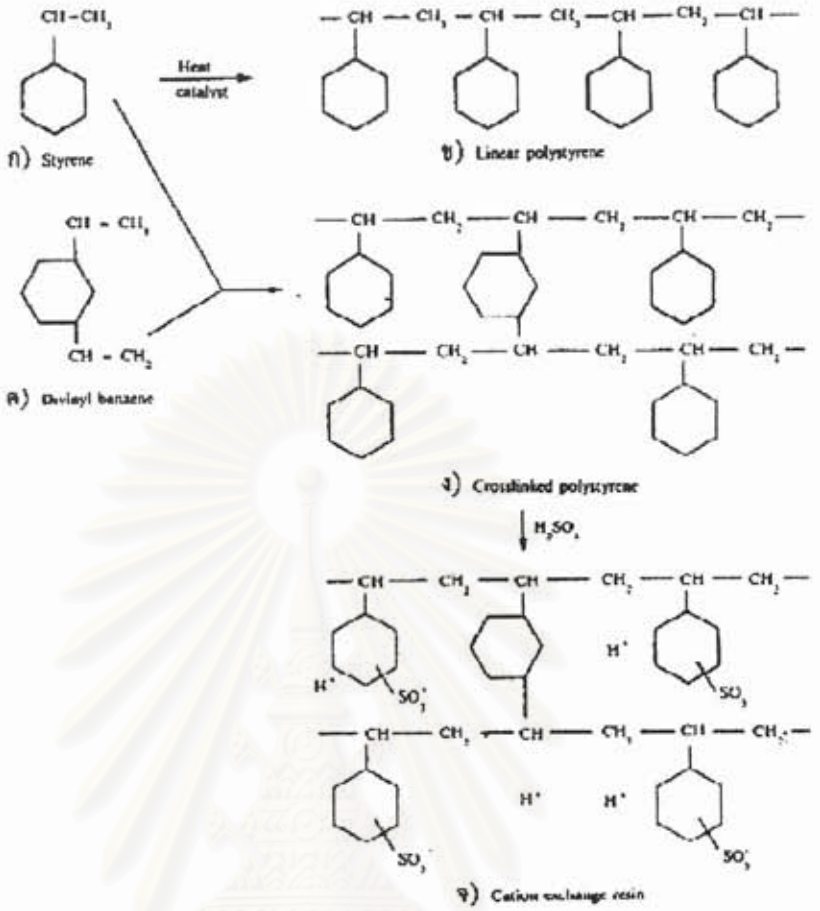
หน้าที่ของระบบแลกเปลี่ยนไอออนมี 2 ประการซึ่งเกิดขึ้นต่อเนื่องกัน คือ

2.2.1.1 กำจัดไอออนต่าง ๆ ออกจากน้ำ เช่น Ca^{++} ,Mg^{++}, $SO4^{=}$, Cl^{-} เป็นต้น นอกจากนี้ ในบางครั้งเรซินอาจใช้กำจัดโลหะพิษต่าง ๆ ออกจากน้ำได้ด้วย โลหะพิษที่ใช้เรซินกำจัดออก ได้แก่ อาเซนิก แบเรียม แคดเมียม โครเมียม โคบอลต์ ทองแดง ทองตะกั่ว โมลิบดีนัม เซเลเนียม เงิน แวนนาเดียม สังกะสี

2.2.1.2 ทำให้ไอออนต่าง ๆ มีความเข้มข้นสูงมาก ๆ งานส่วนนี้เกิดขึ้นหลังจากได้น้ำสะอาดแล้ว กล่าวคือ ไอออนที่ถูกกำจัดออกจากสารละลาย จะหลุดออกมากับสารละลายรีเจนเนอแรนต์ (Regenerant) ในระหว่างการทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) เนื่องจากปริมาตรของสารละลายรีเจนเนอแรนต์ ต่ำกว่าปริมาตรสารละลายซึ่งเป็นที่อยู่เดิมของไอออน ความเข้มข้นใหม่ของไอออนจึงสูงมาก ลักษณะเช่นนี้เท่ากับเป็นการทำให้ไอออนซึ่งเดิมเจือจางมาก มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลายเท่า

2.2.2 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดสมรรถภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ โครงร่างที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า (Functional Group) โครงร่างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้มันมีรูปร่างเป็นอย่างที่ปรากฏ และคงรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ และไม่แตกหักโดยง่าย โครงร่างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากที่เป็นชนิดเดียวกันซึ่งต่อกันเป็นเส้นยาว และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่ประสานเพื่อให้เกิดเป็นรูป 3 มิติที่มีความโปร่งหรือความพรุน ความโปร่งของเรซินขึ้นอยู่กับความเหนียวแน่นของการประสาน (Degree of Crosslinkage) ซึ่งวัดได้จากปริมาณของตัวประสาน ขอให้ดูภาพที่ 2.1 เป็นตัวอย่างประกอบคำอธิบาย



ภาพที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์, 2535)

ในกรณีนี้ตัวประสานคือ DVB (Divinylbenzene) โพลีสไตรีนจะเกาะจับกันแน่นหนาเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของ DVB ที่ใช้ กล่าวคือ ถ้าใช้ DVB มาก โครงร่างของเรซินจะแข็งและทึบ แต่ถ้าใช้ DVB น้อย โครงร่างของเรซินจะอ่อนและโปร่ง โดยปกติ มักให้เรซินมี Degree of Crosslinkage ประมาณ 8-12% DVB ซึ่งหมายความว่ามี DVB ประมาณ 8 -12 % ของไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (มีโพลีสไตรีนประมาณ 88-92%)

ความโปร่งหรือความพรุนของเรซิน มีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยน (Exchange Capacity) และกำหนดลักษณะอื่น ๆ ของเรซินด้วย เช่น ความชื้นในเรซิน เป็นต้น กล่าวคือ เรซินจะต้องมีความพรุนพอเพียงที่จะทำให้ไอออนต่าง ๆ เคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวกจึงจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนได้ เรซินที่มี Degree of

Crosslinkage สูงเกินไป จะมีความพรุนต่ำ ทำให้มีน้ำ (ความชื้น) อยู่ในเรซินน้อย นอกจากนี้ยังแตกหักง่ายอีกด้วย เรซินที่มี Degree of Crosslinkage ต่ำเกินไป จะมีความพรุนมาก ทำให้อมน้ำได้มากแต่สลายตัวได้ง่ายเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวหรือแรงประสานต่ำ นอกจากนี้ยังมีข้อเสียคือ ทำให้ไอออนที่มีขนาดใหญ่ (เช่น โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีประจุไฟฟ้า) สามารถเข้าถึงภายในโครงร่าง และทำให้เรซินเสียได้ในเวลาต่อมา

หมู่ไอออน (Functional Group) ของเรซิน เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่น ความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น หมู่ไอออนเกาะจับอยู่บนโครงร่างไฮโดรคาร์บอน ทำให้เรซินมีประจุบวกหรือลบ การจำแนกประเภทของเรซินออกเป็น 4 ประเภท ก็เป็นไปตามชนิดของหมู่ไอออนนี่เอง ยกตัวอย่าง เช่น หมู่ซัลโฟนิก ($-SO_3^-$) หรือหมู่คาร์บอกซิลิก ($-COO^-$) ทำให้เรซินมีประจุลบประจำตัว และเรียกว่า Cationic Resin ซึ่งใช้ในการกำจัดไอออนบวกออกจากน้ำ ส่วนหมู่อามีน (Amine) ชนิดต่างๆ เช่น $RRNH_2^+$ ทำให้เรซินมีประจุบวกประจำตัวและเรียกว่า Anionic Resin สามารถใช้กำจัดไอออนลบออกจากน้ำได้

โครงร่างไฮโดรคาร์บอนและหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า จับตัวกันเป็นส่วนประกอบถาวรของเรซิน และจำเป็นต้องมีไอออนอิสระที่มีประจุตรงกันข้าม มาทำให้เรซินเป็นกลาง เรซินใหม่นี้จะมี H^+, Na^+, Cl^-, OH^- ตัวใดตัวหนึ่งเป็นไอออนอิสระ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินและสิ่งที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ ไอออนอิสระนี้จับอยู่กับหมู่ไอออน (Functional Group) ของเรซิน อย่างชั่วคราว และพร้อมที่จะแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่น ที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ

2.2.3 การจำแนกประเภทของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

2.2.3.1 เรซินแบบกรดแก่

หน้าที่ของเรซินแบบกรด (ทั้งแก่ และอ่อน) คือใช้ไอออนบวกของตัวเอง (มักเป็น H^+ หรือ Na^+) แลกกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ เช่น Ca^{+2}, Mg^{+2} เป็นต้น H^+ หรือ Na^+ เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ของหมู่ไอออนของเรซิน ยกตัวอย่าง เช่น เรซินแบบกรดแก่ จะมีหมู่ซัลโฟนิก หรือ $-SO_3^-$ เป็นหมู่ไอออน ซึ่งจับติดอยู่กับโครงไฮโดรคาร์บอน

หมู่ซัลโฟนิกนี้อาจอยู่ในรูปของ H^+ ดังเช่น $-SO_3^- H^+$ หรืออยู่ในรูปของ Na^+ เช่น $-SO_3^- Na^+$ ก็ได้ $-SO_3^-$ จะเป็นส่วนที่ไม่ใช้ในการแลกเปลี่ยน มีแต่ H^+ หรือ Na^+ เท่านั้น ที่ใช้แลกกับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 2.2

$$RSO_3Na_2^+ + Ca^{+2} \longrightarrow RSO_3Ca^{+2} + 2Na^+$$
$$RSO_3H_2^+ + Ca^{+2} \longrightarrow RSO_3Ca^{+2} + 2H^+$$

ภาพที่ 2.2 การแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดแก่ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์, 2535)

เรซินทุกชนิดต้องหมดอำนาจเมื่อใช้ไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง แต่สามารถเรียกอำนาจกลับคืนมาได้อีก โดยการทำรีเจนเนอเรชัน เรซินที่อยู่ในรูปของ Na^+ ต้องรีเจนเนอเรตด้วยเกลือแกง (NaCl) ส่วนเรซินที่อยู่ในรูปของ H^+ ต้องรีเจนเนอเรตด้วยกรดแก่ (H^+) ดังแสดงในภาพที่ 2.3

$$RSO_3Ca + 2NaCl \longrightarrow RSO_3Na_2 + CaCl_2$$
$$RSO_3Ca + 2H^+ \longrightarrow RSO_3H_2 + Ca^{+2}$$

ภาพที่ 2.3 การทำรีเจนเนอเรชันของเรซินแบบกรดแก่ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์, 2535)

ประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชันต่ำประมาณ 25-45% ทำให้ต้องเปลืองสารเคมีในการทำรีเจนเนอเรชัน

2.2.3.2 เรซินแบบกรดอ่อน

เรซินแบบนี้แตกต่างจากเรซินแบบกรดแก่ที่ตัวหมู่ไอออน กล่าวคือ ในขณะที่เรซินแบบกรดแก่มีหมู่ซัลโฟนิก เรซินแบบกรดอ่อนมีหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH หรือ -COONa) หมู่ซัลโฟนิกอาจเทียบเท่ากับกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ซึ่งเป็นกรดแก่ ส่วนหมู่คาร์บอกซิลิกอาจเทียบเท่ากับกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งเป็นกรดอ่อน ตัวอย่างของการแลกเปลี่ยนไอออนดังภาพที่ 2.4

$$RH_2 + 2NaOH \longrightarrow RNa_2 + 2H_2O$$

ภาพที่ 2.4 การแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดอ่อน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์, 2535)

ส่วนปฏิกิริยารีเจนเนอเรชันของเรซินแบบกรดอ่อนเป็นเช่นเดียวกับของเรซินแบบกรดแก่

2.2.3.3 เรซินแบบด่างแก่

เรซินแบบด่างแก่มีหน้าที่หลักคือ ใช้ไอออนลบของตน (มักเป็น OH^- หรือ Cl^-) แลกกับไอออนลบในน้ำที่ต้องการกำจัดออก เช่น HCO_3^-, SO_4^{-2}, Cl^- เป็นต้น หมู่ไอออนของ เรซินแบบด่างแก่มักเป็น Quaternary Amine ตัวอย่างเช่น $(CH_3)_3CH_2N^+$ ไอออนอิสระมักเป็น Cl^- หรืออาจเป็น OH^-

ปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนไอออนและรีเจนเนอเรชัน เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับซึ่งกันและกัน ดังภาพที่ 2.5

$$2(CH_3)_3CH_2NOH + SO_4^{-2} \rightleftharpoons [(CH_3)_3CH_2N]_2SO_4^{=} + 2H^-$$
$$2(CH_3)_3CH_2NCl + SO_4^{-2} \rightleftharpoons [(CH_3)_3CH_2N]_2SO_4^{=} + 2Cl^-$$

ภาพที่ 2.5 การแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบด่างแก่ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์, 2535)

สารรีเจนเนอแรนต์อาจเป็น NaCl หรือ HCl หรือ NaOH ทั้งนี้แล้วแต่ว่า เรซินอยู่ในรูปใด เรซินแบบด่างแก่ สามารถใช้ได้ดีที่พีเอชทุกระดับ ประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชันต่ำเพียง 18-30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ต้องเปลืองสารรีเจนเนอแรนต์มาก นอกจากนี้เรซินแบบด่างแก่มีความคงทนต่ำ ทำให้มีอายุการใช้งานสั้น นอกจากการแลกเปลี่ยนไอออนลบแล้ว เรซินแบบด่างแก่ยังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนซิลิกา และ คาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย

2.2.3.4 เรซินแบบด่างอ่อน

การกำจัดไอออนลบของเรซินแบบนี้ นับว่าแตกต่างจากเรซินอีก 3 ประเภท เนื่องจากไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินชนิดนี้กำจัดได้เฉพาะกรดแก่ เช่น HCl, H_2SO_4, HNO_3 ออกจากน้ำ และไม่สามารถกำจัดกรดอ่อน เช่น CO_2, SiO_2 เป็นต้น การกำจัดกรดแก่เกิดขึ้นโดยที่กรดแก่ทั้งโมเลกุลเข้ามาจับกับเรซิน ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 2.6

ดังนั้น เรซินชนิดนี้จึงไม่ต้องมีไอออนอิสระก็ได้ รีเจนเนอแรนต์อาจเป็น NaOH หรือ Na_2CO_3 หรือ NH_4OH ก็ได้ ทั้งนี้เพราะเรซินจับกับกรดไม่แน่นหนา

$$R + HCl \longrightarrow RHCl$$

$$RHCl + NaOH \longrightarrow R + NaCl + H_2O$$

ภาพที่ 2.6 การกำจัดไอออนลบและการทำรีเจนเนอเรชันของเรซินแบบด่างอ่อน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์, 2535)

โดยปกติเรซินแบบด่างอ่อนมักใช้ในการกำจัด Cl^- และ $SO_4^{=}$ ข้อดีมีหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันสูงเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เปลืองสารเคมีน้อย และยังสามารถใช้ Na_2CO_3 ได้ (ราคาถูกกว่า NaOH) ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสูง (แต่อัตราเร็วของปฏิกิริยาต่ำ)

2.2.4 คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน

เพื่อให้มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ต้องมีไอออนอิสระ ที่สามารถใช้แลกกับไอออนในน้ำ
- ต้องไม่ละลายน้ำ
- ต้องมีช่องว่างภายในโครงไฮโดรคาร์บอนอย่างพอเพียง เพื่อให้ไอออนต่าง ๆ เคลื่อนที่ผ่านเข้าและออกได้อย่างสะดวก

2.2.4.1 ความชื้นของเรซิน

ความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ในตัว มีความสำคัญต่ออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน เรซินมีความชื้นสูงถ้าเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้มาก และจะมีความชื้นต่ำถ้ามีช่องว่างน้อย ความสามารถในการเก็บกักน้ำจะแสดงให้เห็นได้จากการบวมหรือพองน้ำของเรซินเมื่อวางแช่อยู่ในน้ำ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเข้าและออกจากช่องว่างของเรซินเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากทำให้ไอออนต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำสามารถซึมเข้าไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระของเรซิน

ระดับการบวมน้ำขึ้นอยู่กับระดับหรือองศาแห่งแรงยึดเหนี่ยว (Degree of Crosslinkage) ของโครงไฮโดรคาร์บอน ถ้าไฮโดรคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันไม่แน่น ช่องว่างภายในจะมีมาก จึงเก็บกักน้ำได้มาก เป็นผลให้เรซินมีความชื้นภายในสูง และมีโอกาสบวมน้ำได้มากและที่สำคัญคือ ความสามารถ (คิดต่อปริมาตรของเรซิน) ในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ ในทางตรงกันข้ามเรซินที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรคาร์บอนสูง จะมีความสามารถ (คิดต่อปริมาตร) ในการแลกเปลี่ยนสูง มีความชื้นน้อยและพองตัวน้อย อย่างไรก็ตาม ถ้าแรงยึดดังกล่าวสูงเกินไปจนทำให้ช่องว่างภายในเรซินเหลือน้อย การแลกเปลี่ยนไอออนอาจไม่สามารถเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากไอออนไม่สามารถเคลื่อนที่เข้า-ออกได้สะดวก และยังอาจทำให้เรซินแตกได้ง่ายอีกด้วย

2.2.4.2 ความหนาแน่นปรากฏ (Bulk Density)

ความหนาแน่นของเรซินเป็นความหนาแน่นปรากฏที่วัดหลังจากผ่านการล้างย้อนตกตะกอน และทิ้งให้สะเด็ดน้ำแล้ว และหมายถึงน้ำหนักของเรซินหารด้วยปริมาตรทั้งหมดของเรซิน ซึ่งรวมความพรุนที่เกิดจากการซ้อนกันของเรซิน ความหนาแน่นปรากฏนี้เรียกว่า Bulk Density หรือ Shipping Weight พารามิเตอร์ที่มีความหมายคล้ายกับความหนาแน่น คือ ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) โดยปกติเรซินจะมี ถ.พ.ประมาณ 1.3 ซึ่งต่ำกว่าถ.พ.ของทรายกรอง (ถ.พ. 2.65) มาก ทั้งนี้เพราะภายในเม็ดเรซินมีน้ำอยู่ประมาณ 40-50 เปอร์เซ็นต์

2.2.4.3 ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size) และสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient)

ขนาดของเรซิน สามารถบอกได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ขนาดสัมฤทธิ์ และสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ ซึ่งมีความหมายเหมือนกับที่ใช้กับทรายกรอง ขนาดของเรซินอาจบอกได้โดยอาศัยเบอร์ของตะแกรงร่อน เช่น ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ได้ แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 40 เป็นต้น

2.2.4.4 ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (Ion Exchange Capacity)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน หมายถึง ปริมาณไอออนที่เรซินแลกมาจากน้ำ (มักมีหน่วยสมมูล หรือวัดในหน่วยกิโลเกรนของหินปูน) ต่อหน่วยน้ำหนัก หรือหน่วยปริมาตรของเรซิน หน่วยแสดงขีดความสามารถของเรซินจึงอาจเป็นได้หลายแบบ ดังนี้

1) หน่วยสมมูลต่อปริมาตรของเรซิน เช่น meq/ml, eq/l
2) หน่วยสมมูลต่อน้ำหนักของเรซิน เช่น meq/g
3) หน่วยน้ำหนักในเทอมหินปูน ต่อปริมาตรของเรซิน เช่น กิโลเกรนต่อลิตร หรือกิโลเกรนต่อลูกบาศก์ฟุต

การเปลี่ยนหน่วยน้ำหนักของสารใดให้เป็นหน่วยสมมูล สามารถกระทำได้โดยหารน้ำหนักของสารนั้นด้วยค่าน้ำหนักสมมูล (Equivalent weight) เช่น

แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) น้ำหนักสมมูลเท่ากับ 68
แคลเซียมซัลเฟต 18 กรัม = 18/68 = 0.26 สมมูล (eq)

การเปลี่ยนหน่วยสมมูลให้เป็นหน่วยของหินปูน ($CaCO_3$) กระทำได้โดยคูณด้วย 50 ยกตัวอย่างเช่น

$$0.26 \text{ eq} = 0.26 * 50 = 13 \text{ g.}CaCO_3$$

อำนาจการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนที่อยู่ในเรซิน กล่าวคือ เรซินที่มีไอออนปริมาณสูง ย่อมมีอำนาจในการแลกเปลี่ยน

ไอออนสูงตามไปด้วย แต่ตามปกติ เรซินมักสามารถแสดงอำนาจแลกเปลี่ยนได้น้อยกว่าค่าสูงสุด เนื่องจากสภาวะแวดล้อมในการใช้งานมักไม่อำนวยให้

2.2.4.5 การทำงานของระบบแลกเปลี่ยนไอออน

ระบบแลกเปลี่ยนไอออนอาจทำงานแบบ ทีละเท (Batch) หรือ แบบต่อเนื่องก็ได้ การทำงานแบบต่อเนื่องนี้ หมายถึงการทำงานแบบคอลัมน์ซึ่งมีเรซินบรรจุอยู่ในถังและปล่อยให้น้ำดิบไหลผ่านชั้นเรซินอย่างต่อเนื่องทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นตลอดเวลา การทำงานแบบนี้ได้รับความนิยมมากกว่าแบบทีละเทมาก การทำงานแบบต่อเนื่องอาจมี 3 ลักษณะ คือ แบบธรรมดาซึ่งชั้นเรซินอยู่กับที่ แบบชั้นเรซินมีการขยายตัวตลอดเวลา และแบบชั้นเรซินซึ่งเสื่อมคุณภาพแล้วเคลื่อนที่ออกจากถังบรรจุในระหว่างที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้น

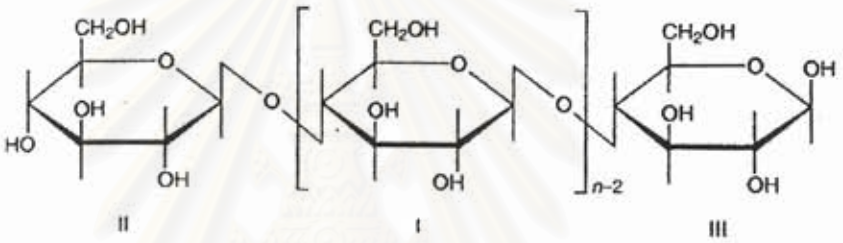
2.3 สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน (Cellulose Ion Exchanger)

โครงสร้างของเซลลูโลสในธรรมชาติจะมีหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้เซลลูโลสมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน การสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ สามารถทำได้โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วย Hydroxy celluloses และ COOH-group 15 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะเป็นผง ไม่ละลายน้ำ สามารถนำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนได้

เรซินที่ได้จากเซลลูโลส จะมีคุณสมบัติคล้ายกับเรซินสังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมี แต่จะมีลักษณะบางประการที่แตกต่างกัน เช่น โครงสร้างของเซลลูโลสจะเป็น Hydrophilic แต่โครงสร้างของเรซินสังเคราะห์จะเป็น Hydrophobic ผลจากคุณสมบัติของไฟเบอร์ในเซลลูโลส พบว่ามีการประสานกันด้วยพันธะไฮโดรเจน หมู่ไอออนส่วนมากจะอยู่ตามตำแหน่งต่าง ๆ บนตาข่ายของโครงร่างซึ่งมีระยะประมาณ 50°A ซึ่งหมู่ของไอออนไม่สามารถที่จะลอดผ่านรูพรุนของโครงร่างของเรซินได้

จากลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลสดังภาพที่ 2.7 พบว่า โมเลกุลของเซลลูโลสมี หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีหมู่ไอออนมาเกาะจับอยู่ การชี้บอกตำแหน่งที่แน่นอนจะทำได้ยาก แต่จากการศึกษาทางเคมี

ของเซลลูโลสพบว่าคาร์บอนอะตอมที่ 2 และ 6 เป็นส่วนที่จะเกิดปฏิกิริยามากที่สุด อนุภาคของเซลลูโลสมีขนาด 15 - 20 ไมครอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซลลูโลส การปรับปรุงลักษณะของโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชั่น ในเซลลูโลสสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนให้สูงขึ้น การเก็บรักษาสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ทำได้โดยการแช่ในสารละลาย NaH_2PO_4 เข้มข้น 0.5 M และ NaOH เข้มข้น 1 N ซึ่งจะสามารถเก็บไว้ได้นานหลายเดือน ควรหลีกเลี่ยงไม่ให้มีการสัมผัสกับสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง ในการทำรีเจนเนอเรชันจะใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.5 N หรือ acid buffers หรือ สารละลาย HCl เจือจาง ความสามารถในการใช้งานของสารแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ในช่วง 0.25 - 1.00 meq/g dry wt.



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (Shore, 1995)

Serva Cellulose Ion Exchangers เป็นสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแรกที่ผลิตขึ้นและสามารถจำหน่ายได้ในปริมาณมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการยอมรับและความสำเร็จในการนำไปใช้งานของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน คุณสมบัติที่สำคัญของ Serva Cellulose Ion Exchangers แสดงในตารางที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของ Serva Cellulose Ion Exchangers
(CE = cation exchanger, AE = anion exchanger)

Name	Ion Exchanging group	Properties	Capacity (meq/g)	Prevailing particle size (mm)
CM-Cellulose	$-OCH_2COOH$	CE, weak acid	0.62 ± 0.1	50 - 200
P-Cellulose	$-OPO_3H_2$	CE, medium acid	0.8 - 0.9	50 - 200
SE-Cellulose	$-O_2H_2SO_3H$	CE, strong acid	0.2 - 0.3	50 - 200
DEAD-Cellulose	$-OC_2H_4N(C_2H_5)_2$	AE, strong base	0.4 - 0.55	50 - 200
TEAE-Cellulose	$-OC_2H_5N^+Br^-$	AE, medium base	0.55 - 0.75	50 - 200
PAB-Cellulose	$-OCH_2C_6H_4NH_2$	AE, weak base	0.15 - 0.2	50 - 200
AE-Cellulose	$-OC_2H_4NH_2$	AE, weak base	0.33 ± 0.1	50 - 200
BD-Cellulose	$-CO_2H_4N(C_2H_5)_2$	AE, medium base	0.8 ± 0.05	50 - 200
GE-Cellulose	$-OC_2H_4NH^-C=NH_2^+Cl^-$	AE, strong base	0.2 - 0.3	50 - 200
BND-Cellulose	$-OC_2H_4N(C_2H_5)_2$	AE, medium base	0.8 ± 0.05	50 - 200

ที่มา : Dorfner, 1977

2.4 ผักตบชวา

ผักตบชวา (Water Hyacinth) จัดอยู่ในวงศ์ผักตบชวา (FAMILY PONTEDERIACEAE) มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Eichhornia crassipes* Solms. เป็นพืชน้ำพื้นเมืองของทวีปอเมริกาใต้ ถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศบราซิล ชื่อสามัญภาษาอังกฤษของผักตบชวา ถือกำเนิดมาจากดอกที่มีสีสวย และช่อดอกคล้ายกับดอก HYACINTH ด้วยความสวยงามของดอกผักตบชวานี้เองทำให้มีผู้นำผักตบชวาไปปลูกยังที่ต่าง ๆ ทั่วโลก ในปี พ.ศ. 2424 ชาวดัทช์ ที่ปกครองประเทศอินโดนีเซียได้นำผักตบชวา ไปปลูกเลี้ยงไว้ในสวนพฤกษศาสตร์ที่เมืองโบกอร์ ต่อมาไม่นานก็แพร่กระจายไปตามลำน้ำต่าง ๆ ทั่วประเทศ

ผักตบชวาเริ่มเข้ามาในประเทศไทยครั้งแรกในปี พ.ศ. 2444 โดยการนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซีย หรือเมืองชวา จึงได้ตั้งชื่อว่า "ผักตบชวา" ครั้งแรกนำมาปลูกลงใน สระน้ำ

และกระถางบัวในวังสระปทุม ต่อมาเมื่อเกิดน้ำท่วมวังสระปทุม กอผักตบชวาได้หลุดลอยไปสู่ลำคลองภายนอก และแพร่กระจายไปตามลำน้ำต่าง ๆ อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีผู้นิยมนำไปปลูกไว้ดูเล่นบ้าง ปลูกเพื่อใช้เลี้ยงสัตว์บ้าง ผักตบชวาซึ่งเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะแวดล้อมของเมืองไทย จึงได้ระบาดแพร่หลายในที่ต่าง ๆ ทั่วประเทศ (สุชาดา ศรีเพ็ญ, 2535)

2.4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา

ลักษณะทั่วไปของผักตบชวาเป็นพืชที่เจริญอยู่ที่ผิวน้ำ จัดเป็นพืชลอยน้ำ (Floating plant) ชนิดหนึ่ง โดยปกติรากจะไม่ยึดติดกับพื้นดินใต้น้ำ เว้นแต่น้ำนั้นค่อนข้างตื้น รากก็หยั่งถึงพื้นดินได้ ลักษณะของผักตบชวา แสดงในภาพที่ 2.8

ภาพที่ 2.8 ผักตบชวา (อภิชัย เชียร์ศิริกุล, 2533)

2.4.1.1 ต้น

ลักษณะเป็นกอประกอบด้วยกลุ่มใบเรียงตัวกันเป็นวง (rossette) กอต้นหนึ่งมีใบตั้งแต่สองใบขึ้นไป กอต้นแต่ละกอจะสร้างลำต้นทอดไปตามผิวน้ำ เรียกว่า ไหล (stolon) จำนวนตั้งแต่หนึ่งถึงหลาย ๆ ไหล เพื่อสร้างกอต้นขึ้นใหม่ โดยมีไหลเกาะติดกับต้นแม่เดิม

2.4.1.2 ราก

เจริญอยู่ทางใต้กอต้น ลักษณะของรากเป็นแบบรากฝอย (fibrous root) คือมีรากย่อย ๆ แตกเป็นกระจุก รากเปล่านี้มีลักษณะอวบอ้วนขาว และเมื่อเจริญมากขึ้นจะมีรากแขนงแตกออกมาอีก รวมทั้งมีขนรากเล็ก ๆ เกิดขึ้นจำนวนมาก ความยาวของรากจะแตกต่างกันไป บางครั้งพบว่ายาวถึง 100 เซ็นติเมตรก็มี ถ้าผักตบชวาขึ้นในน้ำที่มีธาตุอาหารมากรากจะสั้น

2.4.1.3 ใบ

เป็นใบเดี่ยวประกอบด้วยแผ่นใบและก้านใบ ขนาดของแผ่นใบจะขึ้นกับขนาดของลำต้น แผ่นใบมีรูปร่างคล้ายรูปไต หรือรูปหัวใจ ขอบใบเรียบ ระบบเส้นใบแตกแบบขนาน ก้านใบกลมเรียว อวบน้ำ ตามปกติถ้าผักตบชวาเจริญอยู่ในที่เบียดชิดกันมากก้านใบจะอ้วนกลมเรียวยาว แต่ถ้าผักตบชวาเจริญอยู่ห่าง ๆ ไม่หนาแน่น ลำต้นจะเล็กเตี้ย ก้านใบพองเป็นกระเปาะใหญ่ทำหน้าที่เป็นทุ่นให้ลำต้นลอยน้ำได้อย่างอิสระ ใบอ่อนเกิดที่ตรงกลางกอ โดยในระยะแรกใบอ่อนจะม้วนหุ้มรอบโคนกาบใบที่เกิดก่อน และมีกาบใบบางใสหุ้มรองอีกทีหนึ่ง เมื่อก้านใบเจริญยาวขึ้นจะดันกาบใบที่หุ้มนี้ออกไป แผ่นใบก็จะคลี่ออกเป็นใบใหม่ต่อไป ใบในระยะแรกสีเขียวอ่อนและต่อไปจะมีสีเขียวเข้มขึ้น

