การดูดซับสารประกอบฟีนอลจากสารละลายโดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด

Biosorption of Phenolic Compounds from Aqueous Solution by Biomass of Marine Algae *Ulva reticulate*

อุไรวรรณ มณีโชติ ยุพดี ชัยสุขสันต์ และ เสาวภา โชติสุวรรณ

แผนกวิชาเคมี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ปัตตานี 9400

บทคัดย่อ

การดูดซับทางชีวภาพของสารประกอบอินทรีย์ โดยชีวมวลสาหร่าย เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง ได้ศึกษาความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล ได้แก่ ฟีนอล 4-คลอโรฟีนอล และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล โดยใช้ชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata* ที่พบมากบริเวณแหลมตาชี อ่าวปัตตานี โดยศึกษาระยะเวลาการดูดซับ ผลของพีเอช ปริมาณของสาหร่าย และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารประกอบฟีนอลต่อความสามารถดูดซับสารประกอบ ฟีนอลแบบกะ พบว่าตรวจไม่พบสารประกอบฟีนอลในตัวอย่างสาหร่าย และพบว่าตัวอย่างชีวมวลสาหร่ายดูดซับสาร ประกอบฟีนอลต่างๆ ได้ดีในเวลา 120 - 180 นาที พีเอชมีผลต่อความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยตัวอย่างสาหร่ายการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่พีเอช 5 นอกจากนี้การดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสาหร่ายเพิ่มขึ้นในช่วง 0.5 - 3.0 กรัม/ลิตร ข้อมูลสมดุลการดูดซับสารประกอบฟีนอลเป็นไปตามแบบจำลองของแลงค์เมียร์และฟรุนดลิช โดยตัวอย่างสาหร่ายผักกาดสามารถดูดซับฟีนอล คลอโรฟีนอล และไดคลอโรฟีนอลสูงสุด ตามแบบจำลองของแลงค์เมียร์ (Q_m) เท่ากับ 4.7, 9.2 และ 17.9 มก. /กรัม ตามลำดับ และ ตามแบบจำลองฟรุนดลิช (K) เท่ากับ 0.40, 1.74 และ 4.54 มก. /กรัม ตามลำดับ

คำสำคัญ: สารประกอบฟีนอล ชีวมวลสาหร่ายผักกาด แบบจำลองของแลงค์เมียร์และฟรุนดลิช คลอโรฟีนอล ไดคลอโรฟีนอล

Abstract

Biosorption of organic compounds by algal biomass is a potential technology for treating industrial wastewater. Adsorption of phenolic compounds including phenol, 4-chlorophenol (4-CP) and 2,4-dichlorophenol (2,4-DCP) in aqueous solution by marine algal *Ulva reticulata* available in large quantities in Pattani Bay was investigated. The kinetic profiles, the effect of pH, the amount of algae biomass and initial

concentrations of phenolic compounds on sorption of phenolic compounds by the algal biomass were examined using batch experiments. It was found that the phenol compounds were not detected in the biomass samples. The adsorption capacity of the algae samples for phenolic compounds was found to be optimum at the contact time of 120 - 180 minutes. The maximum uptake of three phenolic compounds by the algal biomass occurred at the solution pH of 5.0. In addition, the uptake capacity of the algal biomass increased as the amount of algal biomass increased from 0.5 to 3.0 g/L. The equilibrium data of phenolic compounds fitted well to the Langmuir and Freundlich isotherm models (r^2 > 0.99). The maximum sorption capacity of the biomass following Langmuir isotherm (Q_m) for phenol, 4-CP and 2,4-DCP were 4.7, 9.2 and 17.9 mg/g, respectively, while those derived from Freundlich isotherm (K) were 0.40, 1.74 and 4.54 mg/g, respectively.

Key words: Biosorption, *Ulva reticulata*, Phenolic compounds

1. บทนำ

สารประกอบกลุ่มฟีนอล (Phenolic compounds) เป็นสารที่ใช้มากทั้งในภาคเกษตรกรรม (สารฆ่าแมลง สารปราบศัตรูพืช) และอุตสาหกรรมต่างๆ (สิ่งทอ สีย้อม ผลิตกระดาษ ไม้แปรรูป ยาง น้ำมันปาล์ม น้ำยาล้างรูป และโรงงานกลั่นน้ำมัน) [1], [2], [3] สารประกอบฟีนอล ส่วนหนึ่งปนเปื้อนเข้าสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต [4]

