

การใช้สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังสำหรับการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียสังเคราะห์



นายเรืองศักดิ์ ชี้อประสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4976-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

USING ADSORBENT FROM CASSAVA PEEL
FOR COPPER REMOVAL FROM SYNTHETIC WASTEWATER

Mr. Ruangsak Sueprasit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-4976-7

481815

เรื่องศักดิ์ ชื่อประสิทธิ์ : การใช้สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง สำหรับการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียสังเคราะห์ (USING ADSORBENT FROM CASSAVA PEEL FOR COPPER REMOVAL FROM SYNTHETIC WASTEWATER) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ , 171 หน้า. ISBN 974-17-4976-7

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้สารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังในการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียสังเคราะห์ สารดูดซับที่ใช้ในการวิจัยมีวิธีการเตรียมต่างกัน 2 วิธี วิธีที่ 1 คือ กระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง แล้วแช่ในสารละลาย NaHCO_3 (สารดูดซับแบบที่ 2) และ วิธีที่ 2 คือ กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่อุณหภูมิ 350 °C เวลา 3 ชั่วโมง และล้างด้วยน้ำร้อน (สารดูดซับแบบที่ 3) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ขายเป็นการค้าซึ่งถูกใช้เปรียบเทียบ เพื่อหาลักษณะทางเคมี-กายภาพ ที่แตกต่างกันของสารดูดซับทั้ง 3 แบบ สารดูดซับแต่ละตัวใช้น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง เพื่อหาสภาวะการกำจัดทองแดงที่เหมาะสม โดยปรับเปลี่ยนค่า ปริมาณของสารดูดซับ พีเอช เวลาสัมผัส เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงที่ดีที่สุดของสารดูดซับ โดยการทดสอบไอโซเทอมของสารดูดซับ และทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ความยาว 1 เมตร โดยใช้การป้อนน้ำเสียแบบไหลลง ที่มีชั้นสารดูดซับ 0.30 เมตร และมีอัตราการไหล 0.912, 0.456 และ 0.304 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

จากผลการทดลอง สภาวะที่เหมาะสมของการเตรียมสารดูดซับ คือ สารดูดซับแบบที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์สารดูดซับร้อยละ 36.04 ร้อยละของถ้ำ 4.80 ค่าการดูดซับไอโอดีน 460 mg/g พื้นที่ผิว 889.48 m^2/g ปริมาตรโพรง 0.6044 cm^3/g และขนาดโพรงเฉลี่ย 27.18 °A จากการทดลองแบบแบดท์ พบว่า ที่พีเอช 4 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงสูงสุดเท่ากับร้อยละ 95 เวลาสัมผัสที่เหมาะสม 8 ชั่วโมง จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของสารดูดซับ สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมฟรุนดลิช และความสามารถในการดูดซับทองแดงสูงสุด คือ 14.72 mgCu/g สารดูดซับ

ผลการทดลองแบบต่อเนื่อง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดทอง ด้วยคอลัมน์ที่ป้อนน้ำเสียแบบไหลลง ที่ความลึกของคอลัมน์ 30 ซม. ความเข้มข้นทองแดงเริ่มต้น 10 mg/l พบว่าที่จุดสิ้นสุดสภาพมีน้ำเสียที่กรองผ่านสารดูดซับแต่ละคอลัมน์ ปริมาตรเท่ากับคือ 749, 957 และ 1,048 เท่าของปริมาตรคอลัมน์ ตามลำดับ ที่เวลาสัมผัสที่เหมาะสม 30 นาที

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....เรื่องศักดิ์ ชื่อประสิทธิ์.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2548.....

4670458021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

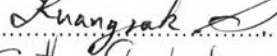
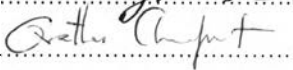
KEY WORD : ADSORBENT/ACTIVATED CARBON /ISOTHERM / CASSAVA PEEL

RUANGSAK SUEPRASIT : USING ADSORBENT FROM CASSAVA PEEL FOR
COPPER REMOVAL FROM SYNTHETIC WASTEWATER. THISIS ADVISOR:
ASSOC.PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 171 pp. ISBN 974-17-4976-7.

The objective of this research was to study the feasibility of copper removal from synthetic wastewater adsorbent (Adsb) prepared from cassava peel. Adbs was prepared by two different methods: 1. Activated by phosphoric acid at 350 °C for 3 hours and soaked in sodiumhydrogencarbonate (the second type of Adbs) ; 2. Activated by phosphoric acid at 350 °C for 3 hours followed by washing with hot water (the third type of Adbs). By commercial grade activated carbon (AC) was used for comparison. Physical-Chemical characteristics of three different Adbs were determined. Each Adbs was tested with synthetic wastewater containing copper to find the optimum condition for copper removal. Parameters varied in the experiment were concentration of Adbs, pH values, and contact time. Isotherm test was then conducted with the best copper removal efficiency of Adbs. Finally, the continuous adsorptive column was studied using down flow column with a diameter of 2.54 cm, length 1.00 metre, height of Adbs of 0.30 metres, flowrate of 0.912,0.456, and 0.304 litres per hour, respectively.