2.4.1.4 ดอก

มีสีม่วงคราม ดอกออกเป็นช่อยาว มีดอกย่อยเกิดรอบ ๆ ก้านช่อดอก ขนาดของช่อดอกและจำนวนของดอกย่อยของแต่ละช่อดอกขึ้นอยู่กับขนาดของกอต้นผักตบชวา อาจเป็นช่อดอกใหญ่มีดอกย่อยถึง 60 ดอก หรือมีดอกย่อยช่อละ 4 – 5 ดอกก็มี ช่อดอกจะเกิดตรงกลาง ๆ ลำต้น โดยช่อดอกอ่อนจะแทงออกมาจากก้านใบ ซึ่งในระยะแรกช่อดอกจะเจริญอยู่ภายในก้านใบ และค่อย ๆ เจริญดันทะลุกาบใบบางที่หุ้มเอาไว้ส่งก้านด้านเจริญขึ้นเหนือกลุ่มใบ ดอกย่อยเมื่อแก่จะบานพร้อมกันทั้งช่อ โดยเริ่มบานตั้งแต่พระอาทิตย์เริ่มส่องแสง และบานเต็มที่เมื่อแสงแดดจัด และหุบในเวลาเย็น ดอกจะบานเพียง 1-2 วัน หลังจากนั้นดอกก็จะหุบหมดทั้งช่อ และก้านช่อดอกจะยืดตัวส่งช่อดอกทั้งหมดลงไปเจริญในน้ำ ผักตบชวาต้นหนึ่ง ๆ มีดอกหลายช่อทะยอยกันออกดอก และบานติดต่อกันเป็นระยะเวลาหนึ่ง ผักตบชวาที่เกิดในบริเวณเดียวกันจะมีดอกบานไล่เลี่ยกัน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดอกไม้โดยทั่วไปจะมีกลีบสองชั้น คือ ชั้นกลีบเลี้ยงและชั้นกลีบดอก ส่วนดอกผักตบชวานั้นมีกลีบเพียงชั้นเดียว จึงเรียกว่า กลีบรวม ซึ่งแยกได้เป็น 6 กลีบย่อย โดยกลีบย่อยทั้งหมดติดกันเป็นหลอดยาว และติดกับก้านช่อดอกอีกทีหนึ่ง กลีบรวมทั้งหมดมีสีม่วงคราม ขนาดต่างกัน และมีกลีบหนึ่งที่ขนาดใหญ่ที่สุด ตรงกลางมีแต้มสีเหลือง ตัดขอบด้วยสีม่วงเข้ม มีเกสรตัวผู้ 6 อัน ขนาดสั้น 3 ยาว 3 ติดอยู่ตรงโคนกลีบ ชั้นเกสรตัวผู้สีเหลืองสด เกสรตัวเมียมีส่วนปลายสุดเรียกยอดเกสรตัวเมียสีม่วงอ่อนอยู่บนก้านที่ติดกับรังไข่ รังไข่เมื่อได้รับการผสมพันธ์แล้วจึงเจริญเป็นผล

2.4.1.5 ผล

มีขนาดเล็กแบบผลแห้ง แก่แล้วแตก ภายในผลมีเมล็ดขนาดเล็ก สีน้ำตาลเข้ม ปกติแล้วการติดผลจนเจริญเป็นเมล็ดนั้นมีน้อยมาก

2.4.2 ลักษณะการเจริญเติบโตของผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นพืชลอยน้ำที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ชอบน้ำและแสงแดดจัด ขยายพันธุ์ได้มากโดยการแตกไหลออกรอบ ๆ กอต้นเดิม มีการแตกใบอ่อนอยู่เสมอ การเกิดใบอ่อนในระยะแรกเป็นตุ่มเล็ก ๆ สีขาวอยู่ภายในโคนด้านในของก้านใบแก่ ซึ่งอยู่ทางด้านนอกของกอต้น มีกาบขนาดเล็กลักษณะบางใส หุ้มรอบพร้อมทั้งมีเมือกลื่น ๆ อยู่ด้วย หลังจากนั้นใบอ่อนจะเริ่มเจริญขึ้นเป็นแผ่นใบขนาดเล็กบนก้านใบสั้น ๆ ต่อมาแผ่นใบจะขยายใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนก้านใบนี้จะยาวเพียงเล็กน้อย แผ่นใบจะม้วนหุ้มรอบโคนก้านใบที่อยู่ติดกัน ต่อจากนั้นก้านใบจะยาวขึ้นดันกาบที่หุ้มออกมา พร้อมทั้งแผ่นใบคลี่กางออก ใบเมื่อมีอายุมากขึ้นสีใบก็เข้มขึ้นด้วย กาบใบซึ่งมีสีเขียวแกมม่วงจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแกมม่วง ผักตบชวาที่เจริญอยู่กันห่าง ๆ ก้านใบจะพองป่องภายในมีช่องอากาศจำนวนมาก แต่ถ้าผักตบชวาเจริญในสภาพที่เบียดชิดกันมาก ๆ ก้านใบจะยาวเรียว

ผักตบชวาออกดอกปีละครั้ง ในช่วงระยะเวลาประมาณเดือนพฤศจิกายนถึงกุมภาพันธ์ ผักตบชวากอหนึ่งมีดอกได้หลายช่อ ช่อดอกอ่อนจะเกิดอยู่ภายในลำต้นที่ลักษณะเหมือนก้านใบ สังเกตได้ว่าบริเวณนั้นจะบวมพอง และเมื่อช่อดอกเจริญมากขึ้นก็จะแทงทะลุออกมาเจริญข้างนอก ดอกย่อยที่เรียงกันอยู่บนก้านช่อดอกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นพร้อมที่จะบาน

ต่อไป เมื่อดอกเจริญเต็มที่แล้วจะเริ่มรับแสงอาทิตย์ที่ส่องในเวลาเช้า และเมื่อแสงอาทิตย์ส่องเต็มที่ดอกผักตบชวาก็จะบานเต็มที่ตลอดทั้งช่อดอกเช่นกัน ในเวลาเย็นดอกก็จะเริ่มหุบ ส่วนของกลีบดอกหุ้มปิดรังไข่ไว้ ต่อมาก้านช่อดอกจะเริ่มโค้งงอส่งช่อดอกลงไปที่ผิวน้ำหรือใต้ผิวน้ำ แต่โดยทั่ว ๆ ไปแล้วไม่ค่อยพบเมล็ดของผักตบชวา (รุ่งรัตน์ เหลืองนทีเทพ, 2520)

2.4.3 องค์ประกอบในผักตบชวา

ผักตบชวาประกอบด้วยเซลลูโลส ลิกนิน และแร่ธาตุอื่น ๆ น้ำหนักแห้งโดยเฉลี่ยของผักตบชวาคิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักทั้งหมด องค์ประกอบของผักตบชวาแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของผักตบชวา

องค์ประกอบ	สัดส่วน (เปอร์เซ็นต์)
ลิกนิน	12 – 13
เซลลูโลส	43 – 44
เพนโตเซน	14 – 15
เถ้า	20 – 21
คาร์บอน	32 – 35
ไฮโดรเจน	5.4 – 5.8
ไนโตรเจน	2.8 – 3.5
โซเดียม	1.5 – 2.5
โปแตสเซียม	2.0 – 3.5
แคลเซียม	0.6 – 1.3

ที่มา : นันทนา อิทธิพรโกวิท, 2538

2.5 สีย้อมผ้า

2.5.1 ประเภทของสีย้อมผ้า

Rangnekar และ Singh (1980) จำแนกประเภทของสีย้อมไว้ 2 แบบ คือ

2.5.1.1 การจำแนกสีย้อมจากลักษณะโครงสร้างทางเคมีของตัวสีย้อม โดยแบ่งตาม chromophoric system ในโมเลกุลของสี สามารถแบ่งประเภทของสีออกได้เป็น 21 กลุ่ม ได้แก่

1) Nitro ตัวอย่างเช่น Napthol Yellow S
2) Nitroso ตัวอย่างเช่น Fast Green O
3) Azo แบ่งเป็น 7 กลุ่มย่อย
   - monoazo ตัวอย่างเช่น Acid Orange II
   - bisazo ตัวอย่างเช่น Congo Red
   - trisazo ตัวอย่างเช่น Direct Black EW
   - polyazo
   - mordant azo ตัวอย่างเช่น Eriochrome Black T
   - stilbene azo ตัวอย่างเช่น Chrysophenine G
   - pyrazolone azo ตัวอย่างเช่น Tartrazine
4) Diphenylmethane ตัวอย่างเช่น Auramine O
5) Triphenylmethane ตัวอย่างเช่น Malachite Green
6) Xanthene ตัวอย่างเช่น Fluorescein
7) Acridine ตัวอย่างเช่น Acridine Orange NO
8) Thiazole ตัวอย่างเช่น Basic Yellow T
9) Indamine & Indophenol ตัวอย่างเช่น Toluylene Blue
10) Azine ตัวอย่างเช่น Safranine T
11) Oxazine ตัวอย่างเช่น Capri Blue GN
12) Thiazine ตัวอย่างเช่น Methylene Blue
13) Cyanine แบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อย

- Methine ตัวอย่างเช่น Astrafloxine FF
- Quinoline ตัวอย่างเช่น Kryptocyanine

14) Sulphur ตัวอย่างเช่น Sulphur black T

15) Lactone ตัวอย่างเช่น Resoflavine W

16) Aminoketone ตัวอย่างเช่น Helindon Brown CR

17) Hydroxy ketone ตัวอย่างเช่น Alizarin Dark Green W

18) Anthraquinonoid ตัวอย่างเช่น Perlon Fast Green 3B

19) Indigoid ตัวอย่างเช่น Indigo

20) Sulphurized vat dyes ตัวอย่างเช่น Hydron Blue R

21) Phthalocyanine ตัวอย่างเช่น Monastral Fast Blue BS

2.5.1.2 การจำแนกสีย้อมจากวิธีการในการย้อมสีติดกับเส้นใย

1) สีแอซิด (Acid dyes) ใช้ย้อมเส้นใยขนสัตว์ ไหม และเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่เป็นกรด บางตัวใช้ย้อมฝ้ายได้ โครงสร้างทางเคมีของสีในกลุ่มนี้ประกอบด้วยหมู่ของกรดซัลโฟนิก หรือบางตัวมีหมู่กรดคาร์บอกซิลิก สมาชิกของสีแอซิดอยู่ในกลุ่มโครงสร้างทางเคมีแทบทุกกลุ่ม โดยสมาชิกที่สำคัญมาจากกลุ่มอะโซ (azo) กลุ่มไตรเฟนิลมีเทน (triphenyl methane) และกลุ่มแอนทราควิโนน (anthraquinone)

2) สีแอซิดมอแดนท์ (Acid Mordant dyes) เป็นสีในกลุ่มแอซิดบางตัวที่สามารถปรับปรุงการย้อมติดเส้นใยได้โดยที่ในโมเลกุลของสีมีหมู่ที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับเกลือของโลหะ เช่น เกลือของโครเมียม บนเส้นใยได้ เกลือโครเมียมจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้สียึดติดกับเส้นใยได้ดีขึ้น ด้วยการใช้สารช่วยติดที่ต่างกันนี้เองทำให้เกิดกระบวนการย้อมสีที่แตกต่างกันไป และการเรียกวิธีการในการย้อมนั้นก็ขึ้นอยู่กับตัวสารช่วยติดที่ใช้ สมาชิกทั้งหมดของสีแอซิดมอแดนท์จัดอยู่ในกลุ่มอะโซ

3) สีเบสิค (Basic dyes) ใช้ย้อมขนสัตว์ในน้ำย้อมที่เป็นกลางหรือเป็นกรดอ่อน และใช้ย้อมฝ้ายโดยใช้สารช่วยติด เช่น กรดแทนนิค (tannic acid) และทาเทรีเมติค (tartaremetic) สีบางตัวในกลุ่มนี้ใช้ย้อมเส้นใยโพลีอะคริโลไนตริล (polyacrylonitrile) ได้ สีเบสิคมีสมาชิกมาจากกลุ่มโครงสร้างทางเคมี ไดเฟนิลมีเทน

(diphenylmethane) ไตรเฟนิลมีเทน (triphenylmethane) แซนทีน (xantene) อะซีน (azine) ออกซะซีน (oxazine) ไทอะซีน (thiazine) และ อะโซ (azo)

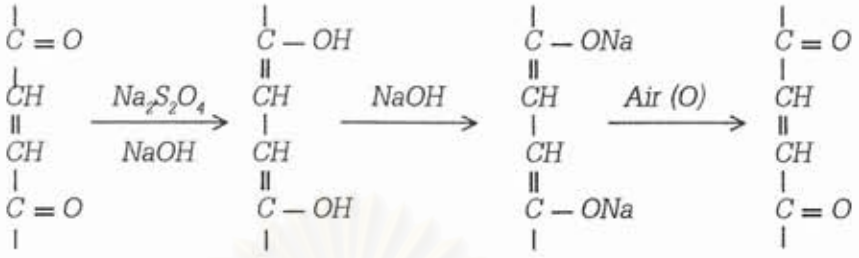
4) สีไดเร็ค (Direct cotton dyes) หรือสีย้อมฝ้าย เป็นสีที่ย้อมติดเส้นใยฝ้ายได้โดยตรงโดยอาศัยพันธะไฮโดรเจนและแรงวันเดอร์วาล โครงสร้างของสีเป็นตัวก่อให้เกิดการติดของสีได้ สีไดเร็คโดยทั่วไปมีหมู่กรดซัลโฟนิก และบางตัวมีหมู่กรดคาร์บอกซิลิกอยู่ในโครงสร้างซึ่งทำให้สีละลายได้ในน้ำ สีในกลุ่มโครงสร้างทางเคมีหลายกลุ่ม เช่น อะโซ (azo) แอนทราควิโนน (anthraquinone) พาธาโลไซยาไนน์ (pthalocyanine) เป็นต้น จัดเป็นสีไดเร็ค โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวสีในการติดของสี การละลาย เป็นต้น

5) สีอะโซอิค (Azoics) ใช้สำหรับย้อมฝ้ายและเส้นใยเซลลูโลสอื่น ๆ ก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยได้โดยการแช่ในสารที่มีส่วนประกอบทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อในภาวะที่เป็นด่างเรียกว่าสารเนพทอล (Naphtol) ตามด้วยการย้อมทับด้วยเกลือไดอะโซเนียม (Diazonium salt) ซึ่งเป็นสารอะโรมาติคเอมีน สีที่แตกต่างกันเกิดขึ้นได้โดยการรวมตัวของเนพทอลกับเกลือไดอะโซเนียมที่ต่างกัน

6) สีมอแดนท์ (Mordant dyes) สีตัวนี้เป็นสีที่สามารถช่วยให้ติดบนเส้นใยได้โดยในโมเลกุลของสีมีหมู่ที่สามารถจับตัวกับโลหะโดยการสร้างพันธะเกิดเป็นสารประกอบคีเลต สีย้อมที่มีหมู่ของ 0,0'-ไดไฮดรอกซี 0,0'-ไดไฮดรอกซีอะโซ อะโซ-0-ไฮดรอกซีคาร์บอกซิลิกแอซิด และ 0-ไฮดรอกซีไนโตรโซ จะเป็นสีย้อมในกลุ่มนี้ เกลือของโลหะที่ใช้เป็นสารช่วยติด ได้แก่ เกลือของอะลูมิเนียม โครเมียม ทองแดง โคบอลต์ นิกเกิล เหล็ก และดีบุก สารช่วยติดที่ใช้สามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลของสีและเส้นใย ช่วยปรับปรุงการย้อมติดของสีให้ดีขึ้น วิธีในการย้อมสีโดยใช้สารช่วยติดนี้สามารถทำได้ 3 วิธี คือ การเตรียมสีย้อมที่มีสารช่วยติดเป็นสารประกอบโลหะของสีย้อม การย้อมสีและสารช่วยติดลงบนเส้นใยพร้อม ๆ กัน และการย้อมสีลงบนเส้นใยก่อนแล้วจึงย้อมทับด้วยสารช่วยติดในภายหลัง

7) สีวัต (Vat dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถทำให้ละลายในน้ำได้โดยทำให้เกิดสารประกอบลิวโค (leuco compounds) ด้วยการรีดิวส์และทำให้เกิดการ

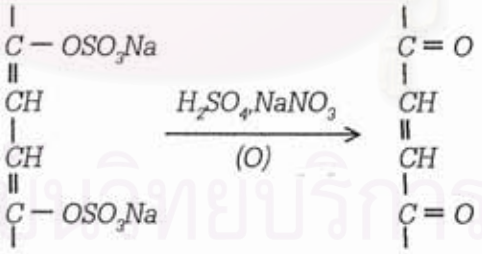
ละลายด้วยโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ (โซเดียมไฮโปซัลไฟต์) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เรียกว่า กระบวนการวัต ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 กระบวนการวัต (Rangnekar and Singh, 1980)

สีวัตอาจใช้ย้อมบนขนสัตว์และไหมได้แต่เส้นใยอาจเสียหายจากภาวะเป็นด่างระหว่างการย้อม สีวัตอยู่ในกลุ่มโครงสร้างเคมี แอนทราควิโนนอยด์ และอินดิกอยด์

8) สีโซลูบิไลส์วัต (Solubillised Vat dyes) เกลือโซเดียมของสารประกอบลิวโคของสีวัตเก็บรักษาได้ยากเนื่องจากเกิดออกซิเดชั่นในอากาศได้ สีโซลูบิไลส์วัตซึ่งเป็นซัลฟุริกเอสเทอร์ของสารประกอบลิวโคมีความเสถียรมากกว่า และสามารถเก็บรักษาไว้ได้โดยไม่เกิดออกซิเดชั่น การย้อมติดบนเส้นใยในรูปของสีวัตทำได้โดยการออกซิไดส์ด้วยกรด (กรดซัลฟุริกเจือจาง) และตัวออกซิไดซ์ (สารละลายโซเดียมไนเตรท) ดังสมการในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การออกซิไดส์สีโซลูบิไลส์วัต (Rangnekar and Singh, 1980)

9) สีกำมะถัน (Sulphur dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ใช้ย้อมฝ้ายในรูปของเกลือโซเดียม โดยการทำปฏิกิริยารีดิวซ์กับโซเดียมซัลไฟด์ในภาวะที่เป็นด่าง ภายหลังการย้อมจะถูกออกซิไดซ์กลับมาเป็นตัวสีเมื่อสัมผัสกับอากาศ สีกำมะถันเตรียมได้

โดยการหลอมละลายกำมะถันหรือโซเดียมซัลไฟด์ กรดอะมิโน และสารประกอบไนโตรอื่น ๆ โดยอาจมีหรือไม่มีตัวทำละลายก็ได้

10) สีกำมะถันวัต (Sulphurised Vat dyes) ใช้วิธีการย้อมเช่นเดียวกับการย้อมสีวัต แต่มีโครงสร้างของควิโนนอยด์ หรือโครงสร้างที่คล้ายกับควิโนนอยด์ สีชนิดนี้เตรียมได้โดยการหลอมกำมะถันกับแอนทราควิโนน และอินโดฟีนอล

11) สีอินเกรน (Ingrain dyes) ก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยโดยกระบวนการเช่นเดียวกับสีอะโซอิค แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

- สีออกซิไดส์ (Oxidation colours) เช่น อะนิลีนแบลค (Aniline Black) ย้อมเป็นสีดำบนเส้นใยฝ้ายโดยการอัดอะนิลีนไฮโดรคลอไรด์ (Aniline hydrochloride) ลงบนฝ้าย ตามด้วยการออกซิไดส์ให้เกิดสีบนเส้นใยด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน

- สีพาทาโลเจน (phthalogens) เป็นกลุ่มของสีที่ใช้เป็นตัวนำในการก่อให้เกิดสีพาทาโลไซยาไนน์ (phthalocyanines) บนเส้นใย สีพาทาโลเจนมีหลายชนิด แต่โดยทั่วไปจะเป็นตัวนำของสีพาทาโลไซยาไนน์ กล่าวคือ 1,3-ไดอิมิโนพาทาลิไมด์ (1,3-diiminophthalimide) ใช้เชื่อมต่อกับเกลือของโลหะ เช่น คอปเปอร์อะซิเตท หรือกับเกลือของโลหะและสารประกอบอินทรีย์ เช่น เอทิลีนไดเอมีน เกิดเป็นสีโลหะพาทาโลไซยาไนน์ได้

12) สีดิสเพอร์ส (Disperse dyes) เป็นสีย้อมที่ใช้สำหรับเส้นใยที่การดูดซึมน้ำไม่ดี เช่น เส้นใยโพลีเอสเทอร์ (polyester) โพลีเอไมด์ (polyamide) โพลีอะคริโลไนไตรล์ (polyacrylonitrile) และโพลีโพรพิลีน (polypropylene) ผลิตขึ้นเพื่อใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตทให้ง่ายขึ้น เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่เป็นละอองละเอียดลอยอยู่ในน้ำ ย้อมติดเส้นใยด้วยวิธีการแตกต่างกัน วิธีการที่สำคัญมี 2 วิธี คือ การใช้สารพา (carrier) ซึ่งเป็นสารออร์แกนิค และการใช้การย้อมที่อุณหภูมิและความดันสูง กลุ่มโครงสร้างทางเคมีของสีในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มอะโซ และแอนทราควิโนนอยด์ โดยโครงสร้างที่มีมวลโมเลกุลต่ำและหมู่ฟังก์ชั่นที่มีอยู่เป็นตัวช่วยในการแพร่กระจายตัวในน้ำ

13) สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) ใช้ย้อมเส้นใยภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เพื่อสร้างพันธะโควาเลนท์กับเส้นใย สีรีแอคทีฟมีอยู่ในกลุ่มโครงสร้างทางเคมีทุกกลุ่ม ใช้ย้อมฝ้าย ขนสัตว์ และอื่น ๆ ระบบรีแอคทีฟมีหลายระบบ แต่ที่นิยมใช้กันอยู่จะเป็นระบบไตรอะซีน และไวนิลซัลโฟน พันธะโควาเลนท์ระหว่างสีกับเส้นใยจะเป็นในรูปของอีเทอร์หรือเอสเทอร์ ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบรีแอคทีฟที่ใช้ น้ำย้อมที่เป็นด่างเป็นสิ่งจำเป็นในการย้อมฝ้ายและขนสัตว์ด้วยสีรีแอคทีฟ และอุณหภูมิที่ใช้ในการย้อมขึ้นอยู่กับระบบของรีแอคทีฟที่ใช้ โดยทั่วไปสีรีแอคทีฟจะแบ่งออกเป็นสีย้อมเย็นและสีย้อมร้อน

14) สีดิสเพอร์สรีแอคทีฟ (Disperse Reactive dyes) สีชนิดนี้มีลักษณะ 2 อย่างอยู่ด้วยกัน คือ เป็นละอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำ และมีโครงสร้างของหมู่รีแอคทีฟ ใช้ย้อมบนเส้นใยโพลีเอไมด์ จะลอยตัวแพร่กระจายอยู่ในน้ำย้อมเช่นเดียวกับสีดิสเพอร์ส และจะย้อมติดบนเส้นใยเหมือนกับสีรีแอคทีฟในภาวะที่น้ำย้อมเป็นด่างเพื่อช่วยในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย

15) สีแคทอิออน (Cation dyes) เป็นสีที่มีประจุบวกอย่างน้อย 1 ประจุ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถย้อมติดบนเส้นใยโพลีอะคริโลไนไตรล์ได้ หมู่ไซยาโนบนเส้นใยจะทำหน้าที่เป็นตัวติดสีซึ่งเป็นประจุบวกภายใต้ภาวะที่เหมาะสม โดยทั่วไปจะเป็นที่อุณหภูมิสูง (ในน้ำเดือด) และใช้ตัวช่วยติดที่มีประจุ สีแคทอิออนจัดอยู่ในกลุ่มโครงสร้างทางเคมีหลายกลุ่ม เช่น กลุ่มอะโซ แอนทราควิโนนอยด์ ไตรเฟนนิลมีเทน อะซีน ออกซะซีน และไทอะซีน เป็นต้น

2.5.2 การย้อมสีไดเร็ค

สีไดเร็คเป็นสีที่ละลายในน้ำ ใช้ย้อมจากน้ำละลายสีโดยตรงให้ซึมเข้าไปภายในเส้นใยเซลลูโลส ผลิตออกจำหน่ายเป็นครั้งแรกใน พ.ศ. 2427 โดย Böttiger มีสีแดงเรียกว่า Congo Red สามารถใช้ย้อมได้ทันทีไม่ต้องย้อมผ้าด้วยสารช่วยติดก่อน (pre-mordanting) เหมือนกับสีตัวอื่น ๆ ซึ่งใช้กันอยู่ก่อนจึงเรียกกันว่า สีไดเร็ค หรือ สีย้อมโดยตรง

โมเลกุลของสีไดเร็คมีโครงสร้างเหมือนกับสีแอสิด แต่มีขนาดใหญ่กว่า มีสูตรโดยทั่วไปเป็น R_1-N=N-X-N=N-R_2 ขนาดของสีไดเร็คเป็นตัวทำให้มันแตกต่างจากสีแอสิด และทำให้สีไดเร็คย้อมติดบนเซลลูโลส การติดของสีไดเร็คอาศัยทั้งพันธะไฮโดรเจนและแรงวันเดอร์วาล ซึ่งแรงวันเดอร์วาลจะมีความแรงเพิ่มมากขึ้นเมื่อขนาดของโมเลกุลเพิ่มขึ้น โครงสร้างโมเลกุลยาวของสีไดเร็คเป็นตัวช่วยในการสร้างพันธะไฮโดรเจน เนื่องจากโมเลกุลของสีสามารถทอดยาวไปตามสายโซ่ของเซลลูโลสซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่

คุณสมบัติในการย้อมติดเซลลูโลสของสีไดเร็คมักจะต่ำเมื่อเทียบกับสีในกลุ่มอื่น ๆ จึงนิยมใช้ย้อมในเฉดสีอ่อนเท่านั้น การตกแต่งภายหลังการย้อมด้วยวิธีการต่าง ๆ ถูกนำมาใช้เพื่อให้สีที่ติดอยู่บนเส้นใยละลายออกมาในน้ำได้น้อยลง ทำให้ปรับปรุงการย้อมติดสีให้ดีขึ้น แต่มีข้อเสียคือ ทำให้สีที่ได้เปลี่ยนไป หรือทำให้สีจางลง

ข้อดีของสีไดเร็คคือ มีขั้นตอนในการย้อมที่ง่าย มีช่วงของเฉดสีกว้าง และค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น

ขนาดของโมเลกุลเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่จะทำให้ตัวสีสามารถเกาะติดเส้นใยได้ ที่อุณหภูมิห้องสีไดเร็คซึ่งไม่เกาะติดเส้นใยนั้นจะกระจายตัวดีในน้ำย้อม แต่สีซึ่งเกาะติดเส้นใยนั้นสีกอดกันเป็นเม็ดเล็ก ๆ จึงเป็นที่เข้าใจกันว่าระดับการกระจายตัวของสีในน้ำย้อมจะมีส่วนสัมพันธ์กับการเกาะติดของสี ฉะนั้นการเติมเกลือลงไปในน้ำย้อมเพื่อช่วยให้สีซึมเข้าไปภายในเส้นใยมากขึ้นจึงเป็นการทำให้ตัวสีรวมกันเป็นเม็ดเล็ก ๆ กระจายตัวอยู่ในน้ำย้อมพอเหมาะที่จะซึมเข้าไปได้ ขนาดของช่องว่างระหว่างโมเลกุลของเส้นใยก็มีส่วนสำคัญยิ่ง ตัวสีจะรวมตัวกันได้เพียง 2-3 โมเลกุลเท่านั้น มิฉะนั้นก็จะใหญ่เกินกว่าที่จะซึมเข้าไปตามช่างว่างของเส้นใยได้ การที่สีจะรวมตัวกันเป็นเม็ดเล็ก ๆ หรือไม่ มิใช่ปัญหาสำคัญนัก เมื่อตัวสีซึ่งเป็นโมเลกุลเดียวซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างของเส้นใยได้แล้ว จะไปรวมตัวกันเองภายในช่องว่างนั้น ไม่ว่าสีจะซึมเข้าไปด้วยกำลังกลอย่างใด แต่ถ้าเนื้อที่สัมผัสระหว่างตัวสีและเส้นใยเพิ่มขึ้น สีก็ดูดติดเส้นใยได้มากขึ้น

โดยแท้ที่จริงแล้วการรวมตัวของสีในน้ำย้อมมิใช่สาเหตุสำคัญที่จะทำให้สีติดเส้นใยได้ แต่แสดงให้เห็นว่าตัวสีสามารถที่จะรวมตัวกันได้ กำลังที่จะทำให้ตัวสีรวมกันได้ใน

น้ำย้อม คือกำลังที่จะให้สีติดเส้นใยได้ หรือนัยหนึ่ง ถ้าตัวสีสามารถทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้มากเท่าไร ก็เกาะติดเส้นใยได้มากเท่านั้น (แต่สภาพอื่น ๆ ต้องเหมาะสมด้วย) ในขณะเดียวกันจะรวมตัวกันเป็นเม็ดเล็ก ๆ ด้วย

สีไดเร็คมักใช้ย้อมที่อุณหภูมิจุดเดือด จนกระทั่งสีซึมเข้าไปในเส้นใย ในภาวะที่ไม่มีอีเลคโทรไลต์สีไดเร็คบางตัวจะไม่สามารถย้อมเซลลูโลสได้ และสีไดเร็คทุกชนิดจะสามารถดูดซึมได้ดีขึ้นถ้าหากมีการเติมเกลือลงในถังย้อม เนื่องจากสีย้อมจะแสดงประจุลบ การย้อมติดที่ดีของสีไดเร็คจะเกิดขึ้นได้ต้องมีการดูดซึมของสีเข้าไปภายในเส้นใยให้ได้มากที่สุด แต่เส้นใยก็จะแสดงประจุลบเมื่ออยู่ในน้ำ ในภาวะที่ไม่มีการเติมสารอื่นประจุลบของสีที่อยู่ใกล้กับผิวเส้นใยจะผลักให้สีโมเลกุลอื่นอยู่ห่างออกไป ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ถึงแม้ว่าประจุบวกของโซเดียมไอออนจะดึงดูดประจุลบที่มีอยู่ แต่ความเข้มข้นของมันไม่พอเพียงที่จะทำให้เกิดภาวะเป็นกลางของพื้นผิวที่แสดงประจุลบอยู่ได้ ประจุลบของสีโมเลกุลอื่น ๆ จะเข้าใกล้เส้นใยได้ก็ต่อเมื่อมีการทำให้เกิดสภาวะเป็นกลางขึ้นเท่านั้น และภาวะนี้จะเกิดขึ้นได้ก็โดยการเติมอีเลคโทรไลต์ลงในถังย้อม ในการย้อมสีไดเร็คจึงต้องเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์หรือโซเดียมซัลเฟตในกระบวนการย้อม ดังภาพที่ 2.12

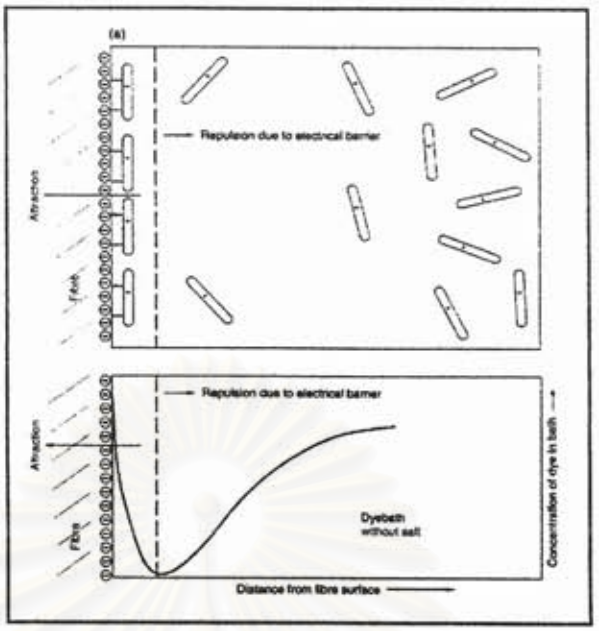
สีไดเร็คแต่ละตัวมีการตอบสนองต่ออิเล็คโทรไลต์แตกต่างกัน ทำให้สามารถจัดหมู่สีไดเร็คโดยใช้คุณสมบัติการย้อม เช่น ระดับการดูดซึม อุณหภูมิที่ดูดซึมได้สูงสุด การเคลื่อนตัว และอิทธิพลความเข้มข้นของอิเล็คโทรไลต์ ออกเป็น 3 หมู่ ดังต่อไปนี้

1) หมู่เอ (Class A)

