การใช้ประโยชน์ของมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวา ในการดูดซับอนุพันธ์ฟีนอล

นางสาวมุกดา พัฒนวาณิชชัย

นางสาวสกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์

นางสาวสุกัญญา กำมะเลศ

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ประโยชน์ของมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวา ในการดูดซับอนุพันธ์ฟีนอล

นางสาวมุกดา พัฒนวาณิชชัย

นางสาวสกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์

นางสาวสุกัญญา กำมะเลศ

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Use of Dried Biomass of Floation Mass (*Salvinia* sp.) and Water Hyacinth (*Eichorina* sp.) in Adsorption of Phenol Derivatives

Miss Mukda Phatthanawanichchai

Miss Sakonwan Hanjitsuwan

Miss Sukanya Kammales

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of

Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง การใช้ประโยชน์ของมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาในการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอล

นักศึกษา นางสาวมุกดา พัฒนวาณิชชัย
นางสาวสกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์
นางสาวสุกัญญา กำมะเลศ

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อุสารัตน์ ภักดีสู่สุข

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์	.....
กรรมการ อ.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	.....
กรรมการ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน	.....
กรรมการ ดร.อุสารัตน์ ภักดีสู่สุข	.....

.....

(ผศ. ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง การใช้ประโยชน์ของมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาในการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอล

นักศึกษา นางสาวมุกดา พัฒนวาณิชชัย
นางสาวสกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์
นางสาวสุกัญญา กำมะเลศ

ภาควิชา เคมี **คณะ** วิทยาศาสตร์

สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อุสารัตน์ ภักดีสู่สุข

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวามาใช้เป็นตัวดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอล นอกจากนี้ยังทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟีนอล ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดของพืช ปริมาณมวลแห้งของพืช เวลาที่ใช้สัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล ค่าพีเอช และชนิดของอนุพันธ์ของฟีนอล ในกรณีของจอกหูหนู ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลคือ ปริมาณของพืช เวลาที่ใช้สัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล และค่าพีเอช ผลการศึกษาพบว่าจอกหูหนูมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้ 91.8(±6.73)% เมื่อใช้มวลแห้งของพืชในปริมาณ 0.5 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลที่พีเอช 7 มีค่าเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการเขย่าเป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของจอกหูหนูขึ้นอยู่กับชนิดของอนุพันธ์ของฟีนอลที่ใช้ โดยความสามารถในการดูดซับสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล > ฟีนอล > 4คลอ โรฟีนอล ในกรณีของผักตบชวา ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับคือ ปริมาณของพืช เวลาที่ใช้สัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอล จากการศึกษาพบว่าผักตบชวาสามารถดูดซับฟีนอลได้ 48.1(±7.04)% เมื่อใช้มวลแห้งของพืชปริมาณ 0.5 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการเขย่าเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง โดยที่ความสามารถในการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอลสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล > 4คลอ โรฟีนอล > ฟีนอล จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับพบว่าสมดุลการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวาสามารถอธิบายโดยไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช ไอโซเทอร์มการดูดซับของจอกหูหนูคือ $y = 1.5953x - 0.4154$ ($r^2 = 0.7804$) และไอโซเทอร์มของผักตบชวาคือ $y = 4.3598x - 2.3775$ ($r^2 = 0.6071$) จากการคำนวณสมการไอโซเทอร์มของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดซับสำหรับพืชทั้งสองชนิด ค่า K และ 1/n สำหรับจอกหูหนูมีค่าเท่ากับ 0.38 และเท่ากับ 1.5953 ตามลำดับ ในขณะที่ค่า K และ 1/n สำหรับผักตบชวามีค่าเท่ากับ 0.004 และเท่ากับ 4.3598 ตามลำดับ

คำสำคัญ : การดูดซับ, จอกหูหนู, ผักตบชวา, ฟีนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Use of Dried Biomass of Floation Mass (*Salvinia* sp.) and Water Hyacinth (*Eichorina* sp.) in Adsorption of Phenol Derivatives

Name Miss Mukda Phatthanawanichchai

Miss Sakonwan Hanjitsuwan

Miss Sukanya Kammales

Department Chemistry **Faculty of** Science

Program Environmental Resource Chemistry

Special Project Advisor Dr.Usarat Pakdeesusuk

ABSTRACT

This special project investigated the possibility in using dried floation mass and dried water hyacinth as an adsorbent of phenol derivatives. In addition, affecting phenol adsorption were studied. These factors were particle size, plant dosage, contact time, initial phenol concentration, pH, and types of phenol derivatives. In case of floation mass, factors that affect phenol adsorption were plant dosage, contact time, initial phenol concentration, and pH. Results showed that floation mass have phenol adsorption capacity of 91.8(±6.73)% when using 0.5 g dried plant, initial phenol concentration of 5 mg/l at pH 7, and at least 3 hours for contact time. Furthermore, adsorption efficiency of floation mass depends on type of 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 were plant dosage, contact time, initial phenol concentration and types of phenol derivatives. Phenol adsorption capacity of water hyacinth was 48.1(±7.04)% when using 0.5 g dried biomass, 5 mg/l initial phenol concentration and shaking for at least 1 hour. Adsorption capacity of phenol derivatives were as follows : 2,4-dichlorophenol > 4-chlorophenol > phenol. The study of adsorption isotherm found that adsorption equilibrium of floation mass and water hyacinth can be best fit with by Freundlish isotherm. Adsorption isotherm of floation mass was $y = 1.5953x - 0.4154$ ($r^2 = 0.7804$) and adsorption of water hyacinth was $y = 4.3598x - 2.3775$ ($r^2 = 0.7804$). By calculating adsorption isotherm equation for both plant, K and 1/n for floation mass were 0.38

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

and 1.5953, respectively, while K and 1/n for water hyacinth were 0.004 and 4.3598, respectively.

Keyword : adsorption, floation mass, water hyacinth, phenol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดี ผู้ทำโครงงานพิเศษขอขอบพระคุณดร.อุสารัตน์ ภักดีสู่สุขที่ปรึกษาโครงงานพิเศษที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ติดตามผลงานและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง รวมถึง ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อ.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และคณาจารย์ในภาควิชาเคมีทุกๆท่านที่ให้คำปรึกษาปัญหาต่างๆ อีกทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาเคมีที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกๆด้าน

ขอขอบพระคุณคุณรัตติญา ฮามิดีน และคุณพิศาล โรจน์รัตนาวิชัยที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการเก็บจอกหูหนูและผักตบชวาเพื่อนำมาใช้ในการทดลอง

และขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้อง เพื่อนๆเคมีทรัพยากรสิ่งแวดลอมปี 4 ทุกคนที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำโครงงานพิเศษนี้มาโดยตลอด

มุกดา พัฒนวาณิชชัย
สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์
สุกัญญา กำมะเลศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ฟีนอลและอนุพันธ์	3
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี	3
2.1.2 การกระจายตัวของฟีนอลและอนุพันธ์	4
2.1.3 ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ	6
2.1.4 กระบวนการบำบัดฟีนอล	6
2.2 พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา	7
2.2.1 ลักษณะทางกายภาพ	7
2.2.2 องค์ประกอบทางเคมี	9
2.3 กระบวนการดูดซับ	9
2.3.1 สารดูดติดผิว	10
2.3.2 ลักษณะการดูดซับ	10
2.3.3 แรงดึงดูดที่ใช้ในการดูดซับ	11
2.3.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	12
2.3.5 สมดุลของการดูดซับ	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	13
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	19
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	19
3.2 การเตรียมสารเคมี	20
3.3 วิธีการทดลอง	21
3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับจากจอกหูหนูและผักตบชวา	21
3.3.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของจอกหูหนูและผักตบชวา	21
3.3.3 การศึกษาหาพื้นที่ผิวของมวลแห้งของพืช	21
3.3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	22
3.3.5 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ	23
3.3.6 ศึกษาชนิดของฟีนอลและอนุพันธ์	23
3.3.7 วิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์	23
3.3.8 วิธีทดลองชุดควบคุม	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง	25
4.1 ธรรมชาติของจอกหูหนูและผักตบชวา	25
4.1.1 ลักษณะโครงสร้างของพืช	27
4.1.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของจอกหูหนูและผักตบชวา	28
4.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับแบบครั้ง	30
4.2.1 ขนาดของพืช	30
4.2.2 ปริมาณของพืช	31
4.2.3 เวลาที่ใช้สัมผัส	33
4.2.4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล	34
4.2.5 ค่าพีเอชของสารละลาย	36
4.2.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	37
4.2.7 ชนิดของฟีนอลและอนุพันธ์	39
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	41
5.1 สรุปผลการทดลอง	41

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	42
บรรณานุกรม	43
ภาคผนวก ก. การเตรียมกราฟมาตรฐาน	45
ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการทดลอง	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุพันธ์ฟีนอล 3

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายเมธิลีนบลูของจอกหูหนู 46

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายเมธิลีนบลูของผักตบชวา 46

ตารางที่ ข.3 ประสิทธิภาพการดูดซับกับขนาดของจอกหูหนู 47

ตารางที่ ข.4 ประสิทธิภาพการดูดซับกับขนาดของผักตบชวา 47

ตารางที่ ข.5 ประสิทธิภาพการดูดซับกับปริมาณของจอกหูหนู 47

ตารางที่ ข.6 ประสิทธิภาพการดูดซับกับปริมาณของผักตบชวา 48

ตารางที่ ข.7 ประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูกับเวลาที่ใช้สัมผัส 48

ตารางที่ ข.8 ประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวากับเวลาที่ใช้สัมผัส 49

ตารางที่ ข.9 ประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูกับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 49

ตารางที่ ข.10 ประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวากับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 50

ตารางที่ ข.11 ประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูกับค่าพีเอชของสารละลาย 50

ตารางที่ ข.12 ประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวากับค่าพีเอชของสารละลาย 51

ตารางที่ ข.13 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายฟีนอลของจอกหูหนู 51

ตารางที่ ข.14 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายฟีนอลของผักตบชวา 51

ตารางที่ ข.15 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย 4-คลอโรฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวา 52

ตารางที่ ข.16 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย 2,4-คลอโรฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวา 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	การกระจายตัวของฟีนอล	5
รูปที่ 2.2	การกระจายตัวของ 4- คลอโรฟีนอล	5
รูปที่ 2.3	การกระจายตัวของ 2,4- ไดคลอโรฟีนอล	6
รูปที่ 2.4	ลักษณะของจอกหูหนู	8
รูปที่ 2.5	ลักษณะของผักตบชวา	8
รูปที่ 2.6	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์	14
รูปที่ 2.7	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช	16
รูปที่ 4.1	ลักษณะทั่วไปของพืชที่ใช้ในการทดลอง โดยที่ (ก) จอกหูหนู และ (ข) ผักตบชวา	26
รูปที่ 4.2	พืชที่ผ่านการอบแห้งและบดที่อุณหภูมิ 70°C โดยที่ (ก) จอกหูหนู และ (ข) ผักตบชวาแล้วก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	26
รูปที่ 4.3	ลักษณะทางกายภาพของพืชและถ่านกัมมันต์ โดย Scanning Electron Microscope ที่ กำลังขยาย 600 เท่า (ก) จอกหูหนู (ข) ผักตบชวา และ (ค) ถ่านกัมมันต์	27
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ methylene blue ที่เหลือในสารละลาย กับปริมาณ methylene blue ที่ถูกดูดซับโดยจอกหูหนูที่สภาวะสมดุล	28
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ methylene blue ที่เหลือในสารละลาย กับปริมาณ methylene blue ที่ถูกดูดซับโดยผักตบชวาที่สภาวะสมดุล	29
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย(%) กับขนาดของพืช (mm) โดยที่ ○ จอกหูหนูและ ● ผักตบชวา	30
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย (%) กับ ปริมาณของจอกหูหนู (g)	31
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย (%) กับ ปริมาณของผักตบชวา (g)	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูโดยเฉลี่ย (%) กับเวลาที่ใช้สัมผัส (min) 33

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวาโดยเฉลี่ย (%) กับเวลาที่ใช้สัมผัส (min) 34

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูโดยเฉลี่ย (%) กับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (mg/l) 35

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวาโดยเฉลี่ย (%) กับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (mg/l) 35

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูโดยเฉลี่ย (%) กับค่าพีเอชของสารละลาย 36

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวาโดยเฉลี่ย (%) กับค่าพีเอชของสารละลาย 37

รูปที่ 4.15 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูแบบฟรุนดลิช 38

รูปที่ 4.16 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลของผักตบชวาแบบฟรุนดลิช 38

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย (%) กับอนุพันธ์ของฟีนอลโดยที่ □ จอกหูหนูและ ■ ผักตบชวา 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ

ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอลเป็นสารที่พบในน้ำเสียซึ่งต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำทั่วไป เนื่องจากการปนเปื้อนในน้ำเพียง 1 ไมโครกรัมต่อลิตรสามารถก่อให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นได้ (Rao และ Viraraghavan, 2002) ฟีนอลที่พบในธรรมชาติในระดับไมโครกรัมต่อลิตรก็มีโอกาสที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำ แหล่งกำเนิดที่สำคัญของสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอลมาจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ การผลิตสี ตัวทำละลาย การผลิตยา และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (Aksu และ Yener, 1998) โดยทั่วไปแล้ววิธีที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอลมีหลายวิธีคือ การบำบัดทางชีวภาพ การสกัดด้วยตัวทำละลาย และการดูดซับ วิธีการที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันได้แก่ การดูดซับ ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารเคมีค่อนข้างสูง ข้อจำกัดที่สำคัญของถ่านกัมมันต์คือ มีราคาแพง และการนำกลับมาใช้ใหม่ก็มีค่าใช้จ่ายสูงในการรีเจนเนอเรชั่นพื้นที่ผิวดูดซับเพื่อรักษาประสิทธิภาพการดูดซับ การศึกษาหาตัวดูดซับประเภทอื่นที่มีราคาถูกกว่า หาได้ง่ายและมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม

จอกหูหนู (*Salvinia* sp.) และผักตบชวา (*Eichornia* sp.) เป็นวัชพืชลอยน้ำที่พบได้ทั่วไป มีการเจริญเติบโตและแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็ว เป็นเหตุให้ปริมาณแสงที่ส่องผ่านลงไปในน้ำลดลงส่งผลให้เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำ จึงจำเป็นต้องกำจัดจอกหูหนูและผักตบชวาโดยการตัดหรือการลอกออกจากผิวหน้าน้ำ ทำให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งที่จะต้องหาวิธีกำจัดหรือนำมาใช้ประโยชน์ จึงเกิดแนวทางในการนำเอาวัชพืชโดยเฉพาะผักตบชวาไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ แต่โดยส่วนใหญ่เป็นงานด้านหัตถกรรม สำหรับในทางสิ่งแวดล้อมพบว่าทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์ให้กับวัชพืชทั้งสองคือ การนำจอกหูหนูและผักตบชวานั้นมาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวามาใช้เป็นตัวดูดซับสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำ เช่น โลหะหนัก สีย้อม และน้ำมัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับดี (Schneider และ Rubio, 1999; Low *et al.*, 1995; Ribeiro *et al.*, 2000)

งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้มวลแห้งของพืชทั้งสองในการดูดซับสารเคมีที่ละลายน้ำ ดังนั้นโครงงานพิเศษนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวามาใช้ดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอลเพื่อเป็นการนำวัชพืชมาใช้ประโยชน์ในงานด้านสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวามาใช้ในการดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์

2. เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและประสิทธิภาพในการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอลด้วยจอกหูหนูและผักตบชวา โดยใช้วิธีการดูดซับแบบครั้ง (batch)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพ ความเป็นรูพรุน และพื้นที่ผิวของจอกหูหนูและผักตบชวา

2. ศึกษาหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวา โดยใช้วิธีการดูดซับแบบครั้ง ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดของพืช ปริมาณของพืช ระยะเวลาที่ใช้สัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ค่าพีเอชของสารละลาย ชนิดของฟีนอลและอนุพันธ์

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำเอาวัชพืชลอยน้ำ เช่น จอกหูหนู, ผักตบชวามาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ

2. ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอล โดยใช้มวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวา และนำปัจจัยที่มีอิทธิพลนี้ไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมได้

3. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้วัสดุธรรมชาติที่มีราคาถูก

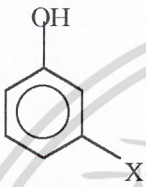
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟีนอลและอนุพันธ์

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

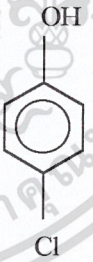
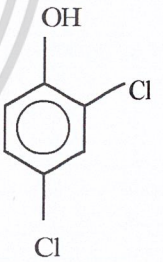
มีสูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไปคือ



เมื่อ X แสดงหมู่แทนที่ เช่น –H, -Cl, $-NO_2$

ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอล 3 ชนิด คือ ฟีนอล, 4-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุพันธ์ฟีนอลทั้ง 3 ชนิด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุพันธ์ฟีนอล (http://www.merk.go.th)

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ฟีนอล	4-คลอโรฟีนอล 	2,4-ไดคลอโรฟีนอล 
สูตรเคมี	C_6H_6O	C_6H_5ClO	$C_6H_4Cl_2O$
น้ำหนักโมเลกุล	94	128.5	163
จุดเดือด ($^{\circ}C$)	182	216-218	209-211
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	40	41-44	40-43
ความดันไอ (hPa)	0.2 (ที่ 20$^{\circ}C$)	0.15 (ที่ 20$^{\circ}C$)	1.3 (ที่ 50$^{\circ}C$)
ความสามารถในการละลายน้ำ	84 g/l (ที่ 20$^{\circ}C$)	27 g/l (ที่ 20$^{\circ}C$)	4.5 g/l (ที่ 20$^{\circ}C$)
ค่าการแตกตัวของกรดอ่อน (pK_a)	9.96	9.2	7.69
ค่าคงที่ของเฮนรี (K_H : $atm.m^3/mol$)	3.97×10^{-7}	3.91×10^{-4}	3.16×10^{-6}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การกระจายตัวของฟีนอลและอนุพันธ์ (คณิตา, 2542)

ฟีนอลที่พบในสิ่งแวดล้อมไม่ได้มีเพียงสปีชีส์เดียว โดยจะพบอยู่ในรูปสปีชีส์ใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลายดังปฏิกิริยาที่ 2.1

(2.1)

ในกรณีที่น้ำมีค่า pH มากกว่า pK_a ของฟีนอล ภายใต้สภาวะดังกล่าวสมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางขวาเนื่องจากมี H_3O^+ น้อย ทำให้ฟีนอลอยู่ในรูปฟีนอเลต ($C_6H_5O^-$) เป็นส่วนใหญ่ ในทางตรงกันข้ามพบว่าถ้าน้ำมีค่า pH น้อยกว่า pK_a ฟีนอล สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางซ้ายเนื่องจากมี H_3O^+ มากทำให้ฟีนอลจะอยู่ในรูปฟีนอล (C_6H_5OH)

องศาการแตกตัวของกรดอ่อน (Degree of dissociation of weak acids, α) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงสัดส่วนการกระจายตัวของสปีชีส์ของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะต่างๆ และสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ 2.1

$$\alpha = \frac{\text{ความเข้มข้นของอนุมูลกรดที่แตกตัวออกมา}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \qquad (2.1)$$

α_0 = ใช้สำหรับอนุมูลที่ไม่มีการเสีย H^+

α_1 = ใช้สำหรับอนุมูลที่มีการเสีย H^+

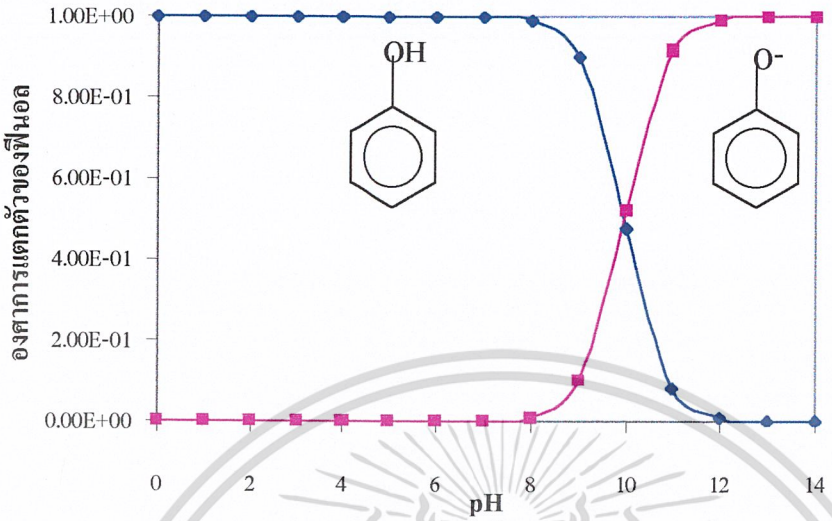
ในกรณีที่สารอินทรีย์เป็นกรดโมโนโปรติก ค่า α_0 และ α_1 สามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่า K_a ของสารและค่า pH ของสารละลาย โดยใช้สมการ 2.2-2.3

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

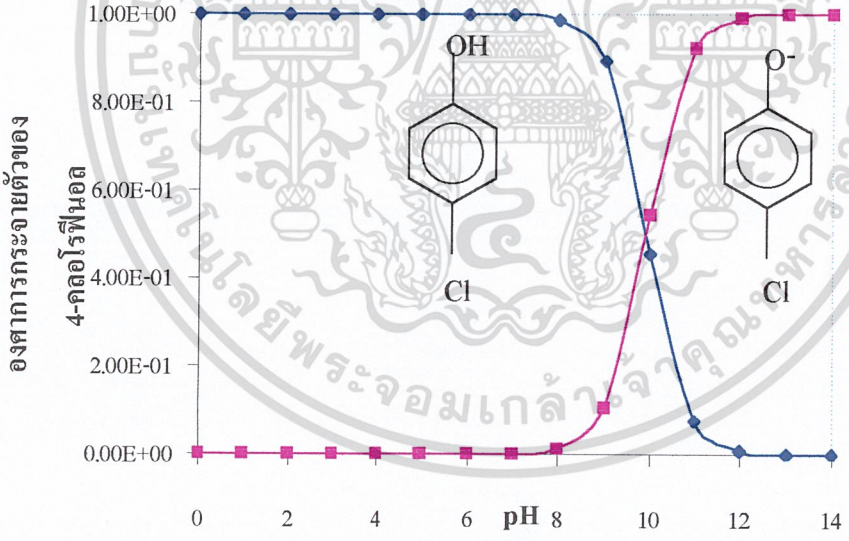
$$\alpha_1 = \frac{K_a}{[H^+] + K_a} \qquad (2.3)$$

องศาการแตกตัวของกรดอ่อนสำหรับฟีนอล, 4-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของฟีนอลทั้ง 3 ชนิดที่ทำการศึกษาในโครงงานพิเศษนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 -2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

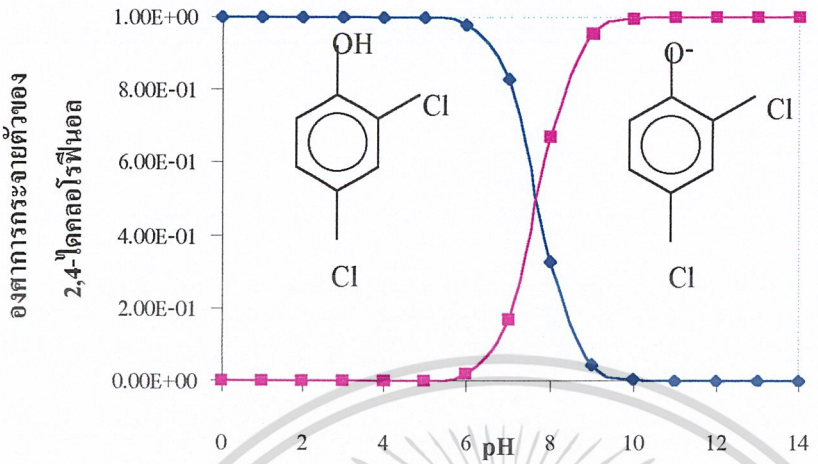


รูปที่ 2.1 การกระจายตัวของฟีนอล



รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของ 4-คลอโรฟีนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การกระจายตัวของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล

2.1.3 ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2535)

ฟีนอลมีพิษเฉียบพลันปานกลางในสัตว์น้ำชนิดต่างๆ LC_{50} ของฟีนอลในปลาชนิดต่างๆมีค่า 5.2-49.86 มิลลิกรัมต่อลิตร มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อคุ้มครองทรัพยากรสัตว์น้ำกำหนดให้ปริมาณฟีนอลในแหล่งน้ำธรรมชาติมีค่าไม่เกิน 2,560 ไมโครกรัมต่อลิตร (fresh chronic criteria) โดยเฉลี่ยในระยะเวลา 24 ชั่วโมง และไม่ควรมีความเข้มข้นเกิน 10,200 ไมโครกรัมต่อลิตร (fresh acute criteria) ไม่ว่าเวลาใดก็ตาม

ค่า LC_{50} ทางปากในหนูของ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล และ 4-คลอโรฟีนอลมีค่า 580 และ 261 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ

2.1.4 กระบวนการบำบัดฟีนอล

วิธีการบำบัดฟีนอลในน้ำทิ้งนั้นมีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่

1. การบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนในน้ำเสีย วิธีการนี้จะใช้สำหรับน้ำเสียที่มีส่วนประกอบอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้คือ ค่าพีเอชสูงหรือต่ำเกินไป มีสารพิษ มีโลหะหนัก มีของแข็งแขวนลอยที่ตกตะกอนยาก มีไขมันและน้ำมันที่ละลายน้ำ มีไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสที่สูงเกินไป และมีเชื้อโรค ทั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมีได้แก่ ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า ถังตกตะกอน ถังกรอง และถังเชื้อโรค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพหรือใช้จุลินทรีย์ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียโดยเฉพาะสารคาร์บอนอินทรีย์-ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส โดยความสกปรกเหล่านี้จะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อเพื่อการเจริญเติบโต ทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกลดลง โดยจุลินทรีย์เหล่านี้อาจเป็นแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Organisms) หรือไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Organisms) ก็ได้ ระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยหลักการทางชีวภาพ ได้แก่ ระบบแอกติเวทเตดสลัดจ์ (Activate Sludge, AS) ระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor, RBC) ระบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch, OD) ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon, AL) ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) ระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย (Stabilization Pond) ระบบยูเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) และระบบกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter, AF) เป็นต้น

ในที่นี่จะขอกล่าวถึงเฉพาะวิธีการดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่จะทำการศึกษาในโครงงานพิเศษนี้และจัดเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

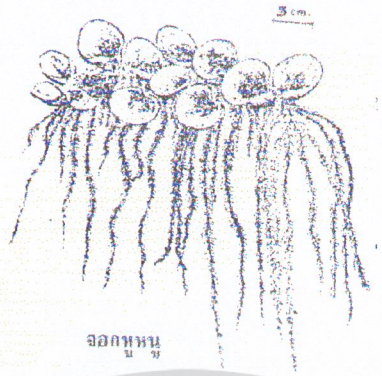
2.2 พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา

2.2.1 ลักษณะทางกายภาพ (สุรชัย, 2538)