สารประกอบฟีนอล จัดเป็นสารเคมีอันตรายมีความเป็นพิษสูง โดยเฉพาะฟีนอลสามารถแพร่เข้าสู่ร่างกาย โดยซึมผ่านทางผิวหนังได้ง่าย ทำให้เกิดอาการปวดหัว หน้ามืด ไอของฟีนอล ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจและตา ฟีนอลในสถานะของแข็งจะทำให้ผิวหนังถูกเผาไหม้หากมีการสัมผัส นอกจากนี้ยังจัดเป็นสารก่อมะเร็ง [5], [6] มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้มีสารประกอบกลุ่มฟีนอลได้สูงสุดไม่เกิน 1 mg/L [7] แต่ในน้ำทิ้งจากโรงงานไม้ยางพารา พบว่ามีปริมาณของเพนตะคลอโรฟีนอลสูงถึง 117 mg/L [8] ซึ่งโรงงานไม้ยางพารามีการใช้สารประกอบฟีนอล เป็นส่วน ผสมในน้ำยารักษาเนื้อไม้ประมาณ 14-18% [9] นอกจากนี้สารประกอบคลอโรฟีนอลสามารถสลายตัวในธรรมชาติที่อุณหภูมิ 210-310°C และสารอันตรายที่เกิดจากการสลาย ตัว ได้แก่ แก๊สพิษของไฮโดรเจนคลอไรด์ คาร์บอนมอ- นอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ [10], [11] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการลด หรือกำจัดสารกลุ่มนี้ในน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ วิธีการกำจัดสารประกอบกลุ่มนี้ออกจากน้ำทิ้งมีหลายวิธี ได้แก่ การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ [12] การใช้เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในการบำบัด [2], [3] และการใช้วิธีการทางชีวภาพในการบำบัด (ทั้งแบบใช้อากาศและแบบไร้อากาศ) [13] นอกจากนี้ ฟีนอลจากน้ำทิ้งยังสามารถบำบัดได้ โดยอาศัยการดูดซับด้วยสารทางชีวภาพ (Biosorbent) ได้แก่ จุลินทรีย์ [14] วัสดุเหลือใช้จากเกษตรกรรม [8], [14] เชื้อราชนิด *Phanerochaete chryosporium* สามารถกำจัดสารประกอบ ฟีนอลประเภท phenol, 2-chlorophenol (2-CP), 4-chlorophenol (4-CP) และ 2,4-dichloro-phenol (2,4-DCP) จากน้ำเสียได้ สำหรับวัสดุเหลือใช้

ทางการเกษตร มีราย งานการทดลองใช้ซังข้าวโพดแห้งดูดซับสารประกอบกลุ่ม ฟีนอลในน้ำทิ้ง พบว่าซังข้าวโพดสามารถดูดซับได้ 10 mg/g น้ำหนักแห้งของซังข้าวโพด [8]

Ulva reticulata หรือสาหร่ายผักกาด เป็นสาหร่ายที่พบเป็นจำนวนมากตลอดทั้งปีในอ่าวปัตตานี โดยพบมาก ในช่วงฤดูร้อนตามชายฝั่ง ซึ่งการเจริญเติบโตของสาหร่ายผักกาดตามชายฝั่ง ก่อให้เกิดปัญหาด้านการกำจัดของเสียบริเวณชายฝั่ง อันเนื่องมาจากการสะสมชีวมวลปริมาณสูง [15] และชาวบ้านไม่ได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ในงาน วิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำชีวมวลของสาหร่ายผักกาดซึ่งยังมีการใช้ประโยชน์น้อยมาทดลอง เป็นตัวดูดซับสาร ประกอบฟีนอล ได้แก่ ฟีนอล 4-คลอโรฟีนอล (4-CP) และ 2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4-DCP) เพื่อเป็นแนวทางในการนำวัสดุจากธรรมชาติที่หาง่าย และมีการใช้ประโยชน์น้อยในอ่าวปัตตานีมาเป็นตัวดูดซับชีวภาพ สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งน้ำธรรมชาติ และโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อไป

2. วัตถุประสงค์

ศึกษาความสามารถดูดซับสารประกอบกลุ่มฟีนอลจากสารละลายโดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulate*

3. อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 สารเคมี

ฟีนอล (AR grade, Panrec Quimica SA), 4-คลอโรฟีนอล (4-CP) (AR grade, Fluka) และ 2,4-ไดคลอโร ฟีนอล (2,4-DCP) (AR grade, Fluka) โดยเตรียมสารละลาย ตั้งต้น (stock solution) ความเข้มข้น 1,000 mg/L เก็บที่อุณหภูมิ 4 ^{0}C สำหรับการศึกษาต่อไป

3.2 เครื่องมือ

วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอล โดยการเติม 4-Aminoantipyrine และ Potassium Ferricyanide นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 500 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Vis-Spectrophotometer, GENESYS^{TM})

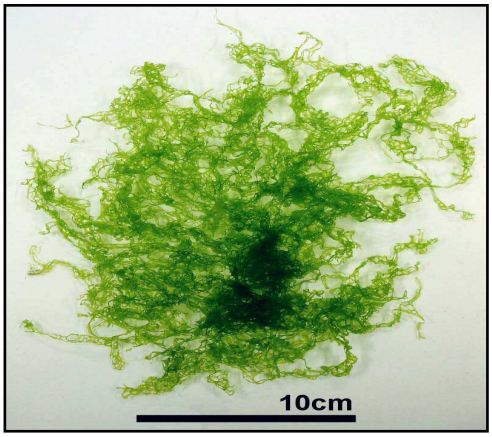
วิเคราะห์ปริมาณ 4-CP and 2,4-DCP โดยเทคนิคโครมาโทกราฟีสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, Hewlett - Packard: Agilent HP 1100)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata* จากแหลมตาชี อ่าวปัตตานี (รูปที่ 1) นำมาล้างด้วยน้ำประปาหลายๆ ครั้งตามด้วยล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 3 ครั้งก่อนนำไปผึ่งให้แห้ง

ก.



ข.

รูปที่ 1 สาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ในบริเวณชายฝั่งของแหลมตาชี อ่าวปัตตานี (ก) และ ลักษณะของสาหร่ายผักกาด (ข)

3.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

วิเคราะห์ปริมาณเถ้า ความชื้น ปริมาณโปรตีนและไนโตรเจน (Kjeldahl method) เยื่อใย (Digestion method) ไขมัน (Soxhlet extraction) ตามวิธีวิเคราะห์มาตรฐานของ AOAC [16] และสารประกอบฟีนอลรวม โดยสเปคโตรโฟโตมิตรี ตามวิธีวิเคราะห์มาตรฐานของ APHA [17]

3.3.3 ศึกษาการดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* แบบระบบกะ (Batch system)

3.3.3.1 การเตรียมสาหร่าย

นำตัวอย่างสาหร่ายซึ่งอบให้แห้งที่ 60 ^{o}C เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงในตู้อบมาบด ก่อนนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 20 และ 10 เมช เก็บตัวอย่างสาหร่ายที่ร่อนแล้วในถุงพลาสติกซิปล็อค และเก็บใน desiccator

3.3.3.2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

นำตัวอย่างสาหร่ายบดที่อบแห้ง มาเติมสารละลายสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ ที่มีความเข้มข้นชนิดละ 15 mg/L ในขวดรูปชมพู่ เขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็ว 200 rpm ที่อุณหภูมิห้อง (29.0 ± 1.0°C) วิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบฟีนอลที่เหลือ ณ เวลาต่างๆ คือ 0, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 360 นาที , 12 และ 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา กรอง และนำสารละลายที่กรองได้มาวิเคราะห์ปริมาณฟีนอล ด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี และ 4-CP และ 2,4-DCP โดย HPLC ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.3.3.3 ผลของ pH ต่อความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด

นำตัวอย่างสาหร่ายบดที่อบแห้ง 0.1 g มาเติมสารละลายสารประกอบฟีนอล ความเข้มข้น 5 mg/L สำหรับฟีนอล และ 10 mg/L สำหรับ 4-CP และ 2,4-DCP ที่มีค่า pH ต่างๆ กัน คือ 2-8 นำไปเขย่าที่ 200 rpm เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (29.0 ± 1.0°C) เมื่อครบเวลา กรองสาหร่ายออก นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์ปริมาณฟีนอล โดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี และ 4-CP และ 2,4-DCP โดย HPLC ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง นำค่า pH ที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองหัวข้อต่อไป

3.3.3.4 ผลของปริมาณชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

นำตัวอย่างสาหร่ายบดที่อบแห้งปริมาณต่างๆ คือ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 g/L มาเติมสารละลายสารประกอบฟีนอลความเข้มข้น 10 mg/L นำไปเขย่าที่ 200 rpm เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่