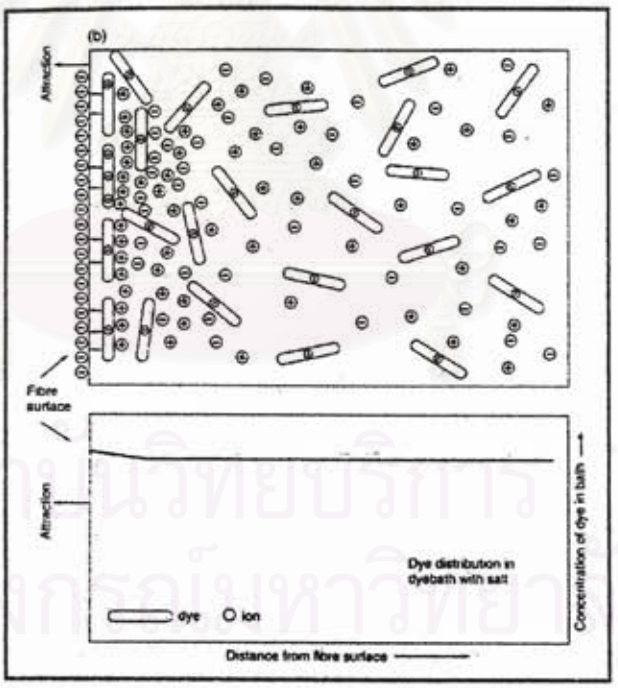
ได้แก่ตัวสีซึ่งมีความสม่ำเสมอในตัวเอง (self-levelling) มีการเคลื่อนตัวดี การย้อมระยะต้นอาจด่าง แต่เมื่อย้อมนานไปจนครบกำหนดเวลา สีจะสม่ำเสมอได้เอง

2) หมู่บี (Class B)

สีในหมู่นี้มีความสม่ำเสมอในตัวเองต่ำ ต้องใช้เกลือเป็นตัวควบคุมให้สีสม่ำเสมอ (Salt controlling) ถ้าตั้งต้นย้อมด่างจะแก้ไขให้สีสม่ำเสมอในภายหลังได้ยาก



ภาพที่ 2.11 เส้นใยและโมเลกุลของสีในน้ำย้อมในภาวะที่ไม่มีเกลือ (Ingamells, 1993)



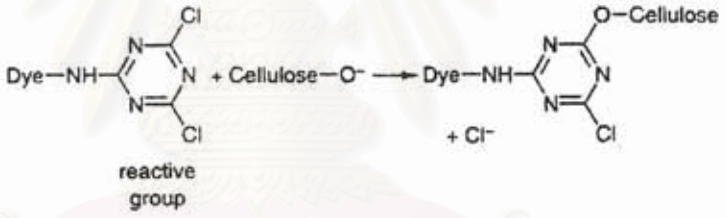
ภาพที่ 2.12 เส้นใยและโมเลกุลของสีในน้ำย้อมในภาวะที่มีการเติมเกลือลงไป (Ingamells, 1993)

3) หมู่ซี (Class C)

นอกจากจะมีความสม่ำเสมอในตัวเองต่ำแล้ว ยังเป็นตัวสีซึ่งมีปฏิกิริยาต่อเกลือไวด้วย ดังนั้นเพียงแต่จะควบคุมการเติมเกลืออย่างเดียวไม่พอ ต้องควบคุมอุณหภูมิการย้อมด้วย

2.5.3 การย้อมสีรีแอคทีฟ

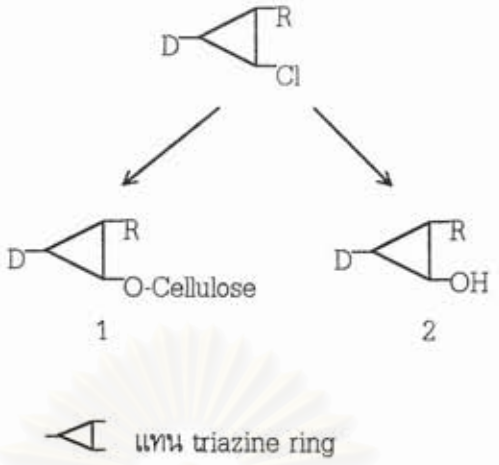
สีรีแอคทีฟ เป็นสีที่ภายในโมเลกุลของสีมีหมู่โครงสร้างทางเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสภายใต้ภาวะที่เป็นด่างและกลายเป็นส่วนหนึ่งของเส้นใย ชนิดของหมู่รีแอคทีฟในโมเลกุลของสีจะเป็นตัวกำหนดระดับของการเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาของสีรีแอคทีฟกับเซลลูโลสแสดงให้เห็นในภาพที่ 2.13 เซลลูโลสจะเข้าทำปฏิกิริยาในรูปของไอออนลบ ซึ่งจะเกิดขึ้นภายใต้ภาวะที่เป็นด่างเท่านั้น ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใยจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการเติมด่างในน้ำย้อม



ภาพที่ 2.13 ปฏิกิริยาของสีรีแอคทีฟกับเซลลูโลส (Ingamells, 1993)

กระบวนการที่สำคัญในการย้อมสีรีแอคทีฟ มีอยู่ 2 ขั้นตอน คือ หนึ่งการแพร่ของสีเข้าไปในเส้นใยเซลลูโลส และสองคือขั้นของการทำปฏิกิริยาระหว่างสีและเซลลูโลส ขั้นตอนแรกนั้นควบคุมโดยเวลาที่ใช้ในการย้อม อุณหภูมิในการย้อม และความเข้มข้นของเกลือ ส่วนขั้นตอนที่สองควบคุมโดยการปรับพีเอชให้อยู่ในภาวะที่เป็นด่าง

สีรีแอคทีฟที่มีคลอรีนเพียงอะตอมเดียว เมื่อละลายน้ำเพื่อย้อมจะเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบ ดังภาพที่ 2.14

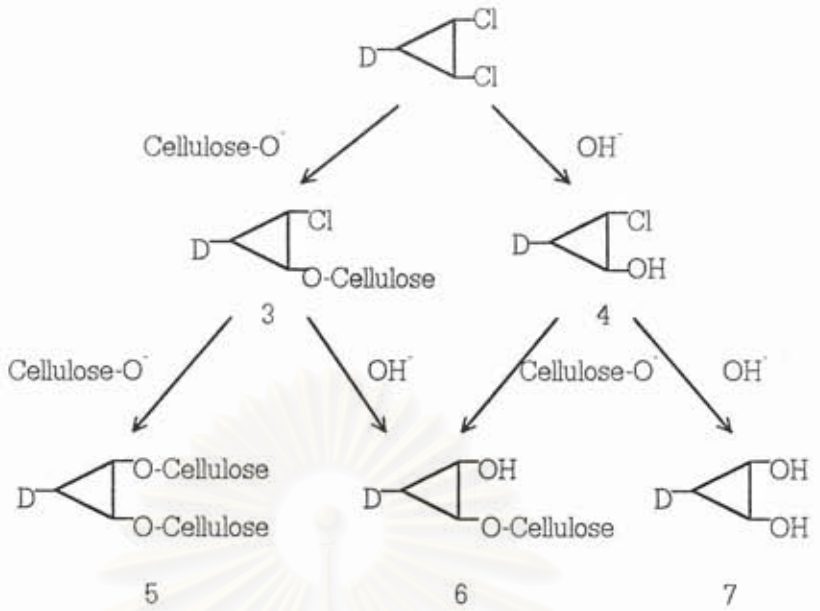


ภาพที่ 2.14 ปฏิกิริยาของสีรีแอคทีฟที่มีคลอรีนอะตอมเดียว (อัจฉราพร ไศละสูต, 2519)

ในโครงสร้างที่ 1 ทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส โครงสร้างที่ 2 ทำปฏิกิริยากับน้ำไม่สามารถจะควบคุมให้เกิดปฏิกิริยาชนิดใดชนิดหนึ่งโดยเฉพาะได้

ตัวสีซึ่งมีคลอรีน 2 อะตอมเกิดปฏิกิริยาได้หลายแบบ จะสรุปว่าเป็นแบบใดแบบหนึ่งไม่ได้ เมื่อสีติดเส้นใยจะเกิดสารประกอบดังโครงสร้างที่ 3 และ 4 ตัวสีที่ติดอยู่กับเส้นใยโดยคลอรีนอะตอมแรกถูกแทนที่จะทนต่อขบวนการที่ใช้น้ำ ปฏิกิริยาของคลอรีนอะตอมที่สองจะมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยในขบวนการย้อมระดับต่อไป ถ้าย้อมเย็นมีด่างอ่อน สีจะมีโครงสร้างตามแบบที่ 3 ด่างแก่ขึ้นก็จะเป็นดังโครงสร้างที่ 5 มีครอสลิ้งเพิ่มขึ้น และถ้าเป็นด่างแก่ที่อุณหภูม 100 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลส์ ได้สารประกอบดังโครงสร้างที่ 6 เซลลูโลสที่เชื่อมโยงเพียงบอนด์เดียวจะทนต่อการไฮโดรไลส์ของด่างได้ดี และทนต่อกรดได้บ้างในบางกรณี

การย้อมสีรีแอคทีฟต้องย้อมให้สีติดเส้นใยได้มากที่สุด และไฮโดรไลส์ในน้ำน้อยที่สุด ทั้งนี้ไม่เพียงแต่จะเป็นการประหยัดเท่านั้น แต่ยังเป็นการมิให้เส้นใยดูดติดตัวสีที่ไฮโดรไลส์แล้วเข้าไปภายในเส้นใย มิฉะนั้นสีรีแอคทีฟนี้ก็จะมีคุณสมบัติเหมือนกับสีไดเร็ค ไม่คงทนต่อขบวนการใช้น้ำ ต้องซักเอาออกให้หมดจึงจะทำให้สีไม่ตกเวลาใช้ ถ้าให้สีไฮโดรไลส์มาก การซักในขั้นสุดท้ายก็ทำให้สะอาดหมดจดได้ยาก ภาวะการย้อมจึงต้องปรับสภาพให้สีสามารถทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้มากที่สุด



ภาพที่ 2.15 ปฏิกิริยาของสีรีแอคทีฟที่มีคลอรีน 2 อะตอม (อัจฉราพร ไศละสูต, 2519)

พอจะกล่าวได้ว่า ระดับการทำปฏิกิริยาของสีขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการประกอบเข้าด้วยกัน ประการที่หนึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าคงที่ของปฏิกิริยาของสีกับเซลลูโลสและน้ำ ซึ่งความจริงมีความแตกต่างกันน้อยมาก ประการที่สองคือ ความเข้มสัมพัทธ์ของหมู่เคมีที่ไอออนไนส์ได้ภายในและภายนอกเส้นใย และสุดท้ายก็คือ ความเข้มสัมพัทธ์ระหว่างตัวสีรีแอคทีฟภายในและภายนอกของเส้นใย

การสิ้นสุดกระบวนการย้อมสีรีแอคทีฟ หมายความว่าสีรีแอคทีฟที่ใช้ทั้งหมดนั้นได้ทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสหรือน้ำหมดแล้ว ถ้าหากว่าในน้ำย้อมยังคงมีสีซึ่งคงสภาพเดิมเหลืออยู่ก็หมายความว่า ส่วนสีที่ใช้นั้นมากเกินไป เป็นการเสียเปล่า อีกประการหนึ่ง เมื่อตัวสีทำปฏิกิริยาหมดแล้ว ถึงจะย้อมต่อไปก็เป็นการเปลืองเวลา เนื่องจากสีรีแอคทีฟไม่เหมือนกับสีไดเร็คที่ยิ่งย้อมนานก็จะทำให้สีเคลื่อนตัวในเส้นใยมากขึ้นทำให้สีสม่ำเสมอมากขึ้น สีรีแอคทีฟนั้นเมื่อทำปฏิกิริยากับเส้นใยแล้วจะไม่เคลื่อนตัวอีก

2.6 การใช้วัสดุธรรมชาติในการบำบัดโลหะหนัก

การศึกษาเพื่อนำวัสดุธรรมชาติที่เป็นของเหลือทิ้งหรือผลพลอยได้จากการทำการเกษตรมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนได้มีมานานแล้ว ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในราคาถูกหรือแทบจะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเลย อีกทั้งเป็นการนำของเสียที่อาจต้องกำจัดทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ วัสดุที่ถูกนำมาศึกษาและพบว่าสามารถใช้เป็นสารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียอย่างได้ผลมีอยู่มากมายหลายชนิด ได้แก่

- เปลือกไม้ (Randall and Garrett, 1974; Kumar and Dara, 1980, 1982)
- เปลือกถั่ว (Randall, Hautala and Mcdonald, 1978; Nakajima and Sakaguchi, 1990; Said, Shalmor and Egila, 1993)
- เปลือกหัวหอม (Kumar and Dara, 1981, 1982)
- ฟางข้าว (Larsen and Schierup, 1981)
- ชานอ้อย (Kumar and Dara, 1982; Sharma and Forster, 1994)
- ขี้เลื่อย (Bhargava, Gupta and Varshney, 1987; Sharma and Forster, 1994)
- กากใบชา (Tan and Abd, 1988)
- เปลือกเมล็ดแตงโม (Okieimen and Ongenkpa, 1989)
- กากแอปเปิ้ล (Maranon and Sastre, 1991, 1992)
- กากหัวบีท (Sharma and Forster, 1994; Ozer, Tumen and Bildik, 1997)
- แกลบ (Said, Shalmor and Egila, 1993; Munaf and Zein, 1997)
- ซังข้าวโพด (Sharma and Forster, 1994; Bosinco et al., 1996)
- กากปาล์ม (Tan, Lee and Ng, 1996) เป็นต้น

2.6.1 การศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา

วินัย สมบูรณ์ และคณะ (2533) ศึกษาการใช้ถ่านหิน ถ่านไม้ ขี้เลื่อย และเศษพืชแห้ง ซึ่งประกอบด้วย ผักตบชวา เปลือกถั่วลิสง แกลบ ฟางข้าว ก้านบัว ต้นกล้วย

I19265354

ชานอ้อย ต้นจูด ใบธูปฤษี และใบสับปะรด ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะชนิดเดียวปนอยู่ ซึ่งโลหะที่ศึกษาประกอบด้วย โครเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี และแคดเมียม พบว่าวัสดุทุกชนิดสามารถบำบัดโลหะหนักได้ทุกตัว แต่โลหะแคดเมียมกำจัดได้น้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่เตรียมขึ้นให้มีความเข้มข้นของโลหะต่าง ๆ ใกล้เคียงกับน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ โดยใช้ถ่านไม้ เปลือกถั่วลิสง และผักตบชวา เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่าถ่านไม้สามารถบำบัดโลหะโครเมียม ทองแดง และสังกะสีได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพ 100, 100 และ 58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และสำหรับนิคเกิลพบว่าผักตบชวาบำบัดได้ดีที่สุด คือ 78 เปอร์เซ็นต์

ขจรศักดิ์ โกศลมนตรี (2538) ศึกษาการใช้ผักตบชวาในการนำโลหะนิกเกิลที่อยู่ในน้ำล้างชิ้นงานจากกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่ จากการทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนนิกเกิลไอออนด้วยผักตบชวาที่ผ่านการแลกเปลี่ยนนิกเกิลไอออนมาแล้ว และผักตบชวาใหม่ พบว่าถ้าน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลที่ใช้มีความเข้มข้น 10 มก./ล. จะเห็นว่าการทดลองซ้ำครั้งที่สองจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนนิกเกิลที่ต่ำกว่าครั้งแรก ถ้าน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลที่ใช้มีความเข้มข้น 100 มก./ล. จะไม่เห็นความแตกต่างของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนนิกเกิลในแต่ละครั้งที่บริการซ้ำ

จากการทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาด้วยอัตราเร็วในการไหล 3, 6, 9 ชั้นเรซินต่อชั่วโมงของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลเข้มข้น 100 และ 250 มก./ล. พบว่า ไม่มีผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวา และการฟื้นอำนาจผักตบชวาที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล 100 มก./ล. จะมีประสิทธิภาพในการนำกลับมากที่สุด 83 เปอร์เซ็นต์ ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.75 นอร์มัล ส่วนการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล 250 มก./ล. จะมีประสิทธิภาพในการฟื้นอำนาจมากที่สุด 78 เปอร์เซ็นต์ ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ที่อัตราเร็ว 3 ชั้นเรซินต่อชั่วโมง และจากผลการทดลองกับน้ำเสียจริง พบว่า ผักตบชวาที่แลกเปลี่ยนไอออนได้มากกว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียจริงที่มากกว่า กลับมีเปอร์เซ็นต์การนำกลับนิกเกิลมาใช้ใหม่ได้น้อยกว่า เมื่อฟื้นอำนาจด้วยกรดไฮโดรคลอริคเข้มข้น 0.5 นอร์มัล

Chawakitchareon, Pulkum และ Aitthipornkowit (1995) ศึกษาความสามารถทั้งหมดในการกำจัดโลหะหนักของเรซินและเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย โดยใช้ขบวนการปรับสภาพทางเคมี 4 ชนิด คือ ชนิดที่ปรับสภาพด้วยกรด ชนิดคาร์บอกซีเมทีล ชนิดซัลโฟเอทีล และชนิดครอสลิ้ง-แซนเทต ทำการทดลองกับโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ด้วยการทดลองแบบคอลัมน์ โดยใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะหนัก 5, 10, 20 และ50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินที่ทำจากผักตบชวาชนิดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด ชนิดคาร์บอกซีเมทีล ชนิดซัลโฟเอทีล และชนิดครอสลิ้ง-แซนเทต มีค่าอยู่ในช่วง 0.686 – 0.809, 0.330 – 0.496, 0.233 – 0.503 และ 0.279 – 0.595 meq/g ตามลำดับ ส่วนความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินที่ทำจากชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด และชนิดคาร์บอกซีเมทีล อยู่ในช่วง 0.065 – 0.086 และ 0.052 – 0.056 meq/g ตามลำดับ โดยที่เรซินชนิดที่ปรับสภาพด้วยกรด และชนิดคาร์บอกซีเมทีล มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงสูงกว่าสังกะสี และนิกเกิล ส่วนเรซินชนิดซัลโฟเอทีล และชนิดครอสลิ้ง-แซนเทต มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับสังกะสี สูงกว่านิกเกิล และทองแดง

จากการศึกษาเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของโลหะหนักที่แตกต่างกัน พบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียลดลง ส่วนการรีเจนเนอเรชันสามารถทำได้โดยใช้สารรีเจนเนอแรนต์เข้มข้น 0.5 นอร์มัล ปริมาตร 2 – 3 ปริมาตรเรซิน

Krasinsri (1996) ศึกษาการกำจัดไอออนของโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดลิกโนเซลลูโลสิคฟอร์มัลดีไฮด์ที่ทำจากผักตบชวา โดยทำการทดลองปรับสภาพผักตบชวาด้วยสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้น 2, 5, 10, 20, 30 และ 37 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการปรับสภาพโครงสร้างผักตบชวาด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5 เปอร์เซ็นต์ ให้ประสิทธิภาพดีในการกำจัดไอออนของโลหะหนัก ผลการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า ความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 1.0962, 0.6983 และ 1.0375 meq/g สำหรับไอออนของทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ตามลำดับ และยังพบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนของทองแดงมีค่าสูงกว่าไอออนของนิกเกิลและสังกะสี

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองรีเจนเนอเรชันคอลัมน์ที่หมดประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนโดยการใช้กรดไฮโดรคลอริคเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ประมาณ 1 ปริมาตรเรซิน พบว่าสามารถนำคอลัมน์กลับมาใช้ได้ใหม่ โดยไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และยังพบอีกว่าเมื่อลดความเข้มข้นของไอออนของโลหะหนักในสารละลายลง จะมีผลทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น สำหรับการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี พบว่าคอลัมน์ชนิดนี้สามารถกำจัดไอออนของโลหะได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

2.6.2 การใช้สีย้อมในการเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน

Suemitsu et al. (1986) ศึกษาการใช้แกลบซึ่งปรับสภาพด้วยสีย้อมในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย สีย้อมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ Procion Red H-3B และ Procion Yellow H-5G โดยทำการทดลองกับโลหะทองแดง ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม โครเมียม ปรอท และนิกเกิล จากการศึกษาความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยการทดลองแบบทีละเท พบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของแกลบที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพอยู่ในช่วง 3.58 – 8.09 mg/g แกลบที่ปรับสภาพด้วยสีย้อม Procion Red และ Procion Yellow มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ในช่วง 5.95 – 13.00 และ 5.87 – 12.13 mg/g ตามลำดับ โดยความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของแกลบทั้งที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ และที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด มีค่าสูงสุดเมื่อทำการทดลองกับตะกั่ว แคดเมียม และปรอท ตามลำดับ และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำเมื่อทดลองกับโครเมียม

และได้ศึกษาผลของพีเอชและอุณหภูมิต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับปรอท พบว่าจะมีค่าสูงที่พีเอชมากกว่า 4 ส่วนอุณหภูมิไม่มีผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองแบบคอลัมน์ โดยใช้สารละลายปรอทความเข้มข้น 150 ppm กับแกลบทั้ง 3 ชนิด พบว่า ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายที่ผ่านคอลัมน์ของแกลบที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ และแกลบที่ปรับสภาพด้วยสี Procion Red และ Procion Yellow มีค่า 1.25, 0.06 และ 0.05 ppm ตามลำดับ และเมื่อใช้สารละลายที่ความเข้มข้น 500 ppm พบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะสูงสุดที่ 50 – 400

มิลลิลิตรแรก จากนั้นจะมีค่าต่ำลง ส่วนการศึกษาเปรียบเทียบลำดับในการแลกเปลี่ยนไอออนของแกลบที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสี Procion Red ด้วยสารละลายของโลหะที่มีความเข้มข้น 75 ppm พบว่าตะกั่วมีค่าสูงกว่าทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล ตามลำดับ

Shukla และ Sakhardande (1990) ศึกษาการกำจัดไอออนของทองแดงโดยใช้เส้นใยฝ้าย เยื่อไผ่ เส้นใยปอกระเจา และขี้เลื่อย ที่ปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31, Reactive Orange 13 และ Reactive Yellow 18 ทำการทดลองแบบทีละเทกับสารละลายทองแดง 4 ชนิด คือ คอปเปอร์ไนเตรท คอปเปอร์ซัลเฟต คอปเปอร์คลอไรด์ และคอปเปอร์อะซิเตรท จากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเส้นใยฝ้าย เยื่อไผ่ เส้นใยปอกระเจา และขี้เลื่อย ที่ไม่ได้ปรับสภาพอยู่ในช่วง 19.50 – 25.75, 31.75 – 42.30, 27.50 – 34.30 และ 45.25 – 46.80 mg/g ตามลำดับ และเส้นใยฝ้าย เยื่อไผ่ เส้นใยปอกระเจา และขี้เลื่อย ที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมมีค่าอยู่ในช่วง 22.50 – 53.80, 43.80 – 61.50, 45.00 – 62.50 และ 52.30 – 62.30 mg/g ตามลำดับ

Shukla และ Sakhardande (1991) ศึกษาการกำจัดไอออนของโลหะโดยใช้เส้นใยฝ้าย เยื่อไผ่ เส้นใยปอกระเจา และขี้เลื่อย ที่ปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31, Reactive Orange 13 และ Reactive Yellow 18 ทำการทดลองแบบทีละเทกับไอออนของโลหะ 4 ชนิด คือ เฟอร์รัส เฟอร์ริก ตะกั่ว และ ปรอท จากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเส้นใยฝ้าย เยื่อไผ่ เส้นใยปอกระเจา และขี้เลื่อย ที่ไม่ได้ปรับสภาพอยู่ในช่วง 2.25 – 14.65, 2.50 – 18.18, 3.25 – 18.75 และ 2.80 – 18.18 mg/g ตามลำดับ และเส้นใยฝ้าย เยื่อไผ่ เส้นใยปอกระเจา และขี้เลื่อย ที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมมีค่าอยู่ในช่วง 6.80 – 25.88, 11.90 – 26.93, 15.25 – 28.30 และ 19.85 – 30.20 mg/g ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะแต่ละชนิด พบว่าเฟอร์ริกมีค่าสูงกว่าปรอท ตะกั่ว และเฟอร์รัส ตามลำดับ

Shukla และ Sakhardande (1992) ศึกษาการกำจัดไอออนของโลหะโดยใช้เยื่อไผ่ เส้นใยปอกระเจา และขี้เลื่อย ที่ปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Orange 13 ทำการทดลองแบบคอลัมน์ กับทองแดง ตะกั่ว ปรอท เฟอร์รัส เฟอร์ริก สังกะสี และนิกเกิล จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อไผ่ เส้นใยปอกระเจา และขี้เลื่อยที่

ไม่ได้ปรับสภาพอยู่ในช่วง 17.3 - 35.2, 17.5 - 38.8 และ 17.3 - 32.7 mg/g ตามลำดับ และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเยื่อไผ่ เส้นใยปอกระเจา และขี้เลื่อย ที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมอยู่ในช่วง 28.8 - 76.9, 28.2 - 69.0 และ 34.6 - 97.5 mg/g ตามลำดับ

Low, Lee และ Lee (1993) ศึกษาการกำจัดทองแดงโดยใช้เส้นใยปาล์มน้ำมันที่ปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Yellow 2 ด้วยการทดลองแบบทีละเท จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ และเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม มีค่า 1.62 ± 0.30 และ 6.67 ± 0.20 mg/g ตามลำดับ และจากการศึกษาผลของพีเอชต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าที่พีเอชมากกว่า 4 จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดลง จากการศึกษาเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก ในทุกความเข้มข้นเริ่มต้นที่ทำการทดลอง และเมื่อศึกษาเปรียบเทียบลำดับในการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโลหะแต่ละชนิดพบว่า ตะกั่วมีค่าสูงกว่าทองแดง โครเมียม และนิกเกิล ตามลำดับ

Low, Lee และ Wong (1995) ศึกษาผลของการปรับสภาพกาบมะพร้าวด้วยสีย้อมที่มีต่อความสามารถในการดูดซับทองแดง โดยทำการทดลองกับสี 3 ตัว คือ Reactive Yellow 2, Acid Blue 29 และ Acid Blue 25 จากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการดูดซับทองแดงของกาบมะพร้าวที่ไม่ได้ปรับสภาพมีค่า 11 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกาบมะพร้าวที่ปรับสภาพด้วยสี Acid Blue 25 และ Acid Blue 29 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ และกาบมะพร้าวที่ปรับสภาพด้วยสี Reactive Yellow 2 มีค่าสูงที่สุด คือ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยที่เมื่อความเข้มข้นของทองแดงที่ละลายอยู่ในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงของกาบมะพร้าวทั้งที่ไม่ได้ปรับสภาพ และกาบมะพร้าวที่ปรับสภาพด้วยสีทั้ง 3 ชนิด จะมีค่าลดลง

ส่วนการศึกษาอิทธิพลของ pH ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง พบว่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4 - 6 นอกจากนี้ยังได้

ศึกษาผลของไอออนของโลหะชนิดอื่นต่อการดูดซับไอออนของทองแดง ของกาบมะพร้าวทั้ง 4 ชนิด พบว่าลำดับในการดูดซับไอออนของกาบมะพร้าว คือ Cu>Cd>Mn>Ni และยังได้ศึกษาผลของสารคีเลตต่อการดูดซับไอออนของทองแดง พบว่า กรดซาลิไซลิกไม่มีผลต่อการดูดซับทองแดงทั้ง 4 ชนิดในทุกอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลอง ส่วนอีดีทีเอมีส่วนในการขัดขวางการดูดซับทองแดง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

3.1.1 โลหะหนัก

- คอปเปอร์ (II) ซัลเฟต (Copper (II) sulphate; $CuSO_4 5H_2O$)
- นิกเกิล (II) ซัลเฟต (Nickel (II) sulphate; $NiSO_4.6H_2O$)
- ซิงค์ (II) ซัลเฟต (Zinc (II) sulphate; $ZnSO_4.7H_2O$)

3.1.2 สีย้อมผ้า

- Reactive Red 31 (Procion Red P-8B)
- Direct Blue 71 (Sirius Blue S-BRR)

3.1.3 สารเคมีอื่นๆ

- ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Trisodium phosphate; Na_3PO_4)
- โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulphate; Na_2SO_4)
- Nonionic detergent (NP-9)

3.2 เครื่องมือ

- เครื่องบด ของ Mulinex
- ตะแกรงร่อนคัดขนาด (Sieve) เบอร์ 60 และ 80 ของ Endecotts และเครื่องเขย่า (Sieve shaker) ของ Josef Deckelmann
- เครื่องกวนใบพัด

- เครื่องเขย่าขวด (Flask shaker) ของ Janke & Kunkel รุ่น HS500
- เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชั่นสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ของ Varian รุ่น Spectr AA-300

3.3 การเตรียมผักตบชวา

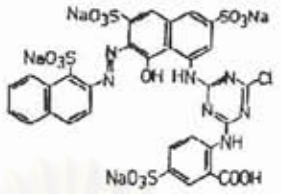
- นำผักตบชวามาตัดส่วนรากทิ้งแล้วล้างน้ำให้สะอาด ตากแดดประมาณ 2 – 3 วัน จนแห้งโดยหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อให้แห้งง่ายขึ้น
- จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำมาบดและร่อนคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงเบอร์ 60 และ 80 ซึ่งจะได้ผักตบชวาขนาด 180-250 μm
- สำหรับผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยสีย้อม ล้างด้วยน้ำที่กำจัดไอออนแล้วจนน้ำล้างที่ได้ใสไม่มีสี ปล่อยให้แห้ง แล้วนำไปอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4 การย้อมสี

3.4.1 การย้อมสีรีแอคทีฟ ใช้วิธีการของ Shukla และ Sakhardande (1990) ตามขั้นตอนดังนี้ คือ

- ละลายสีด้วยน้ำเย็นทีละน้อยจนสีละลายหมด แล้วจึงเจือจางในน้ำย้อมที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนได้ความเข้มข้นที่ต้องการ
- ใส่ผักตบชวาลงในน้ำย้อมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วนน้ำย้อมต่อผักตบชวา 20:1 ให้ความร้อนเป็นเวลา 10 นาที
- เติมโซเดียมซัลเฟต 40 กรัมต่อลิตร ให้ความร้อนต่อไปที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- จากนั้นเติมไตรโซเดียมฟอสเฟต 10 กรัมต่อลิตร ให้ความร้อนต่อไปอีก 45 นาที

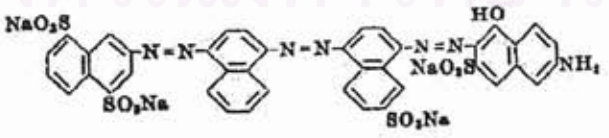
- กรองและล้างด้วยน้ำที่กำจัดไอออนแล้ว
- ต้มกับ nonionic detergent จนเดือดเป็นเวลา 20 นาที
- ล้างอีกครั้งด้วยน้ำให้ detergent ออกจนหมด ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของสี Reactive Red 31
(Shukla และ Sakhardande, 1990)

3.4.2 การย้อมสีไดเร็ค ใช้วิธีการตามเอกสารแนะนำของบริษัท ไดสตาร์ไทย จำกัด และคู่มือการย้อมสี (อัจฉราพร, 2527) โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- ละลายสีโดยการค่อย ๆ เติมน้ำเดือดทีละน้อย คนให้เข้ากันจนสีละลายหมด แล้วจึงเจือจางให้ได้ความเข้มข้นสีตามต้องการ
- เริ่มต้นย้อมโดยใส่ผักตบชวาลงในน้ำย้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนของน้ำย้อมต่อผักตบชวาเป็น 20: 1
- ให้ความร้อนโดยให้น้ำย้อมมีอุณหภูมิสูงขึ้น 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 98 องศาเซลเซียส
- เติมโซเดียมซัลเฟตในอัตราส่วน 10-20 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักวัสดุที่ใช้ย้อม ให้ความร้อนต่อไป 60 นาที
- นำมากรองและล้างด้วยน้ำที่กำจัดไอออนแล้วให้สีส่วนเกินที่ไม่ได้ติดผักตบชวาออกให้หมด จนน้ำที่ล้างใสไม่มีสี ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของสี Direct Blue 71
(The Society of Dyers and Colourists, 1971)