From the experimental results, the optimum condition for Adbs obtained was the second type of Adbs. The yield of the second Adbs activated in the study was 36.04%. The result from Adbs of property analysis showed ash, iodine adsorption, surface area, specific pore volume, and average pore size equaled to 4.8%, 460 mg/g, 889.48 m²/g, 0.6044 cm³/g and 27.18 °A, respectively. In batch studies, the highest removal efficiency for copper was achieved at 95 % at pH 4, a significant amount of copper adsorbed within 8 hours of contact time. From adsorptive isotherm test, the results can be explained by Freundlich isotherm. Maximum adsorptive capacities of the second type of Adbs was equaled to 14.72 mgCu/g.adsorbent.

According to the column of experimental results, the efficiency for copper removal was also studied in the adsorptive column by feeding down flow with synthetic wastewater containing 10 mg/l of copper at the depth of column 30 cm. The result indicated the breakthrough volumes of each column was 749, 957, and 1,048 bed volumes, respectively. At optimum contact time was 30 minutes.

Department.....Environmental Engineering.....Student's Signature.....
Field of study... Environmental Engineering..... Advisor's Signature.....
Academic year.....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

คุณความดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้แก่บิดามารดา ผู้ที่มีพระคุณอย่างสูงยิ่ง ซึ่งให้การอบรม การเลี้ยงดู การศึกษา มาตั้งแต่เยาว์วัย และยังได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้กำลังใจที่ดีที่สุดในระหว่างการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอดจนเสร็จสมบูรณ์ในที่สุด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้จากความช่วยเหลืออย่างดีของ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ทั้งคำแนะนำ ถ่ายทอดวิชาความรู้ในด้านต่างๆ และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องอันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยมาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ในที่สุด จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ.โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเถียร ที่เป็นประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล ที่ให้คำชี้แนะ ปรึกษา และช่วยแก้ไข จนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาคีวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้เสมอมา

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิจัยปริญญาโท ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ห้องปฏิบัติการมูลฝอย ภาคีวิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ ภาคีวิชาชีพอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนเพื่อใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณอภิชัย อรรถนันทน์ ห้างหุ้นส่วน จำกัด สหมิตรแป้งมัน ชลบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก รวมทั้งให้วัสดุดิบ เพื่อใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ จันทวรรณ ตันเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยอำนวยความสะดวกในด้านการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ชาวจุฬาทุกคน และขอขอบคุณบุคคลที่มีได้เอ่ยนามทุกคนที่ให้การช่วยเหลือ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วาณี ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด จนทำให้ฝ่าฟันอุปสรรคมาได้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์.....	4
2.1.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	5
2.1.2 สมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์.....	6
2.1.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	7
2.2 กระบวนการดูดติดผิวและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	9
2.2.1 กระบวนการดูดติดผิว.....	9
2.2.2 อัตราการถ่ายเทโมเลกุล.....	10
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว.....	11
2.3.1 ความปั่นป่วน.....	11
2.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ.....	12
2.3.3 ขนาดของสารที่ถูกดูดติดบนผิวสารดูดซับ.....	12
2.3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดซับ.....	12
2.3.5 ค่าพีเอช.....	12
2.3.6 อุณหภูมิ.....	12

2.4 การวิเคราะห์กระบวนการดูดติดผิว.....	14
2.4.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์.....	14
2.4.2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท.....	16
2.4.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช.....	17
2.5 เขตการถ่ายเทมวล.....	19
2.6 ความจุการดูดติดผิวด้วยสารดูดซับ.....	20
2.7 โลหะหนัก.....	22
2.7.1 เคมีของทองแดง.....	23
2.7.2 ประโยชน์ของทองแดง.....	23
2.7.3 พิษของทองแดง.....	23
2.8 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	24
2.8.1 การดูดติดผิว (Adsorption).....	25
2.8.2 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation).....	25
2.8.3 ปฏิกริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction reduction).....	26
2.8.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange).....	27
2.8.5 การรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis).....	28
2.8.6 การระเหย (Evaporation).....	29
2.8.7 อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis).....	29
2.9 การผลิตแ่งมันสำปะหลัง.....	30
2.9.1 กรรมวิธีการผลิตแ่งมันสำปะหลังแบบเก่า.....	30
2.9.2 กรรมวิธีการผลิตแ่งมันสำปะหลังแบบใหม่.....	31
2.9.3 ของเสียจากการผลิตแ่งมันสำปะหลัง.....	31
2.9.4 การทำสมดุลมวลสาร.....	32
2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
2.10.1 งานวิจัยเกี่ยวกับสารดูดซับที่ผลิตจากแ่งมันสำปะหลัง.....	35
2.10.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดทองแดง.....	36
บทที่ 3 แผนการทดลองและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	46
3.1 สถานที่ทำการวิจัย.....	46
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	46
3.2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์.....	46