อุณหภูมิห้อง (29.0 ± 1.0°C) เมื่อครบเวลา กรองตัวอย่างสาหร่ายออก นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์ปริมาณฟีนอล โดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี และ 4-CP และ 2,4-DCP โดย HPLC ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง นำค่าปริมาณชีวมวลสาหร่ายที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองหัวข้อต่อไป

3.3.3.5 ผลของความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอล

นำตัวอย่างสาหร่ายที่อบแห้งปริมาณที่เหมาะ สมจากข้อ 3.3.3.4 มาเติมสารละลายสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ ซึ่งมี pH ที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.3.3 ในความเข้มข้นต่างๆ คือ 2.5-30.0 mg/L นำไปเขย่าที่ 200 rpm เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (29.0 ± 1.0°C) เมื่อครบเวลากรองตัวอย่างสาหร่ายออก นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์ปริมาณฟีนอล โดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี และ 4-CP และ 2,4-DCP โดย HPLC ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

จากข้อมูลที่ได้นำมาหาความสามารถสูงสุดในการดูดซับสารประกอบฟีนอลตามกลไกการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich isotherms

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata*

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ได้แก่ เถ้า ความชื้น โปรตีน ไนโตรเจน ไขมัน เยื่อใย และสารประกอบฟีนอลรวม แสดงในตารางที่ 1

เป็นที่น่าสังเกตว่า ตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ประกอบด้วยโปรตีน และไขมันในปริมาณน้อยกว่ากรณีสาหร่ายชนิดอื่นๆ เช่น สาหร่ายเทา *Spirogyra* spp. และสาหร่ายไก *Cladophora* spp. ซึ่งมีปริมาณโปรตีน และไขมันเท่ากับ 23.82, 3.08 และ 28.22, 6.81% (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ [18] นอกจากนี้ ตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* มีปริมาณเยื่อใยค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับสาหร่าย *Hypnea charoides* และ *Hypnea japonica* ที่มีปริมาณเยื่อใยเท่ากับ 50.3 ± 2.8 และ 53.2 ± 0.6% (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ [19] จะเห็นได้ว่าตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* น่าจะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพได้เนื่องจากมีปริมาณเยื่อใยค่อนข้างสูง และสูงกว่าปริมาณเยื่อใยของซังข้าวโพด (23.57% น้ำหนักแห้ง) [20] ที่มีการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสารประกอบฟีนอล [8]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของสาหร่ายผักกาด	**% (น้ำหนักแห้ง) ± SD**
ความชื้น	93.4 ± 0.7
เถ้า	21.7 ± 1.8
ไนโตรเจน	0.9 ± 0.1
โปรตีน	6.1 ± 0.3
ไขมัน	2.3 ± 0.3
เยื่อใย	53.5 ± 1.8
สารประกอบฟีนอลิกรวม	nd

SD = standard deviation, n = 3

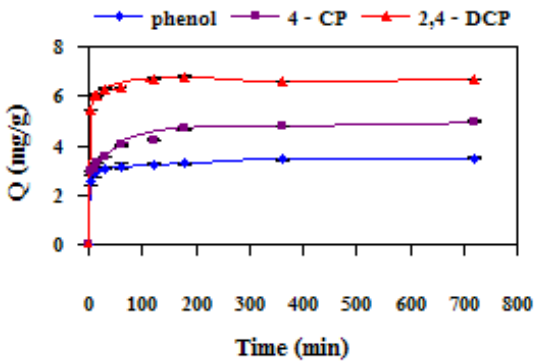
4.2 ความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลโดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata* แบบระบบกะ (Batch system)

ความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลโดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* รายงานใน

รูปของ Q ซึ่งหมายถึงปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ถูกดูดซับ (mg/L) ต่อปริมาณชีวมวลสาหร่ายที่ใช้ (g) ดังนั้นหน่วยของ Q คือ mg/g

4.2.1 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

การดูดซับสารประกอบฟีนอล เข้มข้นชนิดละ 15.0 mg/L โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* (2 g/L) ที่เวลาต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าชีวมวลสาหร่ายสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลได้รวดเร็ว ในช่วงเวลา 30 นาทีแรกของการทดลอง โดยที่ความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ เข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที สำหรับฟีนอล และ 2,4-DCP และ 180 นาที สำหรับ 4-CP (99%) ดังนั้นจึงเลือกเวลา 180 นาที สำหรับการทดสอบการดูดซับสารในหัวข้อต่อๆ ไป และความสามารถในการดูดซับสารคลอโรฟีนอลได้ดีกว่าฟีนอลสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ 2,4-DCP > 4-CP > phenol