3.5 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ใช้น้ำเสียที่เตรียมใหม่ จากสารละลายของคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต นิกเกิล (II) ซัลเฟต และซิงค์ (II) ซัลเฟต ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณโลหะหนักที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์	สารเคมี	น้ำหนักสาร (mg/l)		
		10 ppm	25 ppm	50 ppm
ทองแดง	$CuSO_4 5H_2O$	39.29	98.24	196.47
นิกเกิล	$NiSO_4 6H_2O$	44.77	111.93	279.84
สังกะสี	$ZnSO_4 7H_2O$	43.99	109.96	219.93

3.6 การศึกษาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวา

3.6.1 การทดลองขั้นต้น

นำผักตบชวามาปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ที่ระดับความเข้มข้น 0.010, 0.100 และ 1.000 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากนั้นทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อมแต่ละชนิด ในแต่ละความเข้มข้นกับน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ที่ระดับความเข้มข้น 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 5.0 โดยทำการทดลองแบบทีละเท ใช้ผักตบชวา 0.5 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร ทำการทดลองในขวดพลาสติกที่มีฝาปิดขนาด 400 มิลลิลิตร เขย่าด้วย flask shaker ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมากรองและนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชั่นสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ คำนวณหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาจากความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียที่ลดลงในหน่วยมิลลิกรัมของโลหะหนักต่อกรัมของผักตบชวา และร้อยละของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียที่ลดลง

3.6.2 การทดลองอย่างละเอียด

ศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสี Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ที่ระดับความเข้มข้น 0.001, 0.002, 0.005, 0.010 และ 0.020 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองแบบทีละเทเช่นเดียวกับการทดลองเบื้องต้น วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ และคำนวณหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาเพื่อหาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสม

3.7 การศึกษาปริมาณผักตบชวาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน

ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะสังกะสีของผักตบชวาทั้ง 3 ชนิด คือ ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.002% Reactive Red 31 และผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.001% Direct Blue 71 ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.6 ทำการทดลองแบบทีละเทเช่นเดียวกับการทดลองเบื้องต้น ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 5 โดยใช้ปริมาณผักตบชวาแตกต่างกันคือ 0.5, 1.0 และ 2.0 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.8 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะสังกะสี ในน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี โดยใช้ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.002% Reactive Red 31 และผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.001% Direct Blue 71 ทำการทดลองแบบทีละเทเช่นเดียวกับการทดลองเบื้องต้น ใช้ผักตบชวาปริมาณ 1.0 และ 2.0 กรัม ใส่ลงในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร พีเอชเท่ากับ 5.0 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการทดลองที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์

3.9 การศึกษาเปรียบเทียบชนิดของวัสดุที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน

ศึกษาเปรียบเทียบผลของการปรับสภาพผักตบชวาด้วยสีย้อม Reactive Red 31 กับขี้เลื่อย 3 ชนิด คือ ไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยาง โดยใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 1 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของขี้เลื่อยทั้ง 3 ชนิด ทั้งที่ไม่ได้ปรับสภาพและที่ปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 กับน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ที่ระดับความเข้มข้น 10 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองแบบทีละเทโดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับการทดลองเบื้องต้น เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการทดลองของผักตบชวา ที่ความเข้มข้นของสีย้อมและความเข้มข้นของโลหะหนักเดียวกัน

3.10 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก

วิเคราะห์ปริมาณโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ก่อนและหลังการทดลองด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชั่น สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

3.11 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลการทดลองที่ได้ โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS 7.5

1) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของผักตบชวาก่อนและภายหลังการปรับสภาพ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกแบบทางเดียว (One-Way Analysis of Variance) และ ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อมในแต่ละความเข้มข้น ด้วยการทดสอบพหุคูณโดยใช้วิธีของ Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีของผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด ในน้ำเสียสังเคราะห์ กับ น้ำเสียจริง โดยใช้การทดสอบค่าเฉลี่ยด้วย Independent-Samples T Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 4

ผลการศึกษา และ อภิปรายผล

การทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ และผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด โดยทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ผลการทดลองที่ได้เป็นดังนี้

4.1 การหาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวา

4.1.1 การทดลองขั้นต้น

ทำการทดลองปรับสภาพผักตบชวาด้วยสีย้อม Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 โดยใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 3 ระดับ คือ 0.01, 0.10 และ 1.00 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำผักตบชวาที่ได้ภายหลังการปรับสภาพมาทดสอบหาความสามารถในการกำจัดโลหะหนักทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช เท่ากับ 5.0 โดยใช้ผักตบชวาหนัก 0.5 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และทำการทดลองแบบทีละเทที่ความเร็วของการกวน 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองที่ได้เป็นดังนี้ คือ

4.1.1.1 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และ 4.2 และภาพที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นได้ว่า ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโลหะทองแดงที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด กับผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ พบว่าการปรับสภาพผักตบชวาด้วยสี Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ทำให้ความสามารถในการกำจัดทองแดงของผักตบชวาเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาในแต่ละความเข้มข้นของสีย้อมที่ใช้ในการปรับสภาพ จะเห็นได้ว่า ทั้งที่ความเข้มข้นของสีย้อม 0.01, 0.10 และ 1.00 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการ

แลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงของผักตบชวามีค่าที่ใกล้เคียงกัน ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะสอดคล้องกันในทุกความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์

4.1.1.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลของผักตบชวามีค่าสูงขึ้นเมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อมย้อม Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 จากตารางที่ 4.3 และ4.4 และภาพที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นได้ว่า ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะนิกเกิล สูงกว่าผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบแต่ละความเข้มข้นของสีย้อมที่ใช้ในการปรับสภาพ พบว่า ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสี Reactive Red 31 และผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสี Direct Blue 71 ทั้งที่ความเข้มข้น 0.01, 0.10 และ 1.00 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับนิกเกิลใกล้เคียงกัน ทั้งที่ความเข้มข้นของนิกเกิล 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับผลการทดลองในโลหะทองแดง

4.1.1.3 ตารางที่ 4.5 และ 4.6 และ ภาพที่ 4.5 และ 4.6 แสดงความสามารถในการกำจัดโลหะสังกะสีของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณโลหะสังกะสีที่ถูกกำจัดด้วยผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพกับผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด จะเห็นว่า การปรับสภาพผักตบชวาด้วยสีย้อมทั้งสี Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีของผักตบชวาเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณสังกะสีที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาก่อนและหลังการปรับสภาพแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาในแต่ละความเข้มข้นของสีย้อมที่ใช้ในการปรับสภาพ พบว่า ทั้งที่ความเข้มข้นของสีย้อม 0.01, 0.10 และ 1.00 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการกำจัดสังกะสีของผักตบชวามีค่าใกล้เคียงกัน ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะสอดคล้องกัน ในทุกความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เช่นเดียวกับผลการทดลองในโลหะทองแดงและนิกเกิล

ตารางที่ 4.1 ปริมาณโลหะทองแดง ที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ผักตบชวา 0.5 g : น้ำเสีย 100 ml)

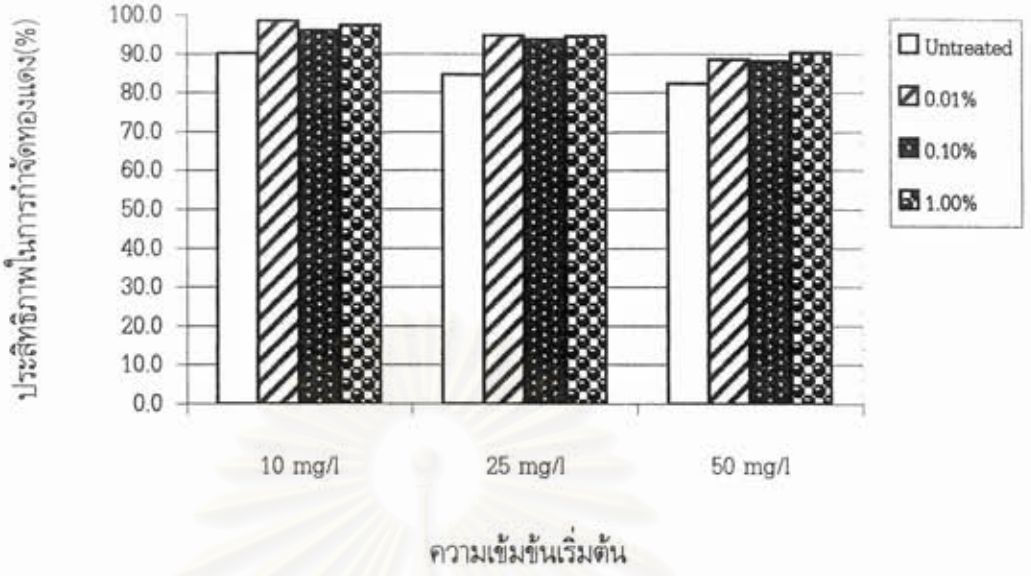
ความเข้มข้นของสีย้อม(%)	ปริมาณ Cu(II) ที่ถูกกำจัด (mg/0.5g ผักตบชวา)			ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l
0.00	0.950^{a}	2.231^{a}	4.483^{a}	90.20	84.67	82.33
0.01	1.039^{c}	2.502^{c}	4.819^{b}	98.65	94.95	88.50
0.10	1.013^{b}	2.477^{b}	4.803^{b}	96.17	93.98	88.21
1.00	1.027^{c}	2.497^{c}	4.925^{c}	97.58	94.77	90.45

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

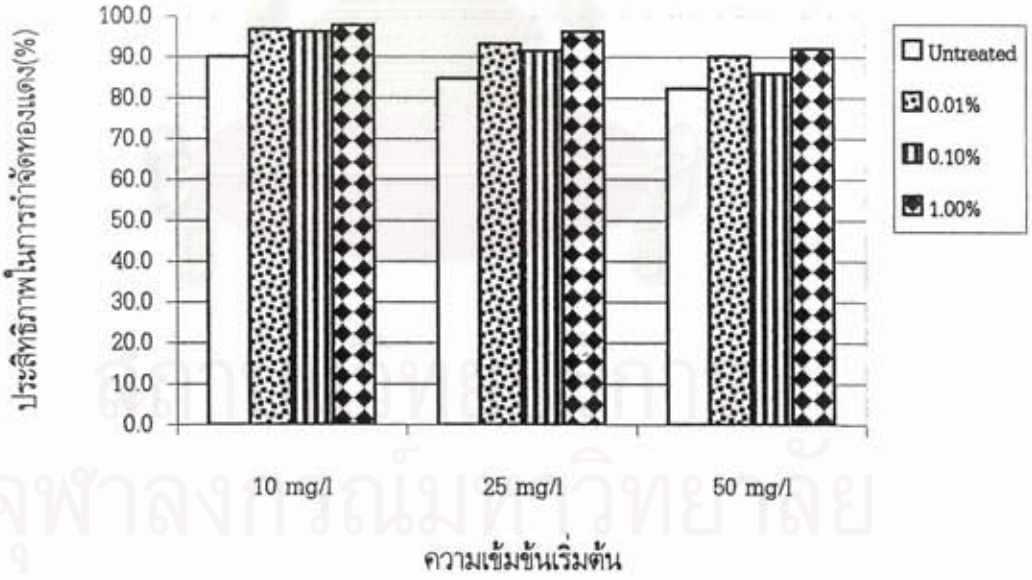
ตารางที่ 4.2 ปริมาณโลหะทองแดง ที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Ditect Blue 71 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (ผักตบชวา 0.5 g : น้ำเสีย 100 ml)

ความเข้มข้นของสีย้อม(%)	ปริมาณ Cu(II) ที่ถูกกำจัด (mg/0.5g ผักตบชวา)			ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l
0.00	0.950^{a}	2.231^{a}	4.483^{a}	90.20	84.76	82.33
0.01	1.027^{bc}	2.458^{c}	4.911^{c}	96.86	93.27	90.19
0.10	1.014^{b}	2.416^{b}	4.685^{b}	96.27	91.67	86.04
1.00	1.031^{c}	2.539^{d}	5.017^{d}	97.88	96.35	92.13

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31



ภาพที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโลหะนิกเกิล ที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ผักตบชวา 0.5 g : น้ำเสีย 100 ml)

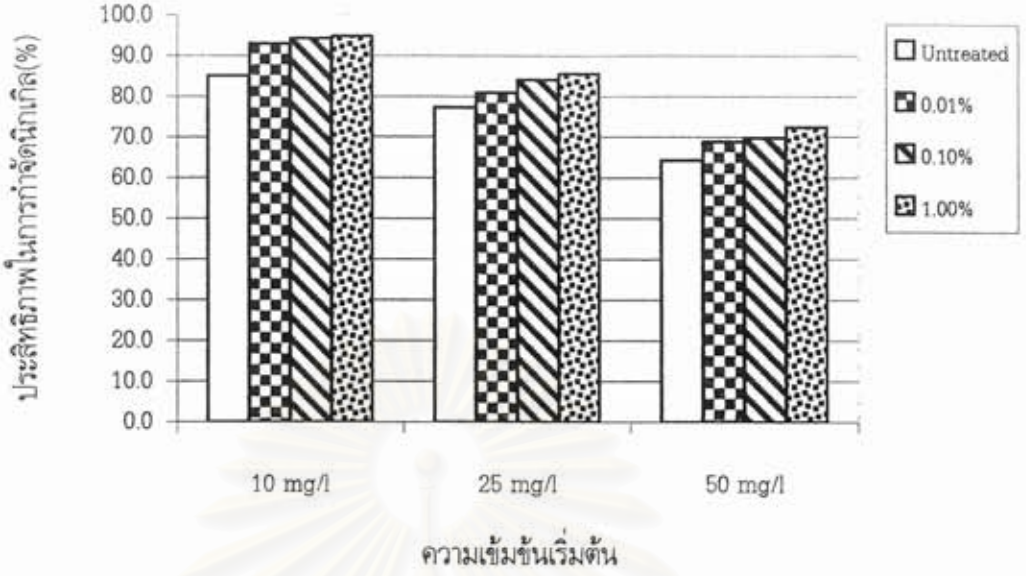
ความเข้มข้นของสีย้อม(%)	ปริมาณ Ni(II) ที่ถูกกำจัด (mg/0.5g ผักตบชวา)			ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l
0.00	0.971[a]	2.022[a]	3.453[a]	85.07	77.33	64.36
0.01	1.062[b]	2.120[b]	3.658[b]	93.06	81.07	68.91
0.10	1.077[c]	2.201[c]	3.746[c]	94.39	84.17	69.82
1.00	1.082[c]	2.242[d]	3.892[d]	94.87	85.72	72.55

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

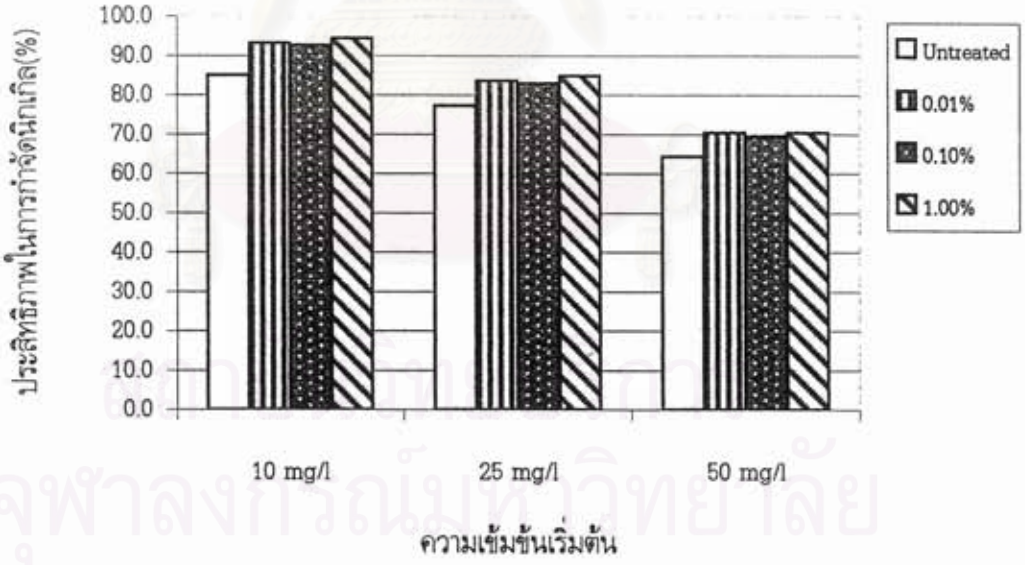
ตารางที่ 4.4 ปริมาณโลหะนิกเกิล ที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Ditect Blue 71 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ผักตบชวา 0.5 g : น้ำเสีย 100 ml)

ความเข้มข้นของสีย้อม(%)	ปริมาณ Ni(II) ที่ถูกกำจัด (mg/0.5g ผักตบชวา)			ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l
0.00	0.971[a]	2.022[a]	3.453[a]	85.07	77.33	64.36
0.01	1.063[c]	2.189[c]	3.780[c]	93.17	83.70	70.46
0.10	1.057[b]	2.171[b]	3.720[b]	92.62	83.01	69.34
1.00	1.078[d]	2.222[d]	3.778[c]	94.43	84.95	70.41

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31



ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ปริมาณโลหะสังกะสี ที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ผักตบชวา 0.5 g : น้ำเสีย 100 ml)

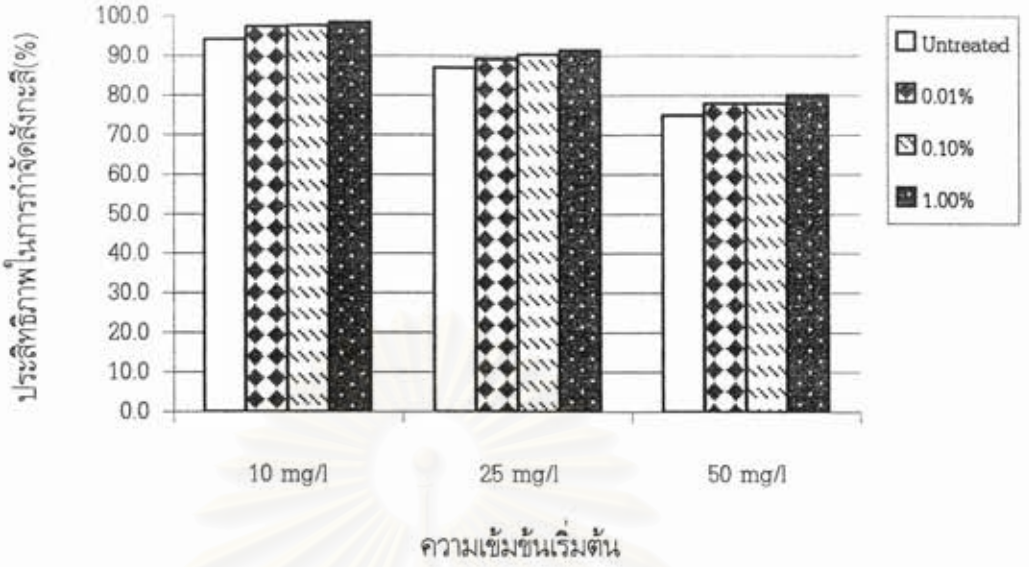
ความเข้มข้นของสีย้อม(%)	ปริมาณ Zn(II) ที่ถูกกำจัด (mg/0.5g ผักตบชวา)			ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l
0.00	1.029[a]	2.625[a]	4.200[a]	94.20	87.01	74.92
0.01	1.064[b]	2.691[b]	4.372[b]	97.39	89.20	77.99
0.10	1.068[b]	2.728[c]	4.368[b]	97.72	90.45	77.92
1.00	1.076[b]	2.759[d]	4.489[c]	98.49	91.47	80.08

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

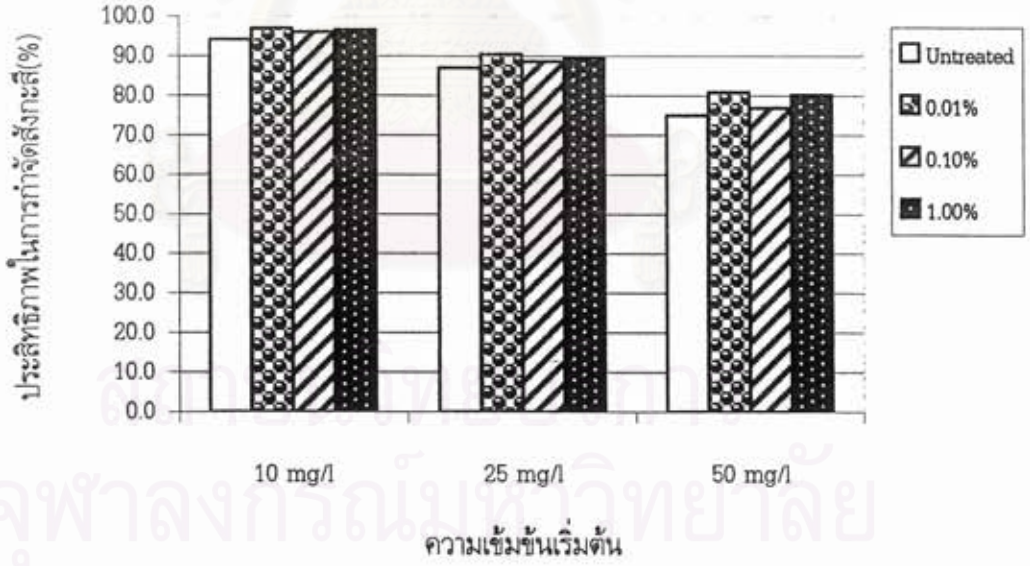
ตารางที่ 4.6 ปริมาณโลหะสังกะสี ที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Ditect Blue 71 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ผักตบชวา 0.5 g : น้ำเสีย 100 ml)

ความเข้มข้นของสีย้อม(%)	ปริมาณ Zn(II) ที่ถูกกำจัด (mg/0.5g ผักตบชวา)			ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l
0.00	1.029[a]	2.625[a]	4.200[a]	94.20	87.01	74.92
0.01	1.059[b]	2.732[d]	4.534[d]	96.99	90.55	80.88
0.10	1.049[b]	2.673[b]	4.305[b]	96.05	88.63	76.80
1.00	1.055[b]	2.704[c]	4.500[c]	96.59	89.63	80.28

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31



ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71

จากผลการทดลองที่ได้ในการทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ที่ระดับความเข้มข้น 0.01, 0.10 และ 1.00 เปอร์เซ็นต์ กับน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ที่ระดับความเข้มข้น 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี สูงกว่าผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมความเข้มข้น 0.01 เปอร์เซ็นต์ กับผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสีย้อม 0.10 เปอร์เซ็นต์ (10 เท่า) และ 1.00 เปอร์เซ็นต์ (100 เท่า) พบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวามีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสี Reactive Red 31 และผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสี Direct Blue 71 ทั้งนี้ ในการย้อมสีที่มีความเข้มข้นสูง โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 1.00 เปอร์เซ็นต์ จะมีสีเหลืออยู่ในน้ำย้อมภายหลังจากสิ้นสุดกระบวนการย้อมเป็นจำนวนมากและถูกทิ้งไปโดยไม่ได้ใช้ประโยชน์ และการล้างเอาสีออกภายหลังการย้อมทำได้ยาก เนื่องจากมีสีที่ถูกดูดซับไว้ภายในโครงสร้างโดยไม่ได้ย้อมติดกับผักตบชวา (สามารถลอกหลุดได้เมื่อล้างด้วยน้ำ) ทำให้ต้องสิ้นเปลืองเวลา และน้ำเป็นจำนวนมากเพื่อล้างสีส่วนนี้ออกให้หมด ด้วยเหตุนี้จึงได้เลือกทำการศึกษาโดยใช้สีย้อมในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำลง คือ 0.001, 0.002, 0.005, 0.010 และ 0.020 เปอร์เซ็นต์ ต่อไป

4.1.2 การทดลองอย่างละเอียด

จากการทดลองขั้นต้นทำให้ทราบว่า ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวาด้วยสีย้อม Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 น่าจะอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับ 0.01 เปอร์เซ็นต์ จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยใช้ความเข้มข้นของสีย้อมที่ระดับ 0.001, 0.002, 0.005 และ 0.02 เปอร์เซ็นต์ แล้วทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองแบบทีละเทเช่นเดียวกับการทดลองขั้นต้น ผลการทดลองที่ได้เป็นดังนี้คือ

4.1.2.1 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

1) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะทองแดง

ตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.7 แสดงความสามารถในการกำจัดโลหะทองแดงของผักตบชวาที่ผ่านการ ปรับสภาพด้วยสี Reactive Red 31 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ โดยจากผลการทดลองจะเห็นว่า ในทุกความเข้มของโลหะทองแดง ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสี Reactive Red 31 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดงมากกว่าผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ ปริมาณทองแดงที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาภายหลังการปรับสภาพมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวา เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะทองแดงมีค่าอยู่ที่ 0.002 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมที่สูงขึ้น ความสามารถในการกำจัดโลหะทองแดงของผักตบชวา มีความแตกต่างกันทางสถิติในบางค่า ซึ่งถือว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และความเข้มข้น 0.002 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในกลุ่มข้อมูลที่มีค่าสูงที่สุด

2) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะนิกเกิล

จากตารางที่ 4.8 และ ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะนิกเกิลของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสี Reactive Red 31 สามารถกำจัดโลหะนิกเกิลได้มากกว่าผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในทุกความเข้มข้นของโลหะนิกเกิล ความเข้มข้นของสีย้อมที่ 0.002 เปอร์เซ็นต์ น่าจะเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวาด้วยสี Reactive Red 31 เนื่องจากความสามารถในการกำจัดโลหะนิกเกิลของผักตบชวาที่ได้จากการใช้สีย้อมที่ความเข้มข้นที่สูงขึ้น มีค่าใกล้เคียงกัน

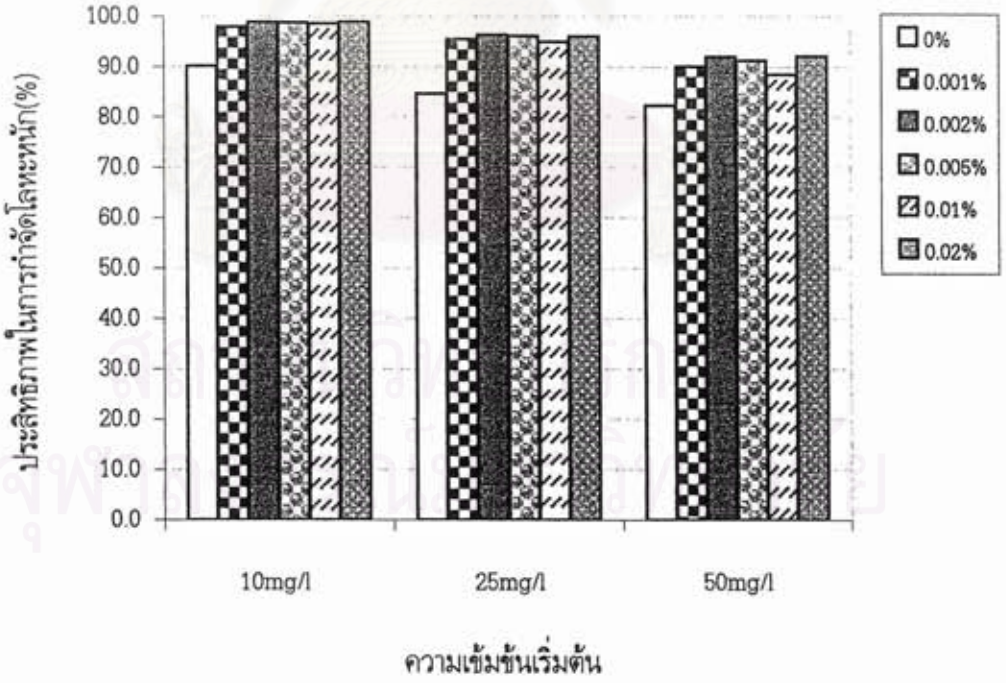
3) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะสังกะสี

ตารางที่ 4.9 และ ภาพที่ 4.9 แสดงความสามารถในการกำจัดโลหะสังกะสีของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสี Reactive Red 31 มีค่าสูงกว่าผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ ปริมาณสังกะสีที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพและภายหลังการปรับสภาพ

ตารางที่ 4.7 ปริมาณโลหะทองแดง ที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (ผักตบชวา 0.5 g:น้ำเสีย 100 ml)

ความเข้มข้นของสีย้อม (%)	ปริมาณCu(II)ที่ถูกกำจัด (mg/0.5g ผักตบชวา)			ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	10mg/l	25mg/l	50mg/l	10mg/l	25mg/l	50mg/l
0.000	0.950[a]	2.231[a]	4.483[a]	90.20	84.67	82.33
0.001	1.031[b]	2.517[c]	4.908[c]	97.93	95.53	90.13
0.002	1.042[c]	2.540[d]	5.011[d]	98.97	96.39	92.02
0.005	1.041[c]	2.534[d]	4.970[d]	98.85	96.16	91.28
0.010	1.039[c]	2.502[b]	4.819[b]	98.65	94.95	88.50
0.020	1.041[c]	2.532[d]	5.014[d]	98.89	96.07	92.08

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

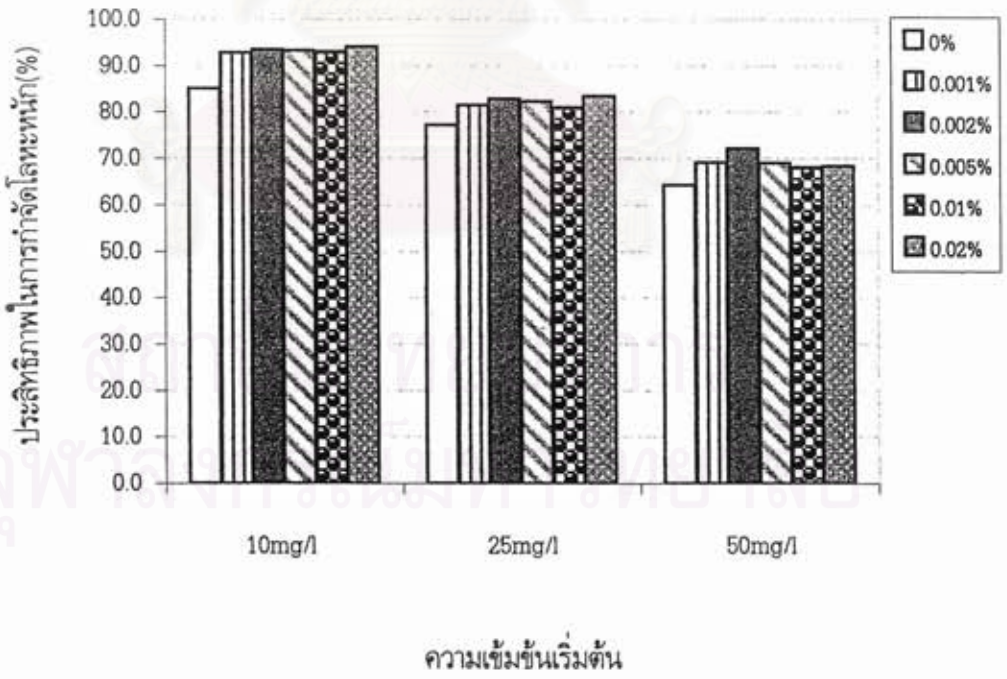


ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 4.8 ปริมาณโลหะนิกเกิล ที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (ผักตบชวา 0.5 g:น้ำเสีย 100 ml)

ความเข้มข้นของสีย้อม (%)	ปริมาณNi(II)ที่ถูกกำจัด (mg/0.5g ผักตบชวา)			ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	10mg/l	25mg/l	50mg/l	10mg/l	25mg/l	50mg/l
0.000	0.971^{a}	2.022^{a}	3.453^{a}	85.07	77.33	64.36
0.001	1.060^{b}	2.132^{b}	3.715^{d}	92.89	81.52	69.24
0.002	1.067^{c}	2.170^{d}	3.873^{e}	93.55	82.96	72.20
0.005	1.064^{bc}	2.153^{c}	3.706^{cd}	93.29	82.31	69.08
0.010	1.062^{bc}	2.120^{b}	3.658^{b}	93.06	81.07	68.19
0.020	1.074^{d}	2.183^{e}	3.670^{bc}	94.09	83.49	68.40

