



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การศึกษาการใช้ประโยชน์ของจอกหูหนูและผักตบชวาในการดูดซับสารอินทรีย์

Study on Application of Floating Mass and Water Hyacinth in Sorption of Organic Compounds



โดย

ดร. อุตาร์ตน์ ฉาวรชัยสิทธิ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 64374
วัน,เดือน,ปี..... 11 ก.ย. 2549

b. 11648011
i.

รายงานฉบับนี้ได้รับเงินงบประมาณสนับสนุนจาก
โครงการวิจัย ทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อภาษาไทย

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำมวลแห้งของจอกหูหนูและ ผักตบชวามาใช้เป็นตัวดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอล โดยอนุพันธ์ของฟีนอลที่ทำการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ ฟีนอล (C_6H_5OH), 4-คลอโรฟีนอล (C_6H_4ClO) และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ($C_6H_3Cl_2O$) นอกจากนี้ยัง ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลด้วยวิธีการทดลองแบบแบตช์ ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ขนาดอนุภาคของพืช ปริมาณมวลแห้งของพืช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารละลายฟีนอล และค่าพีเอชของสารละลาย ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอล คือ ปริมาณมวลแห้งของพืช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล และค่าพีเอช โดย จอกหูหนูมีความสามารถในการดูดซับได้ 91.8 ± 6.73 % เมื่อใช้มวลแห้งของพืชในปริมาณเท่ากับ 0.5 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลที่พีเอช 7 มีค่าเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำ การเขย่าเป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์สามารถ เรียงลำดับได้ดังนี้คือ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล > ฟีนอล > 4-คลอโรฟีนอล ในกรณีของผักตบชวาพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟีนอลคือ ปริมาณมวลแห้งของพืช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้น เริ่มต้นของฟีนอล และชนิดอนุพันธ์ของฟีนอล โดยผักตบชวาสามารถดูดซับฟีนอลได้ 48.1 ± 7.04 % เมื่อใช้มวลแห้งของผักตบชวาในปริมาณเท่ากับ 0.5 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการเขย่าสารละลายเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง ความสามารถในการดูด ซับอนุพันธ์ของฟีนอลสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล > 4-คลอโรฟีนอล > ฟีนอล จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับพบว่าสมการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูและ ผักตบชวาสามารถอธิบายได้โดยไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิช โดยมีไอโซเทอร์มการดูดซับ ของจอกหูหนูคือ $\log q = 1.5953 \log C_e - 0.4154$ ($r^2 = 0.7784$) และไอโซเทอร์มการดูดซับของ ผักตบชวาคือ $\log q = 4.3598 \log C_e - 2.3775$ ($r^2 = 0.6071$) จากการทำนายสมการไอโซเทอร์มของ การดูดซับสำหรับพืชทั้งสองชนิดพบว่าค่า K และ $1/n$ สำหรับจอกหูหนูมีค่าเท่ากับ 0.38 และ 1.5953 ตามลำดับ ในขณะที่ผักตบชวามีค่า K และ $1/n$ เท่ากับ 0.004 และ 4.3598 ตามลำดับ การทดสอบอายุ การใช้งานของจอกหูหนูด้วยวิธีทดสอบแบบคอลัมน์ พบว่าจุดที่สารดูดซับหมดประสิทธิภาพ เกิดขึ้นเมื่อผ่านสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 150 มิลลิตร เข้าสู่คอลัมน์อย่าง ต่อเนื่อง

คำสำคัญ: การดูดซับ วัชพืชน้ำ การจัดการของเสีย ฟีนอล

Abstract

This research investigated the possibility in using dried biomass of floating mass and water hyacinth as adsorbent for phenol derivatives. The phenol derivatives being tested were phenol (C_6H_5OH), 4-chlorophenol (C_6H_4ClO), and 2,4-dichlorophenol ($C_6H_4Cl_2O$). In addition, factors affecting phenol adsorption were studied using batch experiment. These factors were plant particle size, plant dosage, contact time, initial phenol concentration, pH, and types of phenol derivatives. Results from the study showed that factors affecting phenol adsorption by floating mass were plant dosage, contact time, initial phenol concentration, and pH. Floating mass had phenol adsorption capacity of $91.8 \pm 6.73\%$ when using 0.5 g of dried biomass, initial phenol concentration of 5 mg/L at pH 7, and at least 3 hours for contact time. Furthermore, adsorption efficiency of floating mass was depended on phenol derivatives in which adsorption capacity can be arranged in the following order: 2,4-dichlorophenol > phenol > 4-chlorophenol. In case of water hyacinth, factors affecting phenol adsorption capacity were plant dosage, contact time, initial phenol concentration and phenol derivatives. Phenol adsorption capacity of water hyacinth was $48.1 \pm 7.04\%$ when using 0.5 gram of dried biomass, 5 mg/L initial phenol concentration, and shaking for at least 1 hour. Adsorption capacity of phenol derivatives were arranged as follow: 2,4-dichlorophenol > 4-chlorophenol > phenol. The study of adsorption isotherm found that adsorption equilibrium of floating mass and water hyacinth was best described by Freundlich isotherm. The adsorption isotherm for floating mass was $\log q = 1.5953 \log C_e - 0.4154$ ($r^2 = 0.7784$) and the adsorption isotherm for water hyacinth was $\log q = 4.3598 \log C_e - 2.3775$ ($r^2 = 0.6071$). By calculating adsorption isotherm equation for both plants, K and 1/n value for floating mass were 0.38 and 1.5953, respectively, while K and 1/n value for water hyacinth were 0.004 and 4.3598, respectively. Test of service time for floating mass using column method was found that the exhaust point using 4 gram of dried floating mass was occurred when a 150 mL of phenol solution at concentration of 5 mg/L was continuously flowed through the column.

Keywords: adsorption, aquaphyte, waste management, phenol

บทสรุปย่อผู้บริหาร

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์วัชพืชน้ำสองชนิด ได้แก่ จอกหูหนู และผักตบชวาในงานด้านสิ่งแวดล้อม พืชทั้งสองชนิดมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลได้ดีในระดับหนึ่ง ประสิทธิภาพในการดูดซับขึ้นอยู่กับปริมาณของมวลแห้งของพืชที่ใช้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเคมี เวลาที่ใช้ในการบำบัด ค่าพีเอชของสารละลาย และชนิดของสารประกอบฟีนอล อย่างไรก็ตามพบว่าตัวดูดซับประเภทนี้มีอายุการใช้งานค่อนข้างสั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานดังกล่าว ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตลอด
โครงการวิจัยนี้ จนได้จัดเป็นรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์ของงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคุณรัตติญา ไชยสุนทร และคุณพิศาล โรจน์รัตนวิชัยที่ได้ให้ความ
ช่วยเหลือในการเก็บรวบรวมจอภาพและฝึกคอบชวาเพื่อใช้ในการศึกษารังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
บทสรุปย่อผู้บริหาร	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3. ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	4
2.1. ฟีนอลและอนุพันธ์.....	4
2.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี.....	4
2.1.2 การกระจายตัวของฟีนอลและอนุพันธ์	5
2.1.3 ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ.....	7
2.1.4 กระบวนการบำบัดฟีนอล.....	7
2.2. ฟืชที่นำมาใช้ในการศึกษา.....	8
2.2.1 ลักษณะทางกายภาพ	8
2.2.2 องค์ประกอบทางเคมี.....	9
2.2.3 การนำไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับสารเคมี.....	10
2.3. กระบวนการดูดซับ	10
2.3.1 ประเภทของตัวดูดซับ.....	11
2.3.2 กลไกการดูดซับ.....	11
2.3.3 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	12
2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.3.5 การศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ.....	19
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	22
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	22
3.1.1 ตัวดูดซับ.....	22
3.1.2 สารเคมี	22
3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ	22
3.2 การเตรียมสารเคมี.....	23
3.3 วิธีการทดลอง	24
3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับจากจอกหูหนูและผักตบชวา.....	24
3.3.2 การศึกษาลักษณะ โครงสร้างของจอกหูหนูและผักตบชวา	24
3.3.3 การศึกษาหาพื้นที่ผิวของมวลแห้งของพืช	24
3.3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	25
3.3.5 การเตรียมชุดทดลองควบคุม	27
3.3.6 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ	27
3.3.7 การศึกษาชนิดของฟินอลและอนุพันธ์	27
3.3.8 การศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ.....	27
3.3.9 การวิเคราะห์หาปริมาณฟินอลและอนุพันธ์โดยวิธีเทียบสี.....	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	29
4.1 ธรรมชาติของจอกหูหนูและผักตบชวา.....	29
4.1.1 ลักษณะ โครงสร้างของตัวดูดซับ	30
4.1.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของจอกหูหนูและผักตบชวา.....	32
4.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	34
4.2.1 ขนาดอนุภาคของพืช	34
4.2.2 ปริมาณมวลแห้งของพืช	35
4.2.3 ระยะเวลาสัมผัส.....	37
4.2.4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอล.....	39
4.2.5 ค่าพีเอชของสารละลาย.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.2.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	41
4.2.7 ชนิดของฟีนอลและอนุพันธ์.....	43
4.3 อายุการใช้งานของตัวดูดซับ	44
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก ก ต้นฉบับบทความเพื่อพิจารณาเผยแพร่ในวารสาร	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุพันธ์ฟินอล	4
--------------	--	---



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	สัดส่วนการกระจายตัวของฟีนอลในสารละลาย ณ พีเอชแตกต่างกัน.....6
รูปที่ 2.2	สัดส่วนการกระจายตัวของ4-คลอโรฟีนอลในสารละลาย ณ พีเอชแตกต่างกัน6
รูปที่ 2.3	สัดส่วนการกระจายตัวของ 2, 4-ไดคลอโรฟีนอลในสารละลาย ณ พีเอช แตกต่างกัน.....6
รูปที่ 2.4	ลักษณะทั่วไปของจอกหูหนู8
รูปที่ 2.5	ลักษณะทั่วไปของผักตบชวา9
รูปที่ 2.6	กลไกของการเคลื่อนย้ายของสารเคมีในกระบวนการดูดซับ12
รูปที่ 2.7	ลักษณะเส้นไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบต่างๆ14
รูปที่ 2.8	กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์16
รูปที่ 2.9	กราฟเส้นตรงไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนดลิช17
รูปที่ 2.10	แผนภาพอย่างง่ายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นของการดูดซับ และความ เข้มข้นของสารในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด และปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์19
รูปที่ 4.1	ลักษณะทั่วไปของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง โดยที่ (ก) จอกหูหนู และ (ข) ผักตบชวา.....29
รูปที่ 4.2	ลักษณะของตัวดูดซับที่ผ่านการบด และอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยที่ (ก) จอกหูหนู และ (ข) ผักตบชวา30
รูปที่ 4.3	ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดย Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 600 เท่า โดยที่ (ก) จอกหูหนู (ข) ผักตบชวา และ(ค) ถ่านกัมมันต์ (http://www.cee.vt.edu/program_area/environmental/teach/wtprimer/carbon/sketcarb.html).....31
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทธิลีนบลูที่เหลือใน สารละลายกับปริมาณเมทธิลีนบลูที่ถูกดูดซับโดยจอกหูหนู ณ สภาวะสมดุล32
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทธิลีนบลูที่เหลือใน สารละลายกับปริมาณเมทธิลีนบลูที่ถูกดูดซับโดยผักตบชวา ณ สภาวะสมดุล33
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับ โดยเฉลี่ย (%) กับขนาดอนุภาค ของพีช (มิลลิเมตร)โดยที่ ○ จอกหูหนู และ ● ผักตบชวา34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายฟีนอลกับปริมาณมวลแห้งของจอกหูหนู.....	35
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายฟีนอลกับปริมาณมวลแห้งของผักตบชวา.....	36
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูกับระยะเวลาสัมผัส.....	37
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับฟีนอลของผักตบชวากับระยะเวลาสัมผัส.....	38
รูปที่ 4.11	อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับของจอกหูหนู.....	39
รูปที่ 4.12	อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับของผักตบชวา.....	39
รูปที่ 4.13	อิทธิพลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายฟีนอลของจอกหูหนู.....	40
รูปที่ 4.14	อิทธิพลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายฟีนอลของผักตบชวา.....	41
รูปที่ 4.15	ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนู.....	42
รูปที่ 4.16	ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลของผักตบชวา.....	42
รูปที่ 4.17	ประสิทธิภาพของจอกหูหนูและผักตบชวาในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล โดย <input type="checkbox"/> จอกหูหนู และ <input checked="" type="checkbox"/> ผักตบชวา.....	43
รูปที่ 4.18	ความสามารถในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนู เมื่อผ่านสารละลายฟีนอลเข้าสู่คอลัมน์ ณ ปริมาตรต่างกัน โดย ● แสดงความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำที่ออกจากระบบ □ แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับของจอกหูหนู และ แสดงขอบเขตที่ความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำที่ออกจากคอลัมน์เท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นที่เข้าสู่คอลัมน์.....	45

คำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้

C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเคมี (มิลลิกรัมต่อลิตร)
C_c	ความเข้มข้นของสารเคมี ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
q	ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของมวลแห้งของพีช (โมลต่อกรัม หรือ มิลลิกรัมต่อกรัม)
q_{max}	จำนวน โมลของสีเมทิลีนบลูต่อกรัมของตัวดูดซับที่เพียงพอต่อการสร้างชั้นการดูดซับแบบชั้นเดียว
K	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ
M	น้ำหนักของมวลแห้งของพีช (กรัม)
$1/n$	ค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลาย
S	พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับ (ตารางเมตรต่อกรัม)
SD	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

จอกหูหนู (Floating Mass) และผักตบชวา (Water hyacinth) เป็นวัชพืชลอยน้ำที่สามารถเจริญเติบโตและแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็ว ปริมาณการปกคลุมที่ผิวน้ำมากเกินไป ทำให้ความเข้มของแสงที่ส่องผ่านแหล่งน้ำมีปริมาณลดลง ลดปริมาณการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายและพืชอื่นในแหล่งน้ำ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นสำหรับสัตว์น้ำลดลง และน้ำเกิดการเน่าเสียได้ในที่สุด การกำจัดจอกหูหนูและผักตบชวาโดยการตัดหรือการลอกออกจากผิวน้ำน้ำจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อลดปัญหาการเน่าเสียของแหล่งน้ำ ผลที่ตามมาคือเกิดวัสดุเหลือทิ้งที่จะต้องหาวิธีการกำจัดหรือนำไปใช้ประโยชน์ ความพยายามในการนำเอาวัชพืชโดยเฉพาะผักตบชวาไปใช้ประโยชน์ทางเชิงพาณิชย์เกิดขึ้น แต่การประยุกต์ใช้โดยส่วนใหญ่เน้นไปในด้านหัตถกรรม เช่น เครื่องเรือน หรือเครื่องจักสาน สำหรับการนำวัชพืชเหล่านี้มาใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมพบว่า ทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์ให้กับวัชพืชทั้งสอง คือการนำจอกหูหนูและผักตบชวานั้นมาใช้เป็นตัวดูดซับมลพิษที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ

ฟีนอลและอนุพันธ์จัดเป็นมลพิษทางน้ำที่สำคัญกลุ่มหนึ่ง สารกลุ่มนี้สามารถพบได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติรวมทั้งในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว แหล่งกำเนิดที่สำคัญของสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอลมาจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ การผลิตสี ตัวทำละลาย การผลิตยาและอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (Aksu and Yemer, 1998) ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งในการก่อให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นและสีที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำดื่ม การปนเปื้อนในน้ำดื่มในระดับความเข้มข้นเพียง 1 ไมโครกรัมต่อลิตรสามารถทำให้น้ำมีกลิ่นและสีที่ไม่เหมาะสมต่อการบริโภค (Rao and Viraraghavan, 2002) นอกจากนี้การปนเปื้อนในระดับมิลลิกรัมต่อลิตรมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำ วิธีการบำบัดฟีนอลและอนุพันธ์ที่ปนเปื้อนในน้ำสามารถกระทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่นการบำบัดทางชีวภาพ การสกัดด้วยตัวทำละลาย และการดูดซับ เป็นต้น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ข้อจำกัดที่สำคัญของถ่านกัมมันต์คือ มีราคาแพง อีกทั้งการนำกลับมาใช้ใหม่ก็ทำได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูง การศึกษาหาตัวดูดซับประเภทอื่นที่มีราคาถูกกว่า หาได้ง่ายและมีประสิทธิภาพใน

การดูดซับที่ใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์ เพื่อที่จะใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม

คณะวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเอามวลแห้งของผักตบชวาและจอกหูหนูมาใช้เป็นตัวดูดซับสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น โลหะหนัก สีย้อม และน้ำมัน เป็นต้น Low et al. (1994) ได้ศึกษาถึงการใช้มวลแห้งของรากผักตบชวามาใช้ในการดูดซับคอปเปอร์ (Cu^{2+}) และพบว่า รากของผักตบชวามีความสามารถในการดูดซับ Cu^{2+} ได้ 20.9 mg Cu/g Schneider I.A.H and Rubio J. (1999) พบว่ามวลแห้งของจอกหูหนู (*Salvinia* sp.) และรากผักตบชวา (*Eichornia* sp.) มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก Cr^{3+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} แตกต่างกัน โดยมีความสามารถดูดซับสูงสุดที่ 0.9 meq/g และ 0.7 meq/g สำหรับจอกหูหนูและผักตบชวาตามลำดับ Low et al. (1995) ศึกษาถึงการใช้มวลแห้งของผักตบชวาเป็นตัวดูดซับสีย้อมประเภทเบสิก 2 ชนิดคือ Methylene blue และ Victoria blue พบว่าผักตบชวาสามารถดูดซับสีย้อมประเภทเบสิกได้ 128.9 mg/g และ 145.4 mg/g ตามลำดับ Ribeiro et al. (2000) ได้ศึกษาถึงการนำเอามวลแห้งของจอกหูหนูมาใช้ในการดูดซับน้ำมัน พบว่าส่วนใบของจอกหูหนูซึ่งมีขนาด >1mm สามารถดูดซับน้ำมันได้ 7.3-11.6 g/g ในขณะที่รากของจอกหูหนูซึ่งมีขนาดน้อยกว่า 1 mm สามารถดูดซับน้ำมันได้ 3.6-4.8 g/g งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้มวลแห้งของพืชทั้งสองในการดูดซับสารเคมีหลายชนิด ดังนั้นการศึกษาดังกล่าวถึงการใช้ประโยชน์ของมวลแห้งของผักตบชวาและจอกหูหนูแห้งในการดูดซับสารอินทรีย์กลุ่มฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ดีจึงมีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูง นอกจากนี้พืชทั้งสองชนิดสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก ดังนั้นการนำมวลแห้งของผักตบชวาและจอกหูหนูมาใช้ดูดซับสารอินทรีย์จึงเป็นทางเลือกใหม่ในการนำเอาวัชพืชมาใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ในงานสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมวลแห้งของวัชพืชลอยน้ำ 2 ประเภทคือ จอกหูหนู และผักตบชวามาใช้ในการดูดซับสารละลายฟีนอล
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาในการดูดซับสารละลายฟีนอลทั้งแบบครั้ง (batch) และแบบคอลัมน์ (column)