จอกหูหนู (Floation mass) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Salvinia cucullata* Roxb. จัดอยู่ในวงศ์ Salviniaceae ลักษณะทั่วไปจัดเป็นเฟิร์นชนิดหนึ่งจะมีขนขึ้นปกคลุมทั่วลำต้น ส่วนของลำต้นจะเจริญอยู่ใต้ผิวน้ำทอดขนานไปกับผิวน้ำ มีรากแตกจากลำต้นและมีรากขนแตกออกจำนวนมาก ใบจะแตกออกตามข้อของลำต้น ใบคู่หนึ่งเจริญอยู่เหนือผิวน้ำมีรูปร่างกลม ใบม้วนเข้าคล้ายหูหนูเบียดกันแน่น ขอบใบเรียบไม่เปียกน้ำ ที่เหลือมีลักษณะคล้ายรากฝอย (root-like leaf) เจริญอยู่ใต้น้ำ ขณะเป็นต้นอ่อนใบจะแบนคลายแหนมีขนและหยักเป็นคลื่น

ส่วนสืบพันธุ์คือ สปอร์ จะสร้างสปอร์เป็นก้อนแข็งๆ (sporocarp) อยู่ที่ใบที่เจริญอยู่ใต้ผิวหน้า พบตามคลองระบายน้ำ หนองน้ำ บ่อน้ำ บริเวณที่มีน้ำขัง ขยายพันธุ์ได้รวดเร็วโดยใช้ส่วนของลำต้นและสปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ลักษณะของจอกหูหนู (สุรชัย, 2538)

ผักตบชวา (Water hyacinth) มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Eichornia crassipes (Mart.)* Solms จัดอยู่ในวงศ์ Pontederiaceae ลักษณะทั่วไปเป็นวัชพืชน้ำที่มีอายุยืนหลายปี สูงประมาณ 30-90 เซนติเมตร มีลำต้นสั้น รากแตกออกจากลำต้นบริเวณข้อรากมักมีสีม่วงดำ เกิดจากสารแอนโทไซยานิน (anthocyanin) ลำต้นแตกไหลเกิดเป็นลำต้นใหม่ติดต่อกันไป

ใบออกเป็นกลุ่มรอบลำต้น (rosettes) ใบกว้างใหญ่มีรูปร่างค่อนข้างกลม ส่วนฐานใบเว้าเข้าหาก้านใบ มีหูใบ ปลายใบมน ขนาดของใบและความยาวของก้านใบขึ้นกับสภาพความอุดมสมบูรณ์ในบริเวณที่เจริญ

ดอกออกเป็นช่อชนิดช่อดอก ออกดอกได้ตลอดปี ในช่อหนึ่งมีดอก 6-30 ดอก ก้านช่อดอกยาวประมาณ 15-30 เซนติเมตร กลีบเลี้ยงและกลีบดอกหลอมรวมกัน (perianth) มีสีม่วง มีจุดสีเหลืองตรงกลาง ส่วนฐานกลีบดอกหลอมรวมกันเป็นรูปกรวย ส่วนปลายแยกเป็น 6 กลีบ มีเกสรตัวผู้ 6 อัน เกสรตัวเมียเป็นเส้นบางๆที่ส่วนปลายเป็นตุ้มสีขาว พบขึ้นตามคลอง หนองน้ำ ขยายพันธุ์โดยอาศัยเมล็ดและส่วนของลำต้น

ประโยชน์ : ใช้เป็นอาหารสัตว์ ใช้ทำปุ๋ยหมัก ก้านและใบอ่อนนำมารับประทานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 ลักษณะของผักตบชวา (สุรชัย, 2538)

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมี (จตุพรและคณะ, 2545)

วัสดุพืชในธรรมชาติจะประกอบด้วยสารเคมีอินทรีย์ และสารเคมีอนินทรีย์อยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ลิกนิน สารที่มีองค์ประกอบของอีเทอร์ กรดอะลิฟาติก-ฟอสเฟต ซิลิเกต คาร์บอเนต ไนเตรต และแมกนีเซียม เป็นต้น จากองค์ประกอบของพืชดังที่กล่าวมาส่วนใหญ่เป็นสารเคมีอินทรีย์ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ลิกนิน และคาร์โบไฮเดรต สำหรับคาร์โบไฮเดรตถ้าแยกตามปริมาณที่เป็นองค์ประกอบในพืชจะพบว่าที่สำคัญได้แก่ เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของพืชที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ มีประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบของพืชทั้งหมด โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับผนังเซลล์ของพืช คุณสมบัติของเซลลูโลส คือ จะไม่เกิดการละลายน้ำ ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์หรือในสารละลายด่างอ่อน แต่สามารถที่จะละลายได้ดีในกรดหรือด่างแก่

เฮมิเซลลูโลสจัดเป็นสารพอลิแซคคาไรด์ที่มีมากรองลงมาจากเซลลูโลส จะมีลักษณะเป็น Heterogenous ที่ประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์หลายชนิดมารวมกันเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) โครงสร้างจะเป็นลักษณะของกิ่งก้านสาขาแตกต่างไปจากเซลลูโลสและน้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะต่ำกว่าเซลลูโลส

ลิกนินจัดอยู่ในพวก Heterogeneous organic polymer จะอยู่ภายในโครงสร้างของพืช โดยอยู่ในบริเวณรอบเซลลูโลสและป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยสลาย จากการค้นคว้าที่ผ่านมายังไม่พบโครงสร้างที่แน่นอนของลิกนิน ทราบเพียงแต่ว่าลิกนินเป็นพอลิเมอร์ของสารประกอบอะโรมาติกที่ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยของโครงสร้าง Phenylpropane ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดคือ

1. Coniferyl alcohol (R_1=H, R_2=OCH_3)
2. Sinapyl alcohol (R_1=R_2=-OCH_3)
3. P-coumary alcohol (R_1=R_2=H)

2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) (ชีวรัตน์และคณะ, 2544)

เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในด้านการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดสารปนเปื้อนขนาดเล็กได้จนถึงขั้นโมเลกุล ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีการตกตะกอนหรือกรองแบบธรรมดา ทำโดยอาศัยความสามารถเฉพาะตัวของสารในการดึงโมเลกุลของสารปนเปื้อนให้มาเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เรียกปรากฏการณ์ที่สารปนเปื้อนมาเกาะที่ผิวนี้ว่า กระบวนการดูดซับ (Adsorption) พื้นที่ผิวที่ทำหน้าที่ดูดซับสารปนเปื้อนเรียกว่า ตัวดูดซับหรือสารดูดติดผิว (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลที่มาเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ปรากฏการณ์ดูดซับนี้เกิดขึ้นระหว่างสองพื้นผิว โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจาก Landfill เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

2.3.1 สารดูดติดผิว

สารดูดติดผิว (Adsorbent) ที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆมาติดผิวได้มีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ, แมกนีเซียมออกไซด์, ถ่านกระดูก (Bond Char), แอคทิเวทเตดซิลิกา (Activated Silica) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม อย่างไรก็ตามข้อเสียคือ สามารถจับโมเลกุลได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดติดผิวจำเพาะมีข้อจำกัดมาก

2. ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) สารดูดติดผิวชนิดนี้อาจจัดว่าเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ แต่เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้นเพื่อให้มีความพรุนมากและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 450-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 10-10,000 อังสตรอม

3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม (ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับแอคทิเวทเตดคาร์บอน) แต่อย่างไรก็ตามเรซินมีข้อที่ได้เปรียบกว่า คือ สามารถนำกลับมาให้ใหม่ได้ง่ายกว่ามากและรีเจนเนอเรนท์มักเป็นสารที่มีราคาถูก เช่น เกลือแกง

2.3.2 ลักษณะการดูดซับ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับยึดติดกับผิวตัวดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาล์ล (Van der waal) ซึ่งจะมีความแข็งแรงมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ดังนั้นโมเลกุลของสารจะยึดติดแน่นบนพื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูงของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ แต่เมื่อลด

เอกสารนี้ [illegible] ไม่ว่ากรณีใดๆ [illegible] ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิของระบบจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เกิดการผันกลับทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนออกจากตัวดูดซับนั้น และเรียกปรากฏการณ์ช่วงนี้ว่า Desorption

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or chemisorption) เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพทุกประการ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับยึดติดอยู่กับผิวของตัวดูดซับด้วยพันธะเคมีที่แข็งแรง ทำให้ปริมาณพื้นที่ที่ใช้ในการดูดซับบนตัวดูดซับลดลง และเนื่องจากการดูดซับเกิดเฉพาะบนพื้นที่ผิวบางแห่ง ทำให้องค์ประกอบที่ถูกดูดซับไว้ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับมีปริมาณน้อยกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับแบบนี้จะไม่สามารถเกิด desorption ได้ เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible) ปรากฏการณ์นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าองค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้

2.3.3 แรงดึงดูดที่ใช้ในการดูดซับ มี 2 ประเภทคือ

แรงดึงดูดที่ใช้ในการดูดซับโมเลกุลของสารที่สนใจ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. แรงดึงดูดทางกายภาพ (Physical Force) ประกอบด้วย

1.1 แรงแวนเดอร์วาลล์ (Van der waal's Force)

อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้วสามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณที่อยู่ภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้นและสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับ (desorption) จะเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

1.2 แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force)

เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เกิดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

ข. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากการกระจาย (dispersion effect) ซึ่งเห็นได้จากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ซึ่งแรงนี้มักจะเป็นแรงอ่อนๆ เช่น แรงดึงดูดระหว่างสารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

2. แรงดึงดูดทางเคมี (Chemical Force)

เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับตัวดูดซับ แล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อนใหม่ขึ้น เช่น การดูดซับระหว่างหมู่โลหะทรานซิชันกับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพันธะเคมีหรือแรงเคมีที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือเกิดจากการให้อิเล็กตรอนหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกัน จึงมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับซึ่งแรงนี้จะมีค่ามากกว่าแรงทางกายภาพ และจากแรงทางเคมีนี้จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้

2.3.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1. สมบัติของตัวดูดซับ

ก. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับสาร พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุน หากตัวดูดซับมีความเป็นรูพรุนมากทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย

2. สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ

ก. ความสามารถในการละลาย สารที่มีความสามารถในการละลายได้สูงจะถูกดูดซับได้น้อย ฉะนั้นก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายก่อน

ข. น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล ถ้าน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

3. เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสียระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องมีความเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับด้วย

4. ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนและไฮดรอก-ไซด์ไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. อุณหภูมิ (Temperature)

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

2.3.5 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

เมื่อพิจารณาจากการดูดซับตัวถูกละลายโดยใช้สารดูดซับ สมดุลการดูดซับจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับและปริมาณตัวถูกละลายที่หลุดออกจากพื้นผิวของสารดูดซับมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นอัตราการดูดซับและอัตราการหลุดออกจากพื้นผิวเข้าสู่สภาวะสมดุล (Equilibrium state) ซึ่งที่จุดนี้เรียกว่า จุดสมดุลการดูดซับ โดยที่จุดสมดุลการดูดซับจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของสารดูดซับ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด โดยทั่วไปปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณตัวถูกละลายต่อน้ำหนักของสารดูดซับซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุล ในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption isotherm)

2.3.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับสามารถอธิบายได้หลายรูปแบบ ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ 2 รูปแบบคือ

1. ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

Langmuir isotherm เป็นพื้นฐานไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบอื่นๆ ไอโซเทอร์มแบบนี้ใช้อธิบายสมดุลการดูดซับภายใต้สมมติฐานว่า

(1) การดูดซับสูงสุดสัมพันธ์กับโมเลกุลตัวถูกละลายที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

(2) พื้นที่ของการดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน

(3) พลังงานของการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

(4) ไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับในแนวระนาบบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

Langmuir isotherm สามารถเขียนอธิบายได้ด้วยสมการ 2.4

$$Q = \frac{Q_m K C_e}{1 + K C_e} \qquad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Q = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g) = X/M

X = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (mg)

M = ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (g)

Q_m = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับมากที่สุดต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นที่ผิวดูดซับ (mg/g)

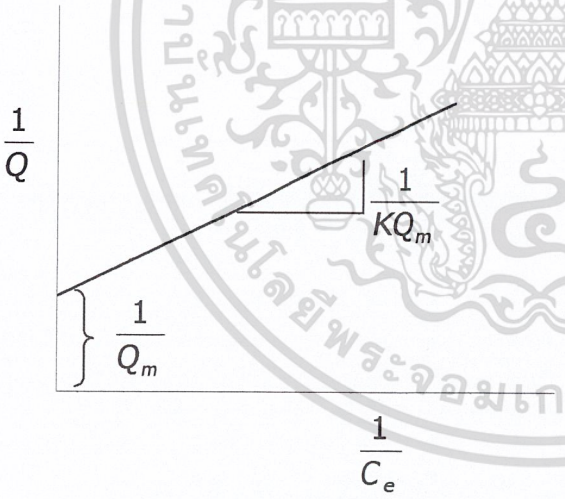
C_e = ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/l , M)

K = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

จัดเป็นสมการเส้นตรงจะได้ดังสมการ 2.5

$$\frac{1}{Q}=\frac{1}{Q_m}+\frac{1}{KQ_mC_e} \qquad (2.5)$$

ถ้าพลอตกราฟระหว่าง 1/Q กับ $1/C_e$ ได้สมการเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/KQ_m$ และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ $1/Q_m$ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ต่อพงศ์, 2544)

2. ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

Freundlich isotherm นี้ใช้อธิบายการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้นด้วยพันธะอ่อนๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ 2.6

$$Q = \frac{X}{M} = KC_e^{1/n} \qquad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Q = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (mg/g)

X = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (mg)

M = ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (g)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/l, M)

K = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

1/n = ค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration Dependence)

สมการ Freundlich เมื่อเขียนกราฟค่า X/M และ C_e จากการทดลองลงบนกราฟ Log-Log จะได้ดังสมการ 2.7

$$\log \frac{X}{M} = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \qquad (2.7)$$