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

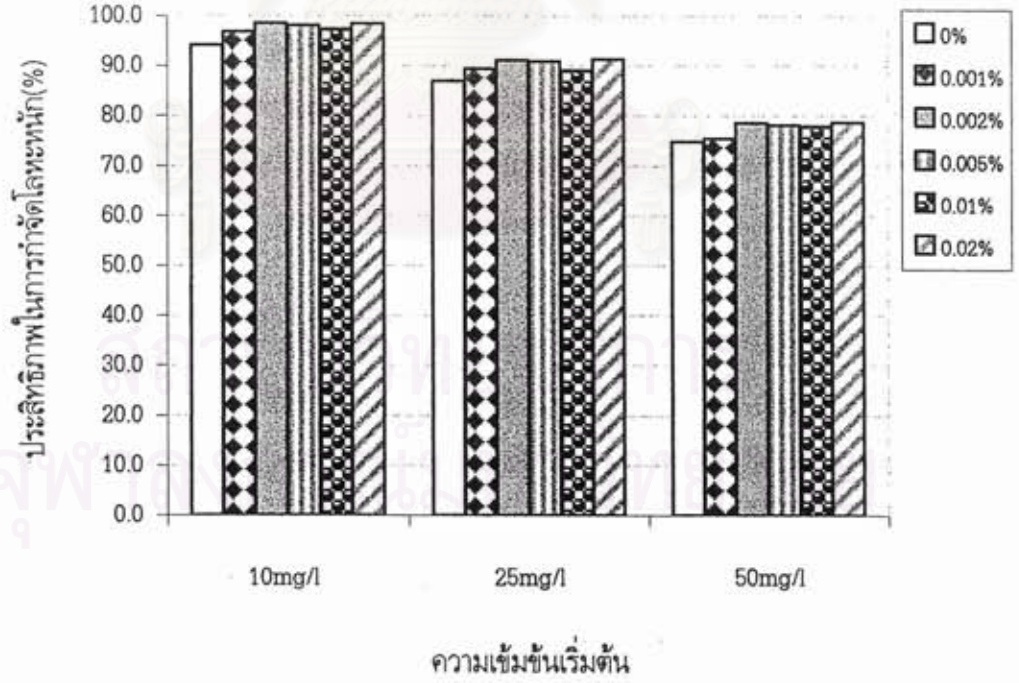


ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 4.9 ปริมาณโลหะสังกะสี ที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (ผักตบชวา 0.5 g:น้ำเสีย 100 ml)

ความเข้มข้นของสีย้อม (%)	ปริมาณZn(II)ที่ถูกกำจัด (mg/0.5g ผักตบชวา)			ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	10mg/l	25mg/l	50mg/l	10mg/l	25mg/l	50mg/l
0.000	1.029[a]	2.625[a]	4.200[a]	94.20	87.01	74.92
0.001	1.059[b]	2.700[b]	4.234[a]	96.91	89.52	75.53
0.002	1.077[e]	2.751[c]	4.408[bc]	98.61	91.20	78.64
0.005	1.073[d]	2.743[c]	4.385[bc]	98.18	90.95	78.22
0.010	1.064[c]	2.691[b]	4.372[b]	97.39	89.20	77.99
0.020	1.076[e]	2.757[c]	4.417[c]	98.49	91.39	78.80

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ทั้งที่ความเข้มข้นของสังกะสี 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพผักตบชวาด้วยสี Reactive Red 31 น่าจะเป็นที่ความเข้มข้น 0.002 เปอร์เซ็นต์ เพราะว่าความสามารถในการกำจัดสังกะสีของผักตบชวาที่ได้จากการปรับสภาพด้วยสีย้อมที่ความเข้มข้นที่สูงขึ้น มีความแตกต่างกันทางสถิติเพียงบางค่า และถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ความเข้มข้น 0.002 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่อยู่ในกลุ่มข้อมูลที่มีความสามารถในการกำจัดโลหะสังกะสีสูงที่สุด

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของสี Reactive Red 31 ที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวาเพื่อใช้ในการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี คือ ที่ความเข้มข้น 0.002 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการที่หมูรีแอคทีฟในโครงสร้างของสี Reactive Red 31 เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสและลิกนิน สร้างพันธะโควาเลนท์เชื่อมต่อเข้าเป็นส่วนหนึ่งในโครงสร้างของผักตบชวา และหมู่ SO_3Na ในโครงสร้างของสีย้อมทำหน้าที่เป็นหมู่แลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Suemitsu et al. (1986) ที่ได้ศึกษาโดยใช้แกลบกับสีรีแอคทีฟ 2 ชนิด คือ Procion Red H-3B และ Procion Yellow H-5G นอกจากนี้ยังมีการศึกษาโดยใช้เส้นใยฝ้าย เยื่อไผ่ ปอกระเจา และขี้เลื่อย โดย Shukla และ Sakhardande (1990; 1991; 1992) และการศึกษาโดยใช้กากปาล์มของ Low, Lee และ Lee (1993) ซึ่งพบว่าวัสดุเหล่านี้เมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยสีรีแอคทีฟ จะทำให้มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

4.1.2.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71 ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

1) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะทองแดง

จากตารางที่ 4.10 และ ภาพที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดงของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71 มีค่าสูงกว่าผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ ปริมาณทองแดงที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสี Direct Blue 71 มีค่ามากกว่าผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ทั้งที่ความเข้มข้นของทองแดง 10, 25

และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวาด้วยสี Direct Blue 71 น่าจะเป็นที่ความเข้มข้น 0.001 เปอร์เซ็นต์ เพราะว่าความสามารถในการกำจัดทองแดงของผักตบชวาที่ได้จากการปรับสภาพด้วยสีย้อมที่ความเข้มข้นที่สูงขึ้น มีความแตกกันทางสถิติเพียงบางค่า ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน และความเข้มข้น 0.001 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่อยู่ในกลุ่มข้อมูลที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง สูงที่สุด

2) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะนิกเกิล

ตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.11 แสดงความสามารถในการกำจัดโลหะนิกเกิลของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสี Direct Blue 71 ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ โดยจากผลการทดลองจะเห็นว่า ในทุกความเข้มข้นของโลหะนิกเกิล ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสี Direct Blue 71 มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพกับผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสี Direct Blue 71 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวาเพื่อใช้ในการกำจัดโลหะนิกเกิลน่าจะมีค่าอยู่ที่ 0.001 เปอร์เซ็นต์ เพราะเมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมที่สูงขึ้น ความสามารถในการกำจัดโลหะนิกเกิลของผักตบชวาในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งที่ระดับความเข้มข้น 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความแตกต่างกันทางสถิติเพียงบางค่า และถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ความเข้มข้น 0.001 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในกลุ่มข้อมูลที่มีค่าสูงที่สุด

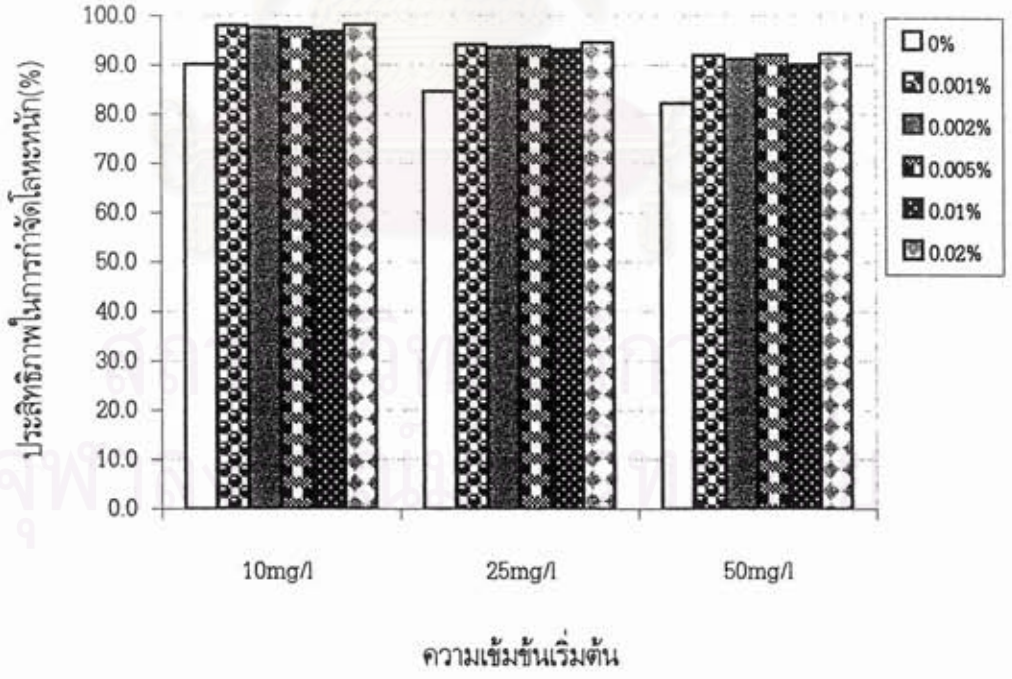
3) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะสังกะสี

ความสามารถในการกำจัดโลหะสังกะสีของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71 ที่ระดับความ เข้มข้นต่าง ๆ จากตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีของผักตบชวามีค่าสูงขึ้นเมื่อผ่านการปรับสภาพ ปริมาณสังกะสีที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสี Direct Blue 71 มีค่ามากกว่าผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในทุกความเข้มข้นของโลหะสังกะสี ความเข้มข้นของสีย้อมที่ 0.001 เปอร์เซ็นต์ น่าจะเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวาด้วยสี Direct Blue 71 เนื่องจากความสามารถในการกำจัดโลหะสังกะสีของผักตบชวาที่ได้จากการใช้สีย้อมที่ความเข้มข้นที่สูงขึ้น ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 10, 25 และ 50 ppm มีความแตกต่างกันทางสถิติในบางค่า และถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ความเข้มข้น 0.001 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในกลุ่มข้อมูลที่มีค่าสูงที่สุด

ตารางที่ 4.10 ปริมาณโลหะทองแดง ที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Ditect Blue 71 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (ผักตบชวา 0.5 g:น้ำเสีย 100 ml)

ความเข้มข้นของสีย้อม (%)	ปริมาณCu(II)ที่ถูกกำจัด (mg/0.5g ผักตบชวา)			ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	10mg/l	25mg/l	50mg/l	10mg/l	25mg/l	50mg/l
0.000	0.950[a]	2.231[a]	4.483[a]	90.20	84.67	82.33
0.001	1.033[c]	2.483[bc]	5.016[c]	98.12	94.23	92.12
0.002	1.029[bc]	2.468[bc]	4.975[bc]	97.73	93.65	91.36
0.005	1.028[bc]	2.472[bc]	5.021[c]	97.65	93.80	92.21
0.010	1.020[b]	2.458[b]	4.911[b]	96.86	93.27	90.19
0.020	1.035[c]	2.494[c]	5.029[c]	98.27	94.63	92.37

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

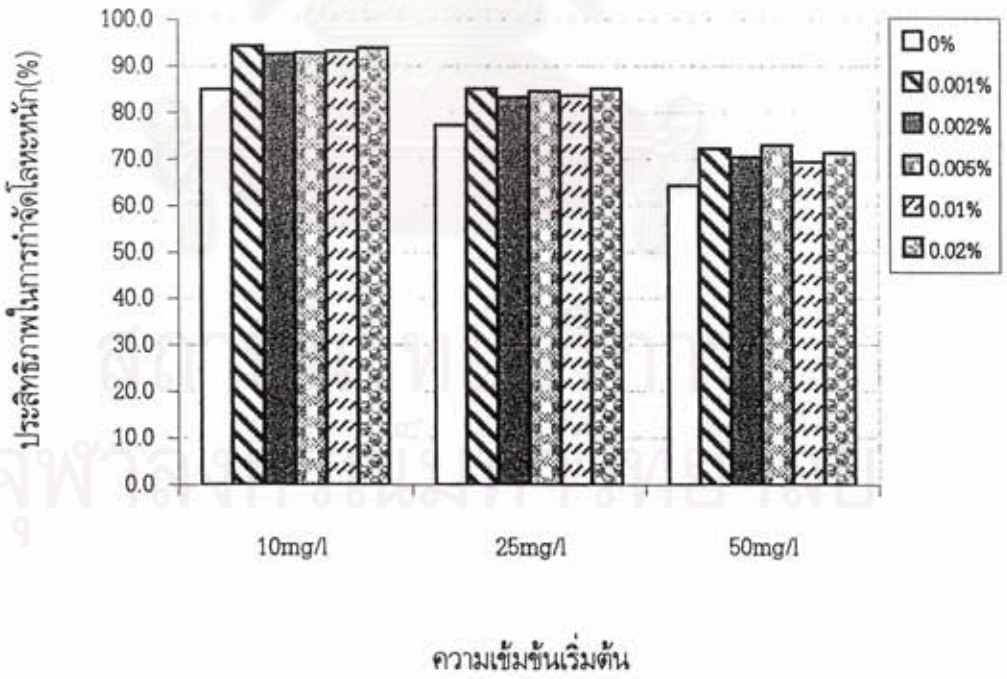


ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 4.11 ปริมาณโลหะนิกเกิลที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Ditect Blue 71 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (ผักตบชวา 0.5 g:น้ำเสีย 100 ml)

ความเข้มข้นของสีย้อม (%)	ปริมาณNi(II)ที่ถูกกำจัด (mg/0.5g ผักตบชวา)			ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	10mg/l	25mg/l	50mg/l	10mg/l	25mg/l	50mg/l
0.000	0.971[a]	2.022[a]	3.453[a]	85.07	77.33	64.36
0.001	1.077[e]	2.227[d]	3.875[e]	94.41	85.18	72.23
0.002	1.057[b]	2.180[b]	3.780[c]	92.63	83.36	70.46
0.005	1.060[bc]	2.212[c]	3.912[e]	92.89	84.60	72.91
0.010	1.063[c]	2.189[b]	3.720[b]	93.17	83.70	69.34
0.020	1.071[d]	2.228[d]	3.826[d]	93.86	85.21	71.32

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

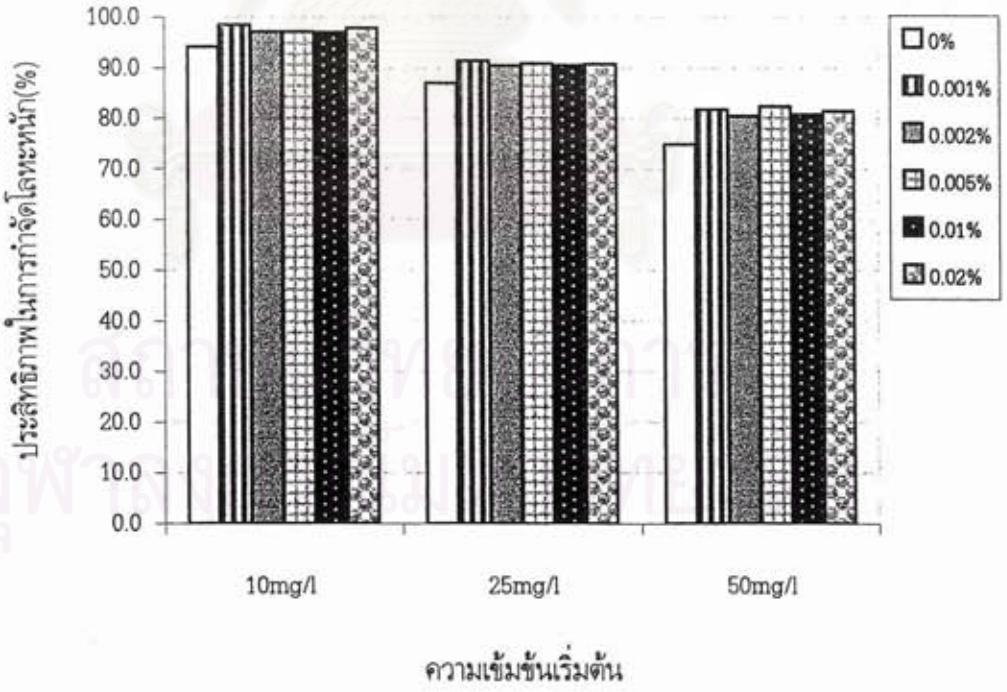


ภาพที่ 4.11 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 4.12 ปริมาณโลหะสังกะสี ที่ถูกกำจัดโดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Ditect Blue 71 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (ผักตบชวา 0.5 g:น้ำเสีย 100 ml)

ความเข้มข้นของสีย้อม (%)	ปริมาณZn(II)ที่ถูกกำจัด (mg/0.5g ผักตบชวา)			ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)		
	10mg/l	25mg/l	50mg/l	10mg/l	25mg/l	50mg/l
0.000	1.029[a]	2.625[a]	4.200[a]	94.20	87.01	74.92
0.001	1.076[c]	2.757[c]	4.584[c]	98.47	91.39	81.78
0.002	1.061[b]	2.729[b]	4.517[b]	97.13	90.47	80.58
0.005	1.062[b]	2.741[b]	4.620[d]	97.18	90.86	82.41
0.010	1.059[b]	2.731[b]	4.534[b]	96.99	90.55	80.88
0.020	1.069[bc]	2.741[b]	4.569[c]	97.84	90.84	81.52

หมายเหตุ: ตัวเลขในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวยกเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

การทดลองใช้สี Direct Blue 71 ในการปรับสภาพผักตบชวานั้น พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสีย้อมที่ใช้อยู่ที่ 0.001 เปอร์เซ็นต์ โดยที่สีไดเร็คมีหมู่ SO_3Na อยู่ในโครงสร้างเช่นเดียวกับสีรีแอคทีฟ จึงทำให้สามารถเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนให้กับผักตบชวาได้เช่นเดียวกัน จะแตกต่างกันแต่เพียงว่า สีไดเร็คไม่มีหมู่ฟังก์ชั่นที่จะทำปฏิกิริยาเข้าไปเชื่อมติดกับโครงสร้างของผักตบชวาได้ การย้อมติดของสีไดเร็คบนผักตบชวาเกิดจากแรงวัลเดอร์วาลและพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าแรงยึดเหนี่ยวของพันธะโควาเลนท์ของสีรีแอคทีฟมาก (Ingamells, 1993) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Low, Lee และ Wong (1995) ในการศึกษาผลของการปรับสภาพด้วยสีย้อมที่มีต่อการดูดซับทองแดงของกาบมะพร้าว โดยใช้สีแอซิดซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับสีไดเร็ค และพบว่าสามารถทำให้กาบมะพร้าวสามารถดูดซับทองแดงได้เพิ่มสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงผลของความเข้มข้นตั้งต้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวา จากตารางที่ 4.7 – 4.12 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งทองแดง นิกเกิล และสังกะสี เพิ่มสูงขึ้น ปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัดด้วยผักตบชวาทั้งชนิดที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ และชนิดที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิดจะมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความสามารถสูงสุดในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวามีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง แต่เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากภาพที่ 4.7 – 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะมีค่าที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผักตบชวากับน้ำเสียมีค่าคงที่ ในขณะที่มีปริมาณของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวากับโลหะทั้ง 3 ชนิด ที่ทำการศึกษา พบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงสูงกว่าสังกะสี และนิกเกิล ตามลำดับ

4.2 ผลของปริมาณผักตบชวาต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย

เมื่อศึกษาเปรียบเทียบการใช้ผักตบชวาในปริมาณต่าง ๆ กัน เพื่อกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผักตบชวาจาก 0.5

กรัม เป็น 1 และ 2 กรัม ผักตบชวาทั้งที่ไม่ได้ปรับสภาพ และที่ปรับสภาพด้วย 0.002% Reactive Red 31 และ 0.001% Direct Blue 71 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีเพิ่มขึ้น

ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีของผักตบชวาที่เพิ่มขึ้นภายหลังจากการปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด มีค่าต่างกันเมื่อใช้ผักตบชวาในปริมาณที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.13 คือ จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อใช้ผักตบชวาปริมาณ 0.5 กรัม

ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้ภายหลังจากการกำจัดด้วยผักตบชวาทั้ง 3 ชนิด ปริมาณ 0.5 กรัมต่อน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน แต่เมื่อใช้ปริมาณผักตบชวา 1 และ 2 กรัม จะทำให้น้ำเสียมีปริมาณสังกะสีต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 4.13 ผลการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (NWH) และผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.002% Reactive Red 31 (RRWH) และ0.001% Direct Blue 71(DBWH) ในปริมาณที่ต่างๆ กัน

ชนิดของผักตบชวา	น้ำหนักผักตบชวา(g)	ความเข้มข้นสุดท้าย(mg/l)	ปริมาณที่ถูกดูดซับ(g)	ประสิทธิภาพในการกำจัด(%)	ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น(%)
NWH	0.5	14.059	4.200	74.92	-
	1.0	4.755	4.495	90.43	-
	2.0	2.843	4.686	94.28	-
RRWH	0.5	11.976	4.408	78.64	4.97
	1.0	3.963	4.601	92.57	2.37
	2.0	1.207	4.849	97.57	3.48
DBWH	0.5	10.212	4.584	81.78	9.16
	1.0	3.150	4.655	93.66	3.57
	2.0	1.635	4.807	96.71	2.58

4.3 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี

จากการทดลองนำผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.002% Reactive Red 31 และผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.001% Direct Blue 71 มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบสังกะสีที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 50.2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ผักตบชวา 1 และ 2 กรัมต่อน้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากผลการทดลองในตารางที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าผักตบชวาทั้ง 2 ชนิดสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสีได้ดี น้ำเสียที่ได้ภายหลังจากการบำบัดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในน้ำเสียจริงกับผลการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ในตารางที่ 4.13 จะเห็นว่าการบำบัดน้ำเสียจริงมีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำกว่าการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในน้ำเสียจริงอาจมีโลหะชนิดอื่นปะปนมาด้วยจากกระบวนการชุบโลหะ ซึ่งโลหะเหล่านั้นก็จะถูกดูดซับโดยผักตบชวาได้เช่นเดียวกัน ทำให้ผักตบชวามีประสิทธิภาพในการบำบัดสังกะสีได้น้อยลง แต่จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ฉ (ตารางที่ ฉ-5-6) พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีของผักตบชวาทั้ง 2 ชนิด ในน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสี Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 สามารถนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.14 ผลการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสีความเข้มข้น 50 mg/l ด้วยผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.002% Reactive Red 31(RRWH) และ 0.001% Direct Blue 71(DBWH)

ชนิดของผักตบชวา	น้ำหนักผักตบชวา (g)	ความเข้มข้นหลังบำบัด (mg/l)	ประสิทธิภาพในการบำบัด (%)
RRWH	1.0	3.750	92.53
	2.0	2.117	95.78
DBWH	1.0	3.806	92.42
	2.0	2.211	95.59

4.4 ผลของชนิดของวัสดุที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนต่อประสิทธิภาพในการปรับสภาพด้วยสีย้อม

การศึกษาการปรับสภาพผักตบชวาด้วยสีย้อมถึงแม้จะพบว่า สามารถทำให้ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของผักตบชวาเพิ่มขึ้นได้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ค่าที่ได้เมื่อเทียบกับก่อนที่จะปรับสภาพ ก็เป็นค่าที่แตกต่างกันไม่มากนักเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า ลักษณะโครงสร้างของผักตบชวาแตกต่างจากวัสดุชนิดอื่น ทำให้การปรับสภาพได้ผลดีไม่เท่าที่ควร จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ขี้เลื่อย 3 ชนิด คือ ไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยาง

การศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของขี้เลื่อยทั้ง 3 ชนิด เมื่อปรับสภาพขี้เลื่อยด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ที่ความเข้มข้น 10 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของขี้เลื่อยทั้ง 3 ชนิดเปรียบเทียบกับผักตบชวา แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.15 และ 4.16 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า

- ขี้เลื่อยทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเพิ่มสูงขึ้น
- ขี้เลื่อยทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักต่ำกว่าผักตบชวา
- ขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทองมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าไม้เต็งและไม้ยาง ตามลำดับ
- ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของขี้เลื่อยทั้ง 3 ชนิดกับโลหะนิกเกิลมีค่าสูงกว่าสังกะสี และทองแดง

จากภาพที่ 4.13 ถึง 4.18 จะเห็นได้ว่าก่อนการปรับสภาพ วัสดุที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงที่สุดคือ ผักตบชวา วัสดุที่มีประสิทธิภาพรองลงมา ขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทอง ขี้เลื่อยไม้เต็ง และขี้เลื่อยไม้ยาง ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักภายหลังการปรับสภาพของวัสดุทั้ง 4 ชนิด มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยขี้เลื่อยไม้ยางเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นมากที่สุดรองลงมาคือ ขี้เลื่อยไม้เต็ง ขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทอง และผักตบชวา ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.19 และ 4.20

จะเห็นได้ว่าผักตบชวาโดยธรรมชาติ ก็มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักค่อนข้างสูงอยู่แล้ว เมื่อเปรียบเทียบกับขี้เลื่อยทั้ง 3 ชนิด และเมื่อนำมาปรับสภาพด้วยสีย้อมถึงแม้ว่าจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเพิ่มสูงขึ้นได้ แต่ก็ค่อนข้างน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อเราย้อมสี โมเลกุลของสีย้อมที่เข้าไปจับอยู่ภายในผักตบชวาทำให้ช่องว่างภายในผักตบชวามีขนาดเล็กลง ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นได้น้อยลง เนื่องจากในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น เรซินจะต้องมีความพรุนพอเพียงที่จะทำให้ไอออนต่าง ๆ เคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวกจึงจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนได้ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์, 2535)

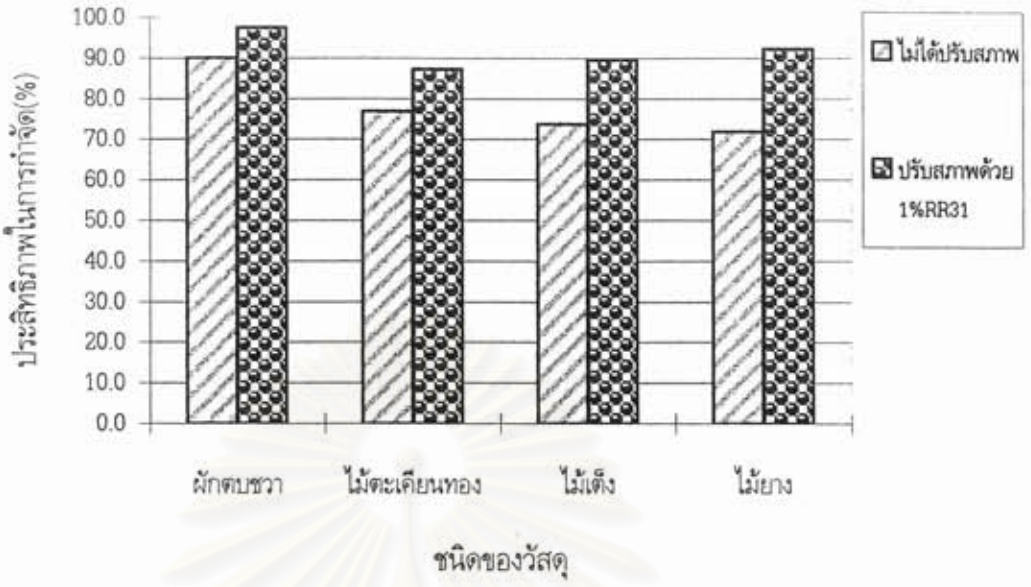
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.15 ประสิทธิภาพของวัสดุชนิดต่าง ๆ ในการดูดซับโลหะหนัก ที่ความเข้มข้น 10 mg/l

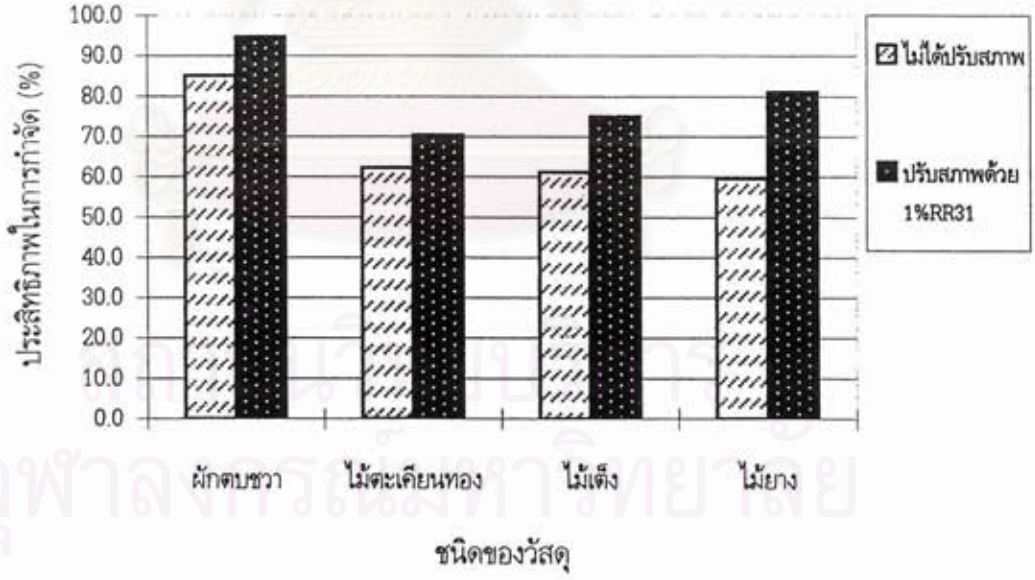
โลหะหนัก	ชนิดของวัสดุ	ประสิทธิภาพในการดูดซับ (%)		
		ไม่ได้ปรับสภาพ	ปรับสภาพด้วย1%RR31	ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น
ทองแดง	ผักตบชวา	90.05	97.58	8.36
	ไม้ตะเคียนทอง	76.89	87.38	13.64
	ไม้เต็ง	73.75	89.68	21.60
	ไม้ยาง	71.85	92.34	28.52
นิกเกิล	ผักตบชวา	85.07	94.87	11.52
	ไม้ตะเคียนทอง	62.34	70.44	12.99
	ไม้เต็ง	61.28	75.09	22.54
	ไม้ยาง	59.65	81.09	35.94
สังกะสี	ผักตบชวา	94.20	98.49	4.55
	ไม้ตะเคียนทอง	56.92	67.51	18.61
	ไม้เต็ง	54.12	71.34	31.82
	ไม้ยาง	49.38	78.44	58.85

ตารางที่ 4.16 ประสิทธิภาพของวัสดุชนิดต่าง ๆ ในการดูดซับโลหะหนัก ที่ความเข้มข้น 50 mg/l

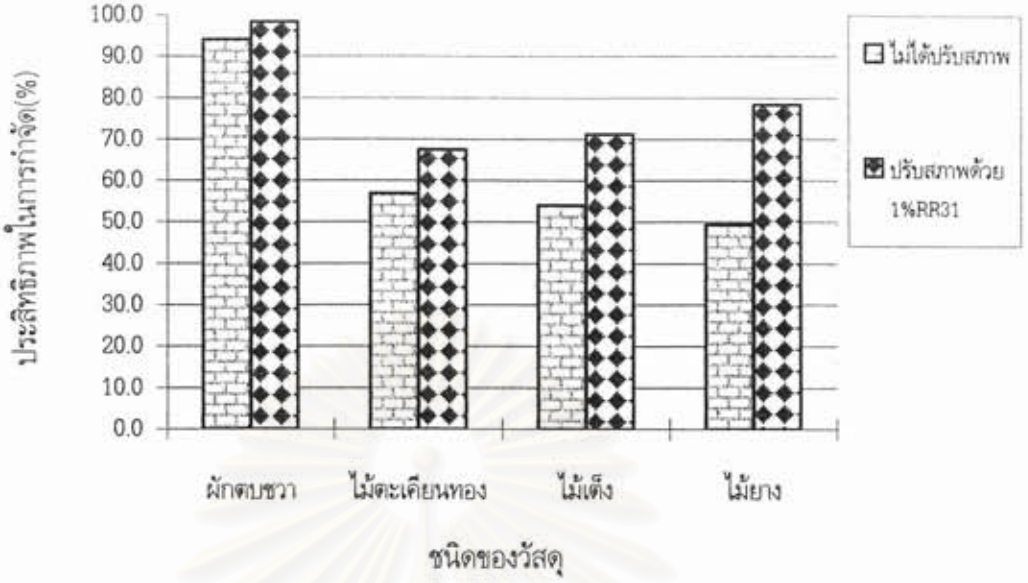
โลหะหนัก	ชนิดของวัสดุ	ประสิทธิภาพในการดูดซับ (%)		
		ไม่ได้ปรับสภาพ	ปรับสภาพด้วย1%RR31	ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น
ทองแดง	ผักตบชวา	82.33	90.45	9.86
	ไม้ตะเคียนทอง	23.43	29.35	25.27
	ไม้เต็ง	22.22	29.35	32.09
	ไม้ยาง	21.40	32.40	51.40
นิกเกิล	ผักตบชวา	64.36	72.55	12.73
	ไม้ตะเคียนทอง	23.76	29.81	25.46
	ไม้เต็ง	25.07	32.51	29.68
	ไม้ยาง	25.38	34.19	34.71
สังกะสี	ผักตบชวา	74.92	80.08	6.89
	ไม้ตะเคียนทอง	19.50	23.92	22.67
	ไม้เต็ง	18.59	24.56	32.11
	ไม้ยาง	14.16	26.55	87.50