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของมวลแห้งของผักตบชวา และจอกหูหนู
2. ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์กลุ่มฟีนอล โดยใช้มวลแห้งของผักตบชวาและจอกหูหนูเป็นตัวดูดซับ
3. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายฟีนอล โดยใช้มวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวา ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ปริมาณของมวลแห้งของพืช ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอล และ ผลของขนาดอนุภาคตัวดูดซับ
4. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบถึงการใช้ประโยชน์ของวัชพืชลอยน้ำในการบำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ
2. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารอินทรีย์กลุ่มฟีนอล โดยใช้มวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวา และนำสภาวะที่เหมาะสมนี้ไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมได้
3. ทราบถึงวิธีการบำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนต่ำ

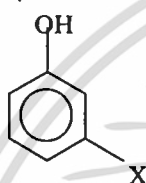
บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟีนอลและอนุพันธ์

2.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี

อนุพันธ์ของฟีนอลมีสูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไปคือ



เมื่อ X แสดงหมู่แทนที่ เช่น -H, -Cl, -NO₂

ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาความสามารถของจอกหูหนูและผักตบชวาในการดูดซับสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอล 3 ชนิด คือฟีนอล, 4-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุพันธ์ฟีนอลทั้ง 3 ชนิด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

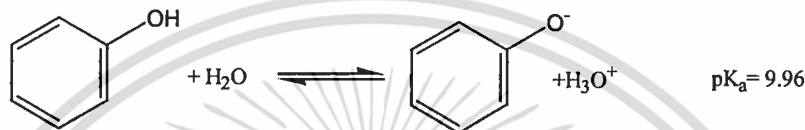
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุพันธ์ฟีนอล (<http://www.merk.co.th>)

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ฟีนอล 	4-คลอโรฟีนอล 	2,4-ไดคลอโรฟีนอล
สูตรเคมี	C ₆ H ₆ O	C ₆ H ₅ ClO	C ₆ H ₄ Cl ₂ O
น้ำหนักโมเลกุล	94	128.5	163
จุดเดือด (°C)	182	216-218	209-211
จุดหลอมเหลว (°C)	40	41-44	40-43
ความดันไอ (hPa)	0.2 (ที่ 20°C)	1.3 (ที่ 50°C)	0.15 (ที่ 20°C)
ความสามารถในการละลายน้ำ	54 g/l	27 g/l	4.5 g/l
ความเป็นกรด (pK _a)	9.96	9.2	7.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่มีการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การกระจายตัวของฟีนอลและอนุพันธ์

ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลมีสมบัติเป็นกรดอินทรีย์ สารในกลุ่มนี้เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้โปรตอน และไอออนที่มีประจุลบ (charged species) ดังนั้นสปีชีส์เปลี่ยนแปลงไปตามค่าพีเอชของสารละลาย ดังตัวอย่างสารละลายฟีนอลดังต่อไปนี้คือ



ในกรณีที่สารละลายมีค่าพีเอชมากกว่าค่า pK_a ภายใต้สภาวะดังกล่าว สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางขวาเนื่องจากมี H_3O^+ น้อย ทำให้ฟีนอลอยู่ในรูป $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$ เป็นส่วนใหญ่ ในทางตรงกันข้ามพบว่าเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชน้อยกว่าค่า pK_a ของฟีนอล สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางซ้ายเนื่องจากมี H_3O^+ มาก ทำให้ฟีนอลอยู่ในรูป $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$

องศาการแตกตัวของกรดอ่อน (Degree of Dissociation of weak acids, α) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงสัดส่วนการกระจายตัวของสปีชีส์ของสารอินทรีย์ ณ พีเอชต่างๆของสารละลาย และสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.1

$$\text{องศาของการแตกตัว} = \frac{\text{ความเข้มข้นของอนุโมลกรดที่แตกตัวออกมา}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \quad (2.1)$$

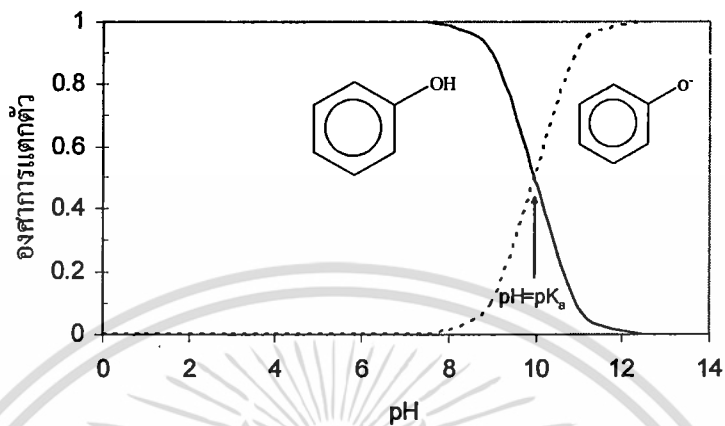
สัญลักษณ์ α_0 ใช้แสดงสัดส่วนของอนุโมลที่ไม่มี การเสีย H^+ และ α_1 ใช้แสดงสัดส่วนของอนุโมลที่มีการเสีย H^+

ในกรณีที่สารอินทรีย์เป็นกรดโมโนโปรติก ค่า α_0 และ α_1 สามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่า K_a ของสาร และค่าพีเอชของสารละลาย โดยใช้สมการที่ 2.2

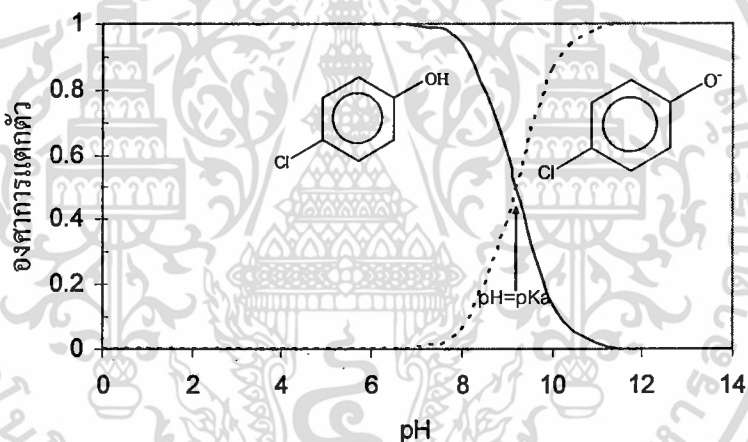
$$\alpha_0 = \frac{[\text{H}^+]}{[\text{H}^+] + K_a} \quad (2.2)$$

$$\alpha_1 = \frac{K_a}{[\text{H}^+] + K_a}$$

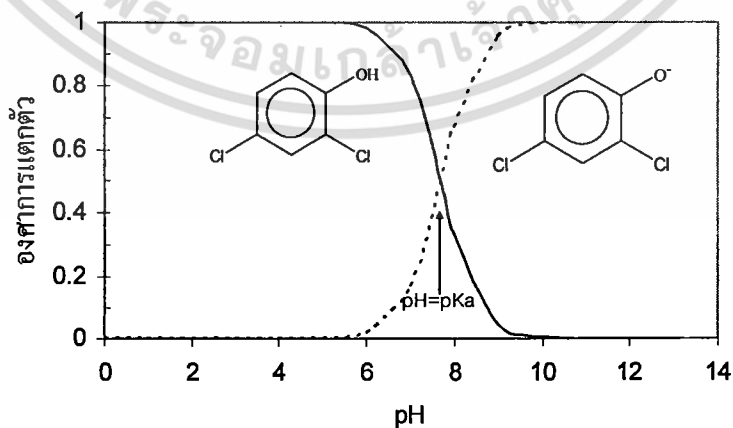
องศาการแตกตัวของกรดอ่อนสำหรับอนุพันธ์ของฟีนอลทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการศึกษาโครงการวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1, 2.2, และ 2.3



รูปที่ 2.1 สัดส่วนการกระจายตัวของฟีนอลในสารละลาย ณ พีเอชแตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 สัดส่วนการกระจายตัวของ 4-คลอโรฟีนอลในสารละลาย ณ พีเอชแตกต่างกัน



รูปที่ 2.3 สัดส่วนการกระจายตัวของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลในสารละลาย ณ พีเอชแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ทำการตีพิมพ์ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ

ฟีนอลและอนุพันธ์สามารถก่อให้เกิดพิษเฉียบพลันปานกลางในสัตว์น้ำชนิดต่างๆ ค่า LC_{50} ของฟีนอลในปลาชนิดต่างๆมีค่า 5.2-49.86 มิลลิกรัมต่อลิตร มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อคุ้มครองทรัพยากรสัตว์น้ำกำหนดให้ปริมาณฟีนอลในแหล่งน้ำธรรมชาติมีไม่เกิน 2,560 ไมโครกรัมต่อลิตร (fresh chronic criteria) โดยเฉลี่ยในระยะเวลา 24 ชั่วโมง และไม่ควรมีความเข้มข้นเกิน 10,200 ไมโครกรัมต่อลิตร (fresh acute criteria) ไม่ว่าเวลาใดก็ตาม (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) ในกรณีของ 4-คลอโรฟีนอล และ 2, 4-ไดคลอโรฟีนอล พบว่าค่า LC_{50} สำหรับหนูที่ได้รับสารนี้ทางอาหารมีค่าเท่ากับ 261 และ 580 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

2.1.4 กระบวนการบำบัดฟีนอล

วิธีการบำบัดฟีนอลในน้ำทิ้งนั้นมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ การบำบัดทางชีวภาพ การสกัดด้วยตัวทำละลาย และการดูดซับ ซึ่งในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะวิธีการดูดซับ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่จะทำการศึกษาในโครงการวิจัยนี้ และจัดเป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลาย

Aksu และ Yener (1998) ศึกษาการใช้มวลแห้งของแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (activated sludge, AS) มาใช้ในการดูดซับ phenol, o-chlorophenol และ p-chlorophenol พบว่ามวลแห้งของ AS สามารถดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลได้ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับของ phenol, o-chlorophenol และ p-chlorophenol เท่ากับ 86.1, 102.4, 116.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ Calace et al. (2002) ศึกษาถึงการใช้กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษมาใช้ในการดูดซับ phenol, 2-chlorophenol (2-CP), 3-chlorophenol (3-CP), 4-chlorophenol (4-CP), 2-nitrophenol (2-NP), 4-nitrophenol (4-NP), 2,4-dichlorophenol (2,4-DCP), 3,4-dichlorophenol (3,4-DCP), 3,5-dichlorophenol (3,5-DCP) และ 2,4,5-trichlorophenol (2,4,5-TCP) พบว่ากากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ สามารถนำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอลที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร Rengaraj et al. (2002) ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลระหว่างแอกทิเวเต็ดคาร์บอนที่ทำจากเปลือกเมล็ดปาล์ม (PSCC) และแอกทิเวเต็ดคาร์บอนที่ผลิตขึ้นเพื่อการค้า (CAC) มาใช้ในการดูดซับฟีนอล พบว่า PSCC มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟีนอลได้ดีกว่า CAC

2.2 พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา

2.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

จอกหูหนู (Floating mass) จัดเป็นเฟิร์นชนิดหนึ่งมีลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 2.4 มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Salvinia* sp. จัดอยู่ในวงศ์ Salviniaceae ลักษณะทั่วไปจะมีขนขึ้นปกคลุมทั่วลำต้น ส่วนของลำต้นจะเจริญอยู่ใต้ผิวน้ำทอดขนานไปกับผิวน้ำ มีรากแตกจากลำต้นและมีรากขนแตกออกจำนวนมาก ใบจะแตกออกตามข้อของลำต้น ใบคู่หนึ่งเจริญอยู่เหนือผิวน้ำมีรูปร่างกลม ใบม้วนเข้าคล้ายหูหนูเบียดกันแน่น ขอบใบเรียบไม่เปียกน้ำ ที่เหลือมีลักษณะคล้ายรากฝอย (root-like leaf) เจริญอยู่ใต้น้ำ ขณะเป็นต้นอ่อนใบจะแบนคล้ายแหนมมีขนและหยักเป็นคลื่น ขยายพันธุ์ได้รวดเร็วโดยใช้ ส่วนของลำต้นและสปอร์ โดยสร้างสปอร์เป็นก้อนแข็งๆ (sporocarp) อยู่ที่ใบที่เจริญอยู่ใต้ผิวน้ำ พบตามคลองระบายน้ำ หนองน้ำ บ่อน้ำ และบริเวณที่มีน้ำขัง



รูปที่ 2.4 ลักษณะทั่วไปของจอกหูหนู (สุรชัย, 2538)

ผักตบชวา (Water hyacinth) เป็นวัชพืชน้ำที่มีอายุยืนหลายปีมี ลักษณะทางกายภาพดังแสดง ในรูปที่ 2.5 มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Eichornia* sp. และจัดอยู่ในวงศ์ Pontederiaceae มีความสูงประมาณ 30-90 เซนติเมตร มีลำต้นสั้น รากแตกออกจากลำต้นบริเวณข้อราก มักมีสีม่วงดำที่เกิดจากสารแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ลำต้นแตกไหลเกิดเป็นลำต้นใหม่ติดต่อกันไป ใบออกเป็นกลุ่มรอบลำต้น (rosettes) ใบกว้างใหญ่มีรูปร่างค่อนข้างกลม ส่วนฐานใบเว้าเข้าหาก้านใบ มีหูใบ ปลายใบมน ขนาดของใบและความยาวของก้านใบขึ้นกับสภาพความอุดมสมบูรณ์ในบริเวณที่เจริญ ดอกออกเป็นช่อ

ชนิดสไปด์ ออกดอกได้ตลอดปี ในช่อหนึ่งมีดอก 6-30 ดอก ก้านช่อดอกยาวประมาณ 15-30 เซนติเมตร กลีบเลี้ยงและกลีบดอกหลอมรวมกัน (perianth) มีสีม่วง มีจุดสีเหลืองตรงกลาง ส่วนฐานกลีบดอกหลอมรวมกันเป็นรูปกรวย ส่วนปลายแยกเป็น 6 กลีบ มีเกสรตัวผู้ 6 อัน เกสรตัวเมียเป็นเส้นบางๆ ที่ส่วนปลายเป็นตุ่มสีขาว พบขึ้นตามคลอง หนองน้ำ ขยายพันธุ์โดยอาศัยเมล็ดและส่วนของลำต้น (สุรชัย, 2538)



รูปที่ 2.5 ลักษณะทั่วไปของผักตบชวา (สุรชัย, 2538)

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมี

วัสดุพืชในธรรมชาติจะประกอบด้วยสารเคมีอินทรีย์ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ ลิกนินและคาร์โบไฮเดรต (จตุพร และคณะ, 2545) ในกรณีของคาร์โบไฮเดรต พบว่ามีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เมื่อพิจารณาตามปริมาณที่เป็นองค์ประกอบในพืช

เซลลูโลสจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตจำพวกโพลีแซคคาไรด์ เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของพืช มีประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบของพืชทั้งหมด (จตุพร และคณะ, 2545) สารในกลุ่มนี้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับผนังเซลล์ของพืช คุณสมบัติของเซลลูโลสคือไม่ละลายน้ำ ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์หรือในสารละลายต่างอ่อน แต่สามารถที่จะละลายได้ดีในกรดหรือด่างแก่ (จตุพร และคณะ, 2545)

เฮมิเซลลูโลสจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตจำพวกโพลีแซคคาไรด์ที่พบเป็นองค์ประกอบของพืชในปริมาณมากรองลงมาจากเซลลูโลส มีลักษณะเป็น Heterogeneous ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) โครงสร้างจะเป็นลักษณะของกิ่งก้านสาขาแตกต่างไปจากเซลลูโลสและน้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะต่ำกว่าเซลลูโลส (จตุพร และคณะ, 2545)

ลิกนินจัดอยู่ในพวก Heterogeneous organic polymer พบภายในโครงสร้างของพืชในบริเวณรอบเซลล์โลส บทบาทที่สำคัญของลิกนินคือช่วยป้องกันเซลล์โลสจากการย่อยสลาย จากการค้นคว้าที่ผ่านมายังไม่พบโครงสร้างที่แน่นอนของลิกนิน ทราบเพียงแต่ว่าลิกนินเป็นพอลิเมอร์ของสารประกอบอะโรมาติกที่ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยของโครงสร้าง Phenylpropane ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดคือ Coniferyl alcohol ($R_1=H, R_2=OCH_3$) Sinapyl alcohol ($R_1=R_2=OCH_3$) และ p-coumaryl alcohol ($R_1=R_2=H$) (จตุพร และคณะ, 2545)

2.2.3 การนำไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับสารเคมี

คณะวิจัยหลายคณะได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเอาผักตบชวาและจอกหูหนูมาใช้เป็นตัวดูดซับสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น โลหะหนัก สีย้อม และน้ำมัน เป็นต้น Low et al. (1994) พบว่ามวลแห้งของรากผักตบชวามีความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง (Cu^{2+}) โดยรากของผักตบชวามีความสามารถดูดซับ ได้ 20.9 mg Cu/g Low et al. (1995) ศึกษาถึงการใช่มวลแห้งของผักตบชวาเป็นตัวดูดซับสีย้อมประเภทเบสิก 2 ชนิด คือ Methylene blue และ Victoria blue พบว่ารากผักตบชวามีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสิกได้ดี โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดได้สูงกว่า 90% Schneider และ Rubio (1999) พบว่ามวลแห้งของจอกหูหนู (*Salvinia* sp.) และรากผักตบชวา (*Eichornia* sp.) มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก Cr^{3+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำ Ribeiro et al. (2000) ศึกษาถึงการนำเอามวลแห้งของจอกหูหนูมาใช้ในการดูดซับน้ำมัน พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับขึ้นอยู่กับส่วนของพืชที่นำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ โดยส่วนใบของจอกหูหนูสามารถดูดซับน้ำมันได้ดีกว่าส่วนรากของพืช

2.3 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายของสารเคมี (Mass transfer) ที่สามารถละลายน้ำได้ ไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น พื้นผิวที่ดูดซับสารปนเปื้อนเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลของสารเคมีที่มาเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ปรากฏการณ์ดูดซับนี้เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวสองชนิด ซึ่งได้แก่พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเป็น

เทคโนโลยีที่นิยมใช้กันอย่างมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดสารปนเปื้อนที่มีขนาดเล็กได้จนถึงขั้นโมเลกุล นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารปนเปื้อนได้ค่อนข้างสูงที่เทียบกับวิธีการตกตะกอน หรือกรองแบบธรรมดาเช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ การใช้ดินเหนียวดูดซับขยาฆ่าแมลงในดิน หรือ โลหะหนักจากกระบวนการฝังกลบ (Landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน (จิวิรัตน์ และคณะ 2544)

2.3.1 ประเภทของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ (Adsorbent) ที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆมาติดผิวได้มีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้ (จิวิรัตน์ และคณะ 2544)