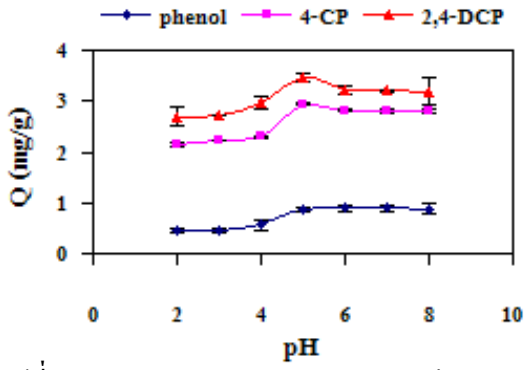


รูปที่ 2 ความสามารถดูดซับ (Q, mg/g) สารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด ที่เวลาต่างๆ (นาที) (ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิด 15.0 mg/L, ปริมาณชีวมวลสาหร่าย 2 g/L)

4.2.2 ผลของ pH ต่อความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

ความสามารถของตัวอย่างสาหร่าย *U. reticulata* ดูดซับสารประกอบฟีนอล เข้มข้น 10.0 mg/L ที่ pH ต่างๆ คือ 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0 และ 8.0 แสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า การดูดซับฟีนอลโดยตัวอย่างสาหร่ายเพิ่มขึ้น เมื่อ pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.0-5.0 และเริ่มคงที่ในช่วง pH 5.0-8.0 ที่ความเข้มข้น 5 mg/L สำหรับกรณี 4-CP และ 2,4-DCP ชีวมวลสาหร่ายสามารถได้ดูดซับสูงสุดที่ pH 5 และเริ่มคงที่ในช่วง pH 6-8 ดังนั้นจึงเลือกค่า pH ของสารละลาย เท่ากับ 5 สำหรับการศึกษาในหัวข้อต่อไป ที่ pH ของสารละลายในช่วง 2-8 ซึ่งสาร ประกอบฟีนอล (pK_a = 10) จะอยู่ในรูปของ uncharged molecule พบว่าความสามารถในการดูดซับสารประกอบ ฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสภาพพื้นผิวของสาหร่ายผักกาด ประกอบด้วยสาร โพลีแซคคาไรด์หลายชนิด ได้แก่ ulvan, cellulose, xyloglucan และ glucuronan สารประกอบเหล่านี้ประกอบ ด้วยหน่วยย่อย คือ กลูโกส และมีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ –COOH, –OH, $–NH_2$ ซึ่งจะมีประจุลบมากขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายมากกว่า 3 ในขณะเดียวกันสารประกอบฟีนอล มีสภาพสูญเสียโปรตอน (deprotonation) มากขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายมากขึ้น [21] ดังนั้นสารประกอบฟีนอล จึงมีโอกาสเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารพวกโพลีแซคคาไรด์บนพื้นผิวของชีวมวลสาหร่ายผักกาด ในช่วง pH 5-8 ความ สามารถในการดูดซับ

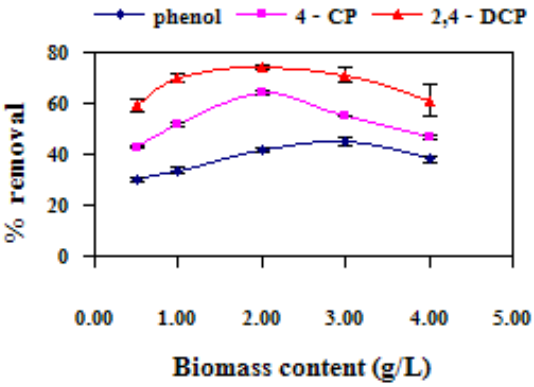
สารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาดเกิดขึ้นได้ดีในช่วง pH 5-8



รูปที่ 3 ความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิด โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด ที่ pH 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0 และ 8.0 (phenol เข้มข้น 5.0 mg/L, 4-CP, 2,4-DCP ชนิดละ 10.0 mg/L, ปริมาณชีวมวลสาหร่าย 2 g/L)

4.2.3 ปริมาณชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ที่เหมาะสมในการดูดซับสารประกอบฟีนอล

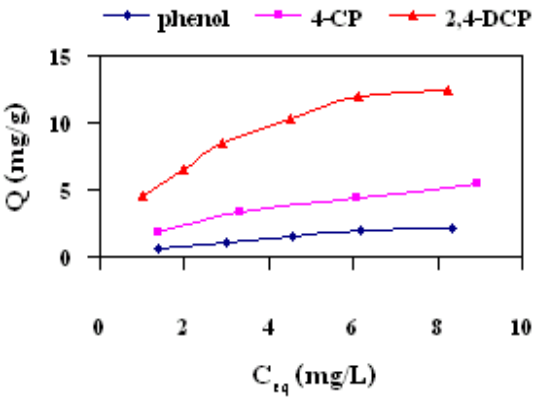
ผลการดูดซับฟีนอลเข้มข้น 5.0 mg/L และ 4-CP, 2,4-DCP เข้มข้น 10.0 mg/L โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ปริมาณต่าง ๆ คือ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 g/L แสดงในรูปที่ 4 จะเห็นว่าความสามารถการดูดซับสาร ประกอบฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของชีวมวลสาหร่ายเพิ่ม ขึ้นในช่วง 0.5-2.0 g/L และความสามารถในการดูดซับสารมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของตัวอย่างสาหร่ายเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ถึง 4.0 g/L โดยปริมาณตัวอย่างที่ใช้ 2.0 g/L ให้ค่าร้อยละการกำจัดได้สูงสุด ในกรณีของสาร 4-CP และ 2,4-DCP ส่วนกรณีการดูดซับฟีนอล ตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ 2.0 g/L และ 3.0 g/L มีค่าร้อยละการกำจัดสูงสุด (40 และ 43% ตามลำดับ) ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของชีวมวลสาหร่ายในการทดลองต่อไป คือ 2.0 g/L เพื่อเป็นการประหยัดและลดต้นทุนในการเตรียมชีวมวลสาหร่ายผักกาด



รูปที่ 4 ความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิด โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด ปริมาณต่าง ๆ (0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 g/L) (phenol เข้มข้น 5.0 mg/L, 4-CP, 2,4-DCP ชนิดละ 10.0 mg/L, pH = 5 ± 0.3)

4.2.4 ผลความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลต่อการดูดซับของชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

ผลการดูดซับสารประกอบฟีนอลทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ฟีนอล เข้มข้น 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 และ 15.0 mg/L, 4-CP เข้มข้น 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 และ 25.0 mg/L และ 2,4-DCP เข้มข้น 10.0, 15.0, 20.0, 25.0 และ 30.0 mg/L โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสามารถดูดซับ (Q, mg/g) สารประกอบฟีนอลแต่ละชนิด โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาดที่ความเข้ม ข้น ที่ภาวะสมดุล (C_{eq}, mg/L) (phenol เข้มข้นเริ่มต้น 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 และ 15.0 mg/L, 4-CP 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 และ 25.0 mg/L และ 2,4-DCP 10.0, 15.0, 20.0, 25.0 และ 30 mg/L, pH 5 ± 0.3)

พบว่า ชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มข้นของสารประกอบฟีนอลชนิดต่าง ๆ เพิ่มขึ้นจาก 2.5-30 mg/L จากข้อมูลนี้นำไปหาความสามารถดูดซับสูงสุดตาม Langmuir และ Freundlich isotherm

4.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสารประกอบฟีนอลโดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata*

ผลการศึกษาในข้อ 4.2.4 สามารถนำมาศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงค์เมียร์ (Langmuir) และ ฟรุนดลิช (Freundlich) ได้

แบบจำลองของแลงค์เมียร์ (Langmuir model)

$$\frac{C_{eq}}{Q} = \frac{1}{Q_m.b} + \frac{C_{eq}}{Q_m} \qquad (1)$$

เมื่อ C_{eq} = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/L)

Q = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

Q_m = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)

b = ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว

แบบจำลองของฟรุนดลิช (Freundlich model)

$$\log Q = \log K + \frac{1}{n}\log C_{eq} \qquad (2)$$

เมื่อ K = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

n = ค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

ตารางที่ 2 ไอโซเทอมของแลงค์เมียร์ และ ฟรุนดลิช ในการดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยตัวอย่างชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

Phenolic compounds	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	Q_m (mg/g)	b	r^2	K (mg/g)	n	r^2
Phenol	4.76	0.09	0.996	0.40	1.15	0.996
4 - CP	9.20	0.18	0.991	1.57	1.74	0.994
2,4 - DCP	17.98	0.31	0.991	4.54	1.84	0.994

การดูดซับสารประกอบกลุ่มฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด พบว่าการดูดซับ 4-CP และ 2,4-DCP โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด เป็นไปตามกลไกแบบแลงค์เมียร์และฟรุนดลิช เนื่องจาก r^2 จากทั้งสองกลไกมีค่าใกล้เคียงกัน (r^2 > 0.99) (ตารางที่ 2) แต่สำหรับการดูดซับฟีนอล มีแนวโน้มเป็นไปตามกลไกการดูดซับแบบฟรุนดลิชมาก กว่าแบบแลงค์เมียร์ เนื่องจาก r^2 จากทั้งสองกลไกมีค่าต่าง กัน ซึ่งกลไกการดูดซับแบบแลงค์เมียร์เป็นการดูดซับเรียง

กันเพียงชั้นเดียวเท่านั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับ และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะดูดซับ นอก จากนี้โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาดดูดซับฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP ได้สูงสุด (Q_m) เท่ากับ 4.7, 9.2 และ 17.9 mg/g ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถดูดซับสารประกอบ ฟีนอลโดยตัวดูดซับชีวภาพชนิดต่าง ๆ พบว่า ชีวมวลสาหร่ายมีความ สามารถดูดซับฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP ได้สูงกว่าตัวดูดซับชีวภาพชนิดอื่น ๆ ได้แก่ ชีวมวลเชื้อรา (*Phanerochaete chrysosporium*) มีความสามารถดูดซับ ฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP เท่ากับ 0.19, 0.23 และ 0.24 mg/g ตามลำดับ [14] ชีวมวลเห็ดนางฟ้า ซึ่งสามารถดูดซับฟีนอล และ 4-CP เท่ากับ 0.95 และ 1.47 mmol/g ตามลำดับ [22] ส่วนกากตะกอนมีความสามารถดูดซับ 4-CP และ 2,4-DCP เท่ากับ 1.50 และ 5.04 mg/g ตามลำดับ [23]

5. สรุปผลการทดลอง

องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของสาหร่ายผัก กาด พบว่ามีปริมาณเยื่อใยสูงถึง 53.5% ผลการศึกษา ความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟีนอลของชีวมวลสาหร่ายผักกาดแบบระบบกะ พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสารประกอบฟีนอล คือ 120-180 นาที และ pH มีผลต่อการดูดซับสารประกอบฟีนอล ซึ่งชีวมวลสาหร่ายผักกาด สามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลสูงสุดนสารละลายที่มี pH 5 และปริมาณชีวมวลของสาหร่ายผักกาด ก็มีผลต่อความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล ซึ่งเมื่อใช้ปริมาณตัวอย่างชีวมวลสาหร่าย 2.0 g/L ให้ค่าการกำจัดสารประกอบฟีนอลได้ดี นอกจากนี้ความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลโดยตัวอย่างสาหร่ายผักกาดจะเพิ่ม ขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลเพิ่มขึ้น โดยเป็นไปตามกลไกการดูดซับแบบแลงค์เมียร์ และฟรุนดลิช (r^2 >0.99) ซึ่งให้ค่าความสามารถดูดซับสูงสุด (Q_m) สำหรับสารประกอบฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP 4.76, 9.20 และ 17.98 mg/g ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำชีวมวลสาหร่ายผักกาดมาใช้กำจัดสาร ประกอบอินทรีย์กลุ่มฟีนอลที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำหรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย และ คณะวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตปัตตานี ที่สนับสนุนการวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] กฤษณล กีรติวิทยายุต, การหาปริมาณฟีนอลในแหล่งน้ำโดยใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตมิตรี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 2528.

[2] Wu, Y., Taylor, K. E., Biswas, N. and Bewtra, J.A., Comparison of Additive in the Remove of Phenol Compound by Peroxidase - catalyzed Polymerization, Water Research, Vol. 31, pp. 2699- 2704, 1997.

[3] Caza, N., Bewtra, J.A., Biswas, N. and Taylor, K.E, Removol of Phenolic Compounds from Synthetic Wastewater Using

Soybean Peroxidase, Water Research, Vol. 33, pp. 3012-3018, 1998.

[4] ทรงพล รดิศพงศ์, กรรณการ์ บุตรเอก และ ขนิษฐา อัศวชัยณรงค์, สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound) (ออนไลน์), สืบค้นจาก; www.dss.go.th/dssweb/st-articles/Files/pep_12_2546_phenolic.pdf, [15 ตุลาคม 2546].

[5] Armour, M.A., Hazardous Laboratory Chemicals Disposal Guide, The United State of America, CRC Press Inc, 1991.

[6] Buchanan, I.D., Nicell, J.A. and Wagner, M, Reactor Models for Horseradish Peroxidase – catalyzed Aromatic Removal, Journal of Environmental Engineering, Vol. 124, pp. 794-802, 1998.

[7] กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม, ฉบับที่ 3, 2539.

[8] จุวัลณีย์ แสงระวี, การศึกษาความเป็นไปได้ของซังข้าวโพดในการดูดซับสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกในน้ำทิ้ง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์, สงขลา, 2546.

[9] ทรงกลด จารุสมบัติ, อำไพ เปี่ยมอรุณ และ ธีระ วีณิน, กิจกรรม “Best Practice ของไม้ยางพาราแปรรูปไทย”, ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ ฯ, 54 น., 2549.

[10] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, ของเสียอันตราย (Hazardous wastes), ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพ ฯ, 650 น., 2546.

[11] กรมควบคุมมลพิษ, เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS) (ออนไลน์), สืบค้นจาก: http://www.pcd.go.th, [15 กันยายน 2549].

[12] Jung, M-W., Ahh, K-H., Lee, Y., Kim, K-P., Rhee, J-S., Park, J-T. and Paeng, K-J., Adsorption Characteristics of Phenol and Chlorophenol on Granular Activated Carbons (GAC), Microchemical Journal, Vol. 70, pp. 123-131, 2001.

[13] Bhattacharya, S.K., Yuan, Q. and Jin, P., Removal of Pentachlophenol from Wastewater by Combined Anaerobic–aerobic Treatment, Journal of Hazardous Materials, Vol. 49, pp. 143-154, 1996.

[14] Wu, J. and Yu, H-Q., Biosorption of Phenol and Chlorophenols from Aqueous Solution by Fungal Mycelia, Process Biochemistry, Vol. 41, pp. 44-49, 2006.

[15] Suzuki, Y., Kametani, T. and Maruyama, T., Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution by Nonliving *Ulva* Seaweed as Biosorbent, Water Research, Vol. 39, pp. 803-1808, 2005.

[16] AOAC, Official Methods of Analysis of AOAC International, 17th ed., Maryland, USA, 2000.

[17] APHA, AWWA and WEF, Standard Method for the Examination of Water and

Wastewater, 18th ed., New York: American Public Health Association, 1992.

[18] บุญมี ปิยะจันทร์, ปริมาณสารอาหารพื้นฐานบางชนิด และ เส้นใยใน *spirogyra* spp., ปัญหาพิเศษ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัย เชียงใหม่, เชียงใหม่, 56 น., 2530.

[19] Wong, K.H. and Cheung, P.C.K., Nutritional Evaluation of some Subtropical Red and Green-Seaweeds Part I – proximate Composition, Amino Acid Profiles and some Physico – chemical Properties, Food Chemistry, Vol. 71, pp. 475 – 482, 2000.

[20] จินดา สนิทวงศ์ฯ, สุวิทย์ อินทฤทธิ์ และ สถิต มั่งมีชัย, การใช้ซังข้าวโพดหวานเป็นอาหารหยาบสำหรับโครีดนมในช่วงแล้ง, น.1-11. รายงานผล งานวิจัยประจำปี 2541, กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพ ฯ, 2541.

[21] Navarro, A. E., Portales, R. F. Sun-Kou, M. R. and Llanos, B. P., Effect of pH on Phenol Biosorption by Marine Seaweeds, Journal of Hazardous Materials, Vol. 156, pp. 405-411, 2008.

[22] Denizli, A., Cihangir, N., Tuzmen, N. and Alsancak, G., Removal of Chlorophenols from Aquatic Systems Using the Dried and Dead Fungus *Pleurotus sajor caju*, Bioresource Technology, Vol. 96, pp. 59-62, 2005.

[23] Ruiying, G. and Jianlong, W., Effects of pH and Temperature on Isotherm Parameters of Chlorophenols Biosorption to Anaerobic Granular Sludge, Journal of Hazardous Materials, Vol. 145, pp. 398–403, 2007.