3.2.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.2.3	น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์.....	48
3.3	แผนการทดลอง.....	49
3.3.1	การเตรียมสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง.....	50
3.3.2	การศึกษาลักษณะทางเคมีและกายภาพของสารดูดซับ.....	52
3.3.3	การศึกษาเบื้องต้นในการใช้สารดูดซับ ที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังเพื่อกำจัดทองแดง.....	55
3.3.4	ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง ของสารดูดซับที่เหมาะสม.....	57
3.3.5	การทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง โดยใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	60
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	62
4.1	การศึกษาลักษณะสมบัติของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง.....	62
4.1.1	ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี.....	62
4.1.2	การศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวภายนอกของสารดูดซับ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	68
4.1.3	การวิเคราะห์สารดูดซับแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ด้วยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer).....	70
4.1.4	การวิเคราะห์สารดูดซับแบบที่ 2 ด้วยเครื่อง XRF (X-Ray Fluorescence).....	72
4.2	การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สารดูดซับ ที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังเพื่อกำจัดทองแดง.....	72
4.3	การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงของสารดูดซับแบบที่ 2.....	77
4.3.1	การทดสอบหาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับทองแดง.....	77
4.3.2	ผลการทดสอบหาเวลาอิ่มตัวในการการดูดติดผิว.....	82
4.3.3	ผลการทดสอบหาไอโซเทอมการดูดติดผิวของสารดูดซับ ที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลัง (แบบที่ 2)	92
4.4	ผลการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง โดยใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (Adsorptive column).....	96
4.4.1	ผลการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาสัมผัสถึงเปล่า 20 นาที.....	99

4.4.2 ผลการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่องที่ ระยะเวลาสัมผัสดังกล่าว 30 นาที.....	101
4.5 การประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตสารดูดซับ จากเปลือกมันสำปะหลัง.....	105
4.5.1 วัตถุดิบ สารเคมี และค่าไฟฟ้าสำหรับใช้ในการผลิต.....	105
4.5.2 การประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตสารดูดซับ จากเปลือกมันสำปะหลัง.....	105
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	107
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	107
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	108
รายการอ้างอิง.....	109
ภาคผนวก.....	115
ภาคผนวก ก.....	116
ภาคผนวก ข.....	121
ภาคผนวก ค.....	125
ภาคผนวก ง.....	128
ภาคผนวก จ.....	135
ภาคผนวก ฉ.....	151
ภาคผนวก ช.....	157
ภาคผนวก ซ.....	163
ภาคผนวก ฌ.....	166
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	171

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ผลของแฟกเตอร์ของการแยกตัวของการแยกตัวจากลักษณะรูปไอโซเทอม.....	16
ตารางที่ 2.2 ปริมาณของเสียของโรงงาน.....	32
ตารางที่ 2.3 สมดุลกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบมาตรฐานสมดุล (กระบวนการผลิตที่มีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่).....	33
ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้.....	49
ตารางที่ 3.2 วิธีการ และขั้นตอนสำหรับการเตรียมสารดูดซับ 2 แบบ.....	51
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง กับถ่านกัมมันต์ที่ขายเป็นการค้า (แบบที่ 1).....	64
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง กับสารดูดซับชนิดต่าง ๆ.....	67
ตารางที่ 4.3 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารดูดซับ แบบที่ 2 ที่สามารถวัดด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF).....	72
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของสารดูดซับ 3 แบบ ที่ความเข้มข้นของทองแดง เริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	73
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสารดูดซับ.....	77
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการดูดติดผิวทองแดงบนสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลัง.....	93
ตารางที่ 4.7 สรุปความสามารถในการดูดติดผิวทองแดงของสารดูดซับแบบแบดซ์.....	95
ตารางที่ 4.8 การทดสอบแบบต่อเนื่องด้วยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	96
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	103