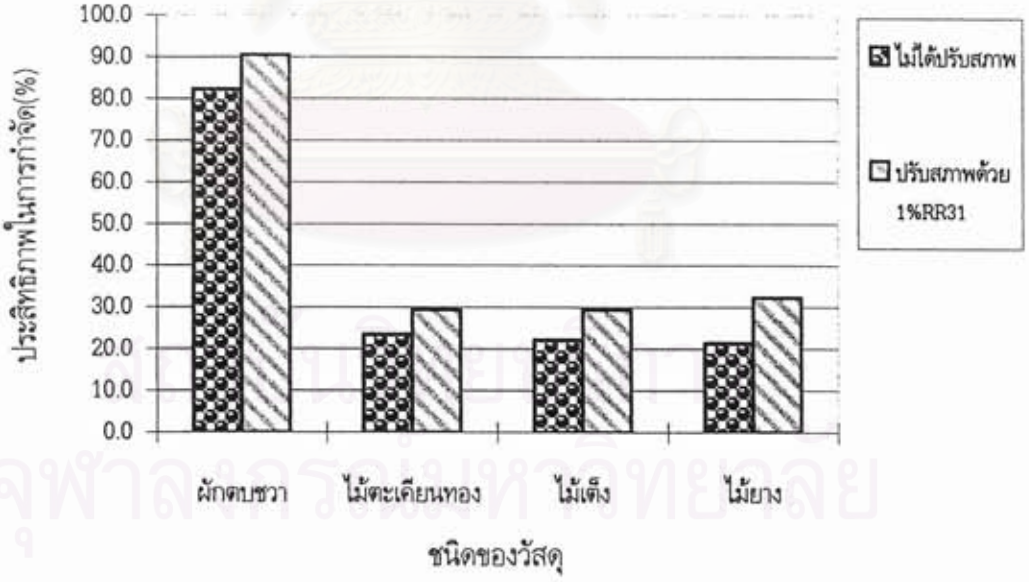
ภาพที่4.13 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงโดยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l



ภาพที่4.14 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลโดยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l

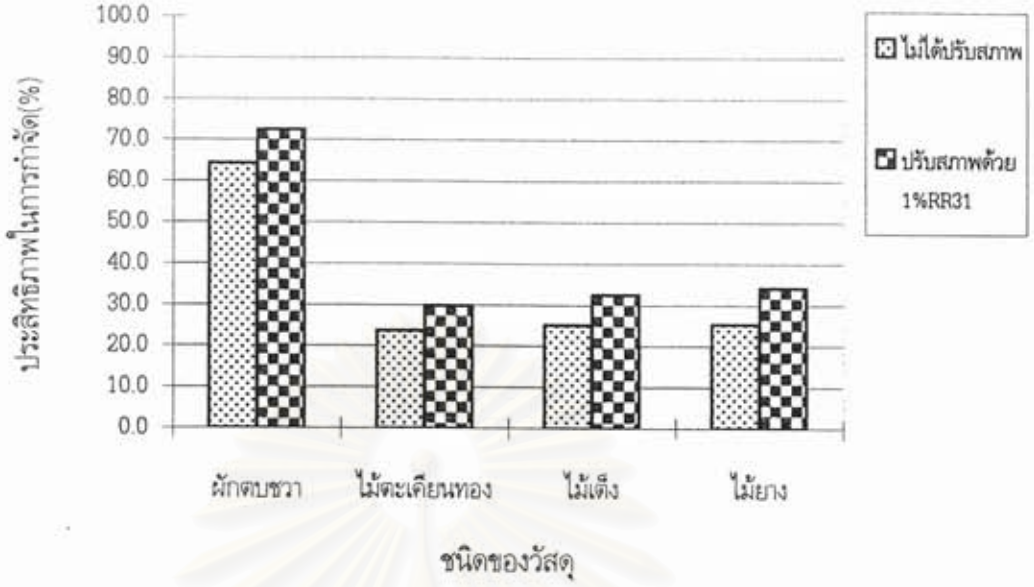


ภาพที่4.15 ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีโดยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/l

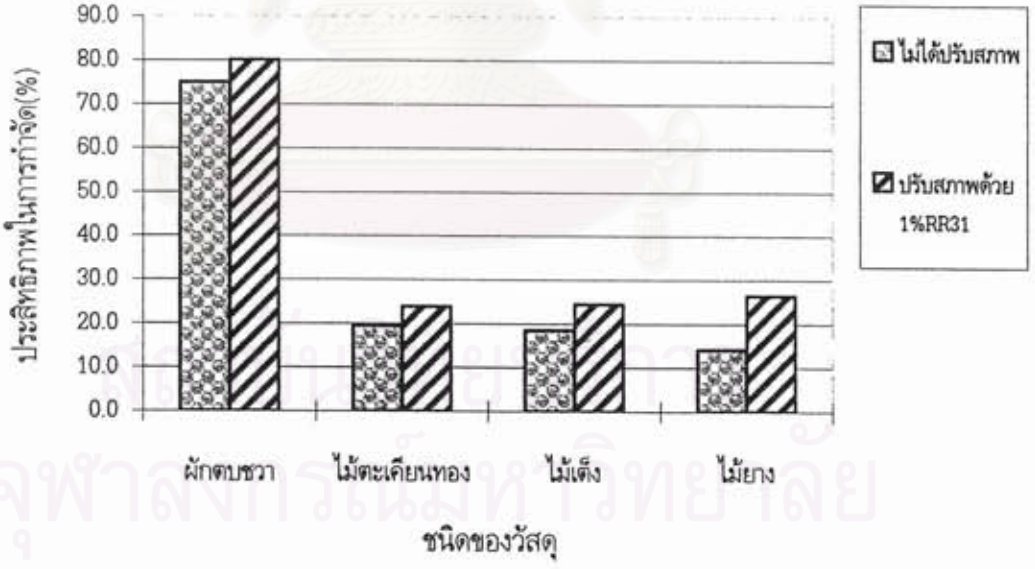


ภาพที่4.16 ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงโดยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/l

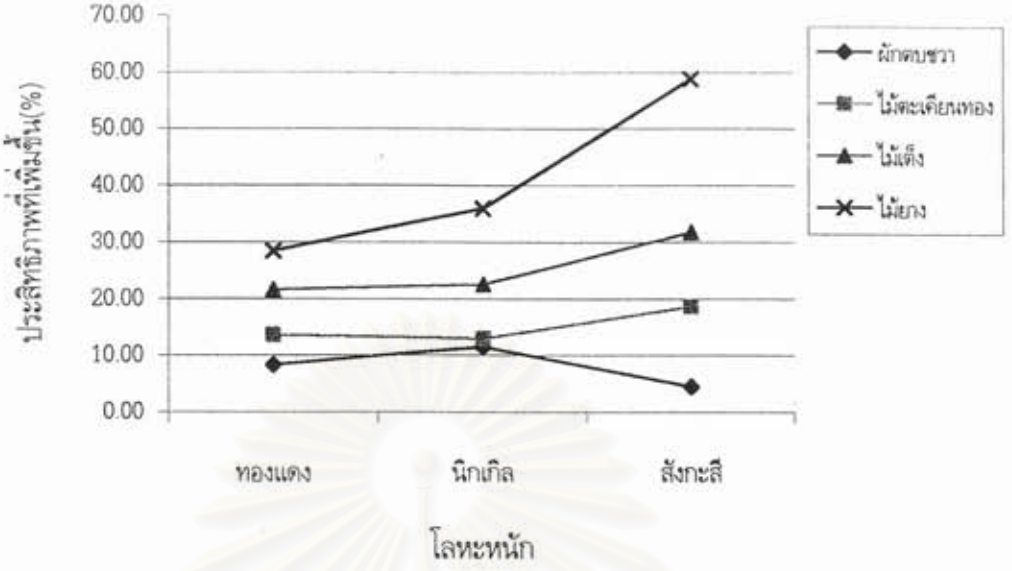
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



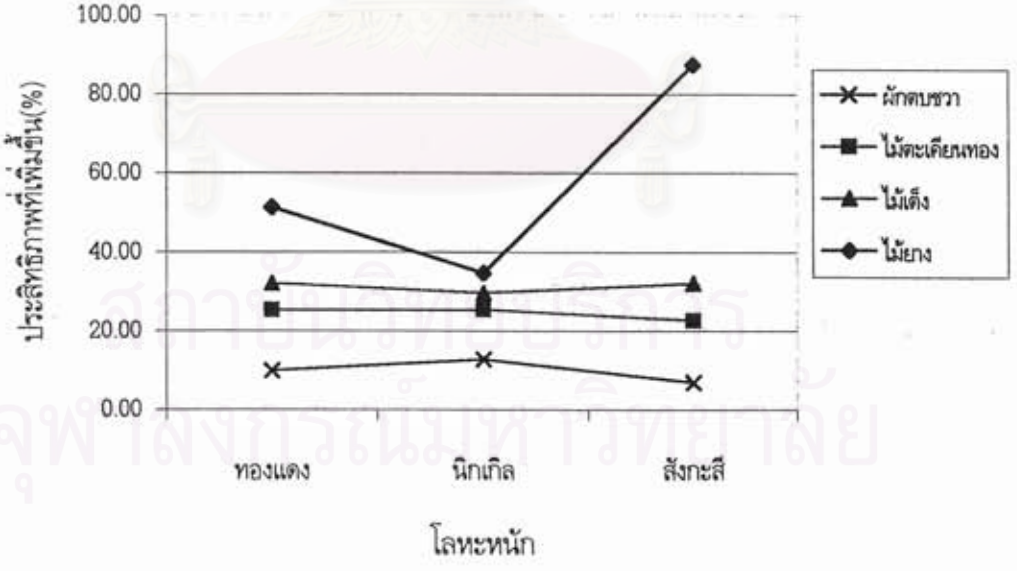
ภาพที่4.17 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลโดยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/l



ภาพที่4.18 ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีโดยวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 mg/l



ภาพที่ 4.19 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นภายหลังจากการปรับสภาพด้วยสีย้อมของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 10 mg/l



ภาพที่ 4.20 ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นภายหลังจากการปรับสภาพด้วยสีย้อมของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 50 mg/l

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมในการปรับสภาพเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา

ผลการทดลองการปรับสภาพเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาด้วยสีย้อมผ้า 2 ชนิด คือ Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 พบว่า

- ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
- ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมในการปรับสภาพผักตบชวา คือ
  สี Reactive Red 31 ความเข้มข้น 0.002 เปอร์เซ็นต์ และ
  สี Direct Blue 71 ความเข้มข้น 0.001 เปอร์เซ็นต์
- เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวา กับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักแตกต่างกัน พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง
- ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักเท่ากัน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวากับโลหะทองแดง จะมีค่ามากว่าสังกะสี และนิกเกิล ตามลำดับ

5.1.2 การศึกษาผลของปริมาณผักตบชวาต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี

การทดลองกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.002% Reactive Red 31 และ ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.001% Direct Blue 71 พบว่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- การบำบัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผักตบชวาปริมาณ 2 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด

- การบำบัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผักตบชวาปริมาณ 0.5 กรัม ได้ค่าความเข้มข้นของน้ำเสียภายหลังการบำบัดสูงกว่าค่ามาตรฐาน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผักตบชวาเป็น 1 และ 2 กรัม น้ำเสียที่ได้ภายหลังการบำบัดมีปริมาณสังกะสีต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

- ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีของผักตบชวาที่เพิ่มขึ้นภายหลังจากการปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด มีค่าสูงที่สุดเมื่อใช้ผักตบชวาปริมาณ 0.5 กรัม ต่อน้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร

5.1.3 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี

การทดลองใช้ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสี Reactive Red 31 เข้มข้น 0.002 เปอร์เซ็นต์ และผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสี Direct Blue 71 เข้มข้น 0.001 เปอร์เซ็นต์ ทำการบำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบสังกะสี พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีเช่นเดียวกับการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์

5.1.4 ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของวัสดุต่างชนิดกัน ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม

การศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของขี้เลื่อย 3 ชนิด คือ ไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยาง ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสี Reactive Rec 31 ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ พบว่า

- ขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยางที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำกว่าผักตบชวา โดยที่ขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทองมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าไม้เต็ง และไม้ยาง ตามลำดับ

- การปรับสภาพขี้เลื่อยทั้ง 3 ชนิดด้วยสี Reactive Red 31 ทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของขี้เลื่อยสูงขึ้น

- ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของขี้เลื่อยทั้ง 3 ชนิด กับโลหะนิกเกิล มีค่าสูงกว่าสังกะสี และทองแดง

- ขี้เลื่อยไม้ยางเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือ ขี้เลื่อยไม้เต็ง ขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทอง และผักตบชวา ตามลำดับ

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1) การเตรียมผักตบชวาให้มีขนาด และให้ได้ปริมาณที่ต้องการทำได้ค่อนยาก เนื่องจากในการบดให้ได้ขนาดที่ต้องการจะมีผักตบชวาจำนวนมากที่มีขนาดเล็กเกินไป จึงต้องใช้เวลาและใช้ปริมาณผักตบจำนวนมาก นอกจากนี้ผักตบชวายังมีน้ำหนักเบา ทำให้ฟุ้งกระจายได้ง่าย เป็นอุปสรรคต่อการทำงาน

2) ในขั้นตอนการย้อมสี โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นของสีย้อมที่สูง ๆ การล้างสีออกหลังจากเสร็จสิ้นขบวนการย้อมทำได้ยากมาก เนื่องจากผักตบชวาดูดซับสีส่วนเกินไว้ในตัวได้มากทำให้สิ้นเปลืองเวลาและน้ำที่ใช้ในการล้าง และหากล้างสีออกไม่หมดจะทำให้มีสีหลุดออกมาในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อนำมากำจัดโลหะหนัก

5.3 ข้อเสนอแนะ

1) ในการเตรียมผักตบชวาให้ได้ปริมาณมาก ควรใช้เครื่องบดชนิดที่มีตะแกรงคัดขนาดอยู่ในตัว ซึ่งจะทำให้ประหยัดเวลาในการเตรียม และไม่เกิดการสูญเสียของผักตบที่มีขนาดเล็กเกินไป

2) ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบการปรับสภาพเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาที่มีขนาดต่าง ๆ กัน

3) ควรมีการศึกษาการฟื้นสภาพผักตบชวาที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนแล้ว และการนำผักตบชวามาใช้ในการกำจัดโลหะหนักซ้ำ

4) ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เช่น การศึกษาที่ระดับพีเอชต่าง ๆ กัน การศึกษาที่เวลาต่าง ๆ กัน

5) ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้สีย้อมตัวอื่น ๆ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ขจรศักดิ์ โกศลมนตรี. 2538. การนำโลหะนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2538. เกณฑ์ระดับคุณภาพน้ำและมาตรฐานคุณภาพน้ำประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

นันทนา อิทธิพรโกวิท. 2538. การกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทีลและครอสส์ลิ้ง-แซนเทตที่ทำจากผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต. 2539. แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์. 2539. วิศวกรรมการประปา. 2 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รุ่งรัตน์ เหลืองนทีเทพ. 2520. การศึกษาทางด้านสัณฐานวิทยาและเซลวิทยาของพืชในวงศ์ Pontederiaceae ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วินัย สมบูรณ์, ฉัตรชัย สัทธางนันท์, ณัฐพร เพิ่มกสิกรณ์ และ จิราพรรณ ประภาพรสุข. 2533. การใช้วัสดุธรรมชาติในการบำบัดโลหะในน้ำ : ตอนที่ 1 ความสามารถและประสิทธิภาพในการบำบัด. วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม. 12(1) : 58-74.

สนธิ คชวัฒน์. ประสิทธิภาพของผักตบชวาในการกำจัดโลหะหนัก : แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุชาดา ศรีเพ็ญ. 2535. ผักตบชวากับสภาวะแวดล้อมของสังคมไทย. (ม.ป.ท.)

สุรภี โรจน์อารยานนท์. 2530. รายงานผลการวิจัยการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย (จากห้องปฏิบัติการ) ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์. กรุงเทพมหานคร: ฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (อัดสำเนา)

อภิชัย เชียร์ศิริกุล. 2535. การบำบัดน้ำเสียจากที่พักอาศัยด้วยบ่อผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อัจฉราพร ไศละสูต. 2519. ความรู้เรื่องผ้า. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: อักษรบัณฑิต.

อัจฉราพร ไศละสูต. 2527. คู่มือย้อมสี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: เทคนิค19 การพิมพ์.

ภาษาอังกฤษ

Bailey, J. E., and Ollis, D.F. 1986. Biochemical engineering fundamentals. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.

Bhatgava, D.S., Gupta, M.S., and Varshney, B.S. 1987. Use of sawdust for the adsorption of heavy metals. Asian environment. 9(4): 29-37.

Bosinco, S., Roussy, J., Guibal, E., and Cloirec, P.L. 1996. Interaction mechanisms between hexavalent chromium and corncob. Environmental Technology 17(1): 55-62.

Chawakitchareon, P., Pulkum, K., and Aittipornkovit, N. 1995. "Heavy metal removal by ion exchange resin made from water hyacinth and bagasse" In 1995 Pacific basin conference of hazardous waste, Edmonton, Canada, 7-12 May, 1995.

Dorfner, K. 1977. Ion exchange porpertie and application. 3rd ed. Michigan: Ann Arbor Science.

Gopal, B. 1987. Water hyacinth. Amsterdam: Elsevier Science.

Ho, Y.S., Wase, D.A.J., and Forster, C.F. 1996. Kinetic studies of competitive heavy metal adsorption by sphagnum moss peat. Environmental Technology 17 (1): 71-77.

Ingamells, W. 1993. Colour for textiles: A user's handbook. West Yorkshire England: The Society of Dyers and Courists.

Krasinsri, P. 1996. Removal of heavy metal ions by Lignocellulosic-formaldehyde ion exchange resin produced from Water hyacinth. Master's Thesis, Inter-department of Environmental Science, Graduate School, Chulalongkorn University.

Kumar, P., and Dara, S.S. 1980. Modified barks for scavenging toxic heavy metal ions. Indian J. Environ. Hlth. 22(3): 196-202.

Kumar, P., and Dara, S.S. 1981. Binding heavy metal ions with polymerized onion skin. J. of Polymer Science 19: 397-402.

Kumar, P., and Dara, S.S. 1982. Utilization of agricultural wastes for decontaminating industrial/domestic wastewaters from toxic metals. Agicultural wastes 4: 213-233.

Lalvani, S.B., Wiltowski, T.S., Murphy, D., and Lalvani, L.S. 1997. Metal removal from process water by lignin. Environmental Technology 18(11): 1163-1168.

Larsen, V.J., and Schierup, H.H. 1981. The use of straw for removal of heavy metals from waste water. J. Environ. Qual. 10(2): 188-192.

Low, K.S., and Lee, C.K. 1991. Cadmium uptake by the moss, *Calymperes delessertii*, Besch. Bioresource Technology 38: 1-6.

Low, K.S., Lee, C.K., and Lee, K.P. 1993. Sorption of copper by dye-treated oil-palm fibres. Bioresource Technology 44: 109-112.

Low, K.S., Lee, C.K., and Tan, S.G. 1997. Sorption of trivalent chromium from tannery waste by moss. Environmental Technology 18(4): 449-454.

Low, K.S., Lee, C.K., and Wong, S.L. 1995. Effect of dye modification on the sorption of copper by coconut husk. Environmental Technology 16(9): 877-883.

Maranon, E., and Sastre, H. 1991. Heavy metal removal in packed beds using apple wastes. Bioresource Technology 38: 39-43.

Maranon, E., and Sastre, H. 1992. Preconcentration and removal of trace metals for water by apple waste. Bioresource Technology 40: 73-76.

Munaf, E., and Zein, R. 1997. The use of rice husk for removal of toxic metals from waste water. Environmental Technology 18(3): 359-362.

Nakajima, A., and Sakaguchi, T. 1990. Recovery and removal of uranium by using plant wastes. Biomass 21: 55-63.

Nato Science Committee Conference on Ecotoxicology. 1974. Ecologycal toxicology research: Effect of heavy metal and organohalogen compounds. NewYork: Blenum Press.

Okieimen, F.E., and Onyenkpa, V.U. 1989. Removal of heavy metal ions from aqueous solutions with melon (*Citrullus vulgaris*) seed husks. Biological Wastes 29: 11-16.

Ozer, A., Tumen, F., and Bildik, M. 1997. Cr(III) removal from aqueous solution by depectinated sugar beet pulp. Envitonmental Technology 18(9): 893-901.

Randall, J.M., et al. 1974. Using of bark to remove heavy metal ions from waste solutions. Forest Products Journal 24: 80-87.

Randall, J.M., Hautala, E., and McDonald, G. 1978. Binding of heavy metal ions by formaldehyde-polymerized peanut skins. J. Applied Polymer Science 22: 379-389.

Rangnekar, D.W., and Singh, P.P. 1980. An introduction to synthetic dyes. Bombay: Himalaya Publishing House.

Said, O.B., Shalmor, M.B., and Egila, J.N. 1993. A note on the binding of nickel and copper ions by cellulosic materials. Bioresource Technology 43(1): 63-65.

Sharma, D.C., and Forster, C.F. 1994. A preliminary examination into the adsorption of hexavalent chromium using low-cost adsorbents. Bioresource Technology 47(3): 257-264.

Shore, J. ed. 1995. Cellulosics dyeing. Oxford: The Alden Press.

Shukla, S.R., and Sakhardande, V.D. 1990. Cupric ion removal by dyed cellulosic materials. J. Applied Polymer Science 41(11&12): 2655-2663.

Shukla, S.R., and Sakhardande, V.D. 1991. Metal ion removal by dyed cellulosic materials. J. Applied Polymer Science 42(3): 829-835.

Shukla, S.R., and Sakhardande, V.D. 1991. Column studies on ion removal by dyed cellulosic materials. J. Applied Polymer Science 44(5): 903-910.

Suemitsu, R., Uenishi, R., and Nakano, M. 1986. The use of Dyestuff-treated rice hulls for removal of heavy metals from waste water. J. Applied Polymer Science 31(1): 75-83.

Tan, W.T., and Abd, R.M.K. 1988. Removal of lead, cadmium and zinc by waste tea leaves. Environmental Technology Letter 9: 1223-1232.

Tan, W.T., Lee, C.K., and Ng, K.L. 1996. Column studies of copper(II) and nickel(II) ions sorption on palm pressed fibres. Environmental Technology 17(6): 621-628.

Tan, W.T., Ooi, S.T., and Lee, C.K. 1993. Removal of chromium (VI) from solution by coconut husk and palm pressed fibres. Environmental Technology 14: 277-282.

The Society of Dyers and Colourists. 1971. Colour index. 9 Vols. 3rd. Huddersfield Great Britain: H Charlesworth&Co.

Walton, H.F. 1990. Ion exchange in analytical chemistry. Boston: CRC Press.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 การกำจัด Cu(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Cu(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	10.530	1.110	0.942	89.46
	10.530	1.021	0.951	90.30
	10.530	0.965	0.957	90.84
ค่าเฉลี่ย		**1.032**	**0.950**	**90.20**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.073**	**0.007**	**0.69**
0.01	10.530	0.099	1.043	99.06
	10.530	0.155	1.038	98.53
	10.530	0.172	1.036	98.37
ค่าเฉลี่ย		**0.142**	**1.039**	**98.65**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.038**	**0.004**	**0.36**
0.10	10.530	0.445	1.009	95.77
	10.530	0.456	1.007	95.67
	10.530	0.309	1.022	97.07
ค่าเฉลี่ย		**0.403**	**1.013**	**96.17**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.082**	**0.008**	**0.78**
1.00	10.530	0.222	1.031	97.89
	10.530	0.216	1.031	97.95
	10.530	0.326	1.020	96.90
ค่าเฉลี่ย		**0.255**	**1.028**	**97.58**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.062**	**0.006**	**0.59**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-2 การกำจัด Cu(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 25 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Cu(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	26.350	4.010	2.234	84.78
	26.350	4.050	2.230	84.63
	26.350	4.055	2.230	84.61
ค่าเฉลี่ย		**4.038**	**2.231**	**84.67**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.025**	**0.002**	**0.09**
0.01	26.350	1.170	2.518	95.56
	26.350	1.395	2.496	94.71
	26.350	1.425	2.493	94.59
ค่าเฉลี่ย		**1.330**	**2.502**	**94.95**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.139**	**0.014**	**0.53**
0.10	26.350	1.575	2.478	94.02
	26.350	1.565	2.479	94.06
	26.350	1.620	2.473	93.85
ค่าเฉลี่ย		**1.587**	**2.476**	**93.98**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.029**	**0.003**	**0.11**
1.00	26.350	1.415	2.494	94.63
	26.350	1.380	2.497	94.76
	26.350	1.340	2.501	94.91
ค่าเฉลี่ย		**1.378**	**2.497**	**94.77**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.038**	**0.004**	**0.14**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 การกำจัด Cu(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Cu(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	54.450	9.330	4.512	82.87
	54.450	9.770	4.468	82.06
	54.450	9.760	4.469	82.08
ค่าเฉลี่ย		**9.620**	**4.483**	**82.33**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.251**	**0.025**	**0.46**
0.01	54.450	5.830	4.862	89.29
	54.450	6.180	4.827	88.65
	54.450	6.770	4.768	87.57
ค่าเฉลี่ย		**6.260**	**4.819**	**88.50**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.475**	**0.048**	**0.87**
0.10	54.450	6.540	4.791	87.99
	54.450	6.570	4.788	87.93
	54.450	6.150	4.830	88.71
ค่าเฉลี่ย		**6.420**	**4.803**	**88.21**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.234**	**0.023**	**0.43**
1.00	54.450	5.300	4.915	90.27
	54.450	5.220	4.923	90.41
	54.450	5.080	4.937	90.67
ค่าเฉลี่ย		**5.200**	**4.925**	**90.45**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.111**	**0.011**	**0.20**

ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-4 การกำจัด Cu(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Cu(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	10.530	1.110	0.942	89.46
	10.530	1.021	0.951	90.30
	10.530	0.965	0.957	90.84
ค่าเฉลี่ย		**1.032**	**0.950**	**90.20**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.073**	**0.007**	**0.69**
0.01	10.530	0.300	1.023	97.15
	10.530	0.284	1.025	97.30
	10.530	0.408	1.012	96.13
ค่าเฉลี่ย		**0.331**	**1.020**	**96.86**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.067**	**0.007**	**0.64**
0.10	10.530	0.392	1.014	96.28
	10.530	0.478	1.005	95.46
	10.530	0.309	1.022	97.07
ค่าเฉลี่ย		**0.393**	**1.014**	**96.27**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.085**	**0.008**	**0.80**
1.00	10.530	0.175	1.036	98.34
	10.530	0.214	1.032	97.97
	10.530	0.281	1.025	97.33
ค่าเฉลี่ย		**0.223**	**1.031**	**97.88**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.054**	**0.005**	**0.51**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-5 การกำจัด Cu(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 25 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Cu(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	26.350	4.010	2.234	84.78
	26.350	4.050	2.230	84.63
	26.350	4.055	2.230	84.61
ค่าเฉลี่ย		**4.038**	**2.231**	**84.67**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.025**	**0.002**	**0.09**
0.01	26.350	1.595	2.476	93.95
	26.350	1.800	2.455	93.17
	26.350	1.925	2.443	92.69
ค่าเฉลี่ย		**1.773**	**2.458**	**93.27**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.167**	**0.017**	**0.63**
0.10	26.350	2.250	2.410	91.46
	26.350	2.200	2.415	91.65
	26.350	2.135	2.422	91.90
ค่าเฉลี่ย		**2.195**	**2.416**	**91.67**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.058**	**0.006**	**0.22**
1.00	26.350	1.010	2.534	96.17
	26.350	0.965	2.539	96.34
	26.350	0.910	2.544	96.55
ค่าเฉลี่ย		**0.962**	**2.539**	**96.35**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.050**	**0.005**	**0.19**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-6 การกำจัด Cu(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Cu(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	54.450	9.330	4.512	82.87
	54.450	9.770	4.468	82.06
	54.450	9.760	4.469	82.08
ค่าเฉลี่ย		**9.620**	**4.483**	**82.33**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.251**	**0.025**	**0.46**
0.01	54.450	4.660	4.979	91.44
	54.450	5.480	4.897	89.94
	54.450	5.890	4.856	89.18
ค่าเฉลี่ย		**5.343**	**4.911**	**90.19**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.626**	**0.063**	**1.15**
0.10	54.450	7.100	4.735	86.96
	54.450	7.750	4.670	85.77
	54.450	7.950	4.650	85.40
ค่าเฉลี่ย		**7.600**	**4.685**	**86.04**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.444**	**0.044**	**0.82**
1.00	54.450	4.400	5.005	91.92
	54.450	4.350	5.010	92.01
	54.450	4.100	5.035	92.47
ค่าเฉลี่ย		**4.283**	**5.017**	**92.13**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.161**	**0.016**	**0.30**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-7 การกำจัด Ni(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Ni(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	11.410	1.664	0.975	85.42
	11.410	1.678	0.973	85.29
	11.410	1.770	0.964	84.49
ค่าเฉลี่ย		**1.704**	**0.971**	**85.07**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.058**	**0.006**	**0.50**
0.01	11.410	0.798	1.061	93.01
	11.410	0.793	1.062	93.05
	11.410	0.784	1.063	93.13
ค่าเฉลี่ย		**0.792**	**1.062**	**93.06**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.007**	**0.001**	**0.06**
0.10	11.410	0.654	1.076	94.27
	11.410	0.655	1.076	94.26
	11.410	0.610	1.080	94.65
ค่าเฉลี่ย		**0.640**	**1.077**	**94.39**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.026**	**0.003**	**0.23**
1.00	11.410	0.583	1.083	94.89
	11.410	0.609	1.080	94.66
	11.410	0.565	1.085	95.05
ค่าเฉลี่ย		**0.586**	**1.082**	**94.87**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.022**	**0.002**	**0.19**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-8 การกำจัด Ni(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 25 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Ni(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	26.150	5.910	2.024	77.40
	26.150	6.025	2.013	76.96
	26.150	5.850	2.030	77.63
ค่าเฉลี่ย		**5.928**	**2.022**	**77.33**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.089**	**0.009**	**0.34**
0.01	26.150	4.985	2.117	80.94
	26.150	4.970	2.118	80.99
	26.150	4.895	2.126	81.28
ค่าเฉลี่ย		**4.950**	**2.120**	**81.07**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.048**	**0.005**	**0.18**
0.10	26.150	4.180	2.197	84.02
	26.150	4.200	2.195	83.94
	26.150	4.035	2.212	84.57
ค่าเฉลี่ย		**4.138**	**2.201**	**84.17**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.090**	**0.009**	**0.34**
1.00	26.150	3.750	2.240	85.66
	26.150	3.805	2.235	85.45
	26.150	3.650	2.250	86.04
ค่าเฉลี่ย		**3.735**	**2.242**	**85.72**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.079**	**0.008**	**0.30**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-9 การกำจัด Ni(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Ni(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	53.650	19.270	3.438	64.08
	53.650	19.170	3.448	64.27
	53.650	18.930	3.472	64.72
ค่าเฉลี่ย		**19.123**	**3.453**	**64.36**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.175**	**0.017**	**0.33**
0.01	53.650	17.000	3.665	68.31
	53.650	17.260	3.639	67.83
	53.650	16.940	3.671	68.42
ค่าเฉลี่ย		**17.067**	**3.658**	**68.19**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.170**	**0.017**	**0.32**
0.10	53.650	16.230	3.742	69.75
	53.650	16.340	3.731	69.54
	53.650	16.010	3.764	70.16
ค่าเฉลี่ย		**16.193**	**3.746**	**69.82**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.168**	**0.017**	**0.31**
1.00	53.650	14.700	3.895	72.60
	53.650	14.730	3.892	72.54
	53.650	14.750	3.890	72.51
ค่าเฉลี่ย		**14.727**	**3.892**	**72.55**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.025**	**0.003**	**0.05**

* ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-10 การกำจัด Ni(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Ni(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	11.410	1.664	0.975	85.42
	11.410	1.678	0.973	85.29
	11.410	1.770	0.964	84.49
ค่าเฉลี่ย		**1.704**	**0.971**	**85.07**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.058**	**0.006**	**0.50**
0.01	11.410	0.803	1.061	92.96
	11.410	0.791	1.062	93.07
	11.410	0.744	1.067	93.48
ค่าเฉลี่ย		**0.779**	**1.063**	**93.17**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.031**	**0.003**	**0.27**
0.10	11.410	0.838	1.057	92.66
	11.410	0.860	1.055	92.46
	11.410	0.828	1.058	92.74
ค่าเฉลี่ย		**0.842**	**1.057**	**92.62**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.016**	**0.002**	**0.14**
1.00	11.410	0.645	1.077	94.35
	11.410	0.636	1.077	94.43
	11.410	0.624	1.079	94.53
ค่าเฉลี่ย		**0.635**	**1.078**	**94.43**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.011**	**0.001**	**0.09**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-11 การกำจัด Ni(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 25 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Ni(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	26.150	5.910	2.024	77.40
	26.150	6.025	2.013	76.96
	26.150	5.850	2.030	77.63
ค่าเฉลี่ย		**5.928**	**2.022**	**77.33**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.089**	**0.009**	**0.34**
0.01	26.150	4.260	2.189	83.71
	26.150	4.280	2.187	83.63
	26.150	4.245	2.191	83.77
ค่าเฉลี่ย		**4.262**	**2.189**	**83.70**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.018**	**0.002**	**0.07**
0.10	26.150	4.470	2.168	82.91
	26.150	4.460	2.169	82.94
	26.150	4.395	2.176	83.19
ค่าเฉลี่ย		**4.442**	**2.171**	**83.01**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.041**	**0.004**	**0.16**
1.00	26.150	3.965	2.219	84.84
	26.150	3.950	2.220	84.89
	26.150	3.890	2.226	85.12
ค่าเฉลี่ย		**3.935**	**2.222**	**84.95**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.040**	**0.004**	**0.15**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-12 การกำจัด Ni(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Ni(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	53.650	19.270	3.438	64.08
	53.650	19.170	3.448	64.27
	53.650	18.930	3.472	64.72
ค่าเฉลี่ย		**19.123**	**3.453**	**64.36**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.175**	**0.017**	**0.33**
0.01	53.650	15.880	3.777	70.40
	53.650	15.950	3.770	70.27
	53.650	15.710	3.794	70.72
ค่าเฉลี่ย		**15.847**	**3.780**	**70.46**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.123**	**0.012**	**0.23**
0.10	53.650	16.570	3.708	69.11
	53.650	16.320	3.733	69.58
	53.650	16.450	3.720	69.34
ค่าเฉลี่ย		**16.447**	**3.720**	**69.34**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.125**	**0.013**	**0.23**
1.00	53.650	15.910	3.774	70.34
	53.650	15.860	3.779	70.44
	53.650	15.850	3.780	70.46
ค่าเฉลี่ย		**15.873**	**3.778**	**70.41**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.032**	**0.003**	**0.06**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-13 การกำจัด Zn(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	10.924	0.662	1.026	93.94
	10.924	0.631	1.029	94.22
	10.924	0.609	1.032	94.43
ค่าเฉลี่ย		**0.634**	**1.029**	**94.20**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.027**	**0.003**	**0.24**
0.01	10.924	0.294	1.063	97.31
	10.924	0.286	1.064	97.38
	10.924	0.275	1.065	97.48
ค่าเฉลี่ย		**0.285**	**1.064**	**97.39**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.010**	**0.001**	**0.09**
0.10	10.924	0.277	1.065	97.46
	10.924	0.236	1.069	97.84
	10.924	0.234	1.069	97.86
ค่าเฉลี่ย		**0.249**	**1.068**	**97.72**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.024**	**0.002**	**0.22**
1.00	10.924	0.240	1.068	97.80
	10.924	0.232	1.069	97.88
	10.924	0.023	1.090	99.79
ค่าเฉลี่ย		**0.165**	**1.076**	**98.49**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.123**	**0.012**	**1.13**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-14 การกำจัด Zn(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 25 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	30.165	3.989	2.618	86.78
	30.165	3.958	2.621	86.88
	30.165	3.805	2.636	87.39
ค่าเฉลี่ย		**3.917**	**2.625**	**87.01**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.099**	**0.010**	**0.33**
0.01	30.165	3.285	2.688	89.11
	30.165	3.316	2.685	89.01
	30.165	3.168	2.700	89.50
ค่าเฉลี่ย		**3.256**	**2.691**	**89.20**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.078**	**0.008**	**0.26**
0.10	30.165	2.961	2.720	90.18
	30.165	2.763	2.740	90.84
	30.165	2.918	2.725	90.33
ค่าเฉลี่ย		**2.881**	**2.728**	**90.45**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.104**	**0.010**	**0.35**
1.00	30.165	2.531	2.763	91.61
	30.165	2.624	2.754	91.30
	30.165	2.565	2.760	91.50
ค่าเฉลี่ย		**2.573**	**2.759**	**91.47**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.047**	**0.005**	**0.16**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-15 การกำจัด Zn(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อมที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	56.055	14.135	4.192	74.78
	56.055	14.106	4.195	74.84
	56.055	13.935	4.212	75.14
ค่าเฉลี่ย		**14.059**	**4.200**	**74.92**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.108**	**0.011**	**0.19**
0.01	56.055	12.782	4.327	77.20
	56.055	12.099	4.396	78.42
	56.055	12.134	4.392	78.35
ค่าเฉลี่ย		**12.338**	**4.372**	**77.99**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.385**	**0.038**	**0.69**
0.10	56.055	12.503	4.355	77.70
	56.055	12.477	4.358	77.74
	56.055	12.143	4.391	78.34
ค่าเฉลี่ย		**12.374**	**4.368**	**77.92**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.201**	**0.020**	**0.36**
1.00	56.055	12.196	4.386	78.24
	56.055	10.668	4.539	80.97
	56.055	10.634	4.542	81.03
ค่าเฉลี่ย		**11.166**	**4.489**	**80.08**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.892**	**0.089**	**1.59**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-16 การกำจัด Zn(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	10.924	0.662	1.026	93.94
	10.924	0.631	1.029	94.22
	10.924	0.609	1.032	94.43
ค่าเฉลี่ย		**0.634**	**1.029**	**94.20**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.027**	**0.003**	**0.24**
0.01	10.924	0.468	1.046	95.72
	10.924	0.256	1.067	97.66
	10.924	0.264	1.066	97.58
ค่าเฉลี่ย		**0.329**	**1.059**	**96.99**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.120**	**0.012**	**1.10**
0.10	10.924	0.415	1.051	96.20
	10.924	0.434	1.049	96.03
	10.924	0.446	1.048	95.92
ค่าเฉลี่ย		**0.432**	**1.049**	**96.05**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.016**	**0.002**	**0.14**
1.00	10.924	0.361	1.056	96.70
	10.924	0.383	1.054	96.49
	10.924	0.375	1.055	96.57
ค่าเฉลี่ย		**0.373**	**1.055**	**96.59**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.011**	**0.001**	**0.10**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-17 การกำจัด Zn(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 25 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	30.165	3.989	2.618	86.78
	30.165	3.958	2.621	86.88
	30.165	3.805	2.636	87.39
ค่าเฉลี่ย		**3.917**	**2.625**	**87.01**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.099**	**0.010**	**0.33**
0.01	30.165	2.902	2.726	90.38
	30.165	2.865	2.730	90.50
	30.165	2.782	2.738	90.78
ค่าเฉลี่ย		**2.850**	**2.732**	**90.55**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.061**	**0.006**	**0.20**
0.10	30.165	3.492	2.667	88.42
	30.165	3.378	2.679	88.80
	30.165	3.423	2.674	88.65
ค่าเฉลี่ย		**3.431**	**2.673**	**88.63**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.057**	**0.006**	**0.19**
1.00	30.165	3.263	2.690	89.18
	30.165	3.109	2.706	89.69
	30.165	3.015	2.715	90.00
ค่าเฉลี่ย		**3.129**	**2.704**	**89.63**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.125**	**0.013**	**0.42**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ก-18 การกำจัด Zn(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.00	56.055	14.135	4.192	74.78
	56.055	14.106	4.195	74.84
	56.055	13.935	4.212	75.14
ค่าเฉลี่ย		**14.059**	**4.200**	**74.92**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.108**	**0.011**	**0.19**
0.01	56.055	10.645	4.541	81.01
	56.055	10.788	4.527	80.75
	56.055	10.716	4.534	80.88
ค่าเฉลี่ย		**10.716**	**4.534**	**80.88**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.072**	**0.007**	**0.13**
0.10	56.055	13.108	4.295	76.62
	56.055	13.029	4.303	76.76
	56.055	12.879	4.318	77.02
ค่าเฉลี่ย		**13.005**	**4.305**	**76.80**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.116**	**0.012**	**0.21**
1.00	56.055	11.394	4.466	79.67
	56.055	10.977	4.508	80.42
	56.055	10.790	4.527	80.75
ค่าเฉลี่ย		**11.054**	**4.500**	**80.28**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.309**	**0.031**	**0.55**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 การกำจัด Cu(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Cu(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.000	10.530	1.110	0.942	89.46
	10.530	1.021	0.951	90.30
	10.530	0.965	0.957	90.84
ค่าเฉลี่ย		**1.032**	**0.950**	**90.20**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.073**	**0.007**	**0.69**
0.001	10.530	0.224	1.031	97.87
	10.530	0.207	1.032	98.03
	10.530	0.224	1.031	97.87
ค่าเฉลี่ย		**0.218**	**1.031**	**97.93**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.010**	**0.001**	**0.09**
0.002	10.530	0.094	1.044	99.11
	10.530	0.114	1.042	98.92
	10.530	0.116	1.041	98.90
ค่าเฉลี่ย		**0.108**	**1.042**	**98.97**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.012**	**0.001**	**0.12**
0.005	10.530	0.097	1.043	99.08
	10.530	0.127	1.040	98.79
	10.530	0.139	1.039	98.68
ค่าเฉลี่ย		**0.121**	**1.041**	**98.85**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.022**	**0.002**	**0.21**
0.010	10.530	0.099	1.043	99.06
	10.530	0.155	1.038	98.53
	10.530	0.172	1.036	98.37
ค่าเฉลี่ย		**0.142**	**1.039**	**98.65**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.038**	**0.004**	**0.36**
0.020	10.530	0.093	1.044	99.12
	10.530	0.117	1.041	98.89
	10.530	0.140	1.039	98.67
ค่าเฉลี่ย		**0.117**	**1.041**	**98.89**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.024**	**0.002**	**0.22**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-2 การกำจัด Cu(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 25 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Cu(II)	
	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	26.350	4.010	2.234	84.78
	26.350	4.050	2.230	84.63
	26.350	4.055	2.230	84.61
ค่าเฉลี่ย		**4.038**	**2.231**	**84.67**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.025**	**0.002**	**0.09**
0.001	26.350	1.185	2.517	95.50
	26.350	1.180	2.517	95.52
	26.350	1.165	2.519	95.58
ค่าเฉลี่ย		**1.177**	**2.517**	**95.53**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.010**	**0.001**	**0.04**
0.002	26.350	0.875	2.548	96.68
	26.350	1.000	2.535	96.20
	26.350	0.980	2.537	96.28
ค่าเฉลี่ย		**0.952**	**2.540**	**96.39**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.067**	**0.007**	**0.25**
0.005	26.350	0.925	2.543	96.49
	26.350	1.035	2.532	96.07
	26.350	1.075	2.528	95.92
ค่าเฉลี่ย		**1.012**	**2.534**	**96.16**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.078**	**0.008**	**0.29**
0.010	26.350	1.170	2.518	95.56
	26.350	1.395	2.496	94.71
	26.350	1.425	2.493	94.59
ค่าเฉลี่ย		**1.330**	**2.502**	**94.95**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.139**	**0.014**	**0.53**
0.020	26.350	0.945	2.541	96.41
	26.350	1.055	2.530	96.00
	26.350	1.105	2.525	95.81
ค่าเฉลี่ย		**1.035**	**2.532**	**96.07**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.082**	**0.008**	**0.31**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-3 การกำจัด Cu(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Cu(II)*	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	54.450	9.330	4.512	82.87
	54.450	9.770	4.468	82.06
	54.450	9.760	4.469	82.08
ค่าเฉลี่ย		**9.620**	**4.483**	**82.33**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.251**	**0.025**	**0.46**
0.001	54.450	5.420	4.903	90.05
	54.450	5.330	4.912	90.21
	54.450	5.370	4.908	90.14
ค่าเฉลี่ย		**5.373**	**4.908**	**90.13**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.045**	**0.005**	**0.08**
0.002	54.450	4.000	5.045	92.65
	54.450	4.440	5.001	91.85
	54.450	4.590	4.986	91.57
ค่าเฉลี่ย		**4.343**	**5.011**	**92.02**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.307**	**0.031**	**0.56**
0.005	54.450	4.420	5.003	91.88
	54.450	4.840	4.961	91.11
	54.450	4.980	4.947	90.85
ค่าเฉลี่ย		**4.747**	**4.970**	**91.28**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.291**	**0.029**	**0.54**
0.010	54.450	5.830	4.862	89.29
	54.450	6.180	4.827	88.65
	54.450	6.770	4.768	87.57
ค่าเฉลี่ย		**6.260**	**4.819**	**88.50**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.475**	**0.048**	**0.87**
0.020	54.450	3.990	5.046	92.67
	54.450	4.460	4.999	91.81
	54.450	4.490	4.996	91.75
ค่าเฉลี่ย		**4.313**	**5.014**	**92.08**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.280**	**0.028**	**0.51**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-4 การกำจัด Ni(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Ni(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	11.410	1.664	0.975	85.42
	11.410	1.678	0.973	85.29
	11.410	1.770	0.964	84.49
ค่าเฉลี่ย		**1.704**	**0.971**	**85.07**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.058**	**0.006**	**0.50**
0.001	11.410	0.833	1.058	92.70
	11.410	0.828	1.058	92.74
	11.410	0.774	1.064	93.22
ค่าเฉลี่ย		**0.812**	**1.060**	**92.89**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.033**	**0.003**	**0.29**
0.002	11.410	0.736	1.067	93.55
	11.410	0.747	1.066	93.45
	11.410	0.724	1.069	93.65
ค่าเฉลี่ย		**0.736**	**1.067**	**93.55**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.012**	**0.001**	**0.10**
0.005	11.410	0.766	1.064	93.29
	11.410	0.769	1.064	93.26
	11.410	0.761	1.065	93.33
ค่าเฉลี่ย		**0.765**	**1.064**	**93.29**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.004**	**0.000**	**0.04**
0.010	11.410	0.798	1.061	93.01
	11.410	0.793	1.062	93.05
	11.410	0.784	1.063	93.13
ค่าเฉลี่ย		**0.792**	**1.062**	**93.06**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.007**	**0.001**	**0.06**
0.020	11.410	0.687	1.072	93.98
	11.410	0.692	1.072	93.94
	11.410	0.644	1.077	94.36
ค่าเฉลี่ย		**0.674**	**1.074**	**94.09**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.026**	**0.003**	**0.23**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-5 การกำจัด Ni(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 25 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Ni(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	26.150	5.910	2.024	77.40
	26.150	6.025	2.013	76.96
	26.150	5.850	2.030	77.63
ค่าเฉลี่ย		**5.928**	**2.022**	**77.33**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.089**	**0.009**	**0.34**
0.001	26.150	4.880	2.127	81.34
	26.150	4.870	2.128	81.38
	26.150	4.750	2.140	81.84
ค่าเฉลี่ย		**4.833**	**2.132**	**81.52**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.072**	**0.007**	**0.28**
0.002	26.150	4.480	2.167	82.87
	26.150	4.500	2.165	82.79
	26.150	4.385	2.177	83.23
ค่าเฉลี่ย		**4.455**	**2.170**	**82.96**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.061**	**0.006**	**0.23**
0.005	26.150	4.605	2.155	82.39
	26.150	4.660	2.149	82.18
	26.150	4.615	2.154	82.35
ค่าเฉลี่ย		**4.627**	**2.152**	**82.31**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.029**	**0.003**	**0.11**
0.010	26.150	4.985	2.117	80.94
	26.150	4.970	2.118	80.99
	26.150	4.895	2.126	81.28
ค่าเฉลี่ย		**4.950**	**2.120**	**81.07**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.048**	**0.005**	**0.18**
0.020	26.150	4.400	2.175	83.17
	26.150	4.320	2.183	83.48
	26.150	4.235	2.192	83.80
ค่าเฉลี่ย		**4.318**	**2.183**	**83.49**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.083**	**0.008**	**0.32**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-6 การกำจัด Ni(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Ni(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	53.650	19.270	3.438	64.08
	53.650	19.170	3.448	64.27
	53.650	18.930	3.472	64.72
ค่าเฉลี่ย		**19.123**	**3.453**	**64.36**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.175**	**0.017**	**0.33**
0.001	53.650	16.510	3.714	69.23
	53.650	16.600	3.705	69.06
	53.650	16.400	3.725	69.43
ค่าเฉลี่ย		**16.503**	**3.715**	**69.24**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.100**	**0.010**	**0.19**
0.002	53.650	15.170	3.848	71.72
	53.650	15.120	3.853	71.82
	53.650	14.460	3.919	73.05
ค่าเฉลี่ย		**14.917**	**3.873**	**72.20**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.396**	**0.040**	**0.74**
0.005	53.650	16.700	3.695	68.87
	53.650	16.630	3.702	69.00
	53.650	16.430	3.722	69.38
ค่าเฉลี่ย		**16.587**	**3.706**	**69.08**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.140**	**0.014**	**0.26**
0.010	53.650	17.000	3.665	68.31
	53.650	17.260	3.639	67.83
	53.650	16.940	3.671	68.42
ค่าเฉลี่ย		**17.067**	**3.658**	**68.19**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.170**	**0.017**	**0.32**
0.020	53.650	17.040	3.661	68.24
	53.650	16.840	3.681	68.61
	53.650	16.980	3.667	68.35
ค่าเฉลี่ย		**16.953**	**3.670**	**68.40**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.103**	**0.010**	**0.19**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-7 การกำจัด Zn(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	10.924	0.662	1.026	93.94
	10.924	0.631	1.029	94.22
	10.924	0.609	1.032	94.43
ค่าเฉลี่ย		**0.634**	**1.029**	**94.20**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.027**	**0.003**	**0.24**
0.001	10.924	0.365	1.056	96.66
	10.924	0.326	1.060	97.02
	10.924	0.322	1.060	97.05
ค่าเฉลี่ย		**0.338**	**1.059**	**96.91**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.024**	**0.002**	**0.22**
0.002	10.924	0.164	1.076	98.50
	10.924	0.149	1.078	98.64
	10.924	0.142	1.078	98.70
ค่าเฉลี่ย		**0.152**	**1.077**	**98.61**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.011**	**0.001**	**0.10**
0.005	10.924	0.206	1.072	98.11
	10.924	0.195	1.073	98.21
	10.924	0.194	1.073	98.22
ค่าเฉลี่ย		**0.198**	**1.073**	**98.18**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.007**	**0.001**	**0.06**
0.010	10.924	0.294	1.063	97.31
	10.924	0.286	1.064	97.38
	10.924	0.275	1.065	97.48
ค่าเฉลี่ย		**0.285**	**1.064**	**97.39**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.010**	**0.001**	**0.09**
0.020	10.924	0.164	1.076	98.50
	10.924	0.164	1.076	98.50
	10.924	0.167	1.076	98.47
ค่าเฉลี่ย		**0.165**	**1.076**	**98.49**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.002**	**0.000**	**0.02**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-8 การกำจัด Zn(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 25 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	30.165	3.989	2.618	86.78
	30.165	3.958	2.621	86.88
	30.165	3.805	2.636	87.39
ค่าเฉลี่ย		**3.917**	**2.625**	**87.01**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.099**	**0.010**	**0.33**
0.001	30.165	3.259	2.691	89.20
	30.165	3.006	2.716	90.03
	30.165	3.221	2.694	89.32
ค่าเฉลี่ย		**3.162**	**2.700**	**89.52**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.136**	**0.014**	**0.45**
0.002	30.165	2.968	2.720	90.16
	30.165	2.490	2.768	91.75
	30.165	2.509	2.766	91.68
ค่าเฉลี่ย		**2.656**	**2.751**	**91.20**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.271**	**0.027**	**0.90**
0.005	30.165	2.791	2.737	90.75
	30.165	2.716	2.745	91.00
	30.165	2.687	2.748	91.09
ค่าเฉลี่ย		**2.731**	**2.743**	**90.95**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.054**	**0.005**	**0.18**
0.010	30.165	3.285	2.688	89.11
	30.165	3.316	2.685	89.01
	30.165	3.168	2.700	89.50
ค่าเฉลี่ย		**3.256**	**2.691**	**89.20**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.078**	**0.008**	**0.26**
0.020	30.165	2.693	2.747	91.07
	30.165	2.625	2.754	91.30
	30.165	2.474	2.769	91.80
ค่าเฉลี่ย		**2.597**	**2.757**	**91.39**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.112**	**0.011**	**0.37**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-9 การกำจัด Zn(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive red 31 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	56.055	14.135	4.192	74.78
	56.055	14.106	4.195	74.84
	56.055	13.935	4.212	75.14
ค่าเฉลี่ย		**14.059**	**4.200**	**74.92**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.108**	**0.011**	**0.19**
0.001	56.055	13.799	4.226	75.38
	56.055	13.823	4.223	75.34
	56.055	13.526	4.253	75.87
ค่าเฉลี่ย		**13.716**	**4.234**	**75.53**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.165**	**0.016**	**0.29**
0.002	56.055	11.892	4.416	78.79
	56.055	12.117	4.394	78.38
	56.055	11.919	4.414	78.74
ค่าเฉลี่ย		**11.976**	**4.408**	**78.64**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.123**	**0.012**	**0.22**
0.005	56.055	12.313	4.374	78.03
	56.055	12.175	4.388	78.28
	56.055	12.141	4.391	78.34
ค่าเฉลี่ย		**12.210**	**4.385**	**78.22**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.091**	**0.009**	**0.16**
0.010	56.055	12.782	4.327	77.20
	56.055	12.099	4.396	78.42
	56.055	12.134	4.392	78.35
ค่าเฉลี่ย		**12.338**	**4.372**	**77.99**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.385**	**0.038**	**0.69**
0.020	56.055	12.211	4.384	78.22
	56.055	11.727	4.433	79.08
	56.055	11.718	4.434	79.10
ค่าเฉลี่ย		**11.885**	**4.417**	**78.80**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.282**	**0.028**	**0.50**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-10 การกำจัด Cu(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Cu(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
0.000	10.530	1.110	0.942	89.46
	10.530	1.021	0.951	90.30
	10.530	0.965	0.957	90.84
ค่าเฉลี่ย		**1.032**	**0.950**	**90.20**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.073**	**0.007**	**0.69**
0.001	10.530	0.144	1.039	98.63
	10.530	0.207	1.032	98.03
	10.530	0.242	1.029	97.70
ค่าเฉลี่ย		**0.198**	**1.033**	**98.12**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.050**	**0.005**	**0.47**
0.002	10.530	0.164	1.037	98.44
	10.530	0.230	1.030	97.82
	10.530	0.324	1.021	96.92
ค่าเฉลี่ย		**0.239**	**1.029**	**97.73**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.080**	**0.008**	**0.76**
0.005	10.530	0.200	1.033	98.10
	10.530	0.268	1.026	97.45
	10.530	0.274	1.026	97.40
ค่าเฉลี่ย		**0.247**	**1.028**	**97.65**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.041**	**0.004**	**0.39**
0.010	10.530	0.300	1.023	97.15
	10.530	0.284	1.025	97.30
	10.530	0.408	1.012	96.13
ค่าเฉลี่ย		**0.331**	**1.020**	**96.86**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.067**	**0.007**	**0.64**
0.020	10.530	0.159	1.037	98.49
	10.530	0.165	1.037	98.43
	10.530	0.223	1.031	97.88
ค่าเฉลี่ย		**0.182**	**1.035**	**98.27**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.035**	**0.004**	**0.34**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-11 การกำจัด Cu(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 25 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Cu(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	26.350	4.010	2.234	84.78
	26.350	4.050	2.230	84.63
	26.350	4.055	2.230	84.61
ค่าเฉลี่ย		**4.038**	**2.231**	**84.67**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.025**	**0.002**	**0.09**
0.001	26.350	1.320	2.503	94.99
	26.350	1.555	2.480	94.10
	26.350	1.685	2.467	93.61
ค่าเฉลี่ย		**1.520**	**2.483**	**94.23**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.185**	**0.019**	**0.70**
0.002	26.350	1.495	2.486	94.33
	26.350	1.715	2.464	93.49
	26.350	1.810	2.454	93.13
ค่าเฉลี่ย		**1.673**	**2.468**	**93.65**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.162**	**0.016**	**0.61**
0.005	26.350	1.475	2.488	94.40
	26.350	1.665	2.469	93.68
	26.350	1.765	2.459	93.30
ค่าเฉลี่ย		**1.635**	**2.472**	**93.80**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.147**	**0.015**	**0.56**
0.010	26.350	1.595	2.476	93.95
	26.350	1.800	2.455	93.17
	26.350	1.925	2.443	92.69
ค่าเฉลี่ย		**1.773**	**2.458**	**93.27**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.167**	**0.017**	**0.63**
0.020	26.350	1.260	2.509	95.22
	26.350	1.460	2.489	94.46
	26.350	1.525	2.483	94.21
ค่าเฉลี่ย		**1.415**	**2.494**	**94.63**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.138**	**0.014**	**0.52**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-12 การกำจัด Cu(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Cu(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	54.450	9.330	4.512	82.87
	54.450	9.770	4.468	82.06
	54.450	9.760	4.469	82.08
ค่าเฉลี่ย		**9.620**	**4.483**	**82.33**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.251**	**0.025**	**0.46**
0.001	54.450	3.880	5.057	92.87
	54.450	4.380	5.007	91.96
	54.450	4.620	4.983	91.52
ค่าเฉลี่ย		**4.293**	**5.016**	**92.12**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.378**	**0.038**	**0.69**
0.002	54.450	4.300	5.015	92.10
	54.450	4.710	4.974	91.35
	54.450	5.100	4.935	90.63
ค่าเฉลี่ย		**4.703**	**4.975**	**91.36**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.400**	**0.040**	**0.73**
0.005	54.450	3.990	5.046	92.67
	54.450	4.220	5.023	92.25
	54.450	4.510	4.994	91.72
ค่าเฉลี่ย		**4.240**	**5.021**	**92.21**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.261**	**0.026**	**0.48**
0.010	54.450	4.660	4.979	91.44
	54.450	5.480	4.897	89.94
	54.450	5.890	4.856	89.18
ค่าเฉลี่ย		**5.343**	**4.911**	**90.19**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.626**	**0.063**	**1.15**
0.020	54.450	3.730	5.072	93.15
	54.450	4.200	5.025	92.29
	54.450	4.540	4.991	91.66
ค่าเฉลี่ย		**4.157**	**5.029**	**92.37**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.407**	**0.041**	**0.75**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-13 การกำจัด Ni(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Ni(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	11.410	1.664	0.975	85.42
	11.410	1.678	0.973	85.29
	11.410	1.770	0.964	84.49
ค่าเฉลี่ย		**1.704**	**0.971**	**85.07**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.058**	**0.006**	**0.50**
0.001	11.410	0.650	1.076	94.30
	11.410	0.648	1.076	94.32
	11.410	0.615	1.080	94.61
ค่าเฉลี่ย		**0.638**	**1.077**	**94.41**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.020**	**0.002**	**0.17**
0.002	11.410	0.853	1.056	92.52
	11.410	0.849	1.056	92.56
	11.410	0.822	1.059	92.80
ค่าเฉลี่ย		**0.841**	**1.057**	**92.63**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.017**	**0.002**	**0.15**
0.005	11.410	0.839	1.057	92.65
	11.410	0.810	1.060	92.90
	11.410	0.784	1.063	93.13
ค่าเฉลี่ย		**0.811**	**1.060**	**92.89**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.028**	**0.003**	**0.24**
0.010	11.410	0.803	1.061	92.96
	11.410	0.791	1.062	93.07
	11.410	0.744	1.067	93.48
ค่าเฉลี่ย		**0.779**	**1.063**	**93.17**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.031**	**0.003**	**0.27**
0.020	11.410	0.702	1.071	93.85
	11.410	0.719	1.069	93.70
	11.410	0.680	1.073	94.04
ค่าเฉลี่ย		**0.700**	**1.071**	**93.86**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.020**	**0.002**	**0.17**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-14 การกำจัด Ni(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 25 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Ni(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	26.150	5.910	2.024	77.40
	26.150	6.025	2.013	76.96
	26.150	5.850	2.030	77.63
ค่าเฉลี่ย		**5.928**	**2.022**	**77.33**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.089**	**0.009**	**0.34**
0.001	26.150	3.880	2.227	85.16
	26.150	3.940	2.221	84.93
	26.150	3.810	2.234	85.43
ค่าเฉลี่ย		**3.877**	**2.227**	**85.18**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.065**	**0.007**	**0.25**
0.002	26.150	4.350	2.180	83.37
	26.150	4.425	2.173	83.08
	26.150	4.280	2.187	83.63
ค่าเฉลี่ย		**4.352**	**2.180**	**83.36**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.073**	**0.007**	**0.28**
0.005	26.150	4.070	2.208	84.44
	26.150	4.055	2.210	84.49
	26.150	3.955	2.220	84.88
ค่าเฉลี่ย		**4.027**	**2.212**	**84.60**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.063**	**0.006**	**0.24**
0.010	26.150	4.260	2.189	83.71
	26.150	4.280	2.187	83.63
	26.150	4.245	2.191	83.77
ค่าเฉลี่ย		**4.262**	**2.189**	**83.70**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.018**	**0.002**	**0.07**
0.020	26.150	3.980	2.217	84.78
	26.150	3.875	2.228	85.18
	26.150	3.750	2.240	85.66
ค่าเฉลี่ย		**3.868**	**2.228**	**85.21**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.115**	**0.012**	**0.44**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-15 การกำจัด Ni(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Ni(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	53.650	19.270	3.438	64.08
	53.650	19.170	3.448	64.27
	53.650	18.930	3.472	64.72
ค่าเฉลี่ย		**19.123**	**3.453**	**64.36**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.175**	**0.017**	**0.33**
0.001	53.650	14.960	3.869	72.12
	53.650	15.030	3.862	71.99
	53.650	14.710	3.894	72.58
ค่าเฉลี่ย		**14.900**	**3.875**	**72.23**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.168**	**0.017**	**0.31**
0.002	53.650	15.860	3.779	70.44
	53.650	16.060	3.759	70.07
	53.650	15.630	3.802	70.87
ค่าเฉลี่ย		**15.850**	**3.780**	**70.46**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.215**	**0.022**	**0.40**
0.005	53.650	14.600	3.905	72.79
	53.650	14.640	3.901	72.71
	53.650	14.360	3.929	73.23
ค่าเฉลี่ย		**14.533**	**3.912**	**72.91**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.151**	**0.015**	**0.28**
0.010	53.650	16.570	3.708	69.11
	53.650	16.320	3.733	69.58
	53.650	16.450	3.720	69.34
ค่าเฉลี่ย		**16.447**	**3.720**	**69.34**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.125**	**0.013**	**0.23**
0.020	53.650	15.890	3.776	70.38
	53.650	15.070	3.858	71.91
	53.650	15.200	3.845	71.67
ค่าเฉลี่ย		**15.387**	**3.826**	**71.32**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.441**	**0.044**	**0.82**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-16 การกำจัด Zn(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มเข้น 10 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	10.924	0.662	1.026	93.94
	10.924	0.631	1.029	94.22
	10.924	0.609	1.032	94.43
ค่าเฉลี่ย		**0.634**	**1.029**	**94.20**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.027**	**0.003**	**0.24**
0.001	10.924	0.171	1.075	98.43
	10.924	0.177	1.075	98.38
	10.924	0.155	1.077	98.58
ค่าเฉลี่ย		**0.168**	**1.076**	**98.47**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.011**	**0.001**	**0.10**
0.002	10.924	0.353	1.057	96.77
	10.924	0.297	1.063	97.28
	10.924	0.292	1.063	97.33
ค่าเฉลี่ย		**0.314**	**1.061**	**97.13**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.034**	**0.003**	**0.31**
0.005	10.924	0.290	1.063	97.35
	10.924	0.307	1.062	97.19
	10.924	0.327	1.060	97.01
ค่าเฉลี่ย		**0.308**	**1.062**	**97.18**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.019**	**0.002**	**0.17**
0.010	10.924	0.468	1.046	95.72
	10.924	0.256	1.067	97.66
	10.924	0.264	1.066	97.58
ค่าเฉลี่ย		**0.329**	**1.059**	**96.99**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.120**	**0.012**	**1.10**
0.020	10.924	0.216	1.071	98.02
	10.924	0.224	1.070	97.95
	10.924	0.267	1.066	97.56
ค่าเฉลี่ย		**0.236**	**1.069**	**97.84**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.027**	**0.003**	**0.25**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-17 การกำจัด Zn(II) ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 25 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อมที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	30.165	3.989	2.618	86.78
	30.165	3.958	2.621	86.88
	30.165	3.805	2.636	87.39
ค่าเฉลี่ย		**3.917**	**2.625**	**87.01**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.099**	**0.010**	**0.33**
0.001	30.165	2.569	2.760	91.48
	30.165	2.668	2.750	91.16
	30.165	2.559	2.761	91.52
ค่าเฉลี่ย		**2.599**	**2.757**	**91.39**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.060**	**0.006**	**0.20**
0.002	30.165	2.901	2.726	90.38
	30.165	2.920	2.725	90.32
	30.165	2.799	2.737	90.72
ค่าเฉลี่ย		**2.873**	**2.729**	**90.47**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.065**	**0.007**	**0.22**
0.005	30.165	2.725	2.744	90.97
	30.165	2.831	2.733	90.61
	30.165	2.713	2.745	91.01
ค่าเฉลี่ย		**2.756**	**2.741**	**90.86**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.065**	**0.006**	**0.22**
0.010	30.165	2.902	2.726	90.38
	30.165	2.865	2.730	90.50
	30.165	2.782	2.738	90.78
ค่าเฉลี่ย		**2.850**	**2.732**	**90.55**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.061**	**0.006**	**0.20**
0.020	30.165	2.750	2.742	90.88
	30.165	2.780	2.739	90.78
	30.165	2.758	2.741	90.86
ค่าเฉลี่ย		**2.763**	**2.740**	**90.84**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.016**	**0.002**	**0.05**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ ข-18 การกำจัด Zn(II) โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct blue 71 ความเข้มข้นต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l*