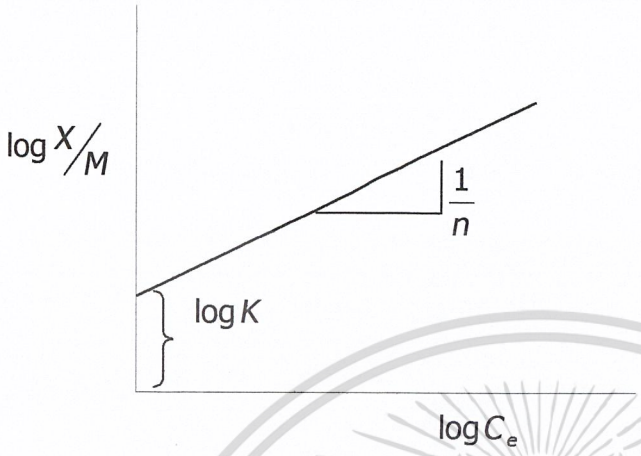
สามารถหาค่า K และ 1/n ได้ โดยที่

1/n = ความชันของกราฟ

log K = จุดตัดแกน y

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log (X/M) กับ log C_e จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ 1/n และจุดตัดแกน y เท่ากับ log K ดังรูปที่ 2.7 ค่า K ที่ได้แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ และค่า 1/n แสดงถึงการดูดซับที่สัมพันธ์กับพื้นผิวตัวดูดซับ โดยค่า 1/n มากกว่า 1 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวของการดูดซับทำให้ปริมาณสารถูกดูดซับได้มากขึ้น ในขณะที่ค่า 1/n น้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นถึงปริมาณพื้นที่ในการดูดซับบนตัวดูดซับมีปริมาณที่จำกัด ซึ่งหากค่า K และ 1/n มีค่าต่ำความสามารถในการดูดซับจะมีค่าต่ำในทุกค่าความเข้มข้น แต่ถ้า 1/n สูงแสดงว่าความสามารถในการดูดซับนี้จะขึ้นกับความเข้มข้น เช่น หากความเข้มข้นต่ำความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว และในทางตรงข้ามเมื่อความเข้มข้นสูงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (ต่อพงศ์, 2544)

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Aksu และ Yener (1998) ได้ศึกษาการใช้มวลแห้งของตะกอนเร่งมาใช้ในการดูดซับ phenol, *o*-chlorophenol และ *p*-chlorophenol โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ค่า pH เริ่มต้น, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารประกอบฟีนอลและหมู่แทนที่ ค่าสามารถในการดูดซับของฟีนอลได้ 86.1 มิลลิกรัมต่อกรัม, *o*-chlorophenol ได้ 102.4 มิลลิกรัมต่อกรัม, *p*-chlorophenol ได้ 116.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับอยู่ในช่วง 1-3 และจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลเริ่มต้นก็ทำให้ค่าความจุในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ผลการศึกษาอิทธิพลของหมู่แทนที่พบว่า phenol, *o*-chlorophenol และ *p*-chlorophenol มีค่าความจุในการดูดซับ 90%, 50% และ 59% ตามลำดับ

Calace *et al.* (2002) ศึกษาถึงการใช้ตะกอนกระดาษ (paper mill sludge) มาใช้ในการดูดซับ โดยสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอลที่ทำการศึกษาคือ ฟีนอล, 2-คลอโรฟีนอล, 3-คลอโรฟีนอล, 4-คลอโรฟีนอล, 2-ไนโตรฟีนอล, 4-ไนโตรฟีนอล, 2,4-ไดคลอโรฟีนอล, 3,4-ไดคลอโรฟีนอล, 3,5-ไดคลอโรฟีนอล และ 2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอล พบว่าลำดับความสามารถในการดูดซับคือ 2-ไนโตรฟีนอล = 4-ไนโตรฟีนอล < 2-คลอโรฟีนอล < ฟีนอล < 4-คลอโรฟีนอล < 3-คลอโรฟีนอล < 2,4-ไดคลอโรฟีนอล < 3,4-ไดคลอโรฟีนอล = 2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอล < 3,5-ไดคลอโรฟีนอล ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยสมมติฐานของ Hill ซึ่งสมมติฐานให้พื้นผิวตัวดูดซับเป็น homogenous แสดงให้เห็นว่าตะกอนกระดาษสามารถนำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในกลุ่มฟีนอลที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Schneider และ Rubio (1999) พบว่ามวลแห้งของจอกหูหนู (*Salvinia* sp.) และราก ผักตบชวา (*Eichornia* sp.) มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก Cr^{3+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Cd^{2+}, Pb^{2+} แตกต่างกัน โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ 0.9 มิลลิอิควาเลนซ์ต่อกรัม, 0.7 มิลลิอิควาเลนซ์ต่อกรัม สำหรับจอกหูหนูและผักตบชวาตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Low *et al.* (1994) ได้ศึกษาถึงการใช้มวลแห้งของรากผักตบชวามาใช้ในการดูดซับคอปเปอร์ (Cu^{2+}) และพบว่ารากของผักตบชวามีความสามารถดูดซับได้ 20.9 มิลลิกรัมคอปเปอร์ต่อลิตร

Low *et al.* (1995) ได้ศึกษาถึงการใช้มวลแห้งของผักตบชวาเป็นตัวดูดซับสีย้อมประเภทเบสิก 2 ชนิด คือ Methylene blue และ Victoria blue พบว่ารากผักตบชวาสามารถดูดซับสีย้อมได้ 128.9 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 145.4 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5-12 ซึ่งที่ค่า pH เป็น 9.62 สามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุดถึง 97.09% ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ 0.5 กรัม สามารถดูดซับได้ 98% และระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลคือ 1 ชั่วโมง จากการศึกษาการดูดซับสีย้อม methylene blue ด้วยตัวดูดซับต่างชนิดกันคือ แอกติเวทเตดคาร์บอน, มอส, รากผักตบชวา และเปลือกกล้วยสามารถดูดซับสีย้อมได้ 99.9%, 97.7% และ 92.2% ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ารากผักตบชวาสามารถนำมาใช้ดูดซับสีย้อมประเภทเบสิกได้ดี

Rao และ Viraraghan (2002) ศึกษาถึงการใช้มวลแห้งของ *Aspergillus niger* มาใช้ในการดูดซับฟีนอล พบว่าการใช้มวลแห้งของ *Aspergillus niger* ด้วยกรดซัลฟูริกที่ค่า pH 5.1 จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด การทดลองแบบคอลัมน์สามารถกำจัดฟีนอลได้ประมาณ 66% ที่ค่า pH เริ่มต้น 5.1 และความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร

Rengaraj *et al.* (2002) ได้ศึกษาถึงการนำแอคติเวทเตดคาร์บอนที่ทำจากเปลือกเมล็ดปาล์ม (Plam Seed Coat Carbon : PSCC) มาใช้ในการดูดซับฟีนอลเปรียบเทียบกับ commercial activated carbon (CAC) โดยมีปัจจัยที่ได้ทำการศึกษาคือ เวลาในการสัมผัส, ความเข้มข้นฟีนอล, ปริมาณตัวดูดซับ และ pH พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4-9 ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ PSCC 2 กรัม และ CAC 3 กรัม ซึ่งทำให้เกิดการดูดซับ 96% และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของ PSCC คือ 3 ชั่วโมง และ CAC คือ 6 ชั่วโมง จากผลการศึกษาปัจจัยปริมาณตัวดูดซับและเวลา พบว่า PSCC มีประสิทธิภาพดีกว่า CAC จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำ PSCC มาใช้ในการบำบัดฟีนอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Ribeiro *et al.* (2000) ศึกษาถึงการนำเอามวลแห้งของจอกหูหนูมาใช้ในการดูดซับน้ำมัน พบว่าส่วนใบของจอกหูหนูซึ่งมีขนาดมากกว่า 1 มิลลิเมตร สามารถดูดซับน้ำมันได้ 7.3-11.6 กรัมต่อกรัม ในขณะที่รากของจอกหูหนูซึ่งมีขนาดน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร สามารถดูดซับน้ำมันได้ 3.6-4.8 กรัมต่อกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Schneider และ Rubio (1999) พบว่ามวลแห้งของจอกหูหนู (*Salvinia* sp.) และราก ผักตบชวา (*Eichornia* sp.) มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก Cr^{3+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Cd^{2+}, Pb^{2+} แตกต่างกัน โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ 0.9 มิลลิอิคิววาเลนซ์ต่อกรัม, 0.7 มิลลิอิคิววาเลนซ์ต่อกรัม สำหรับจอกหูหนูและผักตบชวาตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 ตัวดูดซับ

1. จอกหูหนู
2. ผักตบชวา

3.1.2 สารเคมี

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

3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง UV-spectrophotometer รุ่น UV/Vis 6405 ยี่ห้อ LABQUIP
2. เครื่อง Scanning Electron Microscope รุ่น LEO 1450 VP ยี่ห้อ LEO
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น TC-254 ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT
4. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง
5. เครื่องบดตัวอย่าง
6. เครื่องกรองสุญญากาศพร้อมชุดเครื่องกรอง
7. เครื่องเขย่า รุ่น SGM-300 ยี่ห้อ GALLOENKAMP
8. บีกเกอร์ขนาด 50, 100, 500, 1000 มิลลิลิตร
9. ขวดวัดปริมาตรขนาด 50, 100, 1000 มิลลิลิตร
10. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
11. ปิเปตขนาด 1, 2, 10, 50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
13. ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 12, 20 เมช (1.77, 0.85 มิลลิเมตร)
14. ถาดอลูมิเนียม
15. หลอดหยด
16. ช้อนตักสาร
17. แท่งแก้วคน
18. กระบอกน้ำกลั่น
19. กรวยกรอง
20. ลูกยาง

3.2 การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายสต็อกฟีนอลเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

เตรียมจากฟีนอล 1 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นปรับปริมาตรครบ 1 ลิตร

2. สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 6.8

เตรียมจากชั่งไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) 104.5 กรัม และโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 72.3 กรัม นำสารทั้งสองมาละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรจนครบ 1 ลิตร

3. สารละลายโพแทสเซียมเฟอร์ริกไซยาไนด์ ($K_3Fe(CN)_6$) (เตรียมใหม่ทุกสัปดาห์)

ชั่งโพแทสเซียมเฟอรร์ริกไซยาไนด์ 4 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรจนครบ 50 มิลลิลิตร

4. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)

ปิเปตสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 30% มา 65.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร

5. สารละลาย 4 – อะมิโนแอนติไพริน (เตรียมใหม่ทุกวัน)

ชั่ง 4 – อะมิโนแอนติไพริน 1 กรัม ละลายน้ำกลั่น ปรับปริมาตรจนครบ 50 มิลลิลิตร

6. สารละลาย methylene blue เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่ง methylene blue 1 กรัม ละลายน้ำกลั่นปรับปริมาตรจนครบ 1000 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับจากจอกหูหนูและผักตบชวา

นำจอกหูหนูและผักตบชวามาล้างทำความสะอาด หั่นเป็นชิ้นพอประมาณล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง นำมาอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาบด, ร่อนด้วยตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 12 และ 20 เมช จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Costa *et al.*, 1996) ทิ้งให้เย็นและเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อนำไปใช้ต่อไป

3.3.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของจอกหูหนูและผักตบชวา

ลักษณะโครงสร้างมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาทำการศึกษาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ที่กำลังขยาย 600x

3.3.3 การศึกษาหาพื้นที่ผิวของมวลแห้งของพืช

พื้นที่ผิวของจอกหูหนูและผักตบชวาทำการศึกษาโดยวิธี methylene blue adsorption (นิศากร, 2543) ซึ่งทำได้โดยชั่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวามา 0.5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม methylene blue ที่มีความเข้มข้นต่างๆ กันจำนวน 100 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละขวด นำมาเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ นำสารละลายที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร ทำการวิเคราะห์หาปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (Q) และความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C_e) นำมาพลอตกราฟโดยแสดงความสัมพันธ์ในรูปแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม นำค่าจุดตัดแกน (Q_{max}) ไปแทนในสมการ 3.1 (นิศากร, 2543)

$$S = Q_{max} \times N \times s/n \qquad (3.1)$$

เมื่อ S คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับ (m^2/g)

Q_{max} คือ จำนวนโมลของสีต่อกรัมของตัวดูดซับที่เพียงพอต่อการสร้างชั้นการดูดซับแบบชั้นเดียว

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

s คือ พื้นที่ถูกปกคลุมด้วยไอออนของสี 1 โมเลกุล (มีค่า 120 $(A^0)^2$ สำหรับเมทธิลีนบลู)

n คือ จำนวนการรวมกลุ่มเป็นไมเซลล์เล็กๆของสี (มีค่าเท่ากับ 2.5 สำหรับเมทธิลีนบลู)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

การทดสอบหาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของฟีนอลทำได้โดยใช้วิธีการดูดซับแบบครั้ง ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดของพืช ปริมาณพืช เวลาที่ใช้สัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ค่าพีเอชของสารละลาย และชนิดของอนุพันธ์ของฟีนอล

3.3.4.1 ศึกษาผลของขนาดของพืช

ชั่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาที่มีขนาดเล็กกว่า 0.85 มิลลิเมตร, ขนาดตั้งแต่ 0.85 ถึง 1.77 มิลลิเมตร และขนาดใหญ่กว่า 1.77 มิลลิเมตรมาอย่างละ 0.5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ปิเปตสารละลายที่ได้มา 10 มิลลิลิตร วิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธี Spectrophotometry ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุม

3.3.4.2 ผลของปริมาณของพืช

ชั่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาขนาดที่เหมาะสมจากข้อ 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 ปิเปตสารละลายที่ได้มา 10 มิลลิลิตร วิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธี Spectrophotometry ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุม

3.3.4.3 ผลของเวลาที่ใช้สัมผัส

ชั่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาขนาดที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.1 มาในปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.2 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีที่เวลา 30, 60, 180, 300, 360, 420 และ 480 นาที นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ปิเปตสารละลายที่ได้มา 10 มิลลิลิตร วิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธี Spectrophotometry ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุม

3.3.4.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล

ชั่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาขนาดที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.1 มาในปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.2 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายฟีนอลความเข้มข้น 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.3 นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ปิเปตสารละลายที่ได้มา 10 มิลลิลิตร วิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธี Spectrophotometry ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุม

3.3.4.5 ผลของค่าพีเอชของสารละลาย

ชั่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวาขนาดที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.1 มาในปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.2 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอลความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.4 ลงไป100 มิลลิลิตรแล้วปรับ pH ของสารละลายให้เป็น 4, 7, 10 และ 12 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.3 นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ปิเปตสารละลายที่ได้มา 10 มิลลิลิตร วิเคราะห์หาปริมาณ ฟีนอลโดยวิธี Spectrophotometry ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุม

3.3.5 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ชั่งมวลแห้งของจอกหูหนูและผักตบชวามาขนาดที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.4.1 มาอย่างละ 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัมใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 100 มิลลิลิตร โดยปรับ pH ของสารละลายเป็น 7 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.4.3 นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ปิเปตสารละลายที่ได้มา 10 มิลลิลิตร วิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธี Spectrophotometry ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ พร้อมทั้งทำการทดลองชุดควบคุม

3.3.6 ศึกษาชนิดของฟีนอลและอนุพันธ์

นำสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับแบบครั้งจากการทดลองของสารละลายฟีนอลมาใช้เพื่อทำการศึกษาผลการดูดซับของ 4-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล

3.3.7 วิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลและอนุพันธ์โดยวิธี Spectrophotometry (American Health Public Association, 1992)

นำสารละลายที่กรองได้มา 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 100 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้มาเติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 2.5 มิลลิลิตร เขย่าสารละลาย ปรับปริมาตรสารละลายให้มี pH = 7.9±0.1 ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตทันที เขย่าสารละลาย เติมสารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีนและสารละลายโพแทสเซียมเฟอร์ริกไซยาไนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างละ 1 มิลลิลิตร เขย่าสารละลาย ตั้งทิ้งไว้ 15 นาทีเพื่อให้เกิดสี นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV ที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

3.3.8 วิธีทดลองชุดควบคุม

เตรียมสารละลายฟีนอลให้มีสภาวะเดียวกับสารละลายตัวอย่างในการศึกษาแต่ละปัจจัย โดยไม่ใส่มวลแห้งของพืช นำไปเขย่าที่สภาวะเดียวกับของการศึกษาแต่ละปัจจัย วิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธี Spectrophotometry ทำการทดลองอีก 2 ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

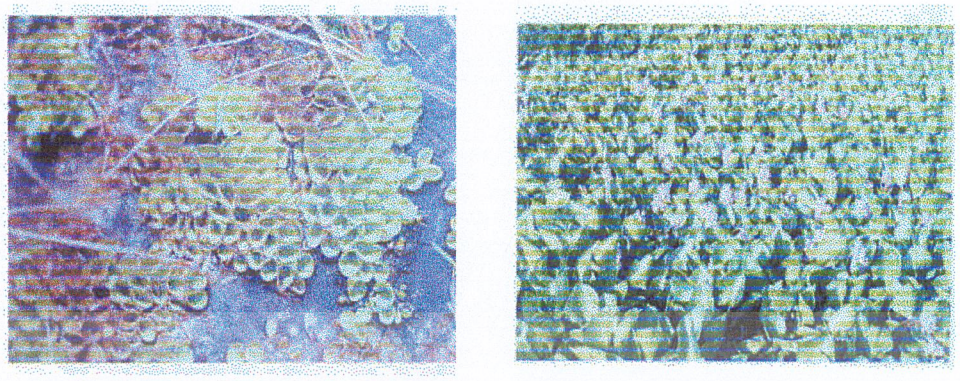
บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

โครงงานพิเศษนี้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเอาจอกหูหนูและผักตบชวามาใช้เป็นตัวดูดซับฟีนอลและอนุพันธ์โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ (1) ศึกษาธรรมชาติของพืชทั้งสองชนิดในแง่ลักษณะทางกายภาพ ความเป็นรูพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะ และ (2) ศึกษาหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ โดยทำการทดสอบการดูดซับแบบครั้ง (batch) ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดของพืช ปริมาณพืชที่ใช้ในการดูดซับ เวลาที่ใช้ในการสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ค่าพีเอชของสารละลาย และชนิดของฟีนอลและอนุพันธ์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้เป็นดังนี้

4.1 ธรรมชาติของจอกหูหนูและผักตบชวา

จอกหูหนูและผักตบชวาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีลักษณะทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยจอกหูหนูจะใช้ทั้งใบและรากเป็นตัวดูดซับ ส่วนผักตบชวาจะใช้ในส่วนของใบและลำต้นเป็นตัวดูดซับ ภายหลังการล้างทำความสะอาดพืชทั้งสองชนิดจะถูกนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดก่อนที่จะนำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และพื้นที่ผิวจำเพาะของพืชโดยวิธี methylene blue adsorption ลักษณะของจอกหูหนูและผักตบชวาภายหลังผ่านการอบแห้ง มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปของพืชที่ใช้ในการทดลอง โดยที่ (ก) จอกหูหนู และ (ข) ผักตบชวา (สุรชัย, 2538)

(ก)

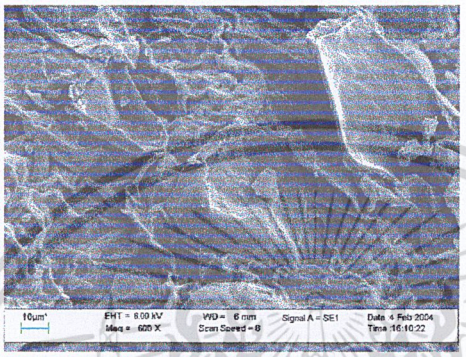
(ข)

รูปที่ 4.2 พืชที่ผ่านการอบแห้งและบดที่อุณหภูมิ 70°C โดยที่ (ก) จอกหูหนู และ (ข) ผักตบชวา แล้วก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

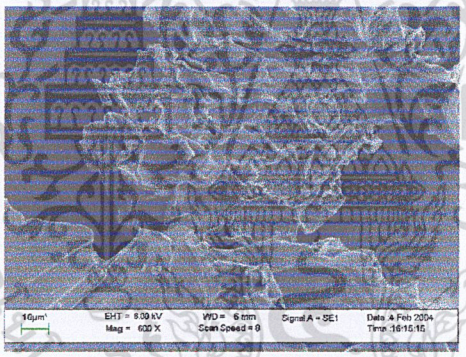
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ลักษณะโครงสร้างของพืช

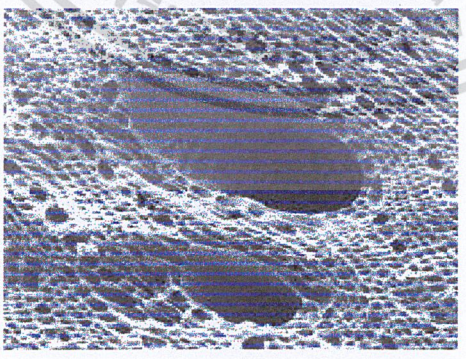
จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างความเป็นรูพรุนของพืชด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าพืชทั้งสองชนิดมีลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างทางกายภาพดังแสดงในรูปที่ 4.3



(ก)



(ข)



(ค)

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

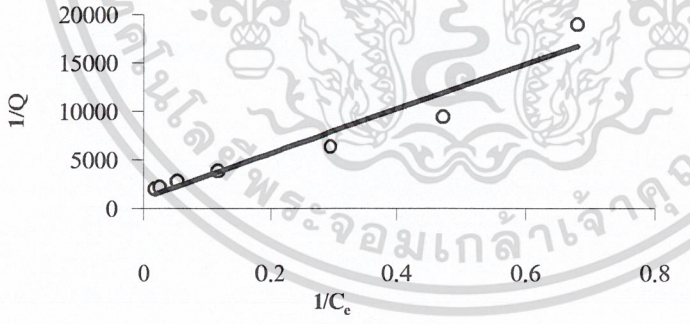
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 พบว่าพื้นผิวของจอกหูหนูและผักตบชวามีความแตกต่างกันไม่มากนัก โดยจอกหูหนูจะมีพื้นที่ผิวค่อนข้างขรุขระ มีลักษณะคล้ายเป็นรูพรุนแต่ไม่ชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของจอกหูหนูที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้กับที่ใช้ในการศึกษาของ Ribeiro *et al.* (2000) พบว่าลักษณะพื้นผิวมีความคล้ายคลึงกัน ในกรณีของผักตบชวาพื้นผิวมีลักษณะคล้ายหลุมตื้นอยู่ทั่วไปและไม่พบส่วนที่เป็นรูพรุนอย่างชัดเจน และเมื่อเปรียบเทียบพืชทั้งสองชนิดกับถ่านกัมมันต์จะพบว่าถ่านกัมมันต์มีลักษณะที่เป็นรูพรุนอย่างชัดเจน

4.1.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของจอกหูหนูและผักตบชวา

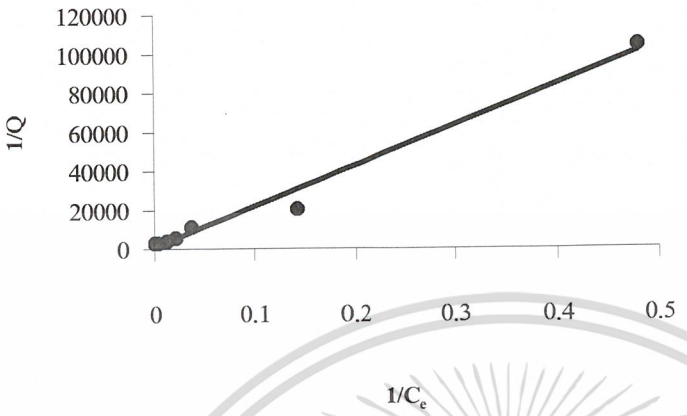
พื้นที่ผิวจำเพาะต่อการดูดซับของจอกหูหนูและผักตบชวาสามารถตรวจวัดได้ตามวิธีของ Ribeiro *et al.* (2000) และ นิศากร (2543) โดยใช้สีเมทธิลีนบลู (methylene blue) เป็นสารเคมีที่ถูกดูดซับและทำการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับเมทธิลีนบลูด้วยจอกหูหนูหรือผักตบชวา เพื่อหาค่า Q_{max} หรือค่าจำนวนโมลของสีต่อกรัมของตัวดูดซับที่เพียงพอต่อการสร้างชั้นการดูดซับแบบชั้นเดียว ค่าพื้นผิวจำเพาะของพืช (S) สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.1

ไอโซเทอร์มของการดูดซับเมธิลีนบลูด้วยจอกหูหนูและผักตบชวา สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ methylene blue ที่เหลือในสารละลายกับปริมาณ methylene blue ที่ถูกดูดซับ โดยจอกหูหนูที่สภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ methylene blue ที่เหลือในสารละลายกับปริมาณ methylene blue ที่ถูกดูดซับโดยผักตบชวาที่สภาวะสมดุล

จากรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับเมธิลีนบลูของจอกหูหนูได้สมการเส้นตรงคือ $y = 23072\,x + 989.26$ สามารถคำนวณหาค่า Q_{max} ได้เท่ากับ 1.01×10^{-3} จากไอโซเทอร์มการดูดซับเมธิลีนบลูของผักตบชวา (รูปที่ 4.5) ได้สมการเส้นตรงคือ $y = 209004\,x + 929.34$ ซึ่งสามารถคำนวณค่า Q_{max} ได้เท่ากับ 1.08×10^{-3}

เมื่อแทนค่า Q_{max} ของจอกหูหนูและผักตบชวาลงในสมการที่ (3.1) สามารถคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของจอกหูหนูได้เท่ากับ 292.10 m^2/g และพื้นที่ผิวจำเพาะของผักตบชวาเท่ากับ 310.93 m^2/g ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้มีความสัมพันธ์โดยกับความสามารถในการดูดซับ และเมื่อเปรียบเทียบพื้นผิวจำเพาะที่คำนวณได้ในการศึกษาครั้งนี้กับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และพื้นที่ผิวของจอกหูหนูที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าในกรณีของจอกหูหนูพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจากการศึกษาของ Ribeiro และคณะ (2000) จอกหูหนูมีพื้นที่ผิว 274 m^2/g เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีความแตกต่างกัน โดยถ่านกัมมันต์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 650-1000 m^2/g (AWWA, 1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับแบบครั้ง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธีการดูดซับแบบครั้ง (batch) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวา ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดของพืช ปริมาณของพืช เวลาที่ใช้สัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ค่าพีเอชของสารละลาย ชนิดของฟีนอลและอนุพันธ์

4.2.1 ขนาดของพืช

จากการศึกษาผลของขนาดของพืชต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอล โดยใช้พืชที่ผ่านการคัดขนาดต่างๆกัน 3 ขนาดคือ ขนาดเล็ก (น้อยกว่า 0.85 มิลลิเมตร), ขนาดกลาง (ตั้งแต่ 0.85 ถึง 1.77 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (ใหญ่กว่า 1.77 มิลลิเมตร) มาเป็นวัสดุในการดูดซับสารละลายฟีนอลที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าขนาดของพืชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย (%) กับขนาดของพืช (mm) โดยที่○ จอกหูหนู และ ● ผักตบชวา