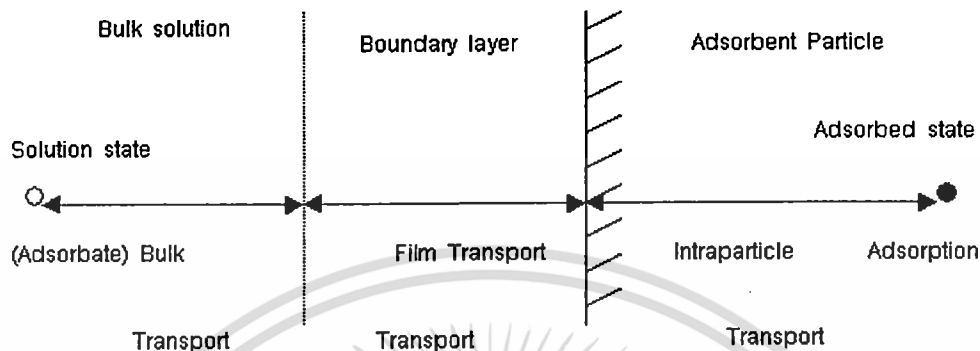
1. สารอินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ, แมกนีเซียมออกไซด์, ถ่านกระดูก (Bone Char), แอกทิเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) เป็นสารธรรมชาติที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่มีข้อจำกัด คือสามารถดูดซับสารปนเปื้อนได้น้อยชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์มีข้อจำกัดมาก

2. สารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เนื่องจากเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้นเพื่อให้มีความพรุนมากและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 450-1500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 10-10000 อังสตรอม

3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม (ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์) อย่างไรก็ตามเรซินมีข้อที่ได้เปรียบกว่าคือสามารถนำกลับมาให้ใหม่ได้ง่ายกว่ามากและรีเจนเนอเรชั่นมักเป็นสารที่มีราคาถูก เช่น เกลือแกง

2.3.2 กลไกการดูดซับ

การเคลื่อนที่ของตัวดูดซับไปยังติดกับตัวดูดซับมีกลไกการดูดซับที่สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนย่อยดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกของการเคลื่อนย้ายของสารเคมีในกระบวนการดูดซับ (Metcalf and Eddy, 1991)

ขั้นตอน Bulk transport เป็นขั้นตอนที่ตัวถูกดูดซับในสารละลาย (bulk solution) เคลื่อนที่ไปยังบริเวณผิวฟิล์ม หรือ โมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

ขั้นตอน Film transport เป็นขั้นตอนที่ตัวถูกดูดซับแพร่ข้ามฟิล์มน้ำผ่าน ไปยังผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอน Intraparticle transport หรือ Pore transport เป็นขั้นตอนที่ตัวถูกดูดซับแทรกผ่านเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอน Adsorption เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับบริเวณ active site บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ โดยแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นอาจเป็นแรงดึงดูดทางกายภาพ หรือแรงดึงดูดทางเคมี หรือทั้งสองแรงพร้อมกัน

2.3.3 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ

สมดุลการดูดซับเป็นการพิจารณากระบวนการดูดซับแบบผันกลับได้ กล่าวคือเมื่อจำนวนโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเท่ากับจำนวน โมเลกุลของสารที่คายการดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium state) ซึ่งที่จุดนี้เรียกว่า จุดสมดุลการดูดซับ โดยที่สภาวะสมดุลนี้ จะมีโมเลกุลสารจำนวนหนึ่งที่ถูกดูดซับอยู่บริเวณผิวของตัวดูดซับ (q หรือ $\frac{x}{M}$) และมีโมเลกุลอีกจำนวนหนึ่งที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลาย (C) ถ้าหากระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับเนื่องจากกระบวนการอื่นๆ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมดปกติปริมาณสารที่ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย สามารถเขียนเป็นสมการแสดงสมดุลการดูดซับได้ดังสมการที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$qM = V(C_0 - C_e) \quad (2.3)$$

เมื่อ q = ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g หรือ mol/g)

M = น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ในระบบ (g)

V = ปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ (L)

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวดูดซับที่มีอยู่ในสารละลาย (mg/L หรือ mol/L)

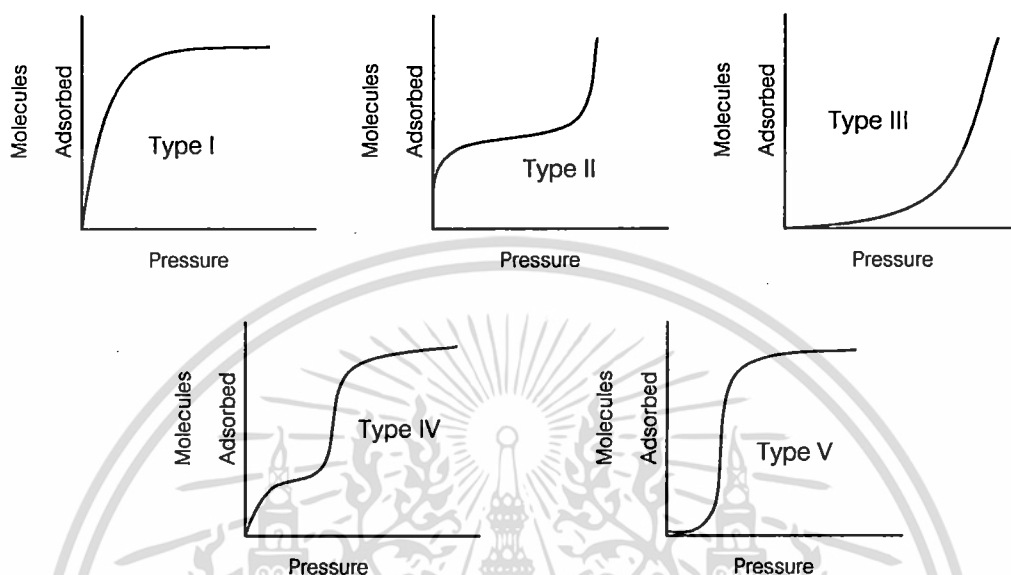
C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L หรือ mol/L)

ในแต่ละสมดุลการดูดซับ จะมีค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K_d) เป็นตัวบ่งบอกถึงสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของตัวถูกดูดซับที่ยึดติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับ กับตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล ดังสมการ 2.4

$$K_d = \frac{q}{C_e} \quad (2.4)$$

เมื่อ K_d = ค่าคงที่สมดุลการดูดซับสำหรับสารเคมีใดๆ

ระบบที่เข้าสู่สมดุลมีค่า q และ C_e แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ ปริมาตรของสารละลาย และน้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ ซึ่งในการศึกษากระบวนการดูดซับของสารเคมีใดๆที่สภาวะสมดุล โดยทั่วไปสามารถทำได้ 2 แบบคือ การแปรความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเคมีให้แตกต่างกัน แต่น้ำหนักตัวดูดซับเท่ากัน และการแปรน้ำหนักของตัวดูดซับให้แตกต่างกัน แต่ความเข้มข้นของสารเคมีเท่ากัน เมื่อนำค่า q และ C_e ของแต่ละความเข้มข้นมาสร้างกราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (W) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่จุดสมดุล (C_e) ในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งโดยทั่วไปพบอยู่ 5 ลักษณะตามรูปความโค้งของเส้น ไอโซเทอร์มในช่วงแรก ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะเส้นไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบต่างๆ (Faust and Aly, 1987)

Type I เป็นรูปที่พบมากที่สุด เป็นการดูดซับโดยมีชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับปกคลุมบริเวณผิวของตัวดูดซับได้หนาหนึ่งโมเลกุล (Single layer adsorption) พบทั้งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี จะเป็นปรากฏการณ์ดูดซับของ microporous powers ซึ่งปริมาณของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำๆ (Relative pressure) และที่ความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้หนึ่ง จะเกิดการดูดซับเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่า ตัวดูดซับมีรูพรุนเป็น microporous (1.5 นาโนเมตร) และมีรูพรุนปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวดูดซับมีการจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนผิวของตัวดูดซับ (monomolecular layer) เป็น monolayer อย่างสมบูรณ์

Type II เป็นปรากฏการณ์ดูดซับแบบ multilayer โดยในช่วงการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกือบสมบูรณ์ และจะเกิดชั้นของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อยๆ (ปริมาณ โมเลกุลที่ถูกดูดซับเป็นอนันต์) การดูดซับเกิดโดย nonporous power ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนกว้างกว่า microporous ถ้าเพิ่มความดันสัมพัทธ์ทำให้เกิดการดูดซับที่ผิวมากกว่า 1 ชั้น

Type III เป็นการดูดซับคล้าย type II แต่ในช่วงการดูดซับของชั้นแรกจะเกิดความร้อนออกมา (Heat of adsorption) ซึ่งความร้อนที่เกิดจะมีค่าน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่นหรือรวมตัวกันของตัวดูดซับที่เป็นของเหลว (the adsorbate heat of liquefaction) ดังนั้นการดูดซับที่

เพิ่มขึ้นจะเกิดจากที่ตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นแรกของตัวถูกดูดซับมากกว่าการดูดซับบริเวณผิวของตัวดูดซับ

Type IV เป็นการดูดซับคล้าย type II สำหรับความหนาของโมเลกุลตัวถูกดูดซับในชั้นแรกๆจะอิ่มตัว เนื่องจากความจุของรูพรุนเต็มหมดแล้ว แต่เมื่อเพิ่มความดันสัมพัทธ์ ทำให้ตัวถูกดูดซับสามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนได้อีก การดูดซับประเภทนี้มักเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 15-1,000 อังสตรอม

Type V เป็นการดูดซับคล้าย type III ในช่วงของตัวถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นต่ำๆ แต่การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง เช่นเดียวกับ Type IV โดยเป็นการดูดซับที่อาศัยอิทธิพลของแรงเหนี่ยวนำของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับที่มีค่าน้อยๆ

ทั้งนี้ไอโซเทอร์มของการดูดซับสามารถอธิบายได้หลายสมการ ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ 2 สมการ คือ

2.3.3.1. ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

Metcalf and Eddy (1991) รายงานว่าไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir ใช้อธิบายสมดุลการดูดซับภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้คือ

1. การดูดซับสูงสุดสัมพันธ์กับ โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ (monomolecular layer) อีออนหรือ โมเลกุลไม่มีการซ้อนทับกัน จึงทำให้ความหนาของชั้น โมเลกุลที่ถูกดูดซับเท่ากันหมด

2. พื้นที่ของการดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน มีตำแหน่ง และกลไกการดูดซับเหมือนกัน ทำให้โครงสร้างเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเหมือนกันเป็น homogeneous surface ในทุกบริเวณ จึงทำให้พลังงานของการดูดซับมีค่าเท่ากันในทุกบริเวณเช่นเดียวกัน

3. เมื่อเกิดการดูดซับแล้ว ไม่มีการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลตัวถูกดูดซับในแนวระนาบบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

Langmuir Isotherm สามารถเขียนอธิบายได้ด้วยสมการ 2.5

$$q = \frac{q_m K_d C_e}{1 + K_d C_e} \quad (2.5)$$

โดย q = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ที่สภาวะสมดุล (mg/g)

q_m = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ที่สภาวะอิ่มตัว (mg/g)

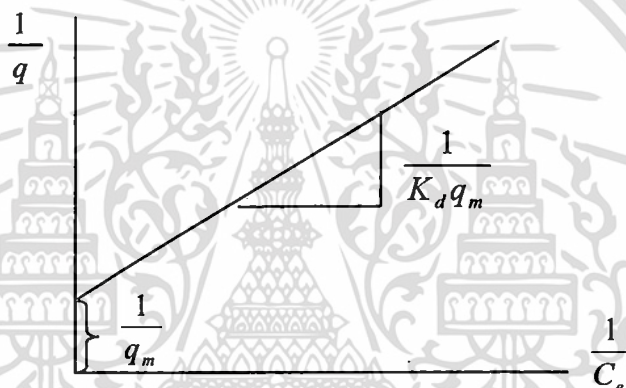
C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/l)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K_d = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับ
เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.5 ได้สมการเส้นตรงดังสมการที่ 2.6

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K_d q_m C_e} \quad (2.6)$$

ถ้าพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ กับ $\frac{1}{C_e}$ ได้สมการเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{K_d q_m}$ และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

2.3.3.2. ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich นี้ใช้อธิบายการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสมการทั่วไปสามารถแสดงได้ดังสมการ 2.7

$$q = \frac{x}{M} = K_d C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.7)$$

เมื่อ q = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/l, mol/l)

K_d = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

$\frac{1}{n}$ = ค่าคงที่แสดงถึงการดูดซับที่สัมพันธ์กับพื้นผิวของตัวดูดซับ

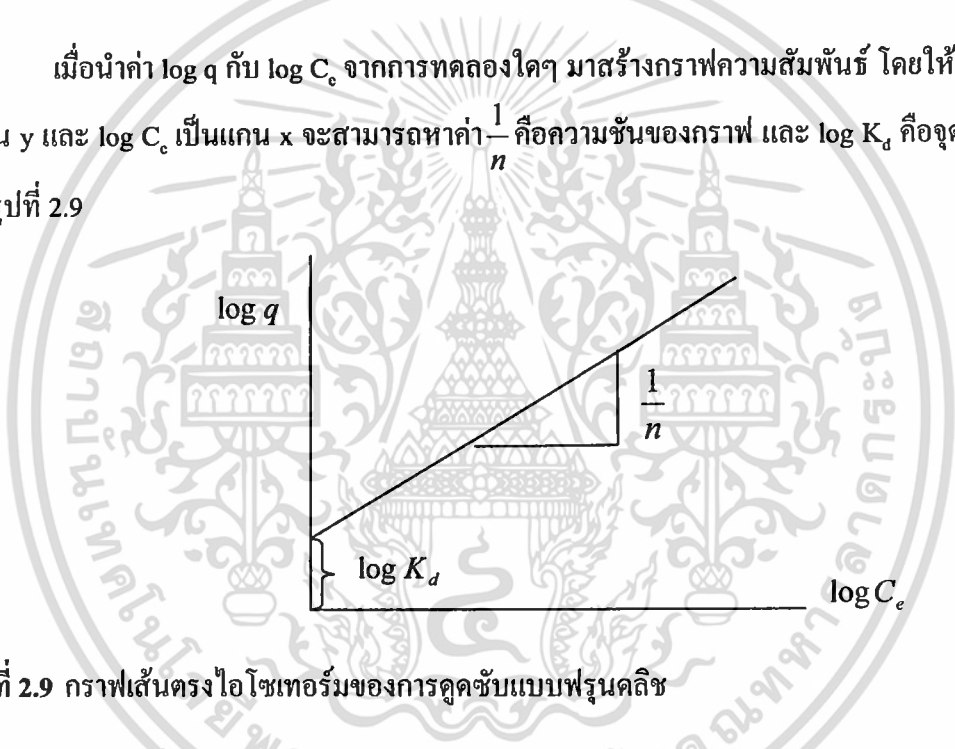
(Concentration dependence) โดยค่า $\frac{1}{n}$ มากกว่า 1 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวบนตัวดูด

ชั้นทำให้ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมีมากขึ้น แต่ถ้าค่า $\frac{1}{n}$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นถึงปริมาณพื้นที่ในการดูดซับบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัด

เมื่อจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยการใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างได้เป็นสมการที่ 2.8

$$\log \frac{x}{M} = \log q = \log K_d + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.8)$$

เมื่อนำค่า $\log q$ กับ $\log C_e$ จากการทดลองใดๆ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ $\log q$ เป็นแกน y และ $\log C_e$ เป็นแกน x จะสามารถหาค่า $\frac{1}{n}$ คือความชันของกราฟ และ $\log K_d$ คือจุดตัดแกน y ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟเส้นตรงไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนดลิช

2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ธรรมชาติของตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นที่ผิว (Surface area) โครงสร้างของรูพรุน (Pore structure) และขนาดของตัวดูดซับ (Absorbent size) พบว่า ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนมากย่อมเกิดการดูดซับได้มาก และเมื่อรูพรุนมีขนาดโครงสร้างใหญ่เพียงพอที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถแทรกเข้าไปได้ ก็ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากเช่นเดียวกัน สำหรับขนาดตัวดูดซับ จะใช้พิจารณาในกรณีของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน อนุภาคขนาดเล็กย่อมมีบริเวณพื้นที่ผิวมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีขนาดใหญ่และรูพรุนมาก พื้นที่ผิวของการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจึงไม่เข้ามามีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2. สมบัติของตัวถูกดูดซับ ได้แก่ น้ำหนักและขนาดของ โมเลกุล สภาพความมีขี้ของ โมเลกุล ความสามารถในการละลายน้ำ และความเข้มข้น กล่าวคือ ในขั้นตอนของการดูดซับ โมเลกุล ของตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนผิวตัวดูดซับ เมื่อตัวถูกดูดซับมีโมเลกุล ขนาดเล็ก สภาพความมีขี้สูง เป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายน้ำสูง ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับ โมเลกุลน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงยากต่อการดูดซับ แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีตัวดูดซับบางประเภทที่ ละลายน้ำได้น้อย แต่เกาะติดผิวตัวดูดซับได้ยาก สำหรับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ จะช่วยเพิ่ม โอกาสในการสัมผัสตัวดูดซับ

3. ปัจจัยทางสภาพแวดล้อม ได้แก่ อัตราการปั่นกววน อุณหภูมิ อิทธิพลของเวลาสัมผัส ค่าพีเอช ความเข้มข้นของเกลือและตัวถูกละลายอื่นๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) อิทธิพลของอัตราการปั่นกววน มีผลให้โอกาสในการสัมผัสกันเพิ่มขึ้น และลด ความห่างระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ ทั้งในบริเวณของ ขั้นตอน Bulk transport ซึ่งเป็นการ เคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ ไปยังบริเวณผิวฟิล์มโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ และขั้นตอน Film transport ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ตัวถูกดูดซับแพร่ข้ามฟิล์มโมเลกุลน้ำที่เคลือบอยู่บริเวณผิว ผ่านไปยังผิว ของตัวดูดซับ แต่ถ้ามีอัตราการปั่นกววนมากเกินไปอาจทำให้เกิดการชน กระแทก ทำให้ประสิทธิภาพ การดูดซับลดลง

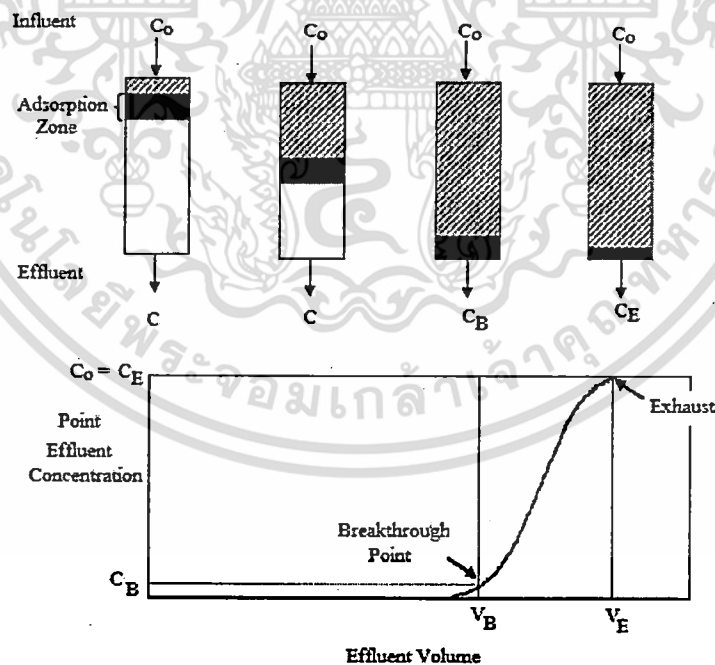
2) อิทธิพลของอุณหภูมิ (Temperature) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่าน ของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น ทำให้อัตราเร็วของการดูดซับเพิ่มขึ้น และทำให้ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