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกราไฟท์.....	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	6
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดติดผิวด้วยสารดูดซับ.....	11
รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางถ่านกัมมันต์.....	13
รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์.....	15
รูปที่ 2.6 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท.....	17
รูปที่ 2.7 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช.....	18
รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช.....	19
รูปที่ 2.9 กราฟเบรคทรุจสำหรับถ่านกัมมันต์ที่แสดงการเคลื่อนที่ของ MTZ เทียบกับปริมาตรที่ผ่านทั้งหมด.....	20
รูปที่ 2.10 รูปแบบฟรุนดลิชไอโซเทอม.....	21
รูปที่ 2.11 การตกตะกอนของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ในรูปไฮดรอกไซด์ และซัลไฟด์.....	26
รูปที่ 2.12 สมดุลมวลสารของกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	34
รูปที่ 3.1 ถังดูดติดผิวที่ใช้ในการทดสอบแบบคอลัมน์.....	48
รูปที่ 3.2 เปลือกมันสำปะหลังแห้งก่อนนำมาเตรียมสารดูดซับ.....	51
รูปที่ 3.3 วิธีการและขั้นตอนการเตรียมสารดูดซับทั้ง 2 แบบ.....	53
รูปที่ 3.4 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของสารดูดซับที่เตรียม.....	54
รูปที่ 3.5 แผนผังการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงเบื้องต้นของสารดูดซับ.....	56
รูปที่ 3.6 แผนภาพการหาพีเอชที่เหมาะสม.....	58
รูปที่ 3.7 แผนภาพการทดสอบแบบแบตช์เพื่อหาปริมาณสารดูดซับและเวลาอิ่มตัว ที่เหมาะสม.....	59
รูปที่ 3.8 ถังดูดติดผิวที่ใช้ในการทดสอบแบบคอลัมน์.....	61
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของสารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังแบบที่ 2 (ล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์คาร์บอนเนต).....	63
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของสารดูดซับที่ผลิตจากเปลือกมันสำปะหลังแบบที่ 3 (ล้างด้วยน้ำร้อน).....	63

รูปที่ 4.3 ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีการเตรียมสารดูดซับ 2 แบบ.....	65
รูปที่ 4.4 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของสารดูดซับ 3 แบบ จากกรรมวิธีการเตรียมสารดูดซับ.....	66
รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แบบที่ 1.....	69
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แบบที่ 1.....	69
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แบบที่ 1.....	69
รูปที่ 4.8 ค่า A(Absorbance)และช่วงความถี่ของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังแบบที่ 2...71	
รูปที่ 4.9 ค่า A(Absorbance)และช่วงความถี่ของสารดูดซับจากเปลือกมันสำปะหลังแบบที่ 3...71	
รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง ของสารดูดซับ 3 แบบ.....	74
รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นทองแดงในน้ำเสียที่ผ่านการด้วยสารดูดซับ 3 แบบ.....	75
รูปที่ 4.12 พิเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยสารดูดซับ 3 แบบ.....	76
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง ของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารดูดซับ ปริมาณต่าง ๆ ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 3, 4 และ 5.....	79
รูปที่ 4.14 ร้อยละการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารดูดซับ จากเปลือกมันสำปะหลัง แบบที่ 2.....	81
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโดยการตกตะกอนของชุดควบคุม ที่พีเอช 3, 4 และ5.....	81
รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อกำจัดด้วยสารดูดซับ แบบที่ 2 ที่พีเอช 3, 4 และ5.....	82
รูปที่ 4.17 ผลของเวลาสัมผัสของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	83
รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ปริมาณ 20 ถึง 120 มิลลิกรัม ต่อ 50 มิลลิลิตรน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาต่าง.....	84
รูปที่ 4.19 ความสามารถในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	85
รูปที่ 4.20 ความเข้มข้นทองแดงที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการกำจัดด้วยถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1 ปริมาณต่าง ๆ.....	86
รูปที่ 4.21 ไอโซเทอมแบบพุนดลิช ของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1.....	87
รูปที่ 4.22 ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ แบบที่ 1.....	87

รูปที่ 4.23 ผลของเวลาสัมพัทธ์ของการดูดติดผิวของสารดูดซับ แบบที่ 2 ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	86
รูปที่ 4.24 ความสามารถในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้สารดูดซับแบบที่ 2 ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	90
รูปที่ 4.25 ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการกำจัดด้วยสารดูดซับ แบบที่ 2 ปริมาณต่าง ๆ.....	91
รูปที่ 4.26 ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ของการดูดติดผิวของสารดูดซับ แบบที่ 2.....	93
รูปที่ 4.27 ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ของการดูดติดผิวของสารดูดซับ แบบที่ 2.....	94
รูปที่ 4.28 คอลัมน์ที่ใช้ในการทดสอบการดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง.....	97
รูปที่ 4.29 เส้นโค้งเบรคทูร์ชของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ในการกำจัดทองแดง ที่เวลากัก 10 นาที.....	98
รูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ถึงเปล่า 10 นาที.....	99
รูปที่ 4.31 เส้นโค้งเบรคทูร์ชของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ในการกำจัดทองแดง ที่เวลากัก 20 นาที.....	100
รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ถึงเปล่า 20 นาที.....	101
รูปที่ 4.33 เส้นโค้งเบรคทูร์ชของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ในการกำจัดทองแดง ที่เวลากัก 30 นาที.....	102
รูปที่ 4.34 ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ถึงเปล่า 20 นาที.....	102