จากรูปที่ 4.6 พบว่าจอกหูหนูขนาดเล็กมีประสิทธิภาพการดูดซับ 57.8(±7.44)% เมื่อใช้จอกหูหนูขนาดกลางประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลงเป็น 44.8(±0.00)% และเมื่อใช้จอกหูหนู

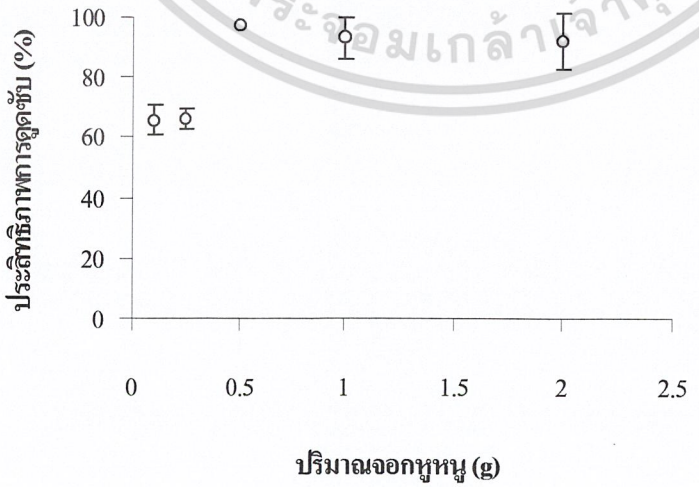
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มเป็น 49.5(±3.10)% เมื่อนำผลที่ได้มาทดสอบทางสถิติโดยวิธี t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูทั้งสามขนาดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อใช้ผักตบชวาที่มีขนาดต่างกันเป็นตัวดูดซับสารละลายฟีนอล พบว่าผลที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับเมื่อใช้จอกหูหนูเป็นตัวดูดซับ กล่าวคือเมื่อผักตบชวามีขนาดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มคงที่เช่นกัน และประสิทธิภาพในการดูดซับของผักตบชวาทั้งสามขนาดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลระหว่างผักตบชวาและจอกหูหนูที่มีขนาดเท่ากัน พบว่าจอกหูหนูมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงกว่าผักตบชวา เนื่องจากขนาดของพืชที่ใช้ในการดูดซับไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับฟีนอล ดังนั้นขนาดของจอกหูหนูและผักตบชวาที่เลือกใช้ในการศึกษาต่อไปคือ ขนาดกลางและขนาดเล็กตามลำดับ เพราะให้ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับไม่แตกต่างกันกับขนาดอื่น และมีปริมาณที่มากพอสามารถใช้ได้ตลอดการทดลองเพื่อป้องกันความแตกต่างของตัวอย่างที่ทำการเก็บในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

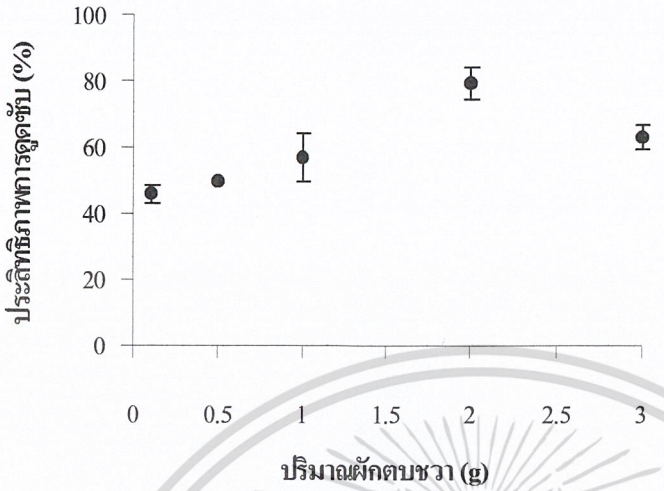
4.2.2 ปริมาณของพืช

จากการศึกษาผลของปริมาณของจอกหูหนูและผักตบชวาต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอล ซึ่งทำการศึกษาได้โดยใช้พืชที่เป็นตัวดูดซับสารละลายฟีนอลในปริมาณที่ต่างกันดังนี้คือ 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 3 กรัม จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้พืชทั้งสองชนิดในปริมาณมากขึ้น ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย (%) กับปริมาณจอกหูหนู (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย (%) กับปริมาณผักตบชวา (g)

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อปริมาณจอกหูหนูเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยจอกหูหนูปริมาณ 0.1 กรัมมีประสิทธิภาพการดูดซับ 65.7(±4.83)% เมื่อเพิ่มปริมาณจอกหูหนูเป็น 0.5 กรัมเกิดการดูดซับได้สูงสุดโดยมีประสิทธิภาพการดูดซับ 97.3(±0.00)% ปริมาณจอกหูหนูที่เพิ่มขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณจอกหูหนูเป็น 1 กรัมและ 2 กรัม พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าไม่แตกต่างกันกับเมื่อใช้จอกหูหนูในระดับปริมาณ 0.5 กรัม นอกจากนี้พบว่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค่อนข้างสูงเมื่อใช้พืชในปริมาณที่มากขึ้น (1 กรัม และ 2 กรัม) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพืช เนื่องจากไม่ได้ทำการแยกระหว่างลำต้นและรากของจอกหูหนูที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับ Ribeiro *et al.* (2000) พบว่ารากของจอกหูหนูมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันได้ดีกว่าใบของจอกหูหนู ดังนั้นปริมาณจอกหูหนูที่เลือกใช้ในการศึกษาต่อไปคือ 0.5 กรัมซึ่งเป็นปริมาณที่ทำให้เกิดการดูดซับสูงสุด

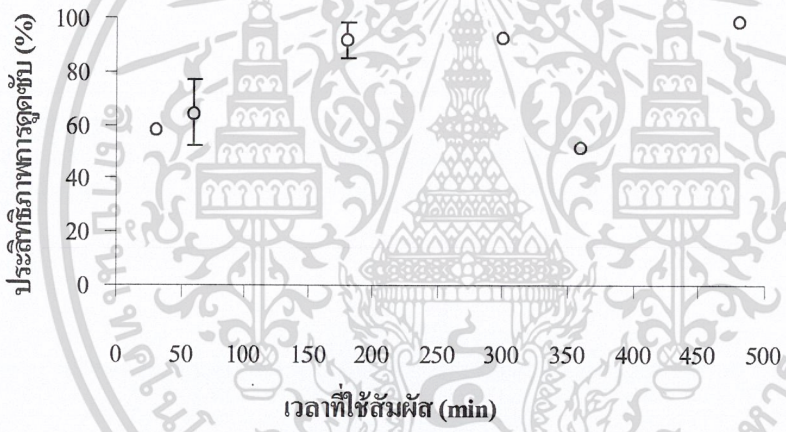
จากรูปที่ 4.8 พบว่าการเพิ่มปริมาณผักตบชวา ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน กล่าวคือเมื่อใช้ผักตบชวาปริมาณ 0.1 กรัมมีประสิทธิภาพการดูดซับ 45.9(±2.71)% เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 0.5 กรัมประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 49.5(±1.76)% และที่ปริมาณ 2 กรัมทำให้เกิดการดูดซับสูงสุดที่ 79.4(±5.13)% และเมื่อเพิ่มปริมาณผักตบชวาขึ้นเป็น 3 กรัมประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลงเนื่องจากไม่ได้ทำการแยกระหว่างก้านและใบ ในการศึกษาของ Francis *et al.* (1982) พบว่าก้านของผักตบชวาสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าใบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นปริมาณผักตบชวาที่เลือกใช้ในการศึกษาต่อไปคือ 0.5 กรัม ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างปริมาณพืชที่ใช้ในการดูดซับ

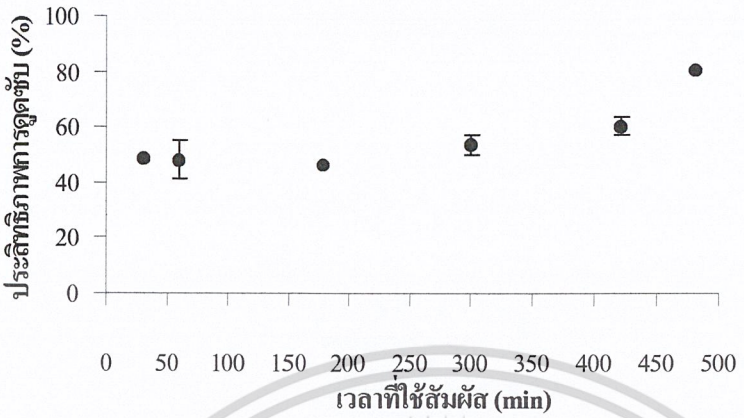
4.2.3 เวลาที่ใช้สัมผัส

จากการศึกษาผลของเวลาที่ใช้สัมผัสต่อความสามารถการดูดซับสารละลายฟีนอล ทำได้โดยให้เวลาที่ใช้สัมผัสระหว่างพืชกับสารละลายฟีนอลแตกต่างกันดังนี้คือ 30, 60, 180, 300, 360, 420 และ 480 นาที พบว่าในกรณีของจอกหูหนูประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสนานขึ้น จนกระทั่งถึงระยะเวลาหนึ่งที่ประสิทธิภาพในดูดซับมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 4.9 สำหรับผักตบชวาประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มเวลาในการสัมผัส ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูโดยเฉลี่ย (%) กับเวลาที่ใช้สัมผัส (min)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวาโดยเฉลี่ย (%) กับเวลาที่ใช้สัมผัส (min)

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อให้จอกหูหนูและสารละลายฟีนอลมีเวลาสัมผัส 30 นาทีมีประสิทธิภาพการดูดซับ 57.9(±2.94)% และเมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสให้นานขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับก็เพิ่มขึ้นด้วย และที่เวลาสัมผัส 180 นาทีมีประสิทธิภาพในการดูดซับ 91.8(±7.76)% จากเวลาสัมผัส 180 นาทีเป็นต้นไป ประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มมีค่าคงที่ ซึ่งเป็นเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ เมื่อใช้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจนถึง 480 นาทีเกิดการดูดซับสูงสุดโดยมีประสิทธิภาพการดูดซับ 98.2(±0.00)% และที่เวลา 360 นาทีประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดต่ำลงอาจมีสาเหตุมาจากการที่พืชมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogenous) ดังนั้นเวลาที่เลือกเพื่อทำการศึกษาต่อไปคือ 180 นาที เนื่องจากที่เวลา 180 และ 480 นาทีประสิทธิภาพการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

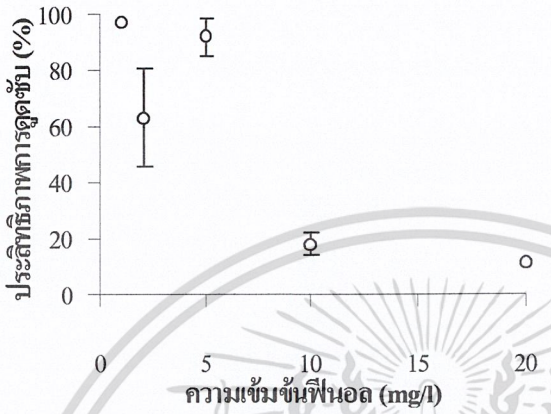
จากรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อใช้เวลาสัมผัสของผักตบชวา 30 นาทีมีประสิทธิภาพการดูดซับ 48.6(±2.51)% เมื่อให้เวลาในการสัมผัสนานขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อใช้เวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจนถึง 480 นาทีจะมีประสิทธิภาพการดูดซับ 80.6(±0.00)% แม้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับที่เวลา 480 นาทีมีค่าสูงสุด แต่ที่ระยะเวลาดังกล่าวสารละลายผสมฟีนอลและผักตบชวามีกลิ่นเน่าเหม็น ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากการย่อยสลายของผักตบชวา ดังนั้นเวลาที่เลือกใช้เพื่อทำการศึกษาต่อไปคือ 60 นาที

4.2.4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล

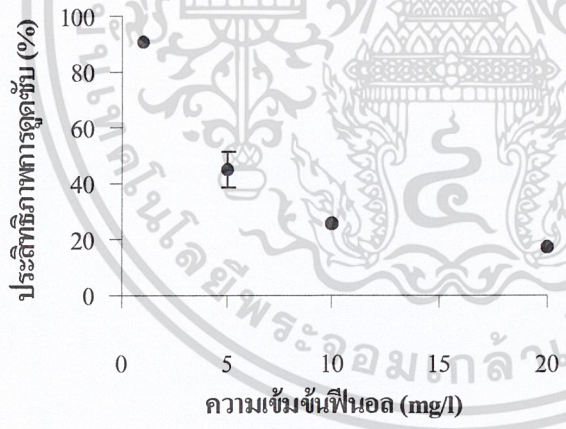
จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอล ซึ่งทำได้โดยเตรียมความเข้มข้นของฟีนอลเป็น 1, 2, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของพืชทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูโดยเฉลี่ย (%) กับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (mg/l)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวาโดยเฉลี่ย (%) กับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (mg/l)

จากรูปที่ 4.11 พบว่าจอกหูหนูและผักตบชวามีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ 97.3(±0.00)% เมื่อความเข้มข้นของฟีนอลเพิ่มขึ้นเป็น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร จอกหูหนูมีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงเป็น 63.8(±17.64)% และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ผักตบชวาเป็นตัวดูดซับพบว่าผลที่ได้มีความคล้ายคลึงกับผลของจอกหูหนู (รูปที่ 4.12) กล่าวคือเมื่อความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

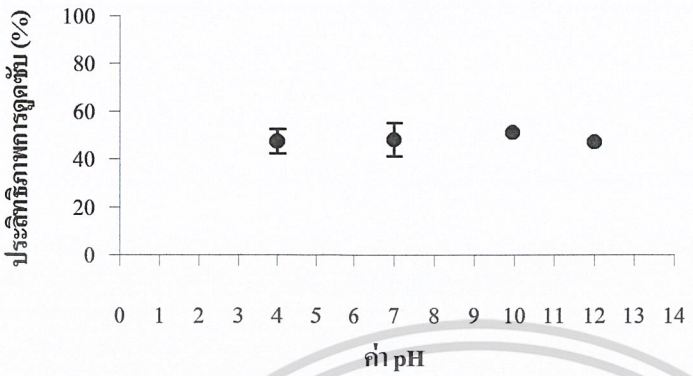
การดูดซับ ฟีนอลของผักตบชวามีค่าลดลง ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้คือการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ทำให้อนุภาคหรือจำนวนโมลของฟีนอลมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่พื้นที่ผิวในการดูดซับของพืชมีปริมาณจำกัด ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของฟีนอลทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง

4.2.5 ค่าพีเอชของสารละลาย

จากการศึกษาผลของค่าพีเอชของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวา ซึ่งทำได้โดยใช้สารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตรต่อพืช 0.5 กรัม ปรับค่าพีเอชของสารละลายฟีนอลให้มีค่าแตกต่างกันดังนี้คือ 4, 7, 10 และ 12 จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายฟีนอลของจอกหูหนู ในขณะที่ค่าพีเอชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวา ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูโดยเฉลี่ย (%) กับค่าพีเอชของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวาโดยเฉลี่ย (%) กับค่าพีเอช ของสารละลาย

จากรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 4 ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล ของจอกหูหนูมีค่าเท่ากับ 29.3(±10.08)% เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชสูงขึ้นเป็น 7 จอกหูหนูมี ประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 89.1(±8.92)% จากนั้นเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มเป็น 10 และ 12 ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลง ความสามารถในการดูดซับที่ลดลง อาจมีสาเหตุมา จากการแข่งขันเข้าจับบริเวณดูดซับของพืชระหว่างไฮโดรเจนไอออน ไฮดรอกไซด์ไอออนและ สารละลายฟีนอล เมื่อสารละลายเป็นกรดและเบสมากเกินไป (Low *et al.*, 1995) นอกจากนี้เมื่อ สารละลายเป็นเบสสารประกอบฟีนอลซึ่งมีค่า pK_a เท่ากับ 9.96 จะอยู่ในรูปฟีนอเลตซึ่งเป็นโมเลกุล ที่มีขั้วที่สามารถละลายน้ำได้ จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลมีค่า ลดลง

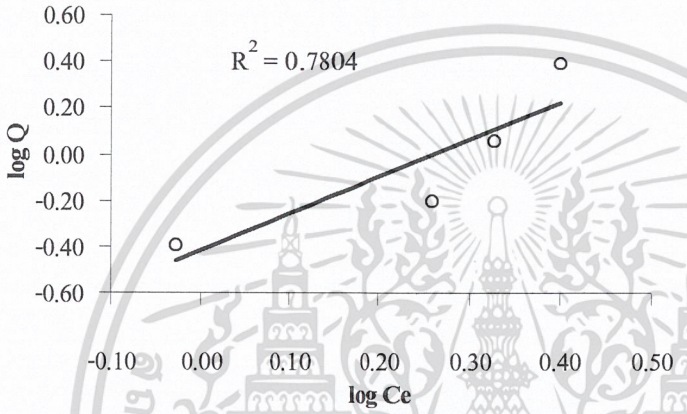
จากรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชต่างๆกันประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล ของผักตบชวามีแนวโน้มคงที่โดยที่ค่าพีเอช 4, 7, 10 และ 12 มีประสิทธิภาพในการดูดซับ 47.3(±5.21)%, 48.2(±7.03)%, 51.2(±0.92)% และ 47.1(±2.30)% ตามลำดับ

4.2.6 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

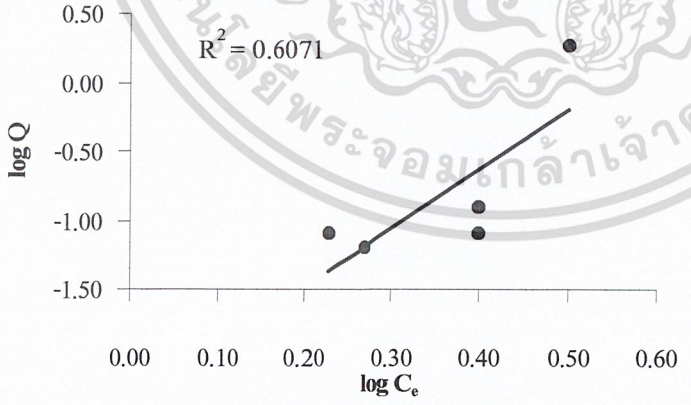
การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวา สามารถทำได้โดยใช้ จอกหูหนูขนาด 0.85-1.77 มิลลิเมตร และผักตบชวาขนาดน้อยกว่า 0.85 มิลลิเมตร ในปริมาณ ต่างๆกันใส่ลงในสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยที่ค่าพีเอช ของสารละลายเป็น 7 ทำการเขย่าเป็นเวลา 3 ชั่วโมงสำหรับจอกหูหนูและ 1 ชั่วโมงสำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผักตบชวา ภายหลังจากกระบวนการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลจะได้ค่าปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักพืช (Q) และความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C_e) นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์เพื่อหาไอโซเทอร์มที่เหมาะสม ซึ่งในการทดลองครั้งนี้พบว่าไอโซเทอร์มที่เหมาะสมต่อการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q และ C_e สำหรับพืชทั้งสองชนิดคือ ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.15 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนูแบบฟรุนดลิช



รูปที่ 4.16 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลของผักตบชวาแบบฟรุนดลิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลของจอกหูหนู จะได้สมการเส้นตรง $y = 1.5953x - 0.4154$ ($r^2 = 0.7804$) และจากรูปที่ 4.16 แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลของผักตบชวา จะได้สมการเส้นตรง $y = 4.3598x - 2.3775$ ($r^2 = 0.6071$) จากสมการฟรุนดลิช

$\log Q = \log K + 1/n \log C_e$

Q = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/l, M)

K = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

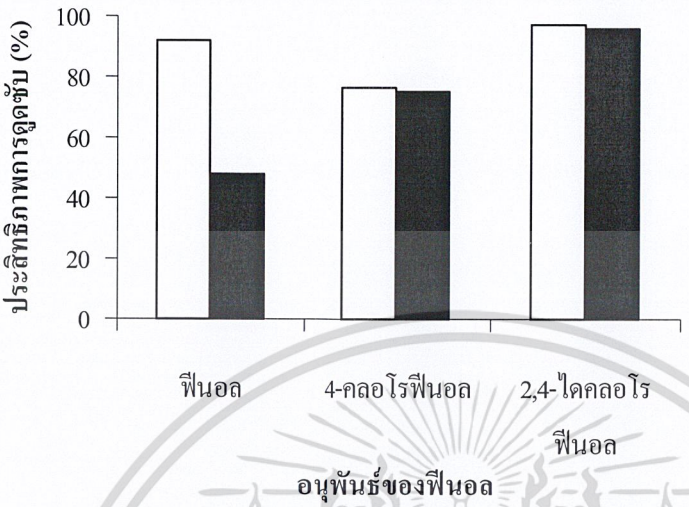
1/n = ค่าคงที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

พบว่าจอกหูหนูมีค่า K เท่ากับ 0.38 และ 1/n เท่ากับ 1.5953 ผักตบชวามีค่า K เท่ากับ 0.004 และ 1/n เท่ากับ 4.3598 จากค่า K ที่คำนวณได้จะเห็นว่าจอกหูหนูมีค่า K สูงกว่าผักตบชวา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจอกหูหนูมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าผักตบชวา เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์จากการศึกษาของ Rengaraj *et al.* (2002) ซึ่งมีค่า K เท่ากับ 9.94 ทำให้สามารถเรียงลำดับความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลได้คือ ถ่านกัมมันต์ > จอกหูหนู > ผักตบชวา ซึ่งสาเหตุที่ถ่านกัมมันต์มีค่า K ที่สูงกว่าจอกหูหนูและผักตบชวามากเนื่องมาจากถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติที่สามารถดูดซับสารที่มีค่าการละลายน้ำสูงได้ดี แม้ว่าจากการศึกษาข้างต้นที่พบว่าตัวดูดซับทั้งสามชนิดมีพื้นที่ผิวจำเพาะใกล้เคียงกัน ส่วนค่า 1/n จะบอกถึงปริมาณพื้นที่ที่ใช้ในการดูดซับบนตัวดูดซับ โดยพืชทั้งสองชนิดมีค่า 1/n มีมากกว่า 1 แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวในการดูดซับ ทำให้ปริมาณสารสามารถถูกดูดซับได้มากขึ้น

4.2.7 ชนิดของฟีนอลและอนุพันธ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับโดยเฉลี่ย (%) กับอนุพันธ์ของฟีนอล โดยที่ □ จอกหูหนูและ ■ ผักตบชวา

จากรูปที่ 4.17 พบว่าความสามารถในการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอลของจอกหูหนูสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล > ฟีนอล > 4-คลอโรฟีนอล โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับ 97.1%, 91.8% และ 76.4% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันกับผักตบชวาความสามารถในการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอลสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล > 4-คลอโรฟีนอล > ฟีนอล โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับ 95.8%, 75.7% และ 48.1% ตามลำดับ การที่ 2,4-ไดคลอโรฟีนอลถูกดูดซับได้ดีเนื่องมาจากมีค่าการละลายต่ำสุด (คือ 4.5 มิลลิกรัมต่อลิตร) (มั่นสิน, 2538) จึงถูกดูดซับได้ดีกว่าอนุพันธ์ของฟีนอลตัวอื่น และโครงสร้างของอนุพันธ์ของฟีนอลที่มีหมู่แทนที่มากจะเป็นการเพิ่มตำแหน่งในการยึดเกาะของอนุภาคกับพื้นที่ผิวของพืช ในกรณีของจอกหูหนูการที่สามารถ ดูดซับฟีนอลได้ดีกว่า 4-คลอโรฟีนอลอาจมีสาเหตุจาก 4-คลอโรฟีนอลมีค่าคงที่ของเฮนรี (K_H) สูงกว่าฟีนอล ทำให้อนุภาคหรือจำนวนโมลของ 4-คลอโรฟีนอลอยู่ในอากาศมากกว่าในสารละลาย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ 4-คลอโรฟีนอลของจอกหูหนูมีค่าน้อยกว่าฟีนอล และเมื่อทำการศึกษาชุดควบคุม พบว่าเมื่อตั้งสารละลาย 4-คลอโรฟีนอลทิ้งไว้ในระยะเวลาสั้นๆ สามารถเกิดการเคลื่อนที่ของ 4-คลอโรฟีนอลไปอยู่ในชั้นของอากาศได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงงานพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้และความสามารถของจอกหูหนูและผักตบชวาในการดูดซับอนุพันธ์ของฟีนอล ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้คือ

ในการเปรียบเทียบผลของขนาดของพืชที่แตกต่างกัน 3 ขนาดคือ ขนาดเล็ก (ขนาดเล็กกว่า 0.85 มิลลิเมตร) ขนาดกลาง (ขนาดตั้งแต่ 0.85 ถึง 1.77 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (ขนาดใหญ่กว่า 1.77 มิลลิเมตร) พบว่า ความสามารถในการดูดซับฟีนอลไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดของพืชที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับ ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลเมื่อใช้พืชทั้งสามขนาดป็นตัวดูดซับไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การเปรียบเทียบผลของปริมาณของพืช โดยปริมาณพืชที่ใช้คือ 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 3 กรัม พบว่าเมื่อใช้ปริมาณพืชมากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูงขึ้น โดยปริมาณที่ใช้ในการศึกษาคือ 0.5 กรัม

การเปรียบเทียบผลของเวลาสัมผัสที่เวลา 30, 60, 180, 300, 360, 420 และ 480 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสนานขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น จนถึงจุดสมดุลประสิทธิภาพการดูดซับจะคงที่ เวลาที่ใช้ในการศึกษาคือ 180 นาทีสำหรับจอกหูหนู และ 60 นาทีสำหรับผักตบชวา

การเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 1- 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล

การเปรียบเทียบผลของค่าพีเอชของสารละลายที่ค่าพีเอช 4, 7, 10 และ 12 พบว่าในจอกหูหนูประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายฟีนอลขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย โดยจอกหูหนูมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด 89.1% ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ในขณะที่ผักตบชวาค่าพีเอชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ในช่วง 47.1% ถึง 51.2%

การเปรียบเทียบผลของอนุพันธ์ของฟีนอลโดยศึกษาอนุพันธ์ของฟีนอลคือ 4-คลอโร-ฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล พบว่าจอกหูหนูและผักตบชวาสามารถดูดซับ 2,4-ไดคลอโร-ฟีนอลได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่าการละลายน้ำต่ำเมื่อเทียบกับ 4-คลอโรฟีนอล และ ฟีนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักพืช (Q) และความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C_e) สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์มของฟรุนดิช โดยที่จอกหูหนูมีสมการการดูดซับคือ $y = 1.5953x - 0.4154$ มีค่า $K = 0.38$ และผักตบชวามีสมการการดูดซับคือ $y = 4.3598x - 2.3775$ มีค่า $K = 0.004$ แสดงให้เห็นว่าจอกหูหนูมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าผักตบชวา ในขณะที่ค่า 1/n ของจอกหูหนูและผักตบชวามีค่า 1.5953 และ 4.3598 ตามลำดับ การที่ 1/n มีค่ามากกว่า 1 แสดงให้เห็นถึงว่าอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวของการดูดซับทำให้ปริมาณสารถูกดูดซับได้มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรแยกศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของพืชในส่วนของใบ ลำต้น และรากด้วย เพราะพืชแต่ละส่วนมีประสิทธิภาพในการดูดซับแตกต่างกัน
2. ควรศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีของพืช เพื่อทราบถึงกลไกของการดูดซับ
3. ควรศึกษาสภาพพื้นผิวของพืชที่นำมาเป็นวัสดุดูดซับว่ามีลักษณะที่ชอบน้ำหรือไม่ เพื่อนำไปดูดซับสารมลพิษได้อย่างเหมาะสม
4. ควรมีการศึกษาถึงผลการดูดซับของน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารละลายฟีนอลจากโรงงานอุตสาหกรรม
5. ควรศึกษาถึงแนวทางในการกำจัดจอกหูหนูและผักตบชวาที่ผ่านการดูดซับสารละลายฟีนอลแล้ว เพื่อไม่ให้เกิดการแพร่กระจายของสารละลายฟีนอลออกสู่สิ่งแวดล้อมอีกครั้ง
6. ควรมีการศึกษาถึงปัจจัยอื่นที่อาจมีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับ เช่น อุณหภูมิ, ความเร็วรอบของการสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **ฟีนอล.** กรุงเทพฯ: กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

คณิตา ตังคณานุรักษ์. 2542. **เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมีเคราะห์1.** กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จตุพร โหงวเข่ง, ธิดารัตน์ จรัสกุล และสุธาสินี บุนยสถิตย์. 2545. **การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับนิเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผักตบชวา โสน และบอน.** ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชีวรัตน์ ศิลปรัตน์, ปริญญา รุ่งโรจน์กิจไพศาล และปวีณา จรัสโชติพินิต. 2544. **การดูดซับตะกั่วโดยการพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จากเปลือกหอยแครง.** ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ต่อพงศ์ กรีธาชาติ. 2544. **การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อกระดาษโดยกระบวนการดูดซับด้วยแอคติเวทเตดคาร์บอน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิศากร แสงนิล. 2543. **การหาพื้นที่ผิวจำเพาะและพฤติกรรมการดูดซับโลหะหนักของวัสดุดูดซับบางชนิด.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2538. **วิศวกรรมการประปา เล่ม 2.** กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุรชัย มัจฉาชีพ. 2538. **วัชพืชในประเทศไทย.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แพร่พิทยา.

Aksu, Z. and Yener, 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. 1992. **Standard Methods for the examination of water and wastewater.**

American Water Works Association. 1998. **Water treatment plant design.**

Calace, N., Nardi, E., Petronio, B.M. and Pietroletti. M. 2002. Adsorption of Phenols by Papermill sludges. **Envionmental Pollution,** 118 : 315 – 319.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

Costa, A.C.A., Mesquita, 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.

Francis, E.C., Ralph, W.S. and Fred, L.S. 1982. Uptake of Arsenic, Cadmium, Lead and Merceury from Polluted Waters by the Water Hyacinth. **Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological,** 27(1) : 31-36.

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.

Rao, J.R. and Viraraghavan, T. 2002. Biosorption of Phenol from and Aqueous Solution by *Aspergillus niger* biomass. **Bioresource Technology**, 85 : 165 - 171.

Rengaraj, S., Seung-Hycon Moon, Sivabalan, R., Arabindoo, B. and Murugesan, 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.

Ribeiro, T.H., Smith, R.W. and Rubio, J. 2000. Sorption of Oils by the Nonliving Biomass of a *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.cee.vt.edu/program_areas/environmental/teach/wtprimer/carbon/sketcarb.html วันที่ 20 มีนาคม 2547

http://www.merk.go.th วันที่ 31 มีนาคม 2547

Steve Krech and Erika Toll "Activated Carbon" Water Treatment Primer Env. Information Mgt Civil Eng. Dep V.P. Tech VSP VA

check

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
การเตรียมกราฟมาตรฐาน

ปิเปตสารละลายฟีนอลเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิลิตรใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เตรียมสารละลายแบลงค์โดยใช้น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 2.5 มิลลิลิตร เขย่าสารละลาย ปรับปริมาตรสารละลายให้มี pH = 7.9±0.1 ด้วยบัฟเฟอร์-ฟอสเฟตทันที เขย่าสารละลาย เติมสารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีนและสารละลายโพแทสเซียม-เฟอร์ริกไซยาไนด์ อย่างละ 1 มิลลิลิตร เขย่าสารละลาย แล้วตั้งทิ้งไว้ 15 นาทีเพื่อให้เกิดสี นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การหาพื้นที่ผิวจำเพาะของจอกหูหนูและผักตบชวา

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายเมธิลีนบลูของจอกหูหนู

M (g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	$1/C_e$	1/Q
0.5	1,000	51.82	0.02	1,969.56
0.5	900	37.81	0.03	2,165.98
0.5	700	18.63	0.05	2,740.80
0.5	500	8.50	0.12	3,799.59
0.5	300	3.37	0.30	6,295.72
0.5	200	2.12	0.47	9,437.54
0.5	100	1.47	0.68	18,953.62

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายเมธิลีนบลูของผักตบชวา

M (g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	$1/C_e$	1/Q
0.5	2,000	1,264.98	0.00	2,540.75
0.5	1,800	1,126.89	0.00	2,774.44
0.5	1,400	732.15	0.00	2,796.29
0.5	1,000	283.74	0.00	2,607.29
0.5	600	79.57	0.01	3,588.38
0.5	400	46.95	0.02	5,289.62
0.5	200	27.15	0.04	10,804.17
0.5	100	7.00	0.14	20,079.78
0.5	20	2.09	0.48	104,271.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับแบบครั้ง

2.1 ผลของขนาดของพืช

ตารางที่ ข.3 ประสิทธิภาพการดูดซับกับขนาดของจอกหูหนู

ขนาดพืช	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)			การระเหย (%)	การดูดซับเฉลี่ย (%)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
เล็กกว่า 0.85 mm	5.00	1.98	1.82	2.53	0	57.8	7.44
0.85-1.77 mm	5.00	2.76	2.76	2.76	0	44.8	0.00
ใหญ่กว่า 1.77 mm	5.00	2.53	2.37	2.68	0	49.5	3.10

ตารางที่ ข.4 ประสิทธิภาพการดูดซับกับขนาดของผักตบชวา

ขนาดพืช	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)			การระเหย (%)	การดูดซับเฉลี่ย (%)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
เล็กกว่า 0.85 mm	3.96	2.24	2.24	2.31	11.11	31.7	1.27
0.85-1.77 mm	3.96	2.54	2.61	2.54	11.11	24.2	1.04
ใหญ่กว่า 1.77 mm	3.96	2.61	2.24	2.17	11.11	29.8	5.96

2.2 ปริมาณของพืช

ตารางที่ ข.5 ประสิทธิภาพการดูดซับกับปริมาณของจอกหูหนู

ปริมาณพืช (g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)			การระเหย (%)	การดูดซับเฉลี่ย (%)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.1	4.72	1.42	1.87	1.57	0	65.7	4.83
0.25	4.72	1.42	1.65	1.72	0	66.2	3.31
0.5	3.67	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	97.3	0.00
1	3.67	0.54	< 0.1	< 0.1	0	93.3	6.93
2	3.67	< 0.1	< 0.1	0.69	0	91.9	9.30

หมายเหตุ ค่า detection limit ของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธีเทียบสีมีค่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองที่มีค่า < 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรหมายถึง ปริมาณฟีนอลที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่า detection limit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ประสิทธิภาพการดูดซับกับปริมาณของผักตบชวา

ปริมาณพืช (g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)			การระเหย (%)	การดูดซับเฉลี่ย (%)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.1	5.48	2.44	2.59	2.73	6.90	45.9	2.71
0.5	4.77	2.01	1.87	2.01	9.40	49.5	1.76
1	5.48	1.69	1.84	2.44	6.90	56.8	7.17
2	5.48	0.95	0.88	0.43	6.90	79.4	5.13
3	5.48	1.47	1.62	1.84	6.90	63.1	3.41

2.3 เวลาที่ใช้สัมผัส

ตารางที่ ข.7 ประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูกับเวลาที่ใช้สัมผัส

เวลาสัมผัส (min)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)			การระเหย (%)	การดูดซับเฉลี่ย (%)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30	5.35	2.08	2.30	2.38	0	57.9	2.94
60	5.35	1.92	1.25	2.53	0	64.5	12.00
180	4.91	0.74	0.21	< 0.1	5.29	91.8	6.73
300	4.91	< 0.1	< 0.1	< 0.1	5.29	92.7	0.00
360	5.58	2.29	2.52	2.37	5.29	57.1	2.09
480	5.58	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	98.2	0.00

หมายเหตุ ค่า detection limit ของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธีเทียบสีมีค่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองที่มีค่า < 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรหมายถึง ปริมาณฟีนอลที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่า detection limit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวากับเวลาที่ใช้สัมผัส

เวลาสัมผัส (min)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)			การระเหย (%)	การดูดซับเฉลี่ย (%)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
30	4.87	1.72	1.80	1.56	16.6	48.6	2.51
60	4.87	2.11	1.56	1.48	16.6	48.1	7.04
180	4.87	1.88	1.72	1.80	16.6	46.4	1.64
300	4.87	1.64	1.32	1.40	16.6	53.5	3.42
420	4.87	1.25	0.93	1.17	16.6	60.4	3.41
480	4.87	< 0.1	< 0.1	< 0.1	16.6	80.6	0.00

หมายเหตุ ค่า detection limit ของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธีเทียบสีมีค่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองที่มีค่า < 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรหมายถึง ปริมาณฟีนอลที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่า detection limit

2.4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล

ตารางที่ ข.9 ประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูกับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล

ความเข้มข้น (mg/l)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)			การระเหย (%)	การดูดซับเฉลี่ย (%)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	1.06	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	97.3	0.00
2	2.12	0.89	0.28	0.96	2.8	63.8	17.64
5	4.91	0.74	0.21	< 0.1	5.29	91.8	6.73
10	10.18	7.78	8.54	7.93	2.8	17.9	3.95
20	20.48	17.33	17.63	17.63	2.8	11.7	0.84

หมายเหตุ ค่า detection limit ของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธีเทียบสีมีค่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองที่มีค่า < 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรหมายถึง ปริมาณฟีนอลที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่า detection limit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวากับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล

ความเข้มข้น (mg/l)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)			การระเหย (%)	การดูดซับเฉลี่ย (%)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	1.04	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	90.38	0.00
5	4.87	3.03	2.52	2.45	0	45.24	6.50
10	9.3	6.73	7.10	6.95	0	25.52	1.99
20	18.93	15.88	15.52	15.66	0	17.13	0.96

หมายเหตุ ค่า detection limit ของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธีเทียบสีมีค่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองที่มีค่า < 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรหมายถึง ปริมาณฟีนอลที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่า detection limit

2.5 ค่าพีเอชของสารละลาย

ตารางที่ ข.11 ประสิทธิภาพการดูดซับของจอกหูหนูกับค่าพีเอชของสารละลาย

ค่าพีเอช	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)			การระเหย (%)	การดูดซับเฉลี่ย (%)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
4	5.23	3.61	2.63	2.78	13.2	29.3	10.08
7	4.91	0.74	0.21	< 0.1	5.3	89.1	8.92
10	6.75	2.69	2.69	3.13	0	57.9	3.75
12	4.51	2.83	2.61	1.94	0	45.5	10.27

หมายเหตุ ค่า detection limit ของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลโดยวิธีเทียบสีมีค่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองที่มีค่า < 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรหมายถึง ปริมาณฟีนอลที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่า detection limit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 ประสิทธิภาพการดูดซับของผักตบชวากับค่าพีเอชของสารละลาย

ค่าพีเอช	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)			การระเหย (%)	การดูดซับเฉลี่ย (%)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
4	4.92	2.52	2.59	2.88	0	47.3	5.21
7	4.87	2.11	1.56	1.48	16.6	48.2	7.03
10	4.97	2.37	2.45	2.45	0	51.2	0.92
12	4.95	2.59	2.52	2.74	0	47.1	2.30

2.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ตารางที่ ข.13 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายฟีนอลของจอกหูหนู

M (g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	Q (mg/g)	log Q	logC_e
0.1	5.00	2.51	2.49	0.40	0.40
0.25	5.00	2.14	1.15	0.06	0.33
0.5	5.00	1.82	0.63	-0.20	0.26
1	5.00	0.93	0.41	-0.39	-0.03

ตารางที่ ข.14 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้หาไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายฟีนอลของผักตบชวา

M (g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	Q (mg/g)	log Q	logC_e
1	5.00	3.16	1.86	0.27	0.50
2	5.00	2.51	0.12	-0.91	0.40
3	5.00	2.51	0.08	-1.10	0.40
4	5.00	1.70	0.08	-1.10	0.23
5	5.00	1.86	0.06	-1.20	0.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ชนิดของฟีนอลและอนุพันธ์

ตารางที่ ข.15 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย 4-คลอโรฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวา

ชนิดพืช	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)			การระเหย	การดูดซับเฉลี่ย	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	(%)	(%)	
จอกหูหนู	5.46	1.36	1.36	1.15	0	76.4	2.22
ผักตบชวา	5.46	1.26	1.68	1.05	0	75.6	5.87

ตารางที่ ข.16 ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลาย 2,4-คลอโรฟีนอลของจอกหูหนูและผักตบชวา

ชนิดพืช	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)			การระเหย	การดูดซับเฉลี่ย	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	(%)	(%)	
จอกหูหนู	3.40	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	97.0	0.00
ผักตบชวา	3.40	< 0.1	0.23	< 0.1	0	95.8	2.34

หมายเหตุ ค่า detection limit ของวิธีวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอล โดยวิธีเทียบสีมีค่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองที่มีค่า < 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรหมายถึง ปริมาณฟีนอลที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่า detection limit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้