3) อิทธิพลของเวลาสัมผัส (Contact time) เวลาสัมผัสมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพ ของการดูดซับ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับด้วย

4) อิทธิพลของค่าพีเอช (pH) เป็นปัจจัยสำคัญต่อความมีขี้ของสาร ทั้งตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ ในกรณีของตัวถูกดูดซับ โดยเฉพาะจำพวกกรดและเบสที่สามารถแตกตัวให้อิออน ได้ เมื่อมีสภาพขี้จะละลายได้ดีใน โมเลกุลของน้ำ เนื่องจากน้ำจัดเป็น โมเลกุลที่มีขี้ ทำให้ ความสามารถในการดูดซับลดลง สำหรับกรณีของตัวดูดซับ โดยเฉพาะจำพวกสินแร่ที่สามารถ แลกเปลี่ยน โปรตอนกับสารละลาย (ทำหน้าที่คล้ายกรดหรือเบส) ทำให้เกิดความมีขี้บริเวณผิว (ทั้ง ขี้บวกและขี้ลบ) จับกับตัวถูกดูดซับที่มีประจุตรงกันข้าม จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

2.3.5 การศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ

การศึกษาในขั้นนี้กระทำโดยการผ่านน้ำที่ปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องเข้าสู่คอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับ เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดซับเป็นระยะเวลาหนึ่งจะมีสารปนเปื้อนเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับทำให้ตัวดูดซับค่อยๆหมดประสิทธิภาพตามปริมาณน้ำที่ค่อยๆไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ โดยสารดูดซับชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพก่อน และชั้นของสารดูดซับที่หมดประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาใช้งานและปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดังรูปที่ 2.10 ดังนั้นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนในที่สุดความเข้มข้นจะถึงค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ ณ จุดนี้เรียกว่า จุดเบรคทรู (Break through point) เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับแล้วต่อความเข้มข้นเริ่มต้นเทียบกับปริมาตรที่ใช้ เรียกว่า เส้นโค้งเบรคทรู (Breakthrough Curve) โดยเวลาที่นับจากการเริ่มต้นการดูดซับจนถึงจุดเบรคทรู เรียกว่า เวลาการใช้งาน (Service time) และเมื่อสารดูดซับไม่สามารถที่จะดูดซับได้อีก เรียกว่าจุดที่สารดูดซับหมดประสิทธิภาพ (Exhaust point) ซึ่งที่จุดนี้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ออกจากระบบ จะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบ



รูปที่ 2.10 แผนภาพอย่างง่ายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นของการดูดซับ และความเข้มข้นของสารในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ (ต๋องพงค์, 2544)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Aksu และ Yemer (1998) ได้ศึกษาการใช้มวลแห้งของแเอ็กทีเวเต็ดสลัดจ์ (dried activated sludge) มาใช้ในการดูดซับ phenol, *o*-chlorophenol และ *p*-chlorophenol โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ค่า pH เริ่มต้น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารประกอบฟีนอลและหมู่แทนที่ พบว่าความสามารถในการดูดซับสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ phenol > *o*-chlorophenol > *p*-chlorophenol โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารเท่ากับ 90% 50% และ 59% ตามลำดับ ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับอยู่ในช่วงพีเอช 1-3 และการเพิ่มความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลเริ่มต้น ทำให้ค่าความจุในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย

Calace et al. (2002) ศึกษาถึงการใช้ตะกอนกระดาษมาใช้ในการดูดซับ phenol, 2-chlorophenol (2-CP), 3-chlorophenol (3-CP), 4-chlorophenol (4-CP), 2-nitrophenol (2-NP), 4-nitrophenol (4-NP), 2,4-dichlorophenol (2,4-DCP), 3,4-dichlorophenol (3,4-DCP), 3,5-dichlorophenol (3,5-DCP) และ 2,4,5-trichlorophenol (2,4,5-TCP) พบว่าลำดับความสามารถในการดูดซับคือ 2-NP = 4-NP << 2-CP < phenol < 4-CP ≤ 3-CP < 2,4-DCP < 3,4-DCP = 2,4,5-TCP < 3,5-DCP

Low et al. (1994) ได้ศึกษาถึงการใช้มวลแห้งของรากผักตบชวาใช้ในการดูดซับ โลหะทองแดง (Cu^{2+}) และพบว่ารากของผักตบชวามีความสามารถดูดซับ ได้ 20.9 mg Cu/g

Low et al. (1995) ศึกษาถึงการใช้มวลแห้งของผักตบชวาเป็นตัวดูดซับสีย้อมประเภทเบสิก 2 ชนิด คือ Methylene blue และ Victoria blue โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ pH, ปริมาณตัวดูดซับ, เวลา และความเข้มข้นเริ่มต้น พบว่ารากผักตบชวาสามารถดูดซับสีย้อมเบสิกได้ 128.9 mg/g และ 145.5 mg/g ตามลำดับ พีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับมีค่าระหว่าง 5-12 โดยค่าพีเอชเท่ากับ 9.62 สามารถดูดซับสีย้อมได้สูงที่สุดถึง 97.09% ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ 0.5 กรัม และใช้ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลคือ 1 ชั่วโมง

Rao และ Viraraghavan (2002) ศึกษาถึงการใช้มวลแห้งของ *Aspergillus niger* มาใช้ในการดูดซับฟีนอล พบว่าการใช้มวลแห้งของ *A. niger* ที่ผ่านการบำบัดด้วยกรดซัลฟูริกที่ค่า pH 5.1 ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลสูงสุด การทดลองแบบคอลัมน์สามารถกำจัดฟีนอลได้ประมาณ 66% ที่ค่า pH เริ่มต้น 5.1 และความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นเป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

Rengaraj et al. (2002) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลระหว่างแอ็กทีเวเต็ดคาร์บอนที่เตรียมจากเปลือกเมล็ดปาล์ม (Palm seed coat carbon, PSCC) และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นเพื่อการค้า (commercial activated carbon, CAC) มาใช้ในการดูดซับฟีนอล พบว่า PSCC มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายฟีนอลได้ใกล้เคียงกับ CAC

Ribeiro et al. (2000) ศึกษาถึงการนำเอามวลแห้งของจอกหูหนูมาใช้ในการดูดซับน้ำมันพบว่า ส่วนใบของจอกหูหนูซึ่งมีขนาดมากกว่า 1 mm สามารถดูดซับน้ำมันได้ 7.3-11.6 g/g ในขณะที่รากของจอกหูหนูซึ่งมีขนาดน้อยกว่า 1 mm สามารถดูดซับน้ำมันได้ 3.6-4.8 g/g

Schneider และ Rubio (1999) พบว่ามวลแห้งของจอกหูหนู (*Salvinia* sp.) และรากผักตบชวา (*Eichornia* sp.) มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก Cr^{3+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} แตกต่างกัน โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ 0.9 meq/g, และ 0.7 meq/g สำหรับจอกหูหนูและผักตบชวา ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุชุดจับ

1. จอกหูหนู
2. ผักตบชวา

3.1.2 สารเคมี

1. สารละลายฟีนอล เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Eraba
2. สารละลาย 4-คลอโรฟีนอล เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Eraba
3. สารละลาย 2,4-ไดคลอโรฟีนอล เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Eraba
4. สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 6.8
5. สารละลายโพแทสเซียมเฟอร์ริกไซยาไนด์ ($K_3Fe(CN)_6$) เกรควิเคราะห์บริษัท Carlo Eraba
6. สารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีน เกรควิเคราะห์ บริษัท Fluka
7. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เกรควิเคราะห์ บริษัท Carlo Eraba
8. สารละลายเมทิลีนบลู (Methylene blue)

3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น UV/Vis 6405 ยี่ห้อ LABQUIP
2. เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป รุ่น LEO 1450 VP ยี่ห้อ LEO
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น TC-254 ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT
4. เครื่องวัดความเป็นกรดค่า
5. เครื่องบดตัวอย่าง
6. เครื่องกรองสุญญากาศพร้อมชุดเครื่องกรอง
7. เครื่องเขย่า รุ่น SGM-300 ยี่ห้อ GALLOENKAMP
8. บีกเกอร์ขนาด 50, 100, 500, 1000 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ขวดวัดปริมาตรขนาด 50, 100, 1000 มิลลิลิตร
10. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
11. ปิเปตขนาด 1, 2, 10, 50 มิลลิลิตร
12. กระดาษกรองเบอร์ 42 ยี่ห้อ Whatman
13. ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 12, 20 เมช (1.77, 0.85 มิลลิเมตร)
14. ถาดอคูมินิยม
15. หลอดหยด
16. ช้อนตักสาร
17. แท่งแก้วคน
18. กระบอกน้ำกลั่น
19. กรวยกรอง
20. ลูกยาง

3.2 การเตรียมสารเคมี

3.2.1. สารละลายสต็อกฟีนอลเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

เตรียมจากฟีนอล 1 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นปรับปริมาตรครบ 1 ลิตร

3.2.2. สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตพีเอช 6.8

เตรียมจากซังไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) 104.5 กรัม ผสมกับโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 72.3 กรัม นำสารทั้งสองมาละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรจนครบ 1 ลิตร

3.2.3. สารละลายโพแทสเซียมเฟอร์ริกไซยาไนด์ ($K_3Fe(CN)_6$)

สารละลายนี้ถูกเตรียมใหม่ทุกสัปดาห์ โดยซังโพแทสเซียมเฟอร์ริกไซยาไนด์ 4 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรจนครบ 50 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร

3.2.4. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)

ปิเปตสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 30% มา 65.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร

3.2.5. สารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีน

สารละลายนี้ถูกเตรียมใหม่ทุกวันก่อนใช้ โดยชั่ง 4-อะมิโนแอนติไพรีน 1 กรัม ละลายน้ำกลั่น ปรับปริมาตรจนครบ 50 มิลลิลิตร

3.2.6. สารละลายดีเมทิลีนบลูเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งเมทิลีนบลูในปริมาณ 0.1 กรัม ละลายน้ำกลั่นปรับปริมาตรจนครบ 500 มิลลิลิตร

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับจากจอกหูหนูและผักตบชวา

พืชที่ใช้เป็นตัวดูดซับในการศึกษาครั้งนี้ ถูกเตรียมขึ้นโดยอ้างอิงวิธีการเตรียมของ Costa et al. (1996) ทำได้โดยนำจอกหูหนูและผักตบชวามาล้างทำความสะอาด หั่นเป็นชิ้นพอประมาณ ล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง นำมาอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาบดด้วยเครื่องบดตัวอย่าง (blender) จากนั้นทำการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 12 และ 20 เมช และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นและเก็บไว้ในเคซิเคเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป

3.3.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของจอกหูหนูและผักตบชวา

ลักษณะ โครงสร้างมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาทำการศึกษาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ที่กำลังขยาย 600x

3.3.3 การศึกษาหาพื้นที่ผิวของมวลแห้งของพืช

พื้นที่ผิวของจอกหูหนูและผักตบชวาทำการศึกษาโดยวิธีการวัดการดูดซับสารละลายดีเมทิลีนบลู (methylene blue adsorption) อ้างอิงตามวิธีของนิศากร (2543) ซึ่งทำได้โดยชั่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวามา 0.5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายดีเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นต่างๆ กันจำนวน 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละขวด นำมาเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ นำสารละลายที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสีที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (q) และความเข้มข้นของสีที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C_e) และนำมาพลอตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ เพื่อหาค่า q_{\max} หรือ ค่าจำนวน โมลของสีต่อกรัมของตัวดูดซับที่เพียงพอต่อการสร้างชั้นการดูดซับแบบชั้นเดียว และนำไปแทนค่าในสมการที่ 3.1 เพื่อหาค่า S (นิศากร, 2543)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

$$S = q_{\max} \times N \times s/n \quad (3.1)$$

เมื่อ S คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับ (m^2/g)

q_{\max} คือ จำนวนโมลของสีที่รองรับของตัวดูดซับที่เพียงพอต่อการสร้างชั้นการดูดซับแบบชั้นเดียว

N คือ เลขอวกาโดร มีค่า 6.02×10^{23} โมเลกุล

s คือ พื้นที่ที่ถูกปกคลุมด้วยไอออนของสี 1 โมเลกุล ($120(A^0)^2$) สำหรับเมทิลีนบลู

n คือ จำนวนการรวมกลุ่มเป็นไมเซลล์เล็กๆของสี (มีค่าเท่ากับ 2.5 สำหรับเมทิลีนบลู)

3.3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

การทดสอบหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสารละลายฟีนอลทำได้โดยใช้วิธีการทดสอบแบบแบตช์ (batch) ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดอนุภาคของพีช ปริมาณมวลแห้งของพีช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ค่าพีเอชของสารละลาย และชนิดอนุพันธ์ของฟีนอล

3.3.4.1 ผลของขนาดอนุภาคของพีช

ซึ่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาที่มีขนาดเล็กกว่า 0.85 มิลลิเมตร ขนาดระหว่าง 0.85 ถึง 1.77 มิลลิเมตร และ ขนาดใหญ่กว่า 1.77 มิลลิเมตร มาอย่างละ 0.5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ บีบเปิดสารละลายที่ได้มา 10 มิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธีเทียบสี (AHPA, 1992) ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ ทำแบลนด์โดยใช้พีชในปริมาณข้างต้น แต่เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรแทนสารละลายฟีนอลวิธีข้างต้น พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุม

3.3.4.2 ผลของปริมาณมวลแห้งของพีช

ซึ่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวามาขนาดที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.4.1 มาอย่างละ 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, และ 3 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ บีบเปิดสารละลายที่ได้มา 10 มิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์หาปริมาณ ฟีนอลโดยวิธีเทียบสี (AHPA, 1992) ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ ทำแบลนด์โดยใช้พีชในปริมาณข้างต้น แต่เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรแทนสารละลายฟีนอลวิธีข้างต้น พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุม

3.3.4.3 ผลของระยะเวลาสัมผัส

ซึ่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.1 มาในปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.2 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำละลายฟีนอลความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30, 60, 180, 300, 360, 420 และ 480 นาที นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ บีบอัดสารละลายที่ได้มา 10 มิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์หาปริมาณ ฟีนอลโดยวิธีเทียบสี (AHPA, 1992) ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ ทำแบลนด์โดยใช้พีชในปริมาณข้างต้น แต่เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรแทนสารละลายฟีนอลวิธีข้างต้น พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุม

3.3.4.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล

ซึ่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.1 มาในปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.2 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำละลายฟีนอลความเข้มข้น 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.3 นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ บีบอัดสารละลายที่ได้มา 10 มิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์หาปริมาณ ฟีนอลโดยวิธีเทียบสี (AHPA, 1992) ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ ทำแบลนด์โดยใช้พีชในปริมาณข้างต้น แต่เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรแทนสารละลายฟีนอลวิธีข้างต้น พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุม

3.3.4.5 ผลของค่าพีเอชของสารละลาย

ซึ่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.1 มาในปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.2 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำละลายฟีนอลความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.4 ลงไป 100 มิลลิลิตรแล้วปรับ pH ของสารละลายให้เป็น 4, 7, 10 และ 12 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.3 นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ บีบอัดสารละลายที่ได้มา 10 มิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์หาปริมาณ ฟีนอลโดยวิธีเทียบสี (AHPA, 1992) ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ ทำแบลนด์โดยใช้พีชในปริมาณข้างต้น แต่เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรแทนสารละลายฟีนอลวิธีข้างต้น พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุม

3.3.5 การเตรียมชุดทดลองควบคุม

การทดลองชุดควบคุมทำโดยเติมสารละลายฟีนอลให้มีความเข้มข้นและปริมาณเดียวกับสารละลายตัวอย่างในการศึกษาแต่ละปัจจัยในหัวข้อ 3.3.4 ลงในขวดรูปชมพู่ที่ไม่ใส่มวลแห้งของพืชนำไปเขย่าที่สภาวะเดียวกับการศึกษาในแต่ละปัจจัย

3.3.6 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ชั่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาขนาดที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.4.1 มาอย่างละ 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.3 นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ บีบอัดสารละลายที่ได้มา 10 มิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์หาปริมาณ ฟีนอลโดยวิธีเทียบสี (AHPA, 1992) ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ ทำแปลงค์โดยใช้พืชในปริมาณข้างต้น แต่เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรแทนสารละลายฟีนอลวิธีข้างต้น พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุม

3.3.7 การศึกษาชนิดของฟีนอลและอนุพันธ์

นำสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับแบบแบดซ์จากการทดลองของสารละลายฟีนอลมาใช้เพื่อทำการศึกษาผลการดูดซับของ 2-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล

3.3.8 การศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ

การศึกษาในขั้นนี้กระทำโดยบรรจุมวลแห้งของพืชปริมาณ 4 กรัมลงในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ความสูงของตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์เท่ากับ 15 cm จากนั้นผ่านสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรเข้าสู่คอลัมน์อย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลประมาณ 1 มิลลิลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากคอลัมน์ บันทึกปริมาตรน้ำที่เก็บรวบรวมได้ นำตัวอย่างที่เก็บรวบรวมได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธีเทียบสี (AHPA, 1992) ทำแปลงค์คอลัมน์โดยใช้พืชในปริมาณเดียวกับข้างต้น แต่ผ่านน้ำกลั่นเข้าสู่คอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

3.3.9 การวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์โดยวิธีเทียบสี

ปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลทำการวิเคราะห์หาโดยใช้วิธีเทียบสีอ้างอิงจากวิธีมาตรฐาน (AHPA, 1992) ทำได้โดยนำสารละลายที่กรองได้จำนวน 10 มิลลิลิตรมาเจือจางให้เป็น 100

มิลลิลิตร นำสารละลายที่เตรียมได้มาเติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในหัวข้อ 3.2.4 จำนวน 2.5 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน และปรับพีเอชทันทีด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต (หัวข้อ 3.2.2) จนมีพีเอชเท่ากับ 7.9 ± 0.1 เติมสารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีน (หัวข้อ 3.2.5) และสารละลายโพแทสเซียมเพอร์ริกไซยาไนด์ (หัวข้อ 3.2.3) อย่างละ 1 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ 15 นาทีเพื่อให้เกิดสี นำไปวัดค่าการแอบซอร์พชันด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวา มาใช้เป็นตัวดูดซับสารฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้คือ (1) ศึกษาธรรมชาติของพืชทั้งสองชนิดในแง่ลักษณะทางกายภาพ ความเป็นรูพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะ (2) ศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ โดยทำการทดสอบการดูดซับแบบแบตช์ (batch) ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดอนุภาคของพืช ปริมาณมวลแห้งของพืชที่ใช้ในการดูดซับ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ค่าพีเอชของสารละลาย และชนิดอนุพันธ์ของฟีนอล (3) ศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยใช้การทดสอบการดูดซับแบบคอลัมน์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้เป็นดังนี้

4.1 ธรรมชาติของจอกหูหนูและผักตบชวา

จอกหูหนูและผักตบชวาที่ใช้ในการศึกษานี้มีลักษณะทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยจอกหูหนูจะใช้ทั้งใบและรากเป็นตัวดูดซับ ส่วนผักตบชวาจะใช้ในส่วนของใบและลำต้นเป็นตัวดูดซับ ภายหลังจากล้างทำความสะอาด พืชทั้งสองชนิดจะถูกนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาด ก่อนที่จะนำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และพื้นที่ผิวจำเพาะของพืชโดยวิธี methylene blue adsorption ลักษณะของจอกหูหนูและผักตบชวาภายหลังจากผ่านกระบวนการแห้ง มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.2



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง โดยที่ (ก) จอกหูหนู และ (ข) ผักตบชวา

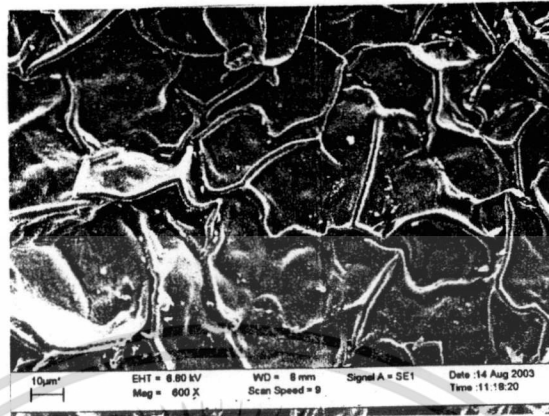
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



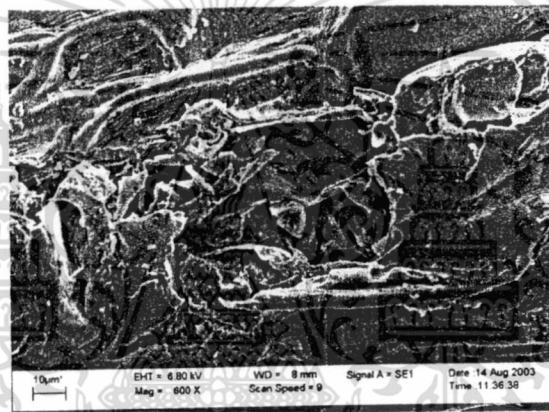
รูปที่ 4.2 ลักษณะของตัวดูดซับที่ผ่านการบด และอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยที่ (ก) จอกหูหนู และ (ข) ผักตบชวา

4.1.1 ลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ

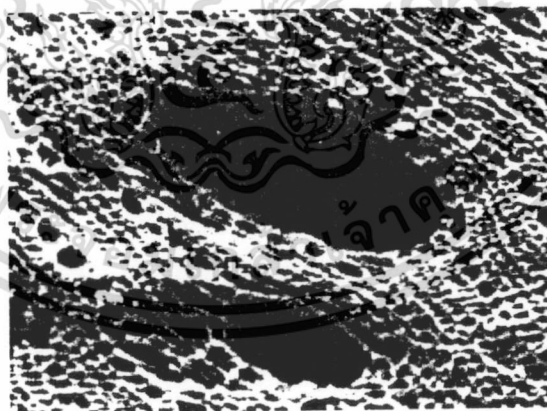
ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างความเป็นรูพรุนของตัวดูดซับ ได้ทำการศึกษาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 600 เท่า พบว่าพืชทั้งสองชนิดมีลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างทางกายภาพดังแสดงในรูปที่ 4.3



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดย Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 600 เท่า โดยที่ (ก) จอกหูหนู (ข) ผักตบชวา และ(ค) ถ่านกัมมันต์ (http://www.cee.vt.edu/program_area/environmental/teach/wtprimer/carbon/sketcarb.html)

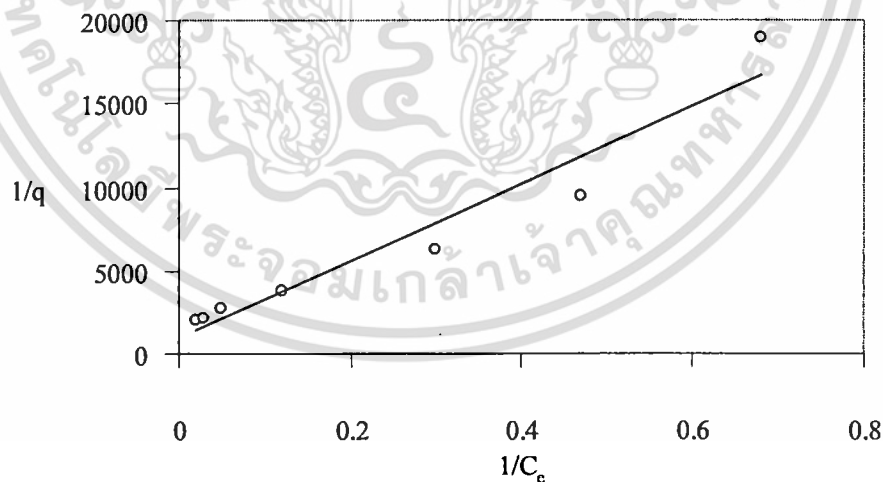
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 พบว่าพื้นผิวของจอกหูหนูและผักตบชวามีความคล้ายคลึงกันเป็นส่วนใหญ่ โดยจอกหูหนูจะมีพื้นที่ผิวค่อนข้างขรุขระ มีลักษณะความเป็นรูพรุนไม่ชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะทางกายภาพของจอกหูหนูที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้กับที่ใช้ในการศึกษาของ Ribeiro *et al.* (2000) พบว่าลักษณะพื้นผิวมีความคล้ายคลึงกัน ในกรณีของผักตบชวาพบว่าพื้นผิวมีลักษณะคล้ายหลุมตื้นอยู่ทั่วไปและไม่พบส่วนที่เป็นรูพรุนอย่างชัดเจน เมื่อทำการเปรียบเทียบตัวดูดซับที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้กับถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีลักษณะที่เป็นรูพรุนอย่างชัดเจน

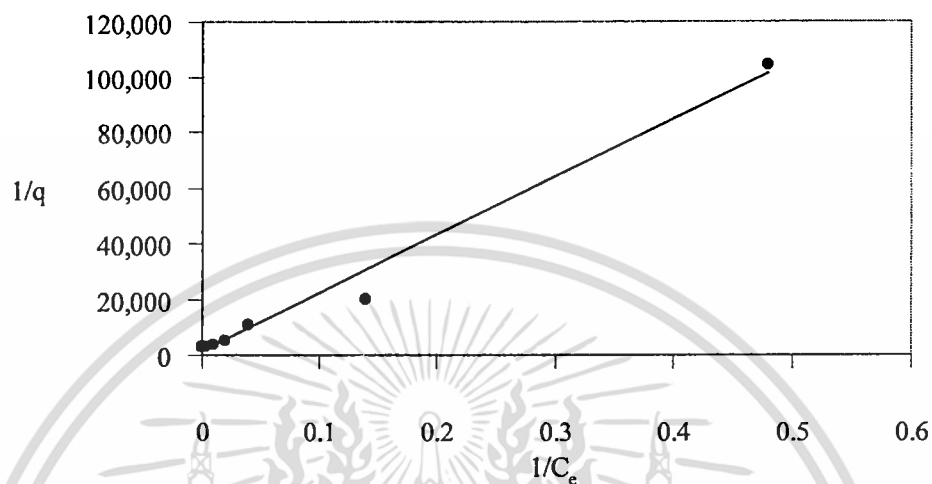
4.1.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของจอกหูหนูและผักตบชวา

พื้นที่ผิวจำเพาะต่อการดูดซับของจอกหูหนูและผักตบชวาสามารถตรวจวัดได้ตามวิธีของ Ribeiro *et al.* (2002) และนิศากร (2543) โดยใช้สีเมทิลีนบลู (methylene blue) เป็นสารเคมีในการทดสอบและทำการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยจอกหูหนูหรือผักตบชวา เพื่อหาค่าจำนวนโมลของสีต่อกรัมของตัวดูดซับที่เพียงพอต่อการสร้างชั้นการดูดซับแบบชั้นเดียว (q_{max}) ที่นำไปใช้ในการคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของพืช (S) โดยใช้สมการที่ 3.1 (นิศากร, 2543)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ methylene blue ด้วยจอกหูหนูหรือผักตบชวา สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่เหลือในสารละลายกับปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับโดยจอกหูหนู ณ สภาวะสมดุล



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทธิลินบลูที่เหลือในสารละลายกับ ปริมาณเมทธิลินบลูที่ถูกดูดซับโดยผักตบชวา ณ สภาวะสมดุล

จากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับเมทธิลินบลูของจอกหูหนู พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเมทธิลินบลูที่เหลือในสารละลายกับปริมาณเมทธิลินบลูที่ถูกดูดซับโดยจอกหูหนู ณ สภาวะสมดุลสามารถอธิบายได้โดยสมการเส้นตรงคือ $y = 23072x + 989.26$ เมื่อนำสมการดังกล่าวมาคำนวณหาค่า q_{max} พบว่าได้ค่า q_{max} เท่ากับ 1.01×10^{-3} ในกรณีของ ผักตบชวา (รูปที่ 4.5) พบว่าไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทธิลินบลูด้วยผักตบชวาสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเส้นตรงคือ $y = 209004x + 929.34$ ซึ่งสามารถคำนวณค่า q_{max} เท่ากับ 1.08×10^{-3}

เมื่อทำการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะ (S) สำหรับตัวดูดซับทั้งสองชนิดโดยการแทนค่า q_{max} ที่ได้จากการคำนวณข้างต้นลงในสมการที่ 3.1 พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของจอกหูหนูและผักตบชวามีค่าเท่ากับ $292.10 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $310.93 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะที่คำนวณได้ในการศึกษาครั้งนี้กับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และพื้นที่ผิวของจอกหูหนูที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าในกรณีของจอกหูหนู พื้นที่ผิวจำเพาะที่หาได้มีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของจอกหูหนูที่ใช้ในการศึกษาของ Ribeiro *et al* (2000) และเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์พบว่าพื้นที่ผิวของพืชที่ใช้เป็นตัวดูดซับในการศึกษาครั้งนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันมีพื้นที่ผิวจำเพาะระหว่าง $650-1000 \text{ m}^2/\text{g}$ (AWWA, 1998)

4.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธีการดูดซับแบบแบดจ์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลของ จอกหูหนูและผักตบชวา และหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวา ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ขนาดอนุภาคของพีช ปริมาณมวลแห้งของพีช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ค่าพีเอชของสารละลาย ชนิดของฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล

4.2.1 ขนาดอนุภาคของพีช

จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคของพีชต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอล โดยใช้พีชที่ผ่านการคัดขนาดต่างๆกัน 3 ขนาดคือ ขนาดเล็กกว่า 0.85 มิลลิเมตร ขนาดตั้งแต่ 0.85 ถึง 1.77 มิลลิเมตร และขนาดใหญ่กว่า 1.77 มิลลิเมตร มาเป็นวัสดุในการดูดซับสารละลายฟีนอลที่ระดับ ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าขนาดอนุภาคของพีชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ดัง แสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย (%) กับขนาดอนุภาคของพีช (มิลลิเมตร) โดยที่ ○ จอกหูหนู และ ● ผักตบชวา

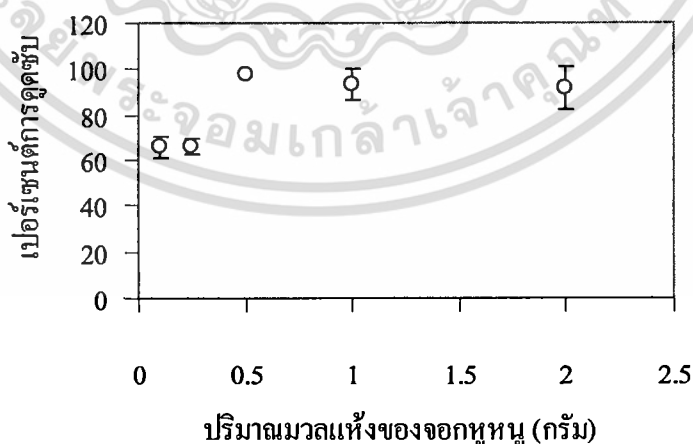
จากรูปที่ 4.6 พบว่าจอกหูหนูขนาดเล็กมีประสิทธิภาพการดูดซับ 57.8 ± 7.44 % เมื่อใช้ จอกหูหนูขนาดกลาง ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลงเป็น 44.8 % และเมื่อใช้จอกหูหนูขนาด ใหญ่ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มเป็น 49.5 ± 3.10 % เมื่อนำผลที่ได้มาทดสอบทางสถิติโดยวิธี

t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูทั้งสามขนาด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

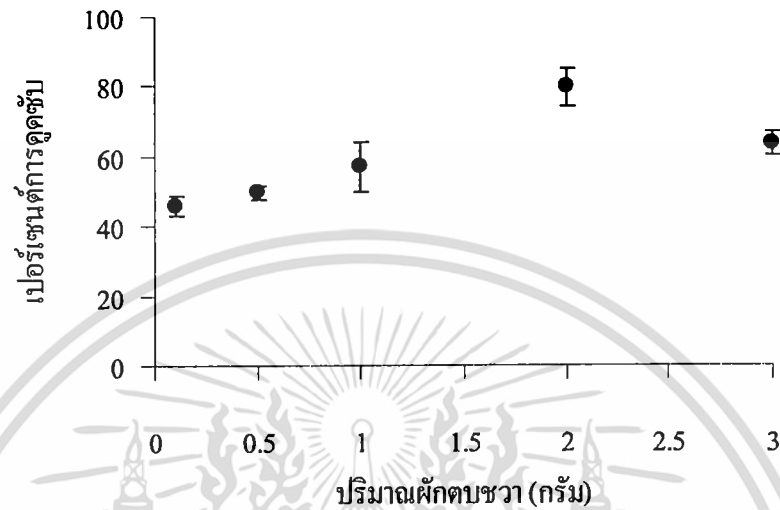
เมื่อใช้ผักตบชวาที่มีขนาดต่างกันเป็นตัวดูดซับสารละลายฟีนอล พบว่าผลที่ได้มีลักษณะ คล้ายคลึงกับเมื่อใช้จอกหูหนูเป็นตัวดูดซับ กล่าวคือเมื่อผักตบชวามีขนาดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มคงที่เช่นกัน และประสิทธิภาพในการดูดซับของผักตบชวาทั้งสามขนาด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลระหว่างผักตบชวาและจอกหูหนูที่มีขนาดเท่ากัน พบว่าจอกหูหนูมีความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลได้สูงกว่าผักตบชวา เนื่องจากขนาดอนุภาคของพืชที่ใช้ในการดูดซับ ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับฟีนอล ดังนั้นขนาดของจอกหูหนูและผักตบชวาที่เลือกใช้ในการศึกษาต่อไปคือ ขนาดกลาง และขนาดเล็กตามลำดับ เนื่องจากให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับ ไม่แตกต่างกันกับขนาดอื่น นอกจากนี้ยังเป็นขนาดอนุภาคของพืชที่มีปริมาณมากพอที่สามารถใช้ตลอดการทดลอง

4.2.2 ปริมาณมวลแห้งของพืช

การศึกษาผลของปริมาณมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลทำการศึกษาค้นคว้าได้โดยใช้พืชที่เป็นตัวดูดซับสารละลายฟีนอลในปริมาณที่ต่างกัน ดังนี้คือ 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 3 กรัม มาเป็นวัสดุในการดูดซับสารละลายฟีนอลที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้พืชทั้งสองชนิดในปริมาณมากขึ้น ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายฟีนอลกับปริมาณมวลแห้งของจอกหูหนู



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายฟีนอลกับปริมาณมวลแห้งของผักตบชวา

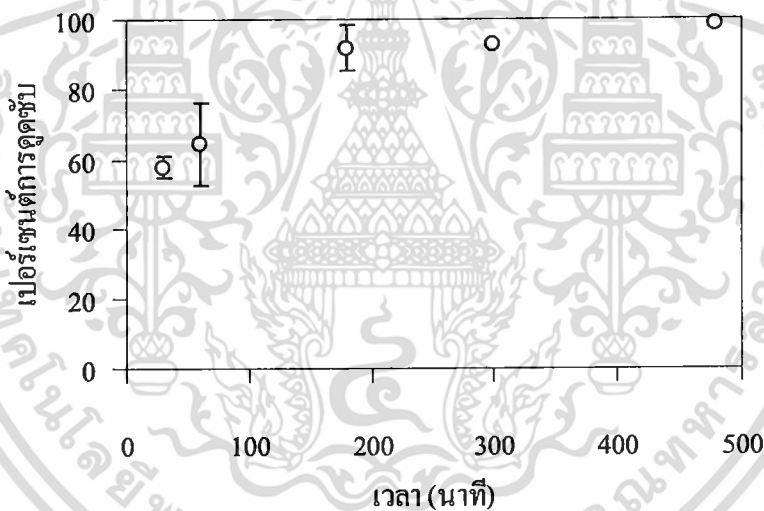
จากรูปที่ 4.7 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณจอกหูหนู โดยจอกหูหนูปริมาณ 0.1 กรัมมีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลได้ถึง 65.7±4.83 % เมื่อเพิ่มปริมาณจอกหูหนูเป็น 0.5 กรัมเกิดการดูดซับได้สูงสุดโดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 97.3 % ปริมาณจอกหูหนูที่เพิ่มขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณจอกหูหนูเป็น 1 กรัมและ 2 กรัม พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าไม่แตกต่างกันกับเมื่อใช้จอกหูหนูในระดับปริมาณ 0.5 กรัม นอกจากนี้พบว่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค่อนข้างสูง เมื่อใช้พืชในปริมาณที่มากขึ้น (1กรัม และ 2กรัม) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพืช เนื่องจากไม่ได้ทำการแยกระหว่างลำต้นและรากของจอกหูหนูที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับ Ribeiro et al. (2000) พบว่ารากของจอกหูหนูมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมัน ได้ดีกว่าใบของจอกหูหนู ดังนั้นปริมาณจอกหูหนูที่เลือกใช้ในการศึกษาต่อไปคือ 0.5 กรัมซึ่งเป็นปริมาณที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด

เมื่อใช้ผักตบชวาเป็นตัวดูดซับสารละลายฟีนอล (รูปที่ 4.8) พบว่าการเพิ่มปริมาณผักตบชวา ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน กล่าวคือเมื่อใช้ผักตบชวาปริมาณ 0.1 กรัมมีประสิทธิภาพการดูดซับ 45.9±2.71 % เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 0.5 กรัมประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 49.5±1.76 % และที่ปริมาณ 2 กรัมทำให้เกิดการดูดซับสูงสุดที่ 79.4±5.13 % ดังนั้น

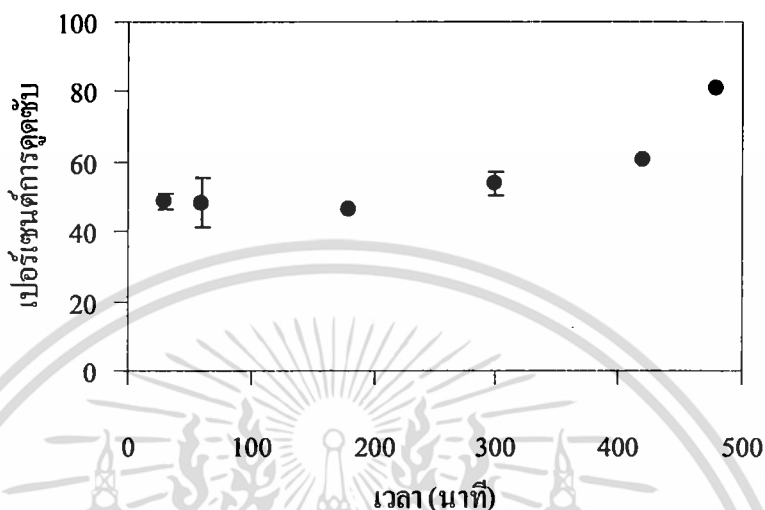
ปริมาณผักตบชวาที่เลือกใช้ในการศึกษาต่อไปคือ 0.5 กรัม ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างปริมาณพืชที่ใช้ในการดูดซับ

4.2.3 ระยะเวลาสัมพัทธ์

จากการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อความสามารถการดูดซับสารละลายฟีนอล ทำได้โดยให้ระยะเวลาสัมพัทธ์ระหว่างพืชที่ใช้เป็นตัวดูดซับกับสารละลายฟีนอลแตกต่างกันดังนี้คือ 30, 60, 180, 300, 360, 420 และ 480 นาที พบว่าในกรณีของจอกหูหนู ประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการสัมพัทธ์นานขึ้น จนกระทั่งถึงระยะเวลาหนึ่งที่ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าคงที่ (รูปที่ 4.9) สำหรับผักตบชวาประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมพัทธ์ระหว่างพืชกับสารละลายฟีนอล (รูปที่ 4.10)



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูกับระยะเวลาสัมพัทธ์



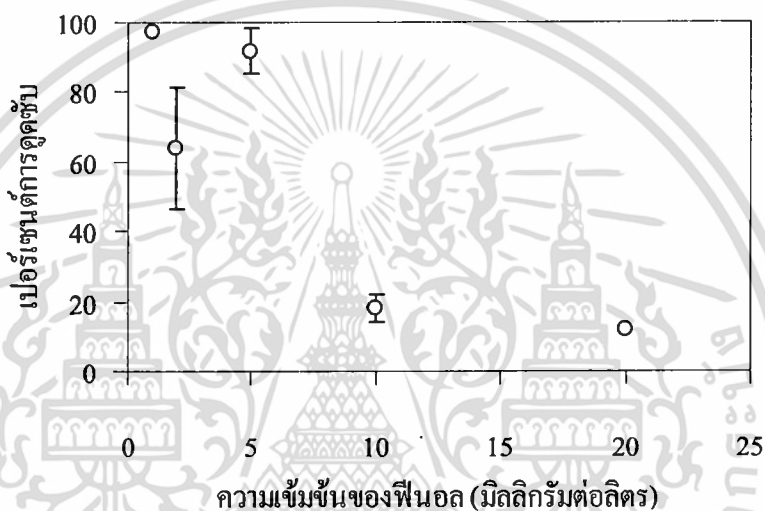
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับฟีนอลของผักตบชวากับระยะเวลาสัมผัส

จากรูปที่ 4.9 พบว่าระยะเวลาในการสัมผัสมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของจอกหูหนู โดยเมื่อใช้เวลาในการสัมผัสระหว่างจอกหูหนูและสารละลายฟีนอลเป็นเวลา 30 นาทีมีประสิทธิภาพการดูดซับ 57.9 ± 2.94 % เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสจาก 30 นาทีเป็น 60 นาทีประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 64.5 ± 12.00 % ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าสูงสุดที่ 91.8 ± 6.73 % เมื่อใช้เวลาสัมผัสนานถึง 180 นาที หลังจากเวลา 180 นาทีเป็นต้นไป ประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มมีค่าคงที่ แสดงว่าปฏิกิริยาการดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังนั้นเวลาที่เลือกเพื่อทำการศึกษาคือ 180 นาที เนื่องจากที่เวลา 180 และ 480 นาทีประสิทธิภาพการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

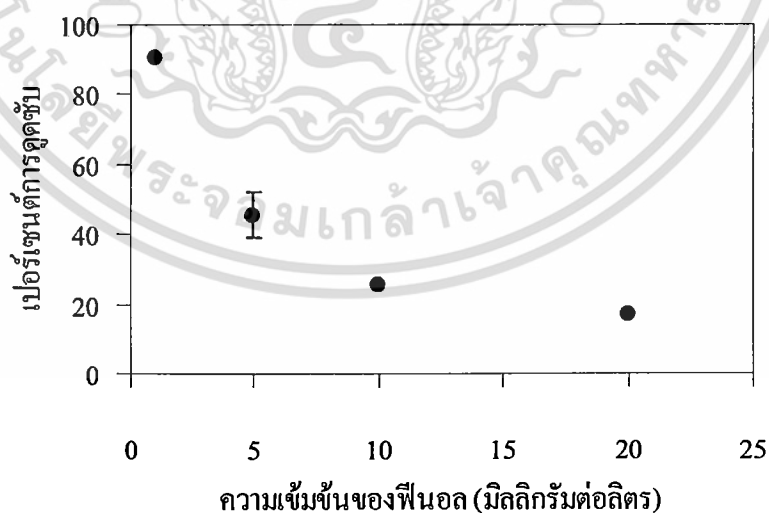
ในกรณีของผักตบชวา พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของผักตบชวามีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อใช้เวลาสัมผัสแตกต่างกัน โดยเมื่อใช้เวลาสัมผัสระหว่างผักตบชวากับสารละลายฟีนอลเป็นเวลา 30 นาทีพบว่าผักตบชวามีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 48.6 ± 2.51 % เมื่อเพิ่มเวลาในการสัมผัสนานขึ้นจาก 30 นาทีเป็น 300 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายฟีนอลมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อใช้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจนถึง 480 นาทีพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 80% แม้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับที่เวลา 480 นาทีมีค่าสูงสุด พบว่าที่ระยะเวลาดังกล่าว สารละลายผสมฟีนอลและผักตบชวามีกลิ่นเหม็น ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากการย่อยสลายของผักตบชวา ดังนั้นเวลาที่เลือกใช้เพื่อทำการศึกษาคือ 60 นาที

4.2.4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลต่อความสามารถในการดูดซับของจอกหูหนู ซึ่งทำได้โดยใช้พีชในปริมาณเท่ากัน และแปรค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเป็น 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของพีชทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12



รูปที่ 4.11 อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับของจอกหูหนู

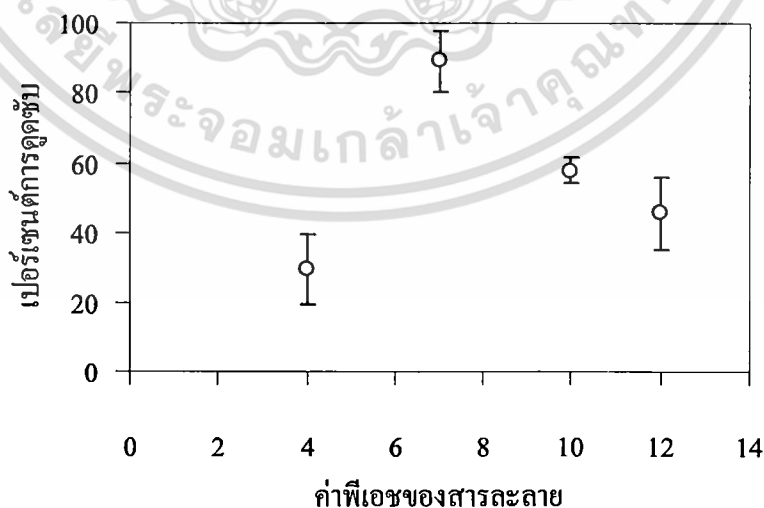


รูปที่ 4.12 อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับของฝักตบขวา

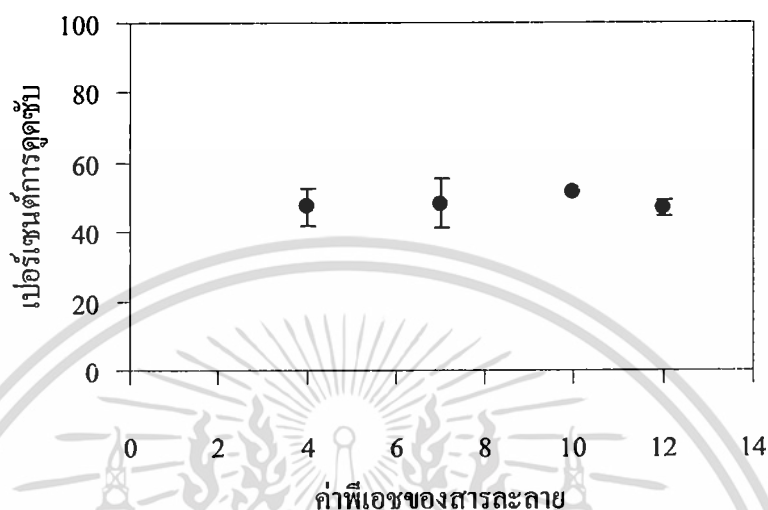
จากรูปที่ 4.11 พบว่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูแปรผกผันกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลในระบบ ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จอกหูหนูมีความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลได้สูงถึง 97.3% เมื่อความเข้มข้นของฟีนอลเพิ่มขึ้นเป็น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร จอกหูหนูมีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงเป็น $63.8(\pm 17.64)\%$ และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ผักตบชวาเป็นตัวดูดซับ พบว่าผลที่ได้มีความคล้ายคลึงกับผลของจอกหูหนู (รูปที่ 4.12) กล่าวคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลของผักตบชวามีค่าลดลง ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ทำให้อนุภาคหรือจำนวนโมลของฟีนอลมีปริมาณมากขึ้นในระบบ ในขณะที่พื้นที่ผิวในการดูดซับของพืชมีปริมาณจำกัด ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของฟีนอลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

4.2.5 ค่าพีเอชของสารละลาย

จากการศึกษาผลของค่าพีเอชของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวา ซึ่งทำได้โดยใช้พืชจำนวน 0.5 กรัม และสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารละลายฟีนอลให้มีค่าแตกต่างกันดังนี้คือ 4, 7, 10 และ 12 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายฟีนอลของจอกหูหนู ในขณะที่ค่าพีเอชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวา ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 อิทธิพลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายฟีนอลของจอกหูหนู



รูปที่ 4.14 อิทธิพลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายฟีนอลของผักตบชวา

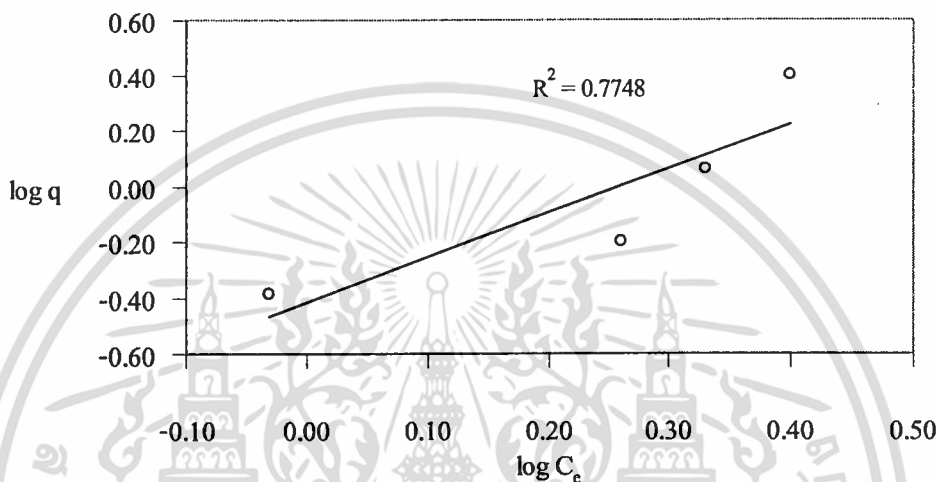
จากรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 4 ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูมีค่าเท่ากับ 29.3 ± 10.08 % เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชสูงขึ้นเป็น 7 จอกหูหนูมีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 89.1 ± 8.92 % ซึ่งเป็นค่าสูงสุด จากนั้นเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มเป็น 10 และ 12 ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลง ความสามารถในการดูดซับฟีนอลที่ลดลง อาจมีสาเหตุมาจากการแข่งขันเข้าจับบริเวณดูดซับของพีระระหว่างไฮโดรเจนไอออน ไฮดรอกไซด์ไอออนและสารละลายฟีนอล เมื่อสารละลายเป็นกรดและเบสมากเกินไป (Low *et al.*, 1995) นอกจากนี้เมื่อสารละลายเป็นเบส สารประกอบฟีนอลซึ่งมีค่า pK_a เท่ากับ 9.96 จะอยู่ในรูปฟีนอลซึ่งเป็น โมเลกุลที่มีขั้วที่สามารถละลายน้ำได้ จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลมีค่าลดลง

จากรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชต่าง ๆ กัน ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลของผักตบชวามีแนวโน้มคงที่โดยที่ค่าพีเอช 4, 7, 10 และ 12 มีประสิทธิภาพในการดูดซับ 47.3 ± 5.21 %, 48.2 ± 7.03 %, 51.2 ± 0.92 % และ 47.1 ± 2.30 % ตามลำดับ

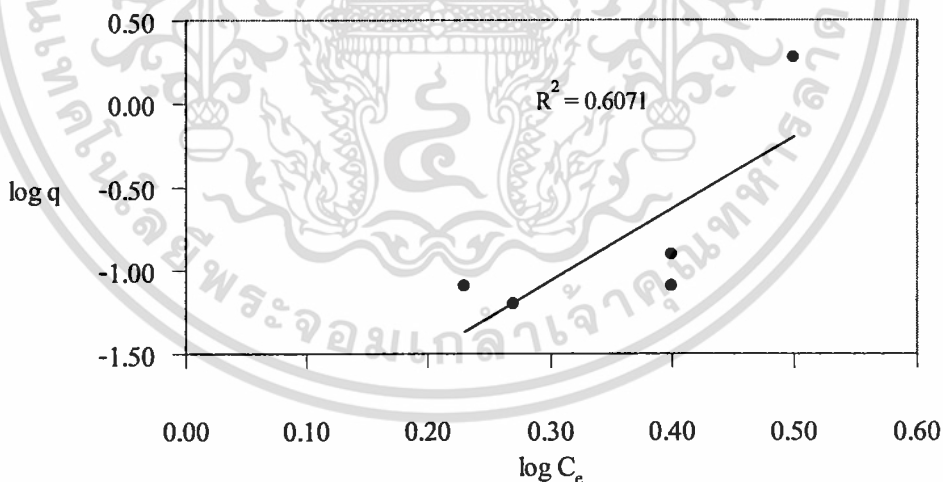
4.2.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวา สามารถทำได้โดยใช้จอกหูหนูและผักตบชวาในปริมาณต่าง ๆ กัน แล้วทำการทดลองในสภาวะที่เหมาะสมของพืชแต่ละชนิด ภายหลังจากกระบวนการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลจะได้ค่าปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักพืช (q) และความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C_e) ที่นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์

เพื่อหาไอโซเทอร์มที่เหมาะสม ซึ่งในการทดลองครั้งนี้พบว่าไอโซเทอร์มที่เหมาะสมต่อการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง q และ C_e สำหรับพืชทั้งสองชนิดคือไอโซเทอร์มแบบฟลูนิค ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.15 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนู



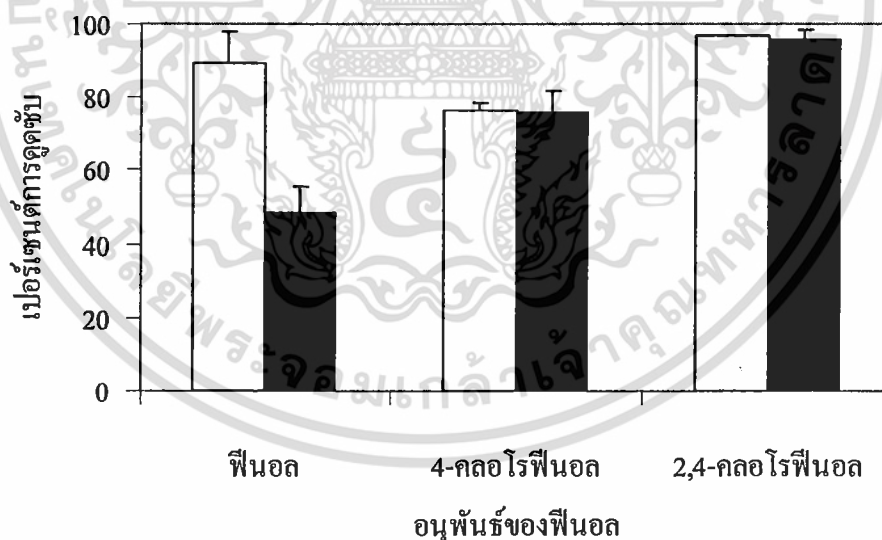
รูปที่ 4.16 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลของผักตบชวา

จากรูปที่ 4.15 แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนู จะได้สมการเส้นตรง $\log q = 1.5953 \log C_e - 0.4154$ ($r^2=0.7748$) และจากรูปที่ 4.16 แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลของผักตบชวา จะได้สมการเส้นตรง $\log q = 4.3596 \log C_e - 2.3775$ ($r^2 = 0.6071$) เมื่อจัดรูป

สมการในรูปแบบการเส้นตรงแบบพหุนาม พบว่าค่าความชันมีค่าเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดบนแกน y มีค่าเท่ากับ $\log K$ จากการคำนวณพบว่าจอกหูหนูมีค่า K เท่ากับ 0.38 และ $1/n$ เท่ากับ 1.5953 ในขณะที่ ผักตบชวามีค่า K เท่ากับ 0.004 และ $1/n$ เท่ากับ 4.3598 จากค่า K ที่คำนวณได้จะเห็นว่าจอกหูหนูมีค่า K สูงกว่าผักตบชวา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจอกหูหนูมีความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลได้สูงกว่าผักตบชวา เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์พบว่าถ่านกัมมันต์มีค่า K เท่ากับ 9.94 (Rengaraj et al., 2002) ทำให้สามารถเรียงลำดับความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลได้ดังนี้คือ ถ่านกัมมันต์ > จอกหูหนู > ผักตบชวา ส่วนค่า $1/n$ จะบอกลถึงปริมาณพื้นที่ที่ใช้ในการดูดซับบนตัวดูดซับ โดยพืชทั้งสองชนิดมีค่า $1/n$ มากกว่า 1 แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวในการดูดซับทำให้ปริมาณสารสามารถถูกดูดซับได้มากขึ้น

4.2.7 ชนิดของฟีนอลและอนุพันธ์

จากการนำสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวามาทำการทดลองโดยเปลี่ยนตัวถูกดูดซับเป็น 4-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล แล้วเปรียบเทียบในการดูดซับสารฟีนอลและอนุพันธ์ สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพของจอกหูหนูและผักตบชวาในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล โดย

□ จอกหูหนู และ ■ ผักตบชวา

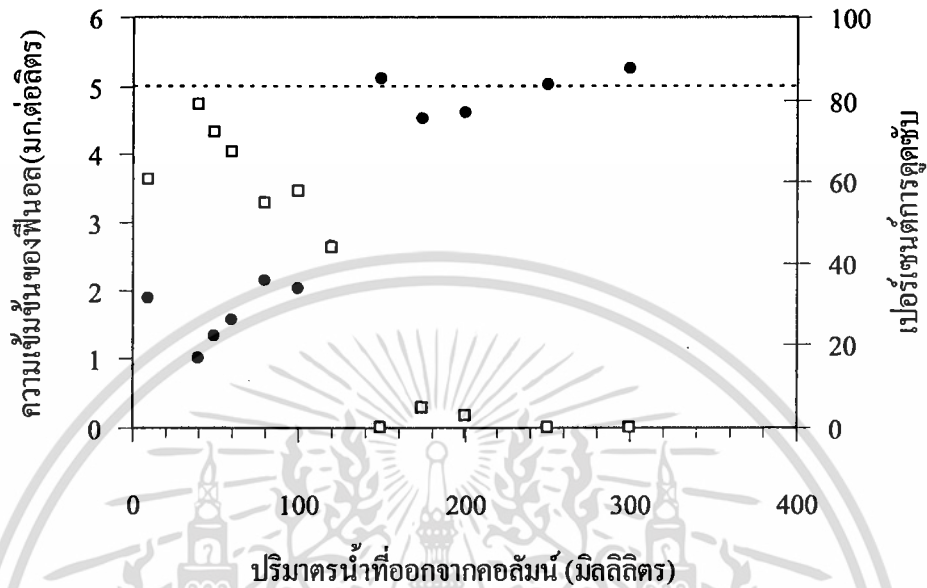
จากรูปที่ 4.17 พบว่าความสามารถในการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอลของจอกหูหนูสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล > ฟีนอล > 4-คลอโรฟีนอล โดยมีประสิทธิภาพในการดูด

จับฟีนอลเท่ากับ 97.1%, 89.1%, และ 76.4% ตามลำดับ สำหรับผักตบชวาพบว่าความสามารถในการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอลสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล > 4-คลอโรฟีนอล > ฟีนอล โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลเท่ากับ 95.8%, 75.7%, และ 48.2% ตามลำดับ เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับชนิดของสารประกอบฟีนอลพบว่า พืชทั้งสองชนิดมีความสามารถในการดูดซับ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลได้ดีที่สุด ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากสารตัวนี้มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุด (คือ 4.5 มิลลิกรัมต่อลิตร) (มันสิน 2538) ทำให้ถูกดูดซับได้ดีกว่าอนุพันธ์ของฟีนอลตัวอื่น ในกรณีของจอกหูหนู พบว่าจอกหูหนูมีความสามารถในการดูดซับ ฟีนอลได้ดีกว่า 4-คลอโรฟีนอล ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก 4-คลอโรฟีนอลมีค่าคงที่ของเฮนรี่สูงกว่าฟีนอล ทำให้อนุภาคหรือจำนวน โมลของ 4-คลอโรฟีนอลอยู่ในอากาศมากกว่าในสารละลาย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ 4-คลอโรฟีนอลมีค่าน้อยกว่าฟีนอล

4.3 อายุการใช้งานของตัวดูดซับ

การศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ ทำได้โดยผ่านสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรอย่างต่อเนื่องเข้าสู่คอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับ และทำการเก็บปริมาตรน้ำตัวอย่างอย่าง ๗ ปริมาตรต่างกันไปจนกระทั่งความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของฟีนอลก่อนเข้าระบบ หรือจุดที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพ

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างจอกหูหนูและผักตบชวาพบว่าจอกหูหนูมีความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าผักตบชวาในทุกปีจบการศึกษาข้างต้น ดังนั้นเพื่อลดปริมาณการใช้ทรัพยากรและปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกทำการศึกษาเฉพาะอายุการใช้งานของจอกหูหนู ผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความสามารถในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนู เมื่อผ่านสารละลายฟีนอลเข้าสู่คอลัมน์ ณ ปริมาตรต่างกัน โดย ● แสดงความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำที่ออกจากระบบ □ แสดง เปอร์เซ็นต์การดูดซับของจอกหูหนู และ แสดงขอบเขตที่ความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำที่ ออกจากคอลัมน์เท่ากับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่เข้าสู่คอลัมน์

จากรูปที่ 4.18 พบว่าจอกหูหนูสามารถดูดซับฟีนอลในช่วงปริมาณน้อยกว่า 150 มิลลิลิตร ดัง จะเห็นได้จากปริมาณฟีนอลในน้ำที่ผ่านคอลัมน์มีความเข้มข้นลดลง และมีประสิทธิภาพในการดูดซับ ระหว่าง 60-80% ในช่วงปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์ตั้งแต่ 10-60 มิลลิลิตร เมื่อผ่านน้ำเข้าสู่คอลัมน์อย่าง ต่อเนื่อง จอกหูหนูเริ่มมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลลดลง และเมื่อน้ำผ่านเข้าสู่คอลัมน์ใน ปริมาณ 150 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำที่ผ่านคอลัมน์มีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารละลายฟีนอลที่เข้าสู่คอลัมน์ แสดงให้เห็นว่าจอกหูหนูเริ่มหมดประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้และความสามารถของจอกหูหนูและผักตบชวา ในการดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนดังนี้คือ (1) ศึกษาธรรมชาติของพืชทั้งสองชนิดในแง่ลักษณะทางกายภาพ ความเป็นรุกรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะ (2) ศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล โดยทำการทดสอบการดูดซับแบบเบตช์ (batch) และ (3) ศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยใช้การทดสอบการดูดซับแบบคอลัมน์ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้คือ

1. จอกหูหนูและผักตบชวาที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับฟีนอล เป็นมวลแห้งของพืชที่ได้มาจากใบ ลำต้น และรากของพืช ที่ผ่านการบดและอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จอกหูหนูที่ผ่านการอบแห้งมีสีน้ำตาลเข้มกว่าผักตบชวา ลักษณะพื้นผิวและความเป็นรุกรุนของจอกหูหนูและผักตบชวามีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยมีผิวค่อนข้างขรุขระ แต่ไม่พบส่วนที่เป็นรุกรุนอย่างเด่นชัด มีพื้นที่ผิวจำเพาะเทียบจากการดูดซับสี่เมทริลีนบลูเท่ากับ 292.10 และ 310.93 ตารางเมตรต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

2. ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยใช้การทดสอบแบบเบตช์ พบว่า ปริมาณมวลแห้งของพืช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ค่าพีเอชของสารละลาย และ ชนิดของสารประกอบฟีนอล มีผลต่อประสิทธิภาพของพืชในการดูดซับฟีนอล ความสามารถในการดูดซับไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคของพืชที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับ ประสิทธิภาพในการดูดซับไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อใช้มวลแห้งของพืชทั้งสามขนาด ได้แก่ ขนาดเล็กกว่า 0.85 มิลลิเมตร ขนาดตั้งแต่ 0.85-1.77 มิลลิเมตร และขนาดใหญ่กว่า 1.77 มิลลิเมตร เป็นวัสดุในการดูดซับฟีนอล การเปรียบเทียบผลของปริมาณมวลแห้งของพืชที่ใช้เป็นตัวดูดซับ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณพืชมากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับจะมีค่าสูงขึ้น การเปรียบเทียบผลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับพบว่าจอกหูหนูและผักตบชวามีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างมวลแห้งของพืชกับสารละลายฟีนอล ปฏิกริยาในการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อเวลา 180 นาที และมากกว่า 480 นาทีสำหรับจอกหูหนู และผักตบชวา การ

เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 1- 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล การเปรียบเทียบผลของค่าพีเอชของสารละลายที่ค่าพีเอช 4, 7, 10 และ 12 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย ในกรณีที่ใช้มวลแห้งของจอกหูหนูเป็นตัวดูดซับ โดยประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าสูงสุดเท่ากับ 89.1% เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 ในทางกลับกัน พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลของผักตบชวาไม่ขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลาย โดยประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าค่อนข้างคงที่ระหว่าง 47.1% ถึง 51.2% การเปรียบเทียบผลของชนิดของสารประกอบฟีนอล โดยศึกษาอนุพันธ์ของฟีนอล 3 ชนิด ได้แก่ ฟีนอล 4-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล พบว่าความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับค่าการละลายน้ำของสารเคมี โดยจอกหูหนูและผักตบชวาสามารถดูดซับ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ได้ดีที่สุด ซึ่งเป็นสารที่มีค่าการละลายน้ำได้ต่ำกว่า 4-คลอโรฟีนอล และฟีนอล การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักพีช (q) และความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สมดุล (C_e) สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์มของฟรอนดลิช โดยที่จอกหูหนูมีสมการการดูดซับคือ $\log q = 1.5933 \log C_e - 0.4154$ ค่าคงที่การดูดซับ (K) และค่า $1/n$ ที่คำนวณได้จากสมการมีค่าเท่ากับ 0.38 และ 1.60 ตามลำดับ สมการการดูดซับของผักตบชวา คือ $\log q = 4.3598 \log C_e - 2.3775$ ค่าคงที่การดูดซับ (K) และค่า $1/n$ ที่คำนวณได้จากสมการมีค่าเท่ากับ 0.004 และ 4.36 ตามลำดับ

3. ในการศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยใช้การทดสอบแบบคอลัมน์ พบว่ามวลแห้งของจอกหูหนูจำนวน 4 กรัมหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ เมื่อผ่านสารละลายฟีนอลปริมาณ 150 มิลลิตรเข้าสู่คอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรแยกส่วนต่างๆของพืชที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับ เช่น ใบ ลำต้น และราก พร้อมทั้งศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของพืชในแต่ละส่วน
2. ควรศึกษาถึงผลการดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟีนอลจากโรงงานอุตสาหกรรม
3. ควรศึกษาแนวทางในการจัดการจอกหูหนูและผักตบชวาที่ผ่านการดูดซับฟีนอลแล้ว เพื่อไม่ให้เกิดการแพร่กระจายของฟีนอลในสิ่งแวดล้อม

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2542. ฟีนอล. กรุงเทพฯ: กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.
- จตุพร โทงว่ง, ชิดารัตน์ จรัสกุล และสุราณี บุญยสถิตย์. 2545. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผักตบชวา โสน และบอน. ปรินูญานิพนธ์ ปรินูญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ชีวรัตน์ ศิลปรัตน์, ปรินูญา รุ่งโรจน์กิจไพศาล และปวีณา จรัสโชติพิณิต. 2544. การดูดซับตะกั่วโดยการพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จากเปลือกหอยแครง. ปรินูญานิพนธ์ ปรินูญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ต่อพงศ์ กิริษชาติ. 2544. การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อกระดาษโดยกระบวนการดูดซับด้วยแอคติเวทเตดคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ ปรินูญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิสากร แสงนิล. 2543. การหาพื้นที่ผิวจำเพาะและพหุติกรรมการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับบางชนิด. วิทยานิพนธ์ ปรินูญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2538. วิศวกรรมการประปาเล่ม 2. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรัชย์ มัจฉาชีพ. 2538. วัชพืชในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แพรวพิทยา.
- Aksu, Z. and Yemer, J. 1998. Investigation of the Biosorption of Phenol and Monochlorinated Phenols on the Dried Activated Sludge. **Process Biochemistry**, 33: 649-655.
- American Health Public Association (AHPA). 1992. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19th edition. Eaton, A.D.; Clesceri, L.S.; and Greenberg, A.E., eds. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- American Water Works Association (AWWA). 1998. **Water Treatment Plant Design**.
- Calace, N., Nardi, E., Petronio, B.M. and Pertroletti, M. 2002. Adsorption of Phenols by Papermill Sludges. **Environmental Pollution**, 118: 315-319.

- Costa, A.C.A., Mesquitta, L.M.S. and Tornovsky, J. 1996. Batch and Continuous Heavy Metals Biosorption by a Brown Seaweed from a Zinc-Producing Plant. **Minerals Engineer**, 9(8): 811-824.
- Faust S.D. and Aly O.M. 1987. **Adsorption Processes for Water Treatment**. USA : Butterworths.
- Kvech, S. and Tull, E. 2002. Activated Carbon. [Online] Available:
http://www.cee.vt.edu/program_areas/environmental/teach/wtprimer/carbon/skctcarb.html [Online].
 (Access date: March 20, 2003)
- Low, K.S., Lee, C.K. and Tai, C.H. 1994. Biosorption of Copper by Water Hyacinth Roots. **Journal of Environmental Science and Health Part A**, 29(1):171-188.
- Low, K.S., Lee, C.K. and Tan, K.K. 1995. Biosorption of Basic Dyes by Water Hyacinth Roots. **Bioresource Technology**, 52(1): 79-83.
- Metcalf and Eddy. 2003. **Wastewater Engineering : Treatment and Reuse**. 4th Edition. Singapore : Mc Graw Hill.
- Rao, J.R. and Viraraghavan, T. 2002. Biosorption of Phenol from an Aqueous solution by *Aspergillus niger* biomass. **Bioresource Technology**, 85: 165-171.
- Rengaraj, S., Moon, S.-H., Sivabalan, R., Arabindoo, B. and Murungesan, V. 2002. Agricultural Solid Waste for the Removal of Organics: Adsorption of Phenol from Water and Wastewater by Palm Seed Coat Activated Carbon. **Waste Management**, 22: 543-548.
- Riberio, T.H., Smith, R.W. and Rubio, J. 2000. Sorption of Oils by the Non-living Biomass of *Salvinia sp.* **Environmental Science and Technology**, 34: 5201-5205.
- Schneider, I.A.H. and Rubio, J. 1999. Sorption of Heavy Metal Ions by the Nonliving Biomass of Freshwater Macrophytes. **Environmental Science and Technology**, 33(13): 2213-2217.
<http://www.merk.go.th> [Online]. (Access date: March 31, 2003)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับฟีนอลด้วยมวลแห้งของจอกหูหนู

Sorption of Phenol by the Dried Biomass of Floating Mass

กุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ มุกดา พัฒนาวาณิชชัย สกสรรวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์ สุกัญญา กำมะเลิศ
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง กรุงเทพฯ 10520

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำมวลแห้งของจอกหูหนูมาใช้เป็นตัวดูดซับสารละลายฟีนอล และทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลด้วยวิธีการทดลองแบบแบตช์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดอนุภาคของพืช ค่าพีเอชของสารละลาย ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณมวลแห้งของพืช และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล ผลการศึกษาพบว่าขนาดอนุภาคของพืชที่ใช้ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ในขณะที่ปัจจัยที่เหลือได้แก่ ค่าพีเอชของสารละลาย ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณมวลแห้งของจอกหูหนู และความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล มีผลต่อความสามารถในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนู โดยจอกหูหนูมีความสามารถในการดูดซับได้ $91.8 \pm 6.73\%$ เมื่อใช้มวลแห้งของพืชในปริมาณเท่ากับ 0.5 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลที่พีเอช 7 มีค่าเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการเขย่าเป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง

Abstract

This research investigated the possibility in using the dried biomass of floating mass as an adsorbent for phenol. Factors affecting phenol adsorption were studied using batch experiments. These factors were plant particle size, pH of solution, contact time, dried biomass dosage, and initial phenol concentration. Results from the study showed that plant particle size did not have any effect on adsorption efficiency. While the remaining factors such as solution pH, contact time, dried biomass dosage, and initial phenol concentration had an effect on phenol adsorption capacity by floating mass. Floating mass had phenol adsorption capacity of $91.8 \pm 6.73\%$ when using 0.5 g of dried biomass, initial phenol concentration of 5 mg/L at pH 7, and at least 3 hours for contact time.

คำสำคัญ (Keywords) : การดูดซับ วัชพืชน้ำ การจัดการของเสีย ฟีนอล

1. บทนำ

จอกหูหนู (Floating Mass) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Salvinia sp.* จัดเป็นพืชลอยน้ำจำพวกเฟิร์นชนิดหนึ่งที่สามารถเจริญเติบโตและแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็ว [1] ปริมาณการปกคลุมที่ผิวน้ำมากเกินไป ทำให้ความเข้มของแสงที่ส่องผ่านแหล่งน้ำมีปริมาณลดลง ลดปริมาณการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายและพืชอื่นในแหล่งน้ำ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นสำหรับสัตว์น้ำมีปริมาณลดลง และน้ำเกิดการเน่าเสียได้ในที่สุด การกำจัดจอกหูหนูโดยการตัดหรือการลอกออกจากผิวน้ำน้ำจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อลดปัญหาการเน่าเสียของแหล่งน้ำ ผลที่ตามมาคือเกิดวัสดุเหลือทิ้งที่ต้องหาวิธีกำจัดหรือนำไปใช้ประโยชน์ ความพยายามในการนำเอาวัชพืชไปใช้ประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้น ทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์ คือการนำจอกหูหนูมาใช้เป็นตัวดูดซับมลพิษที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ

สารประกอบฟีนอลจัดเป็นมลพิษทางน้ำที่สำคัญกลุ่มหนึ่ง สารกลุ่มนี้สามารถพบได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติ รวมทั้งในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว แหล่งกำเนิดที่สำคัญของสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอลมาจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ การผลิตสี ตัวทำละลาย การผลิตยาและอุตสาหกรรมปิโตรเลียม [2] สารประกอบฟีนอลเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งในการก่อให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นและสีที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำดื่ม การปนเปื้อนในน้ำดื่มในระดับความเข้มข้นเพียง 1 ไมโครกรัมต่อลิตรสามารถทำให้น้ำมีกลิ่นและสีที่ไม่เหมาะสมต่อการบริโภค [3] นอกจากนี้การปนเปื้อนในระดับมิลลิกรัมต่อลิตรมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำ [4] วิธีการบำบัดฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำสามารถกระทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การบำบัดทางชีวภาพ การสกัดด้วยตัวทำละลาย และการดูดซับ เป็นต้น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ข้อจำกัดที่สำคัญของถ่านกัมมันต์คือ มีราคาแพง อีกทั้งการนำกลับมาใช้ใหม่มีค่าใช้จ่ายสูง การศึกษาหาตัวดูดซับประเภทอื่นที่มีราคาถูกกว่า หาได้ง่ายและมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์ เพื่อที่จะใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างแพร่หลาย

คณะวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำมวลแห้งของจอกหูหนูมาใช้เป็นตัวดูดซับสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น โลหะหนัก และน้ำมัน เป็นต้น Schneider และ Rubio [5] พบว่ามวลแห้งของจอกหูหนู (*Salvinia sp.*) มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก Cr^{3+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} แตกต่างกัน โดยมีความสามารถดูดซับสูงสุดที่ 0.9 meq/g Ribeiro et al. [6] ได้ศึกษาถึงการนำมวลแห้งของจอกหูหนูมาใช้ในการดูดซับน้ำมัน พบว่าส่วนใบของจอกหูหนูซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 1 มม. สามารถดูดซับน้ำมันได้ 7.3-11.6 กรัมต่อกรัม ในขณะที่รากของจอกหูหนูซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 1 มม. สามารถดูดซับน้ำมันได้ 3.6-4.8 กรัมต่อกรัม งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้มวลแห้งของจอกหูหนูเป็นวัสดุดูดซับ ดังนั้นการศึกษาถึงการนำประโยชน์ของมวลแห้งของจอกหูหนูในการดูดซับสารอินทรีย์กลุ่มฟีนอลจึงมีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูง นอกจากนี้จอกหูหนูสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก ดังนั้นการนำมวลแห้งของจอกหูหนูมาใช้ดูดซับสารอินทรีย์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนฟีนอลด้วยกระบวนการที่มีต้นทุนต่ำ

งานวิจัยนี้จึงได้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมวลแห้งของจอกหูหนูใช้ในการดูดซับสารละลายฟีนอล รวมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ซึ่งความรู้ที่ได้รับสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการและใช้ประโยชน์ของวัสดุเหลือทิ้งในการบำบัดน้ำเสีย

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมมวลแห้งของจอกหูหนู จอกหูหนูที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้ ได้ทำการเก็บรวบรวมมาจากบ่อเลี้ยงปลาแห่งหนึ่งในอำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา จากนั้นนำมาล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดครวดและดินที่ปนเปื้อน หั่นเป็นชิ้นพอประมาณ และนำมาอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาบดด้วยเครื่องบดตัวอย่าง จากนั้นทำการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 12 และ 20 เมช และนำไปอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นและเก็บไว้ในเซซิเคเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป

2.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของพืช ลักษณะทางกายภาพที่ทำการศึกษาได้แก่ ลักษณะโครงสร้าง และพื้นที่ผิวจำเพาะของพืช โดยลักษณะโครงสร้างมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาทำการศึกษาค้างด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope รุ่น 1450VP บริษัท Leo) ที่กำลังขยาย 600 เท่า พื้นที่ผิวของจอกหูหนูทำการศึกษาค้างด้วยวิธีการดูดซับสารละลายสีเมทธิลีนบลูอ้างอิงตามวิธีของ Ribério และคณะ [6] ซึ่งทำได้โดยชั่งมวลแห้งของจอกหูหนูมา 0.5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายเมทธิลีนบลูที่มีความเข้มข้นต่างๆ กันจำนวน 100 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละขวด นำมาเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ นำสารละลายที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของข้อมูลการดูดซับด้วยไอโซเทอร์มแลงเมียร์ระหว่างปริมาณสีที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของพืช พื้นที่ผิวจำเพาะของจอกหูหนูคำนวณจากปริมาณการดูดซับสูงสุด โดยกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของสี่เหลี่ยมมุมฉากเท่ากับ 120 (องศาอิมสตรอง)² [7]

2.3 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ ปัจจัยที่ทำการศึกษาค้างแก่ ขนาดอนุภาคของพืช ค่าพีเอชของสารละลาย ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณมวลแห้งของพืช และความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล การทดสอบหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสารละลายฟีนอลทำได้โดยใช้วิธีการทดสอบแบบแบดซ์ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนหลักได้ดังนี้คือ ชั่งมวลแห้งของจอกหูหนูมาในปริมาณที่เท่ากัน (ยกเว้นการศึกษาค้างผลของปริมาณมวลแห้งของพืช) ใส่ในขวดแก้วพร้อมฝาปิดขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที จนกระทั่งปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะสมดุล นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 นำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธีเทียบสี [8] ทำแบบลงค์โดยใช้มวลแห้งของพืชในปริมาณเท่ากันแต่เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรแทนสารละลายฟีนอลตามวิธีข้างต้น พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุมโดยเติมสารละลายฟีนอลให้มีความเข้มข้นและปริมาณเทียบเท่ากับชุดตัวอย่างที่ทำการศึกษาค้าง ลงในขวดแก้วที่ไม่ใส่มวลแห้งของพืช ทำการทดลองเช่นเดียวกับชุดตัวอย่าง โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำในทุกปัจจัยที่ทำการศึกษาค้าง อุณหภูมิห้อง

3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะและสมบัติของจอกหูหนูแห้ง จอกหูหนูที่นำมาใช้ในการศึกษาค้างนี้มีลักษณะทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 1ก เมื่อผ่านการบดและอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสก่อนนำมาใช้เป็นตัวอย่างดูดซับมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1ข ลักษณะโครงสร้างของจอกหูหนูแห้งพิจารณาจากเครื่อง Scanning Electron Microscope ที่กำลังขยาย 600 เท่า พบว่ามีพื้นที่ผิวค่อนข้างขรุขระและมีลักษณะความเป็นรูพรุนไม่ชัดเจน (รูปที่ 2) พื้นที่ผิวจำเพาะต่อการดูดซับที่

ตรวจวัดโดยใช้สัมพัทธ์เป็นสารเคมีในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 292.10 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของจอกหูหนูแห้งที่ใช้ในการศึกษาของ Ribeiro และคณะ [6]

3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลด้วยจอกหูหนูแห้ง

3.2.1 ผลของขนาดอนุภาคของพืช อิทธิพลของขนาดอนุภาคของพืชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล ทำการศึกษาโดยใช้จอกหูหนูแห้งที่มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาดคือ ขนาดเล็กกว่า 0.85 มิลลิเมตร ขนาดตั้งแต่ 0.85 ถึง 1.77 มิลลิเมตร และขนาดใหญ่กว่า 1.77 มิลลิเมตร มาเป็นวัสดุในการดูดซับสารละลายฟีนอลที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าขนาดของพืชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 3 โดยจอกหูหนูขนาดเล็กกว่า 0.85 มิลลิเมตรมีประสิทธิภาพการดูดซับ $57.8 \pm 7.44\%$ เมื่อใช้จอกหูหนูขนาดตั้งแต่ 0.85 ถึง 1.77 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลงเป็น 44.8 % และเมื่อใช้จอกหูหนูขนาดใหญ่กว่า 1.77 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มเป็น $49.5 \pm 3.10\%$ และเมื่อนำผลที่ได้มาทดสอบทางสถิติโดยวิธี t-test พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูทั้งสามขนาด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.2.2 ผลของค่าพีเอช การศึกษาผลของค่าพีเอชของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนู ทำได้โดยใช้มวลแห้งของจอกหูหนูในปริมาณ 0.5 กรัม และสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชของสารละลายฟีนอลให้มีค่าแตกต่างกัน พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายฟีนอลของจอกหูหนู (รูปที่ 4) เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 4 ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูมีค่าเท่ากับ $29.3 \pm 10.08\%$ เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชสูงขึ้นเป็น 7 จอกหูหนูมีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ $89.1 \pm 8.92\%$ ซึ่งเป็นค่าสูงสุด จากนั้นเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 12 ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลงตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับฟีนอลที่ลดลงอาจมีสาเหตุมาจากอิทธิพลของค่าพีเอชต่อความมีประจุของฟีนอล เมื่อพิจารณาสารละลายฟีนอลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าฟีนอลมีค่าการแตกตัวของกรดอ่อน (pKa) เท่ากับ 9.82 กล่าวคือเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชมากกว่า 9.82 สารประกอบฟีนอลจะมีแนวโน้มเปลี่ยนรูปเป็นฟีนอลเลต ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีประจุลบ และเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชต่ำกว่า 9.82 ฟีนอลจะอยู่ในรูปไม่มีประจุหรือเป็นกลาง ดังนั้นในกรณีของสภาวะกรด (พีเอชน้อยกว่า 7) ทำให้เกิดการแข่งขันเข้าจับบริเวณพื้นที่ดูดซับของพืชระหว่างไฮโดรเจนไอออนและสารละลายฟีนอล และเมื่อพิจารณาในกรณีสภาวะเบสช่วงพีเอช 8-12 สารประกอบฟีนอลแตกตัวและพบในรูปฟีนอลเลตเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วและมีประจุ จึงสามารถละลายน้ำได้ดี ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

3.2.3 ผลของระยะเวลาสัมผัส การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลของจอกหูหนูแห้ง ทำได้โดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัสระหว่างจอกหูหนูแห้งกับสารละลายฟีนอลจาก 30 นาที เป็น 60, 180, 300, และ 480 นาที ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสนานขึ้น จนกระทั่งถึงระยะเวลาหนึ่งที่ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าคงที่ (รูปที่ 5) โดยเมื่อใช้เวลาในการสัมผัสระหว่างจอกหูหนูและสารละลายฟีนอลเป็นเวลา 30 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าเท่ากับ $57.9 \pm 2.94\%$ เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสจาก 30 นาทีเป็น 60 นาทีประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $64.5 \pm 12.00\%$ ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าสูงสุดที่ $91.8 \pm 6.73\%$ เมื่อใช้เวลาสัมผัสนานถึง 180 นาที หลังจากเวลา 180 นาทีเป็นต้นไป ประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มมีค่าคงที่ แสดงว่าปฏิกิริยาการดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ผลของปริมาณมวลแห้งของพืช การศึกษาผลของปริมาณมวลแห้งของจอกหูหนูต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลทำได้โดยใช้พืชที่เป็นตัวดูดซับสารละลายฟีนอลในปริมาณที่ต่างกันดังนี้คือ 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 3 กรัม มาเป็นวัสดุในการดูดซับสารละลายฟีนอลที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้มวลแห้งของพืชในปริมาณมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6 โดยเมื่อใช้จอกหูหนูแห้งในปริมาณ 0.1 กรัมมีประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลได้ถึง $65.7 \pm 4.83\%$ เมื่อเพิ่มปริมาณจอกหูหนูเป็น 0.5 กรัม ทำให้เกิดการดูดซับได้สูงสุดโดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 97.3% ปริมาณจอกหูหนูที่เพิ่มขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณจอกหูหนูเป็น 1 กรัมและ 2 กรัม พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าไม่แตกต่างกันกับเมื่อใช้จอกหูหนูในระดับปริมาณ 0.5 กรัม นอกจากนี้พบว่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค่อนข้างสูง เมื่อใช้พืชในปริมาณที่มากขึ้น (1 กรัม และ 2 กรัม) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความไม่แน่นอนเดียวกันของพืช เนื่องจากไม่ได้ทำการแยกระหว่างลำต้นและรากของจอกหูหนูที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับ Ribeiro และคณะ[6] พบว่ารากของจอกหูหนูมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมัน ได้ดีกว่าใบของจอกหูหนู

3.2.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลต่อความสามารถในการดูดซับของจอกหูหนูแห้ง ทำได้โดยใช้มวลแห้งของพืชในปริมาณเท่ากัน และแปรค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเป็น 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของพืชทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จอกหูหนูมีความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลได้สูงถึง 97.3% เมื่อความเข้มข้นของฟีนอลเพิ่มขึ้นเป็น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร จอกหูหนูมีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงเป็น $63.8 \pm 17.64\%$ และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าจอกหูหนูมีพื้นที่ผิวจำกัดต่อการดูดซับ

4. สรุปผลการทดลอง มวลแห้งของจอกหูหนูที่ได้มาจากการบดและอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีลักษณะพื้นที่ผิวค่อนข้างขรุขระ แต่ไม่พบส่วนที่เป็นรูพรุนอย่างเด่นชัด มีพื้นที่ผิวจำเพาะเทียบจากการดูดซับสตีเมทิลีนบลูเท่ากับ 292.10 ตารางเมตรต่อกรัมน้ำหนักแห้ง จอกหูหนูแห้งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำได้ โดยความสามารถในการดูดซับไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดของพืชที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับ ประสิทธิภาพในการดูดซับ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อใช้มวลแห้งของจอกหูหนูสามขนาดเป็นวัสดุดูดซับ ได้แก่ ขนาดเล็กกว่า 0.85 มิลลิเมตร ขนาดตั้งแต่ 0.85-1.77 มิลลิเมตร และขนาดใหญ่กว่า 1.77 มิลลิเมตร ในขณะที่ค่าพีเอชของสารละลาย ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณมวลแห้งของพืช และความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลด้วยจอกหูหนู ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่ามากกว่า 90% เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 7 ประสิทธิภาพในการดูดซับจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณมวลแห้งของจอกหูหนูมากขึ้น ปฏิบัติการในการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลา 180 นาที ในทางกลับกันพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล

กิตติกรรมประกาศ โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานดังกล่าวที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตลอด

โครงการวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณคุณรัตติญา ไชยสุนทรที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการเก็บรวบรวมจอกหูหนูเพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรชัย มัจฉาชีพ. วัชพืชในประเทศไทย. สำนักพิมพ์แพรวพิตยา, กรุงเทพฯ, 2538.
- [2] Aksu, Z., and Yener, J. "Investigation of the Biosorption of Phenol and Monochlorinated Phenols on the Dried Activated Sludge." *Process Biochemistry*, 1998, 33, 649-655.
- [3] Rao, J.R., and Viraraghavan, T. "Biosorption of Phenol from an Aqueous solution by *Aspergillus niger* biomass." *Bioresource Technology*, 2002, 85, 165-171.
- [4] กรมควบคุมมลพิษ. ฟีนอล. กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ, 2542.
- [5] Schneider, I.A.H., and Rubio, J. "Sorption of Heavy Metal Ions by the Nonliving Biomass of Freshwater Macrophytes." *Environmental Science and Technology*, 1999, 33, 2213-2217.
- [6] Riberio, T.H., Smith, R.W. and Rubio, J. "Sorption of Oils by the Non-living Biomass of *Salvinia sp.*" *Environmental Science and Technology*, 2000, 34, 5201-5205.
- [7] นิสกร แสงนิล. การหาพื้นที่ผิวจำเพาะและพฤติกรรมการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับบางชนิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2543.
- [8] American Health Public Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th edition. American Public Health Association, Washington, D.C., 1992.



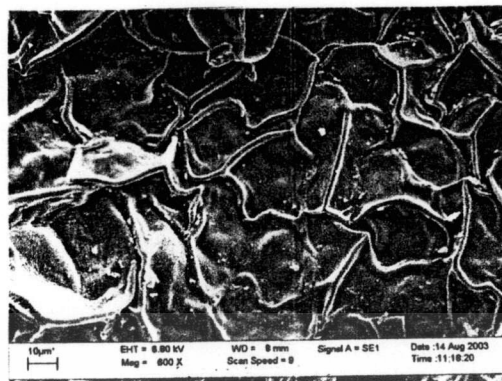
(ก)



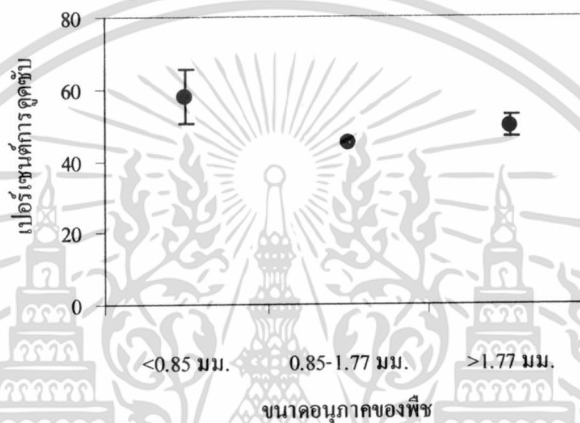
(ข)

รูปที่ 1 ลักษณะทั่วไปของจอกหูหนู (ก) ก่อนบดและอบแห้ง (ข) เมื่อผ่านการบดและอบแห้ง

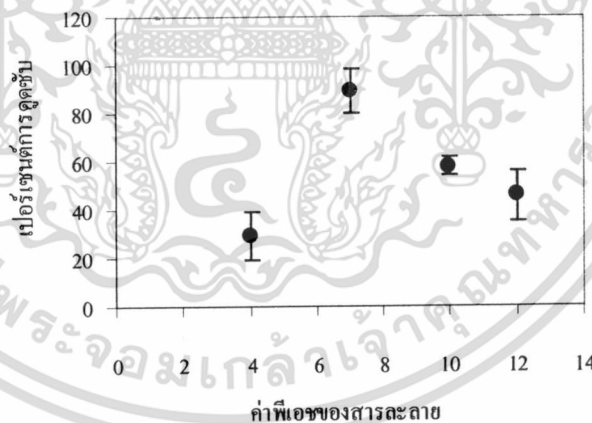
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของจอกหูหนูแห้ง ด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป ณ กำลังขยาย 600 เท่า

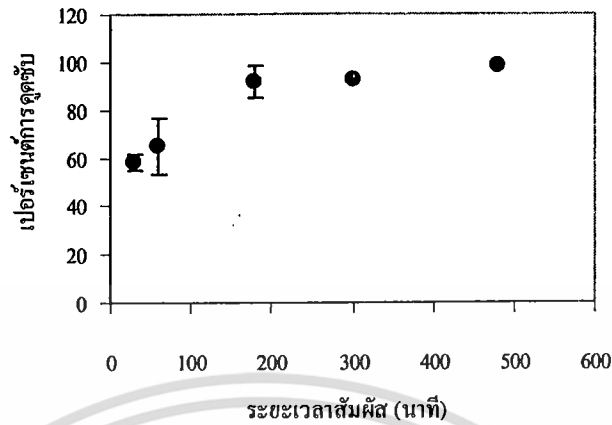


รูปที่ 3 อิทธิพลของขนาดอนุภาคของจอกหูหนูแห้งต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายฟีนอล

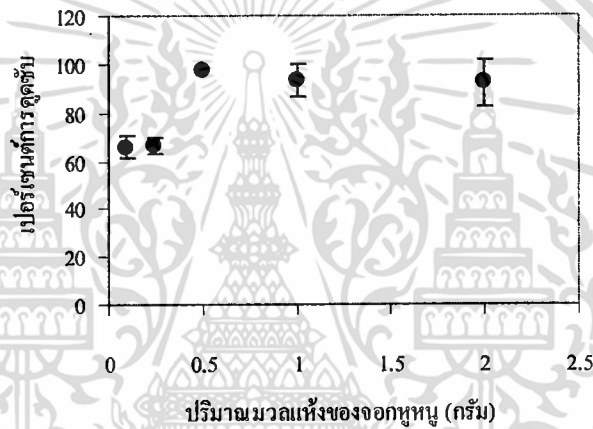


รูปที่ 4 อิทธิพลของค่าพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายฟีนอล

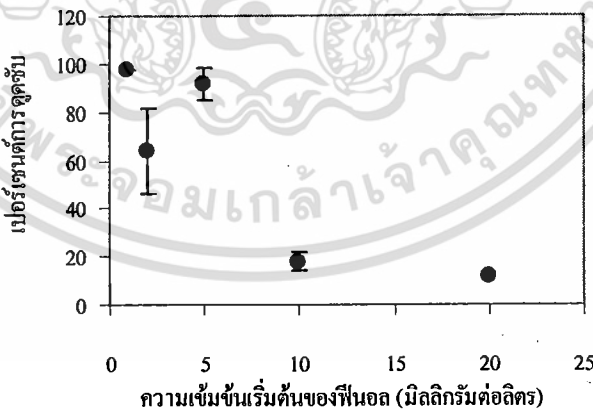
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสน้ำต่อประสิทธิภาพการงอกของสารละลายฟีนอล



รูปที่ 6 อิทธิพลของปริมาณของจอกหูหนูแห้งต่อประสิทธิภาพการงอกของสารละลายฟีนอล



รูปที่ 7 อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อประสิทธิภาพการงอกของจอกหูหนูแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้