ความเข้มข้นของสีย้อม	ความเข้มข้นของน้ำเสีย (mg/l)		ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
ที่ใช้ในการปรับสภาพ(%)	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	(mg/0.5gผักตบชวา)	(%)
Untreated	56.055	14.135	4.192	74.78
	56.055	14.106	4.195	74.84
	56.055	13.935	4.212	75.14
ค่าเฉลี่ย		**14.059**	**4.200**	**74.92**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.108**	**0.011**	**0.19**
0.001	56.055	10.259	4.580	81.70
	56.055	10.353	4.570	81.53
	56.055	10.025	4.603	82.12
ค่าเฉลี่ย		**10.212**	**4.584**	**81.78**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.169**	**0.017**	**0.30**
0.002	56.055	11.029	4.503	80.32
	56.055	10.615	4.544	81.06
	56.055	11.020	4.504	80.34
ค่าเฉลี่ย		**10.888**	**4.517**	**80.58**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.236**	**0.024**	**0.42**
0.005	56.055	9.859	4.620	82.41
	56.055	9.906	4.615	82.33
	56.055	9.812	4.624	82.50
ค่าเฉลี่ย		**9.859**	**4.620**	**82.41**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.047**	**0.005**	**0.08**
0.010	56.055	10.645	4.541	81.01
	56.055	10.788	4.527	80.75
	56.055	10.716	4.534	80.88
ค่าเฉลี่ย		**10.716**	**4.534**	**80.88**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.072**	**0.007**	**0.13**
0.020	56.055	10.387	4.567	81.47
	56.055	10.205	4.585	81.79
	56.055	10.493	4.556	81.28
ค่าเฉลี่ย		**10.362**	**4.569**	**81.52**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.146**	**0.015**	**0.26**

*ผักตบชวา 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ภาคผนวก ค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-1 การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l ด้วยผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ ปริมาณ 1 และ 2 g / 100 ml

ปริมาณผักตบชวา (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสุดท้าย (mg/l)	ปริมาณ Zn(II) ที่ถูกกำจัด (mg)	ประสิทธิภาพในการกำจัด(%)
1.00	49.700	4.650	4.505	90.64
	49.700	4.900	4.480	90.14
	49.700	4.715	4.499	90.51
ค่าเฉลี่ย		**4.755**	**4.495**	**90.43**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.130**	**0.013**	**0.26**
2.00	49.700	2.917	4.678	94.13
	49.700	2.838	4.686	94.29
	49.700	2.774	4.693	94.42
เฉลี่ย		**2.843**	**4.686**	**94.28**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.072**	**0.007**	**0.14**

ตารางที่ ค-2 การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l ด้วยผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย 0.002% Reactive Red 31 ปริมาณ 1 และ 2 g / 100 ml

ปริมาณผักตบชวา (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสุดท้าย (mg/l)	ปริมาณ Zn(II) ที่ถูกกำจัด (mg)	ประสิทธิภาพในการกำจัด(%)
1.00	49.700	3.809	4.589	92.34
	49.700	3.699	4.600	92.56
	49.700	3.571	4.613	92.81
ค่าเฉลี่ย		**3.693**	**4.601**	**92.57**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.119**	**0.012**	**0.24**
2.00	49.700	1.243	4.846	97.50
	49.700	1.124	4.858	97.74
	49.700	1.253	4.845	97.48
ค่าเฉลี่ย		**1.207**	**4.849**	**97.57**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.072**	**0.007**	**0.14**

ตารางที่ ค-3 การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l ด้วยผักตบชวา ที่ปรับสภาพด้วย 0.001% Direct Blue 71 ปริมาณ 1 และ 2 g / 100 ml

ปริมาณผักตบชวา (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสุดท้าย (mg/l)	ปริมาณ Zn(II) ที่ถูกกำจัด (mg)	ประสิทธิภาพในการกำจัด(%)
1.00	49.700	3.350	4.635	93.26
	49.700	3.091	4.661	93.78
	49.700	3.016	4.668	93.93
ค่าเฉลี่ย		**3.152**	**4.655**	**93.66**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.175**	**0.018**	**0.35**
2.00	49.700	1.726	4.797	96.53
	49.700	1.613	4.809	96.75
	49.700	1.566	4.813	96.85
ค่าเฉลี่ย		**1.635**	**4.807**	**96.71**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.082**	**0.008**	**0.17**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-1 การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี ด้วยผักตบชวา ที่ปรับสภาพด้วย 0.002% Reactive Red 31 ปริมาณ 1 และ 2 g / 100 ml

ปริมาณผักตบชวา (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสุดท้าย (mg/l)	ปริมาณ Zn(II) ที่ถูกกำจัด (mg)	ประสิทธิภาพในการกำจัด(%)
1.00	50.20	3.880	4.632	92.27
	50.20	3.740	4.646	92.55
	50.20	3.630	4.657	92.77
ค่าเฉลี่ย		**3.750**	**4.645**	**92.53**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.125**	**0.013**	**0.25**
2.00	50.20	2.329	4.787	95.36
	50.20	2.014	4.819	95.99
	50.20	2.008	4.819	96.00
ค่าเฉลี่ย		**2.117**	**4.808**	**95.78**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.184**	**0.018**	**0.37**

ตารางที่ ง-2 การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี ด้วยผักตบชวา ที่ปรับสภาพด้วย 0.001% Direct Blue 71 ปริมาณ 1 และ 2 g / 100 ml

ปริมาณผักตบชวา (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสุดท้าย (mg/l)	ปริมาณ Zn(II) ที่ถูกกำจัด (mg)	ประสิทธิภาพในการกำจัด(%)
1.00	50.20	3.768	4.643	92.49
	50.20	3.874	4.633	92.28
	50.20	3.777	4.642	92.48
ค่าเฉลี่ย		**3.806**	**4.639**	**92.42**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.059**	**0.006**	**0.12**
2.00	50.20	2.143	4.806	95.73
	50.20	2.238	4.796	95.54
	50.20	2.253	4.795	95.51
ค่าเฉลี่ย		**2.211**	**4.799**	**95.59**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.060**	**0.006**	**0.12**

ภาคผนวก จ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-1 การกำจัด Cu(II) ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l ด้วยขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยาง

ชนิดของวัสดุ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสุดท้าย (mg/l)	ความสามารถในการกำจัด Cu(II) (mg/0.5g วัสดุ)	(%)
ไม้ตะเคียนทอง ไม่ได้ปรับสภาพ	10.530	2.330	0.820	77.87
	10.530	2.412	0.812	77.09
	10.530	2.558	0.797	75.71
ค่าเฉลี่ย		**2.433**	**0.810**	**76.89**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.115**	**0.012**	**1.10**
ไม้ตะเคียนทอง ปรับสภาพด้วย 1% Reactive red 31	10.530	1.335	0.920	87.32
	10.530	1.317	0.921	87.49
	10.530	1.334	0.920	87.33
ค่าเฉลี่ย		**1.329**	**0.920**	**87.38**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.010**	**0.001**	**0.10**
ไม้เต็ง ไม่ได้ปรับสภาพ	10.530	2.745	0.779	73.93
	10.530	2.825	0.771	73.17
	10.530	2.722	0.781	74.15
ค่าเฉลี่ย		**2.764**	**0.777**	**73.75**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.054**	**0.005**	**0.51**
ไม้เต็ง ปรับสภาพด้วย 1% Reactive red 31	10.530	2.140	0.839	79.68
	10.530	2.143	0.839	79.65
	10.530	2.137	0.839	79.71
ค่าเฉลี่ย		**2.140**	**0.839**	**79.68**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.003**	**0.000**	**0.03**
ไม้ยาง ไม่ได้ปรับสภาพ	10.530	3.032	0.750	71.21
	10.530	2.986	0.754	71.64
	10.530	2.875	0.766	72.70
ค่าเฉลี่ย		**2.964**	**0.757**	**71.85**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.081**	**0.008**	**0.77**
ไม้ยาง ปรับสภาพด้วย 1% Reactive red 31	10.530	0.871	0.966	91.73
	10.530	0.807	0.972	92.34
	10.530	0.742	0.979	92.95
ค่าเฉลี่ย		**0.807**	**0.972**	**92.34**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.065**	**0.006**	**0.61**

ขี้เลื่อย 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ จ-2 การกำจัด Cu(II) ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l ด้วยขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยาง*

ชนิดของวัสดุ	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นสุดท้าย	ความสามารถในการกำจัด Cu(II)	
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/0.5g วัสดุ)	(%)
ไม้ตะเคียนทอง	51.750	39.660	1.209	23.36
ไม่ได้ปรับสภาพ	51.750	40.000	1.175	22.71
	51.750	39.210	1.254	24.23
ค่าเฉลี่ย		**39.623**	**1.213**	**23.43**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.396**	**0.040**	**0.77**
ไม้ตะเคียนทอง	51.750	36.690	1.506	29.10
ปรับสภาพด้วย 1%	51.750	36.610	1.514	29.26
Reactive red 31	51.750	36.390	1.536	29.68
ค่าเฉลี่ย		**36.563**	**1.519**	**29.35**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.155**	**0.016**	**0.30**
ไม้เต็ง	51.750	40.370	1.138	21.99
ไม่ได้ปรับสภาพ	51.750	40.460	1.129	21.82
	51.750	39.930	1.182	22.84
ค่าเฉลี่ย		**40.253**	**1.150**	**22.22**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.284**	**0.028**	**0.55**
ไม้เต็ง	51.750	36.240	1.551	29.97
ปรับสภาพด้วย 1%	51.750	36.640	1.511	29.20
Reactive red 31	51.750	36.800	1.495	28.89
ค่าเฉลี่ย		**36.560**	**1.519**	**29.35**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.288**	**0.029**	**0.56**
ไม้ยาง	51.750	40.260	1.149	22.20
ไม่ได้ปรับสภาพ	51.750	40.830	1.092	21.10
	51.750	40.940	1.081	20.89
ค่าเฉลี่ย		**40.677**	**1.107**	**21.40**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.365**	**0.037**	**0.71**
ไม้ยาง	51.750	34.660	1.709	33.02
ปรับสภาพด้วย 1%	51.750	34.960	1.679	32.44
Reactive red 31	51.750	35.330	1.642	31.73
ค่าเฉลี่ย		**34.983**	**1.677**	**32.40**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.336**	**0.034**	**0.65**

* ขี้เลื่อย 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ จ-3 การกำจัด Ni(II) ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l ด้วยขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยาง

ชนิดของวัสดุ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสุดท้าย (mg/l)	ความสามารถในการกำจัด Ni(II) (mg/0.5g วัสดุ)	(%)
ไม้ตะเคียนทอง ไม่ได้ปรับสภาพ	11.410	4.348	0.706	61.89
	11.410	4.321	0.709	62.13
	11.410	4.221	0.719	63.01
ค่าเฉลี่ย		**4.297**	**0.711**	**62.34**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.067**	**0.007**	**0.59**
ไม้ตะเคียนทอง ปรับสภาพด้วย 1% Reactive red 31	11.410	3.416	0.799	70.06
	11.410	3.399	0.801	70.21
	11.410	3.303	0.811	71.05
ค่าเฉลี่ย		**3.373**	**0.804**	**70.44**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.061**	**0.006**	**0.53**
ไม้เต็ง ไม่ได้ปรับสภาพ	11.410	4.446	0.696	61.03
	11.410	4.482	0.693	60.72
	11.410	4.326	0.708	62.09
ค่าเฉลี่ย		**4.418**	**0.699**	**61.28**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.082**	**0.008**	**0.72**
ไม้เต็ง ปรับสภาพด้วย 1% Reactive red 31	11.410	2.880	0.853	74.76
	11.410	2.917	0.849	74.43
	11.410	2.730	0.868	76.07
ค่าเฉลี่ย		**2.842**	**0.857**	**75.09**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.099**	**0.010**	**0.87**
ไม้ยาง ไม่ได้ปรับสภาพ	11.410	4.688	0.672	58.91
	11.410	4.667	0.674	59.10
	11.410	4.458	0.695	60.93
ค่าเฉลี่ย		**4.604**	**0.681**	**59.65**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.127**	**0.013**	**1.11**
ไม้ยาง ปรับสภาพด้วย 1% Reactive red 31	11.410	2.224	0.919	80.51
	11.410	2.225	0.919	80.50
	11.410	2.025	0.939	82.25
ค่าเฉลี่ย		**2.158**	**0.925**	**81.09**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.115**	**0.012**	**1.01**

ขี้เลื่อย 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ จ-4 การกำจัด Ni(II) ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l ด้วยขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยาง

ชนิดของวัสดุ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นสุดท้าย (mg/l)	ความสามารถในการกำจัด Ni(II) (mg/0.5g วัสดุ)	(%)
ไม้ตะเคียนทอง ไม่ได้ปรับสภาพ	53.650	40.980	1.267	23.62
	53.650	40.970	1.268	23.63
	53.650	40.760	1.289	24.03
ค่าเฉลี่ย		**40.903**	**1.275**	**23.76**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.124**	**0.012**	**0.23**
ไม้ตะเคียนทอง ปรับสภาพด้วย 1% Reactive red 31	53.650	38.010	1.564	29.15
	53.650	37.710	1.594	29.71
	53.650	37.250	1.640	30.57
ค่าเฉลี่ย		**37.657**	**1.599**	**29.81**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.383**	**0.038**	**0.71**
ไม้เต็ง ไม่ได้ปรับสภาพ	53.650	40.250	1.340	24.98
	53.650	40.930	1.272	23.71
	53.650	39.420	1.423	26.52
ค่าเฉลี่ย		**40.200**	**1.345**	**25.07**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.756**	**0.076**	**1.41**
ไม้เต็ง ปรับสภาพด้วย 1% Reactive red 31	53.650	36.040	1.761	32.82
	53.650	36.290	1.736	32.36
	53.650	36.300	1.735	32.34
ค่าเฉลี่ย		**36.210**	**1.744**	**32.51**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.147**	**0.015**	**0.27**
ไม้ยาง ไม่ได้ปรับสภาพ	53.650	40.040	1.361	25.37
	53.650	40.270	1.338	24.94
	53.650	39.790	1.386	25.83
ค่าเฉลี่ย		**40.033**	**1.362**	**25.38**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.240**	**0.024**	**0.45**
ไม้ยาง ปรับสภาพด้วย 1% Reactive red 31	53.650	35.770	1.788	33.33
	53.650	34.810	1.884	35.12
	53.650	35.340	1.831	34.13
ค่าเฉลี่ย		**35.307**	**1.834**	**34.19**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.481**	**0.048**	**0.90**

ขี้เลื่อย 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ จ-5 การกำจัด Zn(II) ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 mg/l ด้วยขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยาง*

ชนิดของวัสดุ	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นสุดท้าย	ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/0.5g วัสดุ)	(%)
ไม้ตะเคียนทอง	10.924	4.744	0.618	56.57
ไม่ได้ปรับสภาพ	10.924	4.766	0.616	56.37
	10.924	4.607	0.632	57.83
ค่าเฉลี่ย		**4.706**	**0.622**	**56.92**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.086**	**0.009**	**0.79**
ไม้ตะเคียนทอง	10.924	3.540	0.738	67.59
ปรับสภาพด้วย 1%	10.924	3.570	0.735	67.32
Reactive red 31	10.924	3.537	0.739	67.62
ค่าเฉลี่ย		**3.549**	**0.738**	**67.51**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.018**	**0.002**	**0.17**
ไม้เต็ง	10.924	5.077	0.585	53.52
ไม่ได้ปรับสภาพ	10.924	4.992	0.593	54.30
	10.924	4.967	0.596	54.53
ค่าเฉลี่ย		**5.012**	**0.591**	**54.12**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.058**	**0.006**	**0.53**
ไม้เต็ง	10.924	3.195	0.773	70.75
ปรับสภาพด้วย 1%	10.924	3.243	0.768	70.31
Reactive red 31	10.924	2.954	0.797	72.96
ค่าเฉลี่ย		**3.131**	**0.779**	**71.34**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.155**	**0.015**	**1.42**
ไม้ยาง	10.924	5.505	0.542	49.61
ไม่ได้ปรับสภาพ	10.924	5.579	0.535	48.93
	10.924	5.505	0.542	49.61
ค่าเฉลี่ย		**5.530**	**0.539**	**49.38**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.043**	**0.004**	**0.39**
ไม้ยาง	10.924	2.391	0.853	78.11
ปรับสภาพด้วย 1%	10.924	2.422	0.850	77.83
Reactive red 31	10.924	2.254	0.867	79.37
ค่าเฉลี่ย		**2.356**	**0.857**	**78.44**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.089**	**0.009**	**0.82**

*ขี้เลื่อย 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ตารางที่ จ-6 การกำจัด Zn(II) ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 mg/l ด้วยขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยาง*

ชนิดของวัสดุ	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นสุดท้าย	ความสามารถในการกำจัด Zn(II)	
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/0.5g วัสดุ)	(%)
ไม้ตะเคียนทอง	56.055	45.315	1.074	19.16
ไม่ได้ปรับสภาพ	56.055	45.220	1.084	19.33
	56.055	44.835	1.122	20.02
ค่าเฉลี่ย		**45.123**	**1.093**	**19.50**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.254**	**0.025**	**0.45**
ไม้ตะเคียนทอง	56.055	42.715	1.334	23.80
ปรับสภาพด้วย 1%	56.055	41.440	1.462	26.07
Reactive red 31	56.055	43.790	1.227	21.88
ค่าเฉลี่ย		**42.648**	**1.341**	**23.92**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**1.176**	**0.118**	**2.10**
ไม้เต็ง	56.055	45.775	1.028	18.34
ไม่ได้ปรับสภาพ	56.055	46.790	0.927	16.53
	56.055	44.340	1.172	20.90
ค่าเฉลี่ย		**45.635**	**1.042**	**18.59**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**1.231**	**0.123**	**2.20**
ไม้เต็ง	56.055	43.320	1.274	22.72
ปรับสภาพด้วย 1%	56.055	42.245	1.381	24.64
Reactive red 31	56.055	41.145	1.491	26.60
ค่าเฉลี่ย		**42.237**	**1.382**	**24.65**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**1.088**	**0.109**	**1.94**
ไม้ยาง	56.055	48.400	0.766	13.66
ไม่ได้ปรับสภาพ	56.055	47.935	0.812	14.49
	56.055	48.020	0.804	14.33
ค่าเฉลี่ย		**48.118**	**0.794**	**14.16**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.248**	**0.025**	**0.44**
ไม้ยาง	56.055	41.565	1.449	25.85
ปรับสภาพด้วย 1%	56.055	41.150	1.491	26.59
Reactive red 31	56.055	40.805	1.525	27.21
ค่าเฉลี่ย		**41.173**	**1.488**	**26.55**
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		**0.381**	**0.038**	**0.68**

*ขี้เลื่อย 0.5 กรัม; น้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร; พีเอช 5.0

ภาคผนวก ฉ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวสำหรับผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ความเข้มข้น 0.00 - 1.00 เปอร์เซ็นต์

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Cu10	Between Groups	1.415E-02	3	4.718E-03	106.830	.000
	Within Groups	3.533E-04	8	4.417E-05		
	Total	1.451E-02	11			
Cu25	Between Groups	.154	3	5.137E-02	958.770	.000
	Within Groups	4.287E-04	8	5.358E-05		
	Total	.155	11			
Cu50	Between Groups	.328	3	.109	122.728	.000
	Within Groups	7.122E-03	8	8.902E-04		
	Total	.335	11			
Ni10	Between Groups	2.472E-02	3	8.239E-03	701.154	.000
	Within Groups	9.400E-05	8	1.175E-05		
	Total	2.481E-02	11			
Ni25	Between Groups	8.450E-02	3	2.817E-02	462.993	.000
	Within Groups	4.867E-04	8	6.083E-05		
	Total	8.498E-02	11			
Ni50	Between Groups	.304	3	.101	458.885	.000
	Within Groups	1.767E-03	8	2.208E-04		
	Total	.306	11			
Zn10	Between Groups	3.834E-03	3	1.278E-03	30.126	.000
	Within Groups	3.393E-04	8	4.242E-05		
	Total	4.173E-03	11			
Zn25	Between Groups	2.996E-02	3	9.987E-03	140.005	.000
	Within Groups	5.707E-04	8	7.133E-05		
	Total	3.053E-02	11			
Zn50	Between Groups	.128	3	4.251E-02	17.049	.001
	Within Groups	1.995E-02	8	2.494E-03		
	Total	.147	11			

ตารางที่ ฉ-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวสำหรับผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71 ความเข้มข้น 0.00 - 1.00 เปอร์เซ็นต์

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Cu10	Between Groups	1.198E-02	3	3.994E-03	76.318	.000
	Within Groups	4.187E-04	8	5.233E-05		
	Total	1.240E-02	11			
Cu25	Between Groups	.153	3	5.089E-02	588.948	.000
	Within Groups	6.913E-04	8	8.642E-05		
	Total	.153	11			
Cu50	Between Groups	.511	3	.170	100.295	.000
	Within Groups	1.357E-02	8	1.697E-03		
	Total	.524	11			
Ni10	Between Groups	2.109E-02	3	7.031E-03	581.855	.000
	Within Groups	9.667E-05	8	1.208E-05		
	Total	2.119E-02	11			
Ni25	Between Groups	7.018E-02	3	2.339E-02	837.954	.000
	Within Groups	2.233E-04	8	2.792E-05		
	Total	7.040E-02	11			
Ni50	Between Groups	.219	3	7.288E-02	466.946	.000
	Within Groups	1.249E-03	8	1.561E-04		
	Total	.220	11			
Zn10	Between Groups	1.643E-03	3	5.476E-04	14.349	.001
	Within Groups	3.053E-04	8	3.817E-05		
	Total	1.948E-03	11			
Zn25	Between Groups	1.866E-02	3	6.220E-03	76.088	.000
	Within Groups	6.540E-04	8	8.175E-05		
	Total	1.931E-02	11			
Zn50	Between Groups	.229	3	7.620E-02	238.865	.000
	Within Groups	2.552E-03	8	3.190E-04		
	Total	.231	11			

ตารางที่ ฉ-3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวสำหรับผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 ความเข้มข้น 0.000 - 0.020 เปอร์เซ็นต์

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Cu10	Between Groups	2.001E-02	5	4.001E-03	288.102	.000
	Within Groups	1.667E-04	12	1.389E-05		
	Total	2.017E-02	17			
Cu25	Between Groups	.219	5	4.376E-02	710.828	.000
	Within Groups	7.387E-04	12	6.156E-05		
	Total	.220	17			
Cu50	Between Groups	.613	5	.123	134.067	.000
	Within Groups	1.097E-02	12	9.141E-04		
	Total	.624	17			
Ni10	Between Groups	2.281E-02	5	4.562E-03	469.221	.000
	Within Groups	1.167E-04	12	9.722E-06		
	Total	2.293E-02	17			
Ni25	Between Groups	4.986E-02	5	9.972E-03	217.571	.000
	Within Groups	5.500E-04	12	4.583E-05		
	Total	5.041E-02	17			
Ni50	Between Groups	.275	5	5.492E-02	128.357	.000
	Within Groups	5.134E-03	12	4.278E-04		
	Total	.280	17			
Zn10	Between Groups	4.931E-03	5	9.862E-04	348.067	.000
	Within Groups	3.400E-05	12	2.833E-06		
	Total	4.965E-03	17			
Zn25	Between Groups	3.800E-02	5	7.600E-03	36.825	.000
	Within Groups	2.477E-03	12	2.064E-04		
	Total	4.048E-02	17			
Zn50	Between Groups	.133	5	2.661E-02	54.354	.000
	Within Groups	5.874E-03	12	4.895E-04		
	Total	.139	17			

ตารางที่ ฉ-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวสำหรับผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Direct Blue 71 ความเข้มข้น 0.000 - 0.020 เปอร์เซ็นต์

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Cu10	Between Groups	2.307E-02	5	4.613E-03	42.130	.000
	Within Groups	1.314E-03	12	1.095E-04		
	Total	2.438E-02	17			
Cu25	Between Groups	.151	5	3.015E-02	140.539	.000
	Within Groups	2.574E-03	12	2.145E-04		
	Total	.153	17			
Cu50	Between Groups	.689	5	.138	80.119	.000
	Within Groups	2.065E-02	12	1.721E-03		
	Total	.710	17			
Ni10	Between Groups	2.343E-02	5	4.685E-03	425.923	.000
	Within Groups	1.320E-04	12	1.100E-05		
	Total	2.356E-02	17			
Ni25	Between Groups	9.154E-02	5	1.831E-02	319.958	.000
	Within Groups	6.867E-04	12	5.722E-05		
	Total	9.223E-02	17			
Ni50	Between Groups	.406	5	8.110E-02	144.166	.000
	Within Groups	6.751E-03	12	5.626E-04		
	Total	.412	17			
Zn10	Between Groups	3.866E-03	5	7.732E-04	26.972	.000
	Within Groups	3.440E-04	12	2.867E-05		
	Total	4.210E-03	17			
Zn25	Between Groups	3.438E-02	5	6.877E-03	159.716	.000
	Within Groups	5.167E-04	12	4.306E-05		
	Total	3.490E-02	17			
Zn50	Between Groups	.353	5	7.067E-02	343.815	.000
	Within Groups	2.467E-03	12	2.056E-04		
	Total	.356	17			

ตารางที่ ฉ-5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์กับน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยผักตบชวา ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 0.002% Reactive Red 31 เมื่อใช้ผักตบชวา 1 และ 2 กรัม

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									95% Confidence Interval of the Mean	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
1g RRWH	Equal variances assumed	.015	.907	.202	4	.850	4.000E-02	.1984	-.5109	.5909
	Equal variances not assumed			.202	3.984	.850	4.000E-02	.1984	-.5118	.5918
2g RRWH	Equal variances assumed	.899	.397	7.155	4	.002	1.8567	.2595	1.1362	2.5772
	Equal variances not assumed			7.155	3.605	.003	1.8567	.2595	1.1040	2.6094

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ-6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์กับน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยผักตบชวา ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 0.001% Direct Blue 71 เมื่อใช้ผักตบชวา 1 และ 2 กรัม

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									95% Confidence Interval of the Mean	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
1g DBWH	Equal variances assumed	4.436	.103	5.789	4	.004	1.2400	.2142	.6452	1.8348
	Equal variances not assumed			5.789	2.448	.018	1.2400	.2142	.4625	2.0175
2g DBWH	Equal variances assumed	.359	.582	9.548	4	.001	1.1167	.1170	.7920	1.4414
	Equal variances not assumed			9.548	3.657	.001	1.1167	.1170	.7796	1.4537

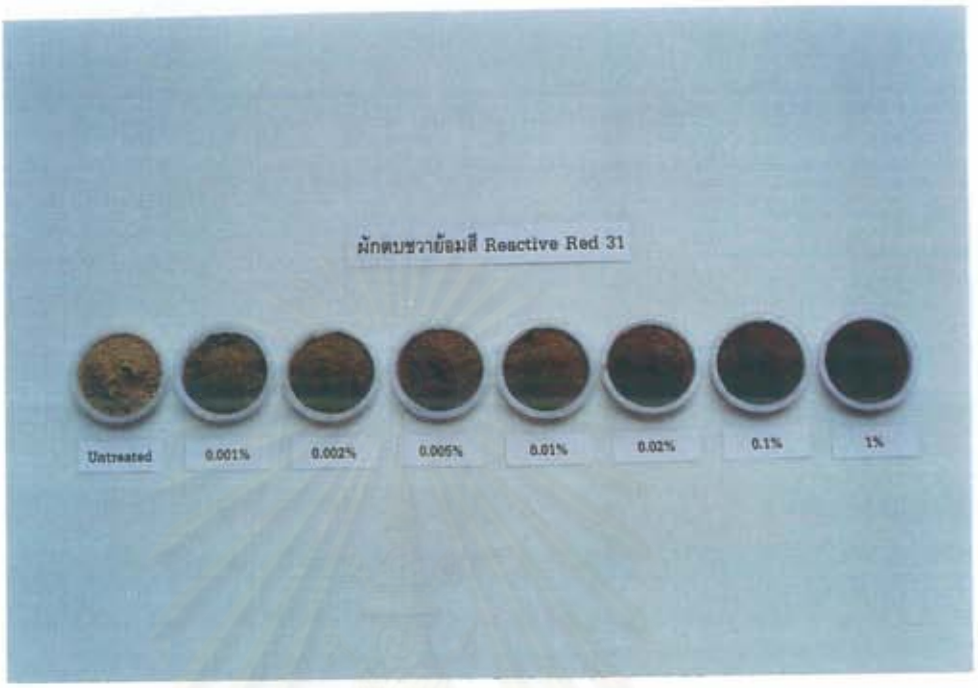
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ ช-1 ผักตบชวาขนาด 180 - 250 µm

ภาพที่ ช-2 การย้อมสีผักตบชวา



ภาพที่ ช-3 ผักตบชวาย้อมสี Reactive Red 31

ภาพที่ ช-4 ผักตบชวาย้อมสี Direct Blue 71

ภาพที่ ช-5 ขี้เลื่อยไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็ง และไม้ยางก่อนและหลังการย้อมสี

ภาพที่ ช-6 การทดสอบความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก

ประวัติผู้วิจัย

นางสาวขวัญเนตร สบายใจ เกิดเมื่อวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2516 ที่จังหวัดสมุทรสงคราม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวาริชศาสตร์ จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ในปีการศึกษา 2538 และได้เข้าศึกษาต่อในสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่ปีการศึกษา 2539

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย