บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata*

สาหร่ายผักกาด *U. reticulata* กระจายอยู่ทั่วไปบริเวณบ้านตันหยงลุโละ ปากแม่น้ำยะหริ่ง บ้านดาโต๊ะ และแหลมตาชี อ่าวปัตตานี โดยที่บริเวณแหลมตาชีจะพบปริมาณสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* มากกว่าบริเวณอื่นๆ (รูปที่ 4.1 a) และสาหร่ายผักกาดเจริญเติบโตได้ดีตลอดทั้งปีแต่จะพบในปริมาณมากในช่วงเดือนเมษายนถึงมิถุนายน และกันยายนถึงตุลาคม โดยที่สาหร่ายผักกาด *U. reticulata* จะแผ่ราบไปกับพื้นโคลน และมีขนาดใหญ่ถึง 30 cm มีลักษณะเป็นแผ่นแบน หนา 50-80 ไมครอน และจะเป็นช่องทะลุมากมายทำให้ดูคล้ายกับเป็นตาข่าย (รูปที่ 4.1 b)

(a) **(b)**

รูปที่ 4.1 สาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ในบริเวณชายฝั่งของแหลมตาชี อ่าวปัตตานี (a) และลักษณะของสาหร่ายผักกาด (b)

สาหร่ายผักกาด *U. reticulata* เป็นสาหร่ายที่นิยมนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ (วันเพ็ญ, 2549; สุภาจรี, 2542) ซึ่งชาวบ้านในชุมชนส่วนใหญ่จะให้ความสำคัญกับสาหร่ายผมนาง *Gracilaria fisheri* มากกว่าสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* เนื่องจากสาหร่ายผมนางที่ตากแห้งสามารถส่งขายทำรายได้ให้กับชาวบ้านได้ แต่มีการนำสาหร่ายผักกาดมาใช้ประโยชน์น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับสาหร่ายสีเขียวชนิดอื่นๆ (วันเพ็ญ, 2549; สุภาจรี, 2542) ซึ่งส่วนใหญ่ก็ปล่อยให้ทับถมเน่าเสียบริเวณชายฝั่งแหลมตาชี อ่าวปัตตานี

Prince of Songkla University Pattani Campus

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์สาหร่ายผักกาด *U. reticulata* เป็นตัวดูดซับสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานไม้ยางพารา โดยทำการเก็บตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* เพื่อใช้ในการวิจัยในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2548 จากบริเวณห่างจากชายฝั่งของแหลมตาชีในระยะ 2 เมตร อ่าวปัตตานี จังหวัดปัตตานี

4.2 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata*

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ได้แก่ เถ้า ความชื้น โปรตีน ไนโตรเจน ไขมัน เยื่อใย และสารประกอบฟีนอลรวม แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

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

SD = standard deviation, n = 3

เป็นที่น่าสังเกตว่า ตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ประกอบด้วยโปรตีน และไขมันในปริมาณน้อยกว่ากรณีสาหร่ายชนิดอื่นๆ เช่น สาหร่ายเทา *Spirogyra* spp. และ สาหร่ายไก *Cladophora* spp. ซึ่งมีปริมาณโปรตีน และไขมันเท่ากับ 23.82, 3.08 และ 28.22, 6.81% (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ (บุญมี, 2530) นอกจากนี้ ตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* มีปริมาณเยื่อใยค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับสาหร่าย *Hypnea charoides* และ *Hypnea japonica* ที่มีปริมาณเยื่อใยเท่ากับ 50.3 ± 2.8 และ 53.2 ± 0.6% (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ (Wong and Cheung, 2000) จะเห็นได้ว่าตัวอย่างสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* น่าจะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพได้เนื่องจากมีปริมาณเยื่อใยค่อนข้างสูง และสูงกว่าปริมาณเยื่อใยของซังข้าวโพด (23.57% น้ำหนักแห้ง) (จินดาและคณะ, 2541) ที่มีการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสารประกอบฟีนอล (จุวัลณีย์, 2546)

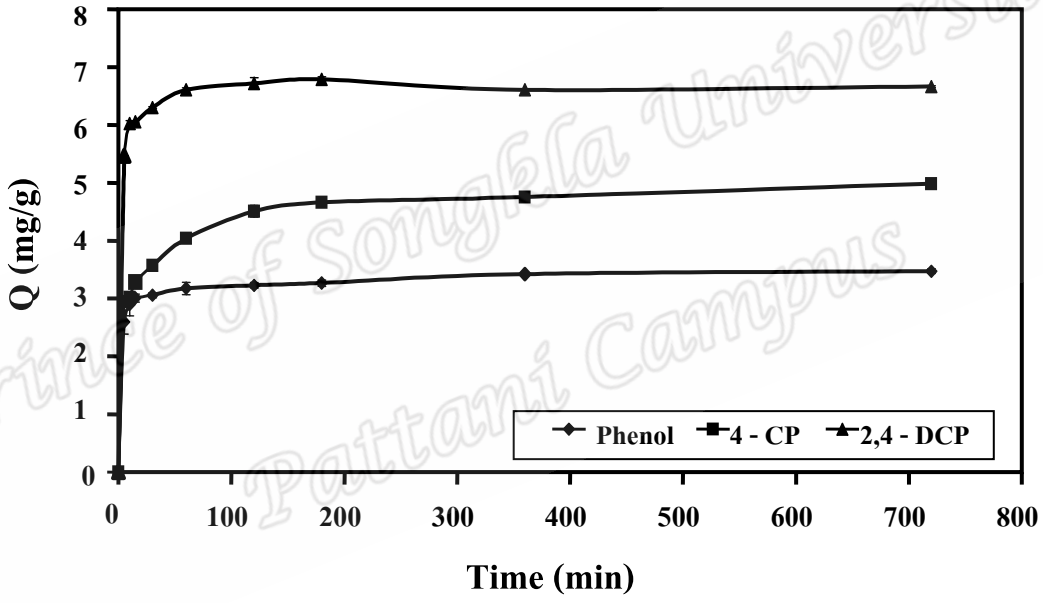
Prince of Songkla University Pattani Campus

4.3 ความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata* แบบระบบกะ (Batch system)

ความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* รายงานในรูปของ Q ซึ่งหมายถึง ปริมาณสารประกอบฟีนอลที่ถูกดูดซับ (mg/L) ต่อปริมาณชีวมวลสาหร่ายที่ใช้ (g) ดังนั้น หน่วยของ Q คือ mg/g

4.3.1 จลนศาสตร์ของการดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

การดูดซับสารประกอบฟีนอล เข้มข้นชนิดละ 15.0 mg/L โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* (2 g/L) ที่เวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสามารถดูดซับ (Q, mg/g) สารประกอบฟีนอลโดยชีวมวลสาหร่ายผักกาดที่เวลาต่างๆ (นาที) (ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิด 15.0 mg/L, ปริมาณชีวมวลสาหร่าย 2 g/L)

จากรูป 4.2 แสดงให้เห็นว่าชีวมวลสาหร่ายผักกาดสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิดได้รวดเร็วในช่วงเวลา 30 นาทีแรกของการทดลอง เนื่องจากช่วงแรกของการทดลองความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมีค่าสูง และชีวมวลสาหร่ายมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูง (actives adsorption sites) จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดลอง และเริ่มลดลงจนเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งมีความเป็นไปได้เนื่องจากสภาพพื้นผิวของชีวมวล

Prince of Songkla University Pattani Campus

สาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับต่ำลง ทำให้โมเลกุลของสารประกอบฟีนอลแพร่เข้าสู่รูพรุนของชีวมวลสาหร่ายเป็นไปได้ยากขึ้นจึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง และคงที่ในที่สุด (Senel *et al*., 2006) 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

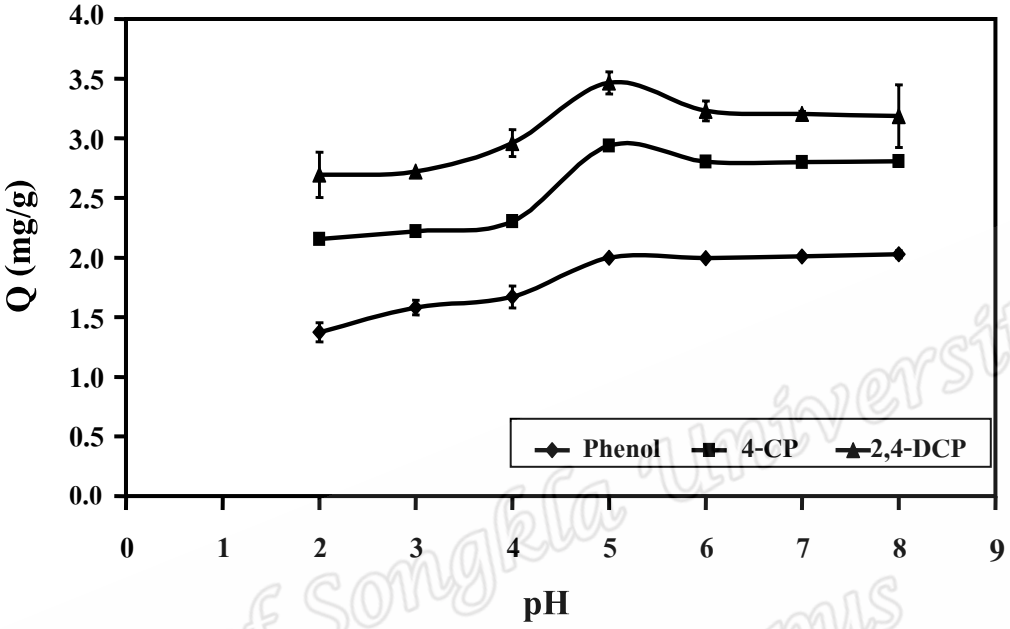
ลำดับการดูดซับสารโดยชีวมวลสาหร่ายผักกาดนี้สอดคล้องกับกรณีของตัวดูดซับที่เป็นชีวมวลเชื้อรา *Phanerochaete chryosporium* ซึ่งรายงานโดย Wu *et al.* (2006) คือ 2,4-DCP > 4-CP > 2-CP > phenol ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพื้นผิวของชีวมวลสาหร่ายและผนังเซลล์ของเชื้อราต่างประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์ที่มีองค์ประกอบคล้ายคลึงกัน จึงทำให้มีการดูดซับที่คล้ายกัน

การดูดซับสารประกอบกลุ่มฟีนอลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูง ซึ่งระยะเวลาสมดุลของการดูดซับสารโดยตัวดูดซับต่างชนิดกันจะมีค่าแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ Hypersol-MacronetTM มีเวลาในการดูดซับฟีนอลและคลอโรฟีนอลเข้าสู่สภาวะคงที่ที่ 20 วัน (Streat and Sweetland, 1997) ในขณะที่กากตะกอนมีการดูดซับเข้าสู่สภาวะคงที่ที่เวลา 4 ชั่วโมงสำหรับการดูดซับฟีนอล (Yenkie and Natarajan, 1993) และถ่านกัมมันต์ที่เวลา 20 ชั่วโมง (Ravi *et al*., 1998) อย่างไรก็ตามกรณีของเส้นใย polyamide (polyamide hollow fibers) พบว่าความสามารถในการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก และเข้าสู่สภาวะคงที่ที่เวลา 30 นาที (Senel *et al*., 2006) ความแตกต่างของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ของการดูดซับนี้อาจเนื่องมาจากหลายปัจจัย เช่นโครงสร้างของตัวดูดซับ (ได้แก่ ความมีรูพรุน พื้นที่ผิว) ปริมาณของตัวดูดซับ สมบัติของตัวถูกดูดซับ ซึ่งได้แก่ ขนาดของโมเลกุล และความสามารถในการละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ ตลอดจนอัตราเร็วในการเขย่า ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ ในขณะที่บริเวณที่มีความไวในการดูดซับสูง (actives adsorption sites) จะเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดอัตราเร็วในการดูดซับสารประกอบกลุ่มฟีนอล (Senel *et al*., 2006)

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.3.2 ผลของ pH ต่อความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด

ความสามารถของตัวอย่างสาหร่ายดูดซับสารประกอบฟีนอล 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 4.3



รูปที่ 4.3 ความสามารถดูดซับ (Q, mg/g) สารประกอบฟีนอลแต่ละชนิด โดยชีวมวลสาหร่าย ที่ pH 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0 และ 8.0 (ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอล แต่ละชนิด 10.0 mg/L, ปริมาณชีวมวลสาหร่าย 2 g/L)

จากรูป 4.3 แสดงให้เห็นว่า 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

จากการศึกษาความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลโดยชีวมวลสาหร่ายผักกาดที่ pH ของสารละลายในช่วง 2-8 ซึ่งสารประกอบฟีนอล (pK_a = 10) จะอยู่ในรูปของ uncharged molecule พบว่าความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสภาพพื้นผิวของสาหร่ายผักกาดประกอบด้วยสารโพลีแซคคาไรด์หลายชนิด ได้แก่ ulvan, cellulose, xyloglucan และ glucuronan สารประกอบเหล่านี้ประกอบด้วยหน่วยย่อย คือ กลูโกส และมีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ –COOH, –OH, $–NH_2$ ซึ่งจะมีประจุลบมากขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายมากกว่า 3 ในขณะเดียวกันสารประกอบฟีนอล มีสภาพสูญเสียโปรตอน (deprotonation)

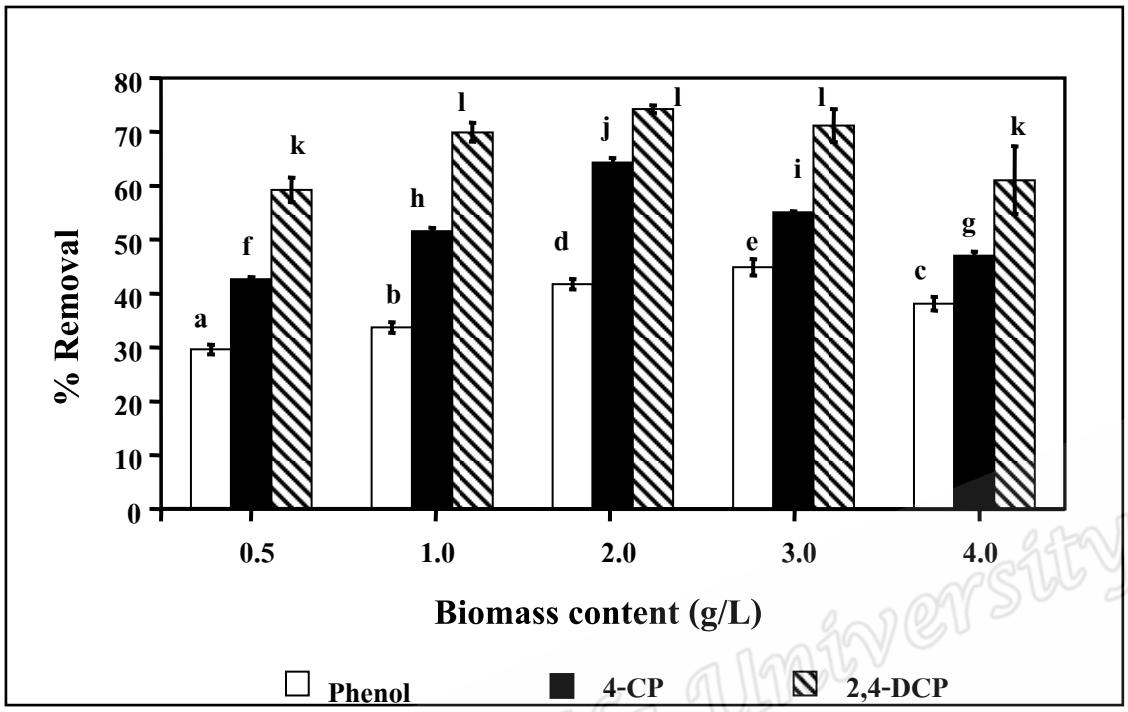
Prince of Songkla University Pattani Campus

มากขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายมากขึ้น (Navarro *et al*., 2008) ดังนั้นสารประกอบฟีนอลจึงมีโอกาสเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารพวกโพลีแซคคาไรด์บนพื้นผิวของชีวมวลสาหร่ายผักกาดในช่วง pH 5-8 ความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟีนอลโดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด เกิดขึ้นได้ดีในช่วง pH 5-8 ซึ่งใกล้เคียงกับชีวมวลตะกอนแห้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่สามารถดูดซับฟีนอลได้ดีในช่วง pH 6-8 (Thawornchaisit and Pakulanon, 2007) ชีวมวลเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* และ ชีวมวลเห็ดนางฟ้า (*Pleurotus sajor caju*) ที่สามารถดูดซับฟีนอล และ คลอโรฟีนอล (2-CP, 4-CP และ 2,4,6-TCP) ได้ดีในช่วง pH 6-8 (Denizli *et al*., 2004; Denizli *et al*., 2005) เนื่องจากสาหร่ายผักกาด ตะกอนแห้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* และเห็ดนางฟ้า เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ มีลักษณะพื้นผิวดูดซับที่เป็นสารพวกโพลีแซคคาไรด์เช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสารอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ส่วนชีวมวลขี้เถ้าแกลบดำสามารถดูดซับฟีนอลได้ดีในช่วง pH 1-2 ซึ่งต่างกับชีวมวลสาหร่ายผักกาด ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวของขี้เถ้าแกลบดำนอกจากประกอบด้วยเซลลูโลสแล้วยังมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นในสภาวะที่สารละลายมีค่า pH ในช่วง 1-2 เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ดีระหว่างฟีนอลกับพื้นผิวที่มีซิลิกาของชีวมวลขี้เถ้าแกลบดำ (จรรยา, 2546)

4.3.3 ปริมาณชีวมวลสาหร่ายผักกาด ที่เหมาะสมในการดูดซับสารประกอบฟีนอล

ผลการดูดซับฟีนอลเข้มข้น 5.0 mg/L และ 4-CP, 2,4-DCP เข้มข้น 10.0 mg/L โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาดปริมาณต่างๆ คือ 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 g/L แสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลที่ศึกษาไม่เท่ากัน เนื่องจากความสามารถในการดูดซับฟีนอล 4-CP และ 2,4-DCP โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* แตกต่างกัน ดังนั้นถ้าใช้ความเข้มข้นของฟีนอลเท่ากับ 4-CP และ 2,4-DCP จะทำให้หลังกระบวนการดูดซับมีฟีนอลเหลืออยู่ในปริมาณสูงเกินไป

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.4 ความสามารถกำจัดสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิด (% Removal) โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด ปริมาณต่างๆ (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)
อักษร a-k แสดงความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05)

จากรูป 4.4 แสดงให้เห็นว่าความสามารถการดูดซับสารประกอบฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของชีวมวลสาหร่ายเพิ่มขึ้นในช่วง 0.5-2.0 g/L และความสามารถในการดูดซับสารมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของตัวอย่างสาหร่ายเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ถึง 4.0 g/L โดยปริมาณตัวอย่างที่ใช้ 2.0 g/L ให้ค่าร้อยละการกำจัดได้สูงสุด ในกรณีของสาร 4-CP และ 2,4-DCP ส่วนกรณีการดูดซับฟีนอลตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ 2.0 g/L และ 3.0 g/L มีค่าร้อยละการกำจัดสูงสุด (40 และ 43% ตามลำดับ) ดังนั้นจึงเลือกปริมาณของชีวมวลสาหร่ายในการทดลองต่อไปคือ 2.0 g/L เพื่อเป็นการประหยัดและลดต้นทุนในการเตรียมชีวมวลสาหร่ายผักกาด

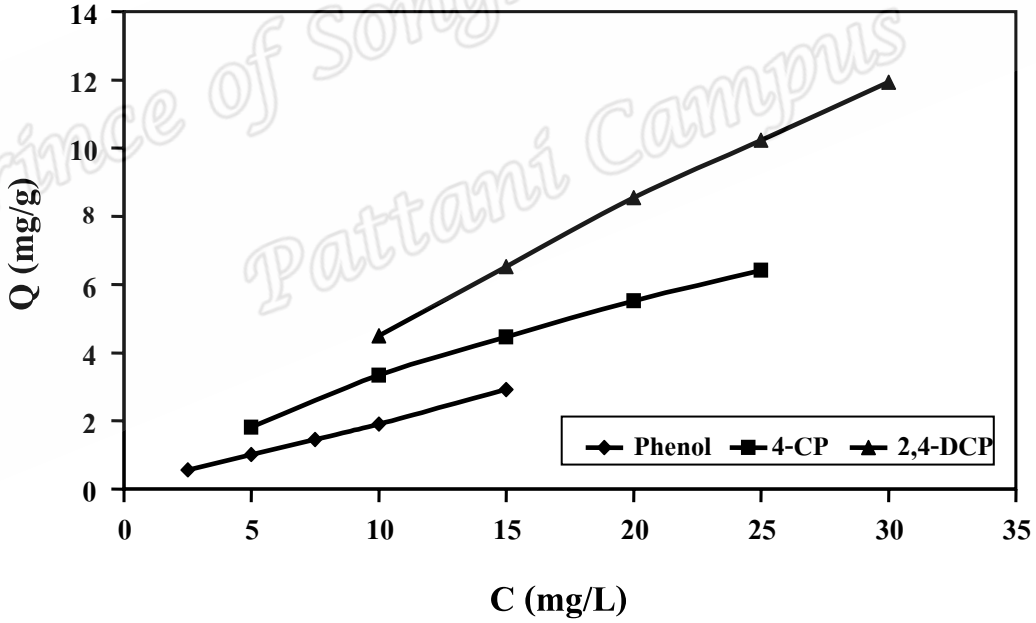
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟีนอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณชีวมวลสาหร่ายผักกาดแต่เมื่อปริมาณของชีวมวลสาหร่ายเพิ่มมากขึ้นกว่า 4 g/L ความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟีนอลลดลง ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการดูดซับเกิดการยึดเกาะระหว่างสารประกอบฟีนอลกับพื้นผิวของชีวมวลสาหร่าย เมื่อปริมาณชีวมวลสาหร่ายมากขึ้นก็จะทำให้ในสารละลายมีชีวมวลที่มีความหนาแน่นสูง ฉะนั้นโอกาสที่สารประกอบฟีนอล

Prince of Songkla University Pattani Campus

จะเข้าเกาะติดบนพื้นผิวชีวมวลสาหร่ายก็เป็นไปได้ยากขึ้น จึงทำให้ความสามารถดูดซับลดลงเช่นเดียวกับ Thawornchaisit and Pakulanon (2007) ที่รายงานความสามารถดูดซับฟีนอลด้วยกากตะกอน ความเข้มข้นของกากตะกอนมีผลต่อความสามารถดูดซับฟีนอล ซึ่งความสามารถดูดซับฟีนอลลดลงจาก 94 ถึง 5 mg/g เมื่อปริมาณของกากตะกอนเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 10 g/L

4.3.4 ผลความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลต่อการดูดซับของชีวมวลสาหร่ายผักกาด

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 แสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งช่วงความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลที่ศึกษาไม่เท่ากัน เนื่องจากว่าความสามารถในการดูดซับฟีนอล 4-CP และ 2,4-DCP โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* แตกต่างกัน หากใช้ความเข้มข้นของฟีนอลในช่วงเดียวกับ 4-CP และ 2,4-DCP จะทำให้หลังกระบวนการดูดซับมีฟีนอลเหลืออยู่ในสารละลายสูงเกินไป

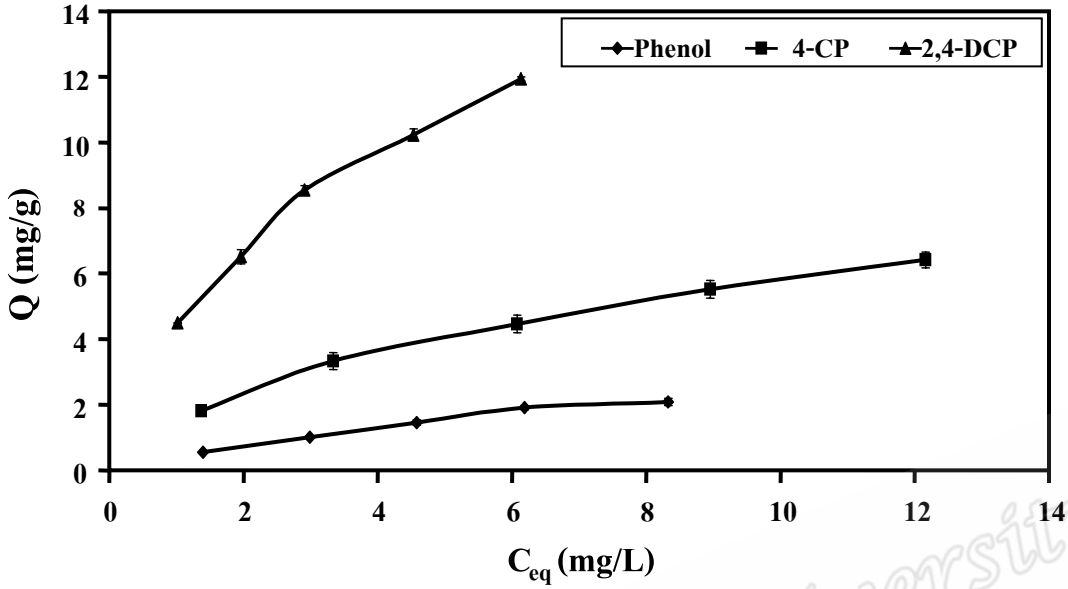


รูปที่ 4.5 ความสามารถดูดซับ (Q, mg/g) สารประกอบฟีนอลแต่ละชนิด โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด ที่ความเข้มข้นต่างๆ (phenol เข้มข้นเริ่มต้น 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 และ 15.0 mg/L, 4-CP 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 และ 25.0 mg/L และ 2,4-DCP 10.0, 15.0, 20.0, 25.0 และ 30 mg/L, pH 5 ± 0.3)

Prince of Songkla University Pattani Campus

จากรูป 4.5 จะเห็นว่าชีวมวลสาหร่ายดูดซับสารเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ เพิ่มขึ้นจาก 2.5-30.0 mg/L โดยสามารถดูดซับสารคลอโรฟีนอล 2,4-DCP ได้สูงสุดและสูงกว่า 4-CP และฟีนอลมากทั้งนี้อาจเนื่องจาก ฟีนอลมีความเป็นขั้วสูงกว่า 4-CP และ 2,4-DCP เพราะว่าพวกสารฮาโลเจน (-Cl) จะไปลดความมีขั้วของสาร (เกรียงศักดิ์, 2546) ฟีนอลมีความสามารถละลายน้ำ (93 g/L) ซึ่งสูงกว่า 4-CP (27 g/L) และ 2,4-DCP (0.5 g/L) (Denizli *et al*., 2005) ความสามารถดูดซับสารเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถละลายน้ำลดลงและความสามารถละลายในไขมัน ซึ่งอธิบายในรูปของ K_{ow} (Octanol-water partition coefficient) มีค่าสูงขึ้น (Wu and Yu, 2006) โดย 2,4-DCP มีค่า K_{ow} (1,698.2) ที่สูงกว่า 4-CP (245.5) และ ฟีนอล (28.8) (Aksu and Yenner, 1998) และนอกจากนี้ 2,4-DCP มีหมู่แทนที่ (-Cl) มากกว่า 4-CP และ ฟีนอล ดังนั้น 2,4-DCP จะสามารถยึดเกาะบนพื้นผิวชีวมวลสาหร่ายผักกาดได้มากกว่า 4-CP และ ฟีนอลจึงทำให้ความสามารถดูดซับ 2,4-DCP สูงกว่า 4-CP และ ฟีนอล ในสภาวะแบบระบบกะ

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับกรณีของกากตะกอนความสามารถดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 4 ถึง 110 mg/L แต่เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นมากกว่า 110 mg/L ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นผลในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลกับพื้นผิวกากตะกอน (Thawornchaisit and Pakulanon, 2007) เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขี้เลื่อยหวาย ความสามารถดูดซับฟีนอลเพิ่มขึ้นจาก 23.4 ถึง 140.7 mg/g เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 25 ถึง 200 mg/L (Hameed and Rahman, 2008) และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากแกลบความสามารถดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 3.9×10^{-5} ถึง 2.4×10^{-4} mol/g เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 3.2 mmol/L (Kennedy *et al*., 2007) นอกจากนี้ ขี้เถ้าก็สามารถดูดซับฟีนอลและออโธคลอโรฟีนอลได้เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 75 และ 100 mg/L (Mukherjee *et al*., 2006)



รูปที่ 4.6 ความสามารถดูดซับ (Q, mg/g) สารประกอบฟีนอลแต่ละชนิด โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาดที่ความเข้มข้น 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)

จากรูป 4.6 แสดงให้เห็นความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟีนอลทั้ง 3 ชนิด โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด ที่ความเข้มข้นสารประกอบฟีนอล ณ สภาวะสมดุล ซึ่งจากผลการศึกษานี้สามารถนำไปวิเคราะห์กลไกการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich ต่อไป

4.3.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด

ผลการศึกษาในข้อ 4.3.4 สามารถนำมาศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich ได้

แบบจำลองของแลงค์เมียร์ (Langmuir model)

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

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

Q = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

Q_m = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)

b = ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว

Prince of Songkla University Pattani Campus

แบบจำลองของฟรุนดิช (Freundlich model)

$$\log Q = \log K_F + \frac{1}{n}\log C_{eq} \quad \text{———(2)}$$

เมื่อ K = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)
n = ค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

ความหมายของค่า K และ 1/n ตามสมการของฟรุนดิชแสดงดังตารางที่ 4.2

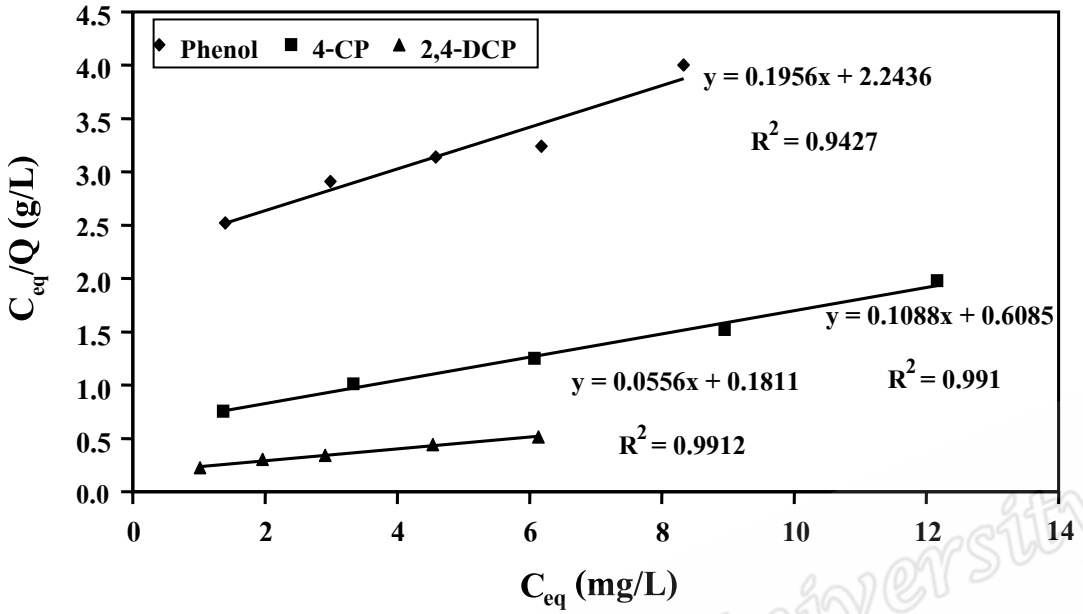
ตารางที่ 4.2 อธิบายความหมายของค่า K และ 1/n จากสมการฟรุนดิช

1/n	K	คำอธิบาย
ต่ำ	สูง	ความสามารถในการดูดซับสูง และจะเปลี่ยนตามความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในอัตราที่ไม่สูงนัก
	ต่ำ	ความสามารถในการดูดซับต่ำในทุกช่วงความเข้มข้น
สูง	สูง	ความสามารถในการดูดซับสูงมากเมื่อความเข้มข้นสูง และความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างมากเมื่อความเข้มข้นต่ำ
	ต่ำ	ความสามารถในการดูดซับสูงเมื่อความเข้มข้นสูง และความสามารถในการดูดซับต่ำเมื่อความเข้มข้นต่ำ

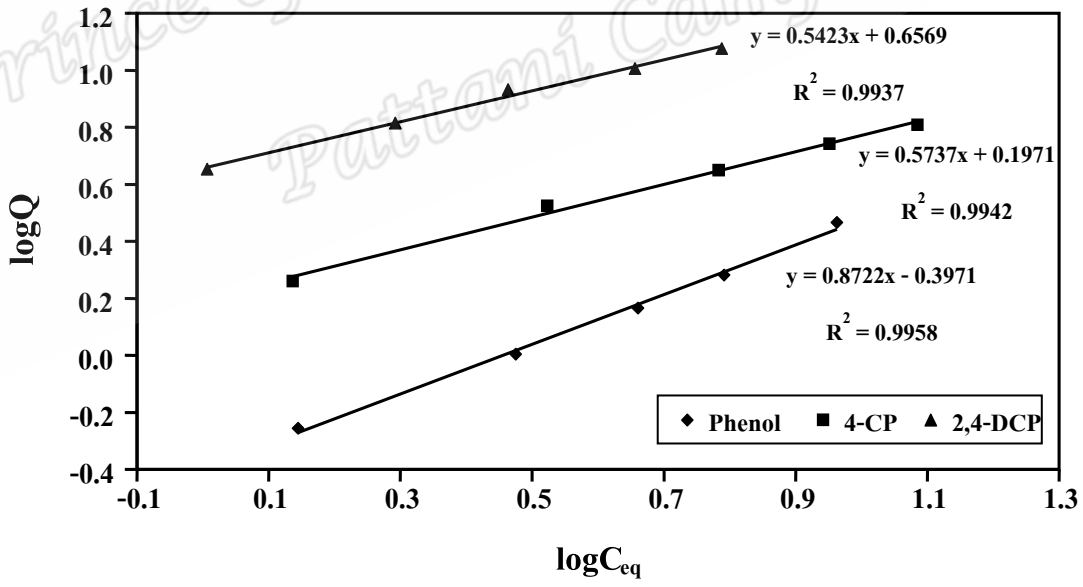
ที่มา: สิริชื่น (2543)

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงค์เมียร์ (สมการ 1) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{eq}/Q กับ ค่า C_{eq} ได้กราฟเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 4.7 และจากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (สมการ 2) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า logQ กับ ค่า $\log C_{eq}$ ได้กราฟเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งค่าคงที่ Q_m และ b (ตามแบบจำลองของแลงค์เมียร์) และค่าคงที่ K และ n (ตามแบบจำลองของฟรุนดิช) แสดงในตารางที่ 4.3

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.7 ไอโซเทอร์มของแลงค์เมียร์ในการดูดซับสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ โดยตัวอย่างชีวมวลสาหร่ายผักกาด



รูปที่ 4.8 ไอโซเทอร์มของฟรุนดิช ในการดูดซับสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ โดยตัวอย่างชีวมวลสาหร่ายผักกาด

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 4.3 ไอโซเทอร์มของแลงค์เมียร์ และฟรุนดิช ในการดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยตัวอย่างชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

Phenolic compounds	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	Q_m(mg/g)	b	r^2	K (mg/g)	1/n	r^2
Phenol	4.76	0.09	0.943	0.40	0.87	0.996
4 - CP	9.20	0.18	0.991	1.57	0.57	0.994
2,4 - DCP	17.98	0.31	0.991	4.54	0.54	0.994

การดูดซับสารประกอบกลุ่มฟีนอลโดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด พบว่าการดูดซับ 4-CP และ 2,4-DCP โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด เป็นไปตามกลไกแบบแลงค์เมียร์และฟรุนดิช เนื่องจาก r^2 จากทั้งสองกลไกมีค่าใกล้เคียงกัน ($r^2 > 0.99$) (ตารางที่ 4.3) แต่สำหรับการดูดซับฟีนอล มีแนวโน้มเป็นไปตามกลไกการดูดซับแบบฟรุนดิชมากกว่าแบบแลงค์เมียร์ เนื่องจาก r^2 จากทั้งสองกลไกมีค่าต่างกัน ซึ่งกลไกการดูดซับแบบแลงค์เมียร์เป็นการดูดซับเรียงกันเพียงชั้นเดียวเท่านั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับ และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะดูดซับ นอกจากนี้โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ (Gimbert *et al.*, 2008) โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาดดูดซับฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP ได้สูงสุด (Q_m) เท่ากับ 4.7, 9.2 และ 17.9 mg/g ตามลำดับ

การดูดซับแบบฟรุนดิช เป็นกลไกที่อธิบายการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับเรียงกันหลายชั้น ด้วยพันธะอ่อนๆ จากตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ K และ 1/n ที่ได้แสดงถึงประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบฟีนอลด้วยชีวมวลสาหร่ายผักกาด ซึ่งฟีนอล มีค่า K ต่ำ และ 1/n สูงกว่า แสดงว่าความสามารถในการดูดซับสูงเมื่อความเข้มข้นสูงและความสามารถในการดูดซับต่ำเมื่อความเข้มข้นต่ำ ส่วน 4-CP และ 2,4-DCP มีค่า K สูง และ 1/n ต่ำกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการดูดซับสูงและจะเปลี่ยนตามความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในอัตราที่ไม่สูงนัก ซึ่งในการวิจัยนี้ความสามารถในการดูดซับ 4-CP และ 2,4-DCP สูงกว่ากรณีฟีนอลโดยมีความสามารถดูดซับสำหรับฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP (K) เท่ากับ 0.40, 1.57 และ 4.54 mg/g ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลโดยตัวดูดซับชีวภาพชนิดต่างๆ พบว่า ชีวมวลสาหร่ายผักกาดมีความสามารถดูดซับฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP ได้สูงกว่าตัวดูดซับชีวภาพ ชนิดอื่นๆ ได้แก่ ชีวมวล *Phanerochaete chrysosporium* ซึ่งค่า Q_m สำหรับฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP เท่ากับ 0.19, 0.23 และ 0.24 mg/g ตามลำดับ (Wu and Yu, 2006) ส่วนชีวมวลเห็ดนางฟ้ามี

Prince of Songkla University Pattani Campus

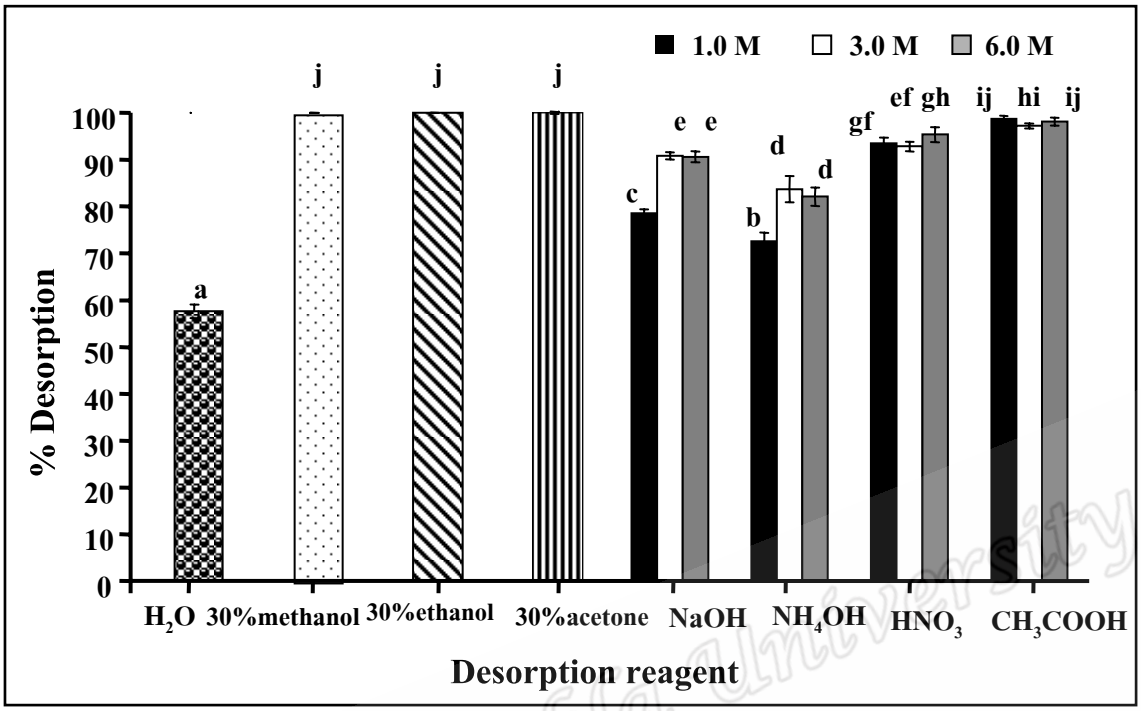
ค่า Q_m สำหรับฟีนอล และ 4-CP เท่ากับ 0.95 และ 1.47 mmol/g ตามลำดับ (Denizli *et al*., 2005) และกากตะกอนมีความสามารถดูดซับ 4-CP และ 2,4-DCP ได้สูงสุดเท่ากับ 1.50 และ 5.04 mg/g ตามลำดับ (Ruiying and Jianlong, 2007) ส่วนซังข้าวโพดที่ล้างด้วยเบส กรด และน้ำกลั่น มีความสามารถในการดูดซับเพนตะคลอโรฟีนอล (PCP) ได้สูงสุด (Q_m) เท่ากับ 9.66, 5.88 และ 8.40 mg/g ตามลำดับ (จุวัลณีย์, 2546) จะเห็นได้ว่าชีวมวลสาหร่ายผักกาด มีความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟีนอลสูงกว่าซังข้าวโพด อาจเนื่องจากว่าชีวมวลสาหร่ายผักกาดมีปริมาณเยื่อใย (53.5 % น้ำหนักแห้ง) สูงกว่าซังข้าวโพด (23.57% น้ำหนักแห้ง) เพราะปริมาณเยื่อใยเป็นตัวบ่งชี้ความมีรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับที่มีรูพรุนสูง จะส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นด้วย

จากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าชีวมวลสาหร่ายผักกาดสามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการกำจัดสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำได้โดยต้องมีการศึกษาในรายละเอียดการประยุกต์ใช้ส่วนหนึ่งคือความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ จึงได้ศึกษากระบวนการ sorption-desorption ของสารประกอบฟีนอล และได้รายงานผลในหัวข้อ 4.3.6

4.3.6 ผลของกระบวนการ Sorption–Desorption ของสารประกอบฟีนอลบนพื้นผิวชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata*

ผลการชะสารประกอบฟีนอลจากชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ที่ผ่านกระบวนการดูดซับฟีนอล 10.0 mg/L, 4-CP, 2,4-DCP ชนิดละ 15.0 mg/L โดยใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ได้แก่ 30% methanol, 30% ethanol, 30% acetone, H_2O และ NaOH, NH_4OH, HNO_3, CH_3COOH ที่ความเข้มข้น 1.0, 3.0 และ 6.0 M แสดงในรูป 4.9-4.10

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.9 ความสามารถในการชะฟีนอลโดยสารเคมีชนิดต่างๆ คือ methanol, ethanol, acetone, NaOH, NH_4OH, HNO_3, CH_3COOH และ H_2O (phenol 10.0 mg/L, pH 5 ± 0.3, เวลาการชะ 1 ชั่วโมง)

อักษร a-j แสดงความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

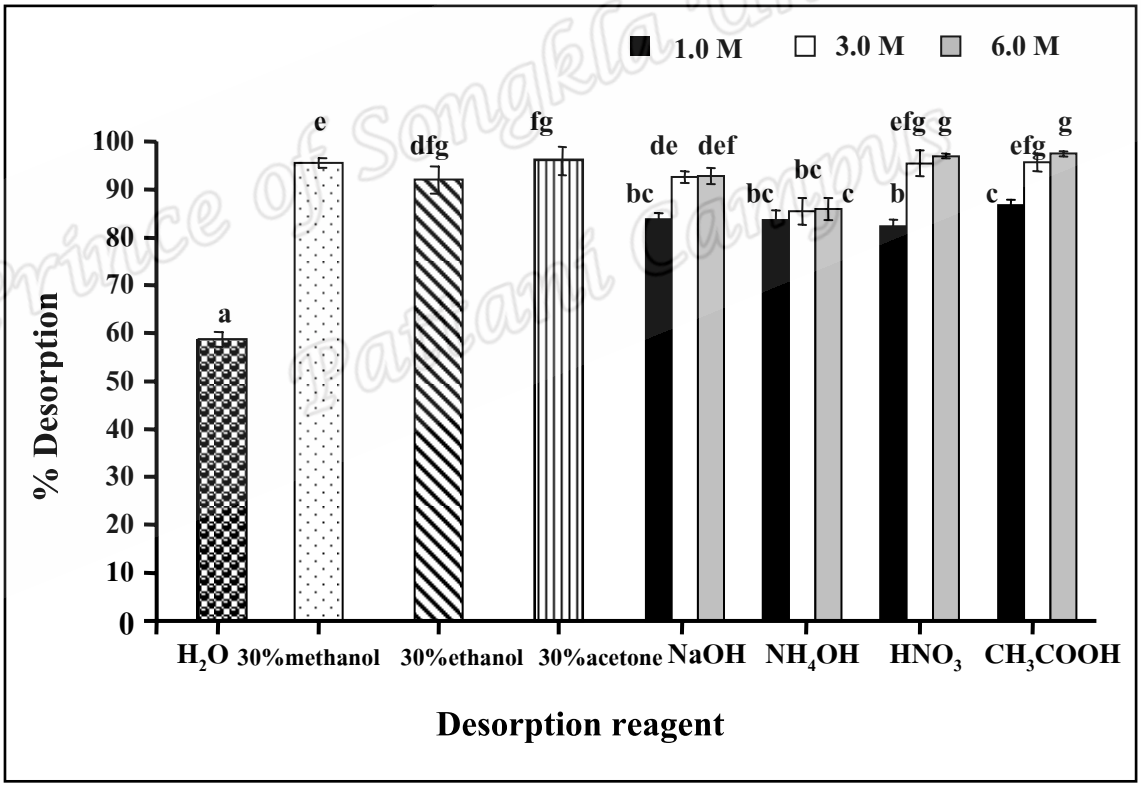
จากรูป 4.9 แสดงให้เห็นว่า 30% methanol, 30% ethanol และ 30% acetone สามารถชะฟีนอลได้สูงสุดเท่ากับ 100% รองลงมาคือ 1.0 M CH_3COOH, 6.0 M CH_3COOH, 3.0 M CH_3COOH, 6.0 M HNO_3, 1.0 M HNO_3, 3.0 M HNO_3, 3.0 M NaOH, 6.0 M NaOH, 3.0 M NH_4OH 6.0 M NH_4OH, 1.0 M NaOH และ 1.0 M NH_4OH มีความสามารถในการชะฟีนอลได้เท่ากับ 98.8, 98.1, 97.2, 95.4, 93.5, 92.8, 90.8, 90.6, 83.7, 82.1, 78.5 และ 72.6% ตามลำดับ ซึ่งสารเคมีทุกชุดการทดลองจะให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (H_2O) ที่สามารถชะฟีนอลได้เพียง 57.6% และนอกจากนี้ CH_3COOH ที่ความเข้มข้น 1.0 และ 6.0 M มีความสามารถชะฟีนอลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับ 30% methanol, 30% ethanol และ 30% acetone ส่วน HNO_3 ที่ความเข้มข้นต่างๆ สามารถชะฟีนอลได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จะเห็นได้ว่าสารเคมีต่างๆ ได้แก่ 30% methanol, 30% ethanol, 30% acetone และ CH_3COOH เข้มข้น 1.0, 3.0 และ 6.0 M มีความสามารถในการชะฟีนอลออกจากชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ได้ดี

Prince of Songkla University Pattani Campus

กรณี 4-CP พบว่า สารละลาย 6.0 M CH_3COOH สามารถชะ 4-CP ได้สูงสุดเท่ากับ 97.5% รองลงมาคือ 6.0 M NHO_3, 30% acetone, 3.0 M CH_3COOH, 30% methanol, 3.0 M HNO_3, 6.0 M NaOH, 3.0 M NaOH, 30% ethanol, 1.0 M CH_3COOH, 6.0 M NH_4OH, 3.0 M NH_4OH, 1.0 M NaOH, 1.0 M NH_4OH และ 1.0 M HNO_3 ซึ่งมีความสามารถในการชะ 4-CP ได้เท่ากับ 97.0, 96.2, 95.7, 95.6, 95.5, 92.8, 92.6, 92.0, 86.8, 86.0, 85.5, 83.8, 83.7, 82.3% ตามลำดับ (รูปที่ 4.10) สารเคมีทุกชุดการทดลองจะให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (H_2O) ที่สามารถชะ 4-CP ได้เพียง 58.7 % นอกจากนี้สารละลาย 6.0 M CH_3COOH สามารถชะ 4-CP ได้สูงสุด เมื่อเทียบกับ 3.0 M CH_3COOH, 3.0 M HNO_3, 6.0 M NHO_3, 30% methanol และ 30% acetone มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จะเห็นได้ว่าสารละลาย CH_3COOH และ HNO_3 เข้มข้น 3.0 และ 6.0 M, 30% methanol และ 30% acetone เป็นตัวชะที่ดีในการชะ 4-CP ออกจากชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*



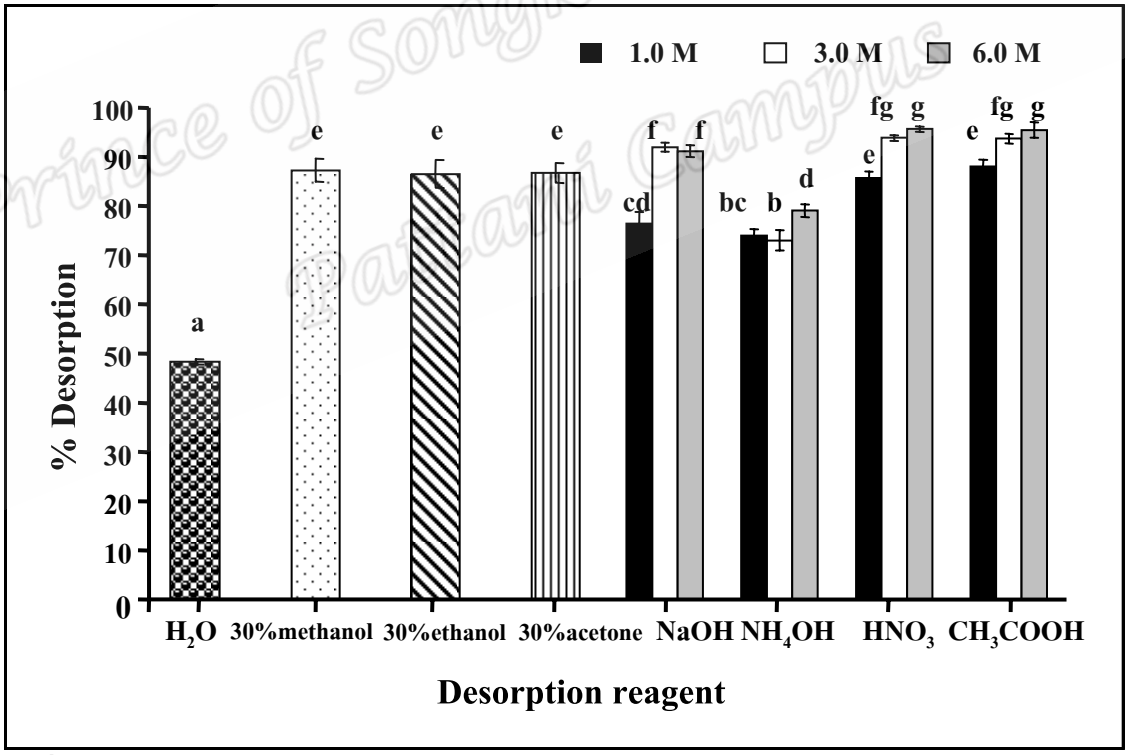
รูปที่ 4.10 ความสามารถในการชะ 4-CP โดยสารเคมีชนิดต่างๆ คือ methanol, ethanol, acetone, NaOH, NH_4OH, HNO_3, CH_3COOH และ H_2O (4-CP 15.0 mg/L, pH 5 ± 0.3, เวลาการชะ 1 ชั่วโมง)

อักษร a-g แสดงความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

Prince of Songkla University Pattani Campus

ส่วน 2,4-DCP พบว่าสารละลาย 6.0 M HNO_3 สามารถชะ 2,4-DCP ได้สูงสุดเท่ากับ 95.6% รองลงมาคือ 6.0 M CH_3COOH, 3.0 M HNO_3, 3.0 M CH_3COOH, 3.0 M NaOH, 6.0 M NaOH, 1.0 M CH_3COOH, 30% methanol, 30% acetone, 30% ethanol, 1.0 M HNO_3, 6.0 M NH_4OH, 1.0 M NaOH, 1.0 M NH_4OH และ 3.0 M NH_4OH ซึ่งมีความสามารถในการชะ 2,4-DCP ได้เท่ากับ 95.4, 93.8, 93.7, 91.9, 91.2, 87.9, 87.3, 86.7, 86.5, 85.7, 79.0, 76.4, 73.9 และ 73.0% ตามลำดับ (รูปที่ 4.11) สารเคมีทุกชุดการทดลองจะให้ผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (H_2O) ที่สามารถชะ 2,4-DCP ได้เพียง 48.3% สารละลาย 6.0 M HNO_3 สามารถชะ 2,4-DCP ได้สูงสุด เมื่อเทียบกับ 3.0 M HNO_3, 6.0 M และ 3.0 M CH_3COOH ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสารละลายกรดและเบส ที่ความเข้มข้น 3.0 และ 6.0 M พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ดังนั้นสารละลายกรดและเบสคือ 3.0 M HNO_3, 6.0 M HNO_3, 3.0 M CH_3COOH, 6.0 M CH_3COOH, 3.0 M NaOH และ 6.0 M NaOH สามารถชะ 2,4-DCP ออกจากชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ได้ดี



รูปที่ 4.11 ความสามารถในการชะ 2,4-DCP โดยสารเคมีชนิดต่างๆ คือ methanol, ethanol, acetone, NaOH, NH_4OH, HNO_3, CH_3COOH และ H_2O (2,4-DCP 15.0 mg/L, pH 5 ± 0.3, เวลาการชะ 1 ชั่วโมง)

อักษร a-g แสดงความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารละลาย methanol, ethanol และ acetone เป็นตัวทำละลายที่มีขั้ว สามารถที่จะชะสารประกอบฟีนอลที่มีขั้วเช่นเดียวกันออกจากชีวมวลสาหร่ายผักกาดได้ โดยสามารถชะฟีนอลได้ดีกว่า 4-CP และ 2,4-DCP เนื่องจากฟีนอลมีความสามารถในการละลายในสารละลายได้สูงกว่าคลอโรฟีนอลจึงทำให้โมเลกุลของฟีนอลถูกชะออกมาได้มากกว่า นอกจากนี้คลอโรฟีนอลสามารถเกาะติดบนพื้นผิวของชีวมวลสาหร่ายแข็งแรงกว่าฟีนอล จึงถูกชะออกมาได้น้อยกว่า สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Denizli *et al*. (2004) ซึ่งศึกษาความสามารถในการชะสารประกอบฟีนอล คือ ฟีนอล, 2-CP, 4-CP และ 2,4,6-TCP ที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยชีวมวล *Phanerochaete chrysosporium* โดยใช้ 30% methanol พบว่า 30% methanol สามารถชะสารประกอบฟีนอลได้มากกว่า 90% และ ชีวมวล *Phanerochaete chrysosporium* สามารถผ่านกระบวนดูดซับ และการชะได้ถึง 10 ครั้ง

สารละลายเบส NaOH มีความสามารถในการชะสารประกอบฟีนอลทั้ง 3 ชนิดออกจากตัวดูดซับได้ดีกว่าสารละลาย NH_4OH ทั้งนี้เนื่องจาก NH_4OH เป็นเบสอ่อนเมื่อละลายน้ำแล้วแตกตัวให้ OH^- ได้เพียงบางส่วนไม่ถึง 100% ต่างจาก NaOH เป็นเบสแก่เมื่อละลายน้ำแล้วแตกตัวให้ OH^- มาก (แตกตัวได้ 100%) ซึ่ง OH^- มีผลต่อความสามารถในการชะสารประกอบฟีนอล เนื่องจาก OH^- ในสารละลายจะส่งผลให้สารประกอบฟีนอลเปลี่ยนรูปเป็นฟีนอเลทไอออน (phenolate ions) พื้นผิวของชีวมวลสาหร่ายที่เป็นประจุลบจะไม่มีการดึงดูดกับสารประกอบฟีนอล (phenolate ions) จึงทำให้สารประกอบฟีนอลถูกชะหลุดออกจากพื้นผิวชีวมวลสาหร่ายผักกาด เช่นเดียวกับรายงานของ Gupta *et al*. (2000) ซึ่งพบว่า acetone และ 5% NaOH สามารถชะสารประกอบฟีนอล 2,4,6-TNP, 4-NP, 4-CP และ 1,3-dihydroxybenzene ได้ดีที่สุด นอกจากนี้ 110 M NaOH ยังสามารถชะ PCP และ 2,4,6-TCP ที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวได้สูงสุดเท่ากับ 99.9% (Radhika และ Palanivelu, 2006)

สำหรับสารละลายกรด HNO_3 และ CH_3COOH ก็มีความสามารถชะสารประกอบฟีนอลทั้งสามชนิดได้ดี เนื่องจากสารละลายกรดสามารถแตกตัวให้ไฮโดรเนียมไอออน (H^+) ซึ่งจะเข้าไปแทนที่สารประกอบฟีนอลที่เกาะติดบนพื้นผิวชีวมวลสาหร่ายผักกาด ส่งผลให้สารประกอบฟีนอลถูกชะหลุดจากพื้นผิวของชีวมวลสาหร่ายผักกาดได้ดี

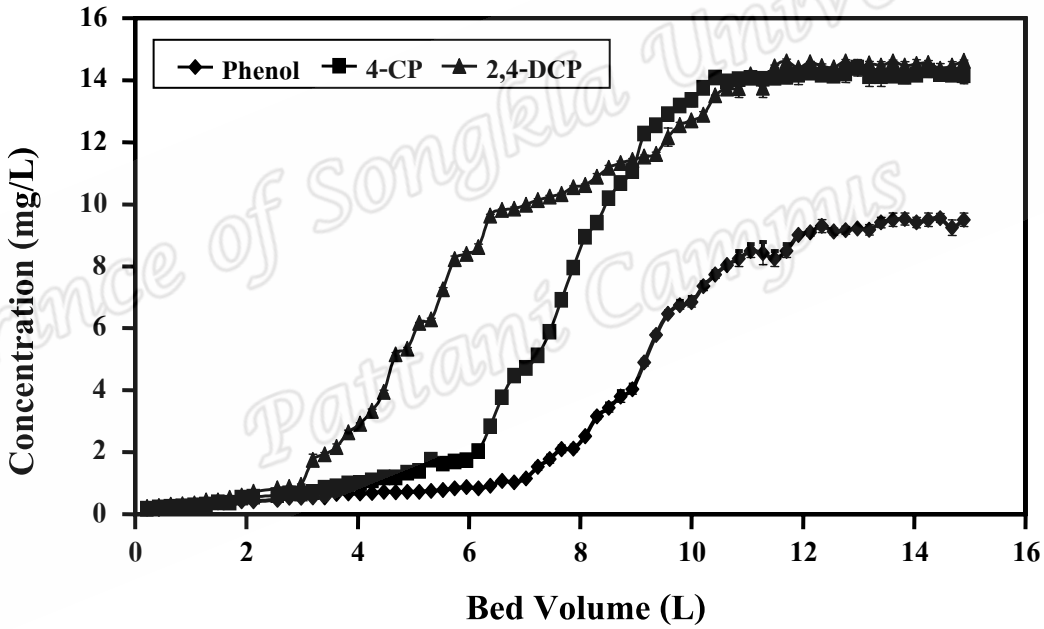
สรุปได้ว่า สารเคมีที่ใช้ในการชะสารประกอบฟีนอลทั้งสามชนิดจากชีวมวลสาหร่ายผักกาดได้ดี ได้แก่ สารละลาย 3.0 M CH_3COOH, 3.0 M HNO_3 และ 3.0 M NaOH โดยสารละลายที่เหมาะสมที่สุดคือ 3.0 M CH_3COOH เนื่องจากไม่มีผลทำลายสภาพชีวมวลสาหร่าย ต่างจาก 3.0 M NaOH ซึ่งทำให้ตัวอย่างมีลักษณะเปื่อยยุ่ย และกรณี 3.0 M HNO_3 ทำให้สภาพชีวมวลสาหร่ายมีลักษณะซีดเหลือง นอกจากนี้ H_2O สามารถชะสารประกอบฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP ได้เพียง

Prince of Songkla University Pattani Campus

57.6, 58.7 และ 48.3% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบสารเคมีทั้ง 3 กลุ่มดังกล่าว แต่ยังให้ผลที่สูงกว่าที่รายงานโดย Rao และ Viraraghavan (2002) ในการชะฟีนอลที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยชีวมวล *Aspergillus niger* ด้วยน้ำ deionized พบว่า น้ำ deionized มีความสามารถในการชะฟีนอลได้เพียง 5% เท่านั้น

4.4 ความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata* แบบระบบต่อเนื่อง (Continuous flow system)

ผลการศึกษาการดูดซับสารประกอบฟีนอลทั้งสามชนิดแบบระบบต่อเนื่อง โดยใช้ชีวมวลสาหร่ายผักกาด 3.0 g บรรจุในคอลัมน์ และผ่านสารละลายสารประกอบฟีนอลความเข้มข้น 10 mg/L สำหรับฟีนอล และ 15 mg/L สำหรับ 4-CP และ 2,4-DCP แสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟ Breakthrough ของการดูดซับสารประกอบฟีนอลสามชนิด โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด (phenol เข้มข้น 10.0 mg/L และ 4-CP, 2,4-DCP ชนิดละ 15.0 mg/L, pH 5 ± 0.3, 1 Bed volume 0.047 L)

กราฟที่ได้จากการพลอตระหว่างความเข้มข้นที่เหลือกับปริมาตรของตัวดูดซับในคอลัมน์หรือปริมาตรบรรจุ (Bed Volume; BV) มีลักษณะเป็นรูปตัวเอสตามลักษณะของกราฟ Breakthrough จะเห็นได้ว่า ปริมาตรสารละลายที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนด ให้สารกลุ่มฟีนอลมีได้ไม่เกิน 1.0 mg/L เท่ากับ 329.0 mL หรือ 7.0 L ของปริมาตรบรรจุ (สำหรับฟีนอล),

Prince of Songkla University Pattani Campus

190.0 mL หรือ 4.04 L ของปริมาตรบรรจุ (สำหรับ 4-CP) และ 147.1 mL หรือ 3.13 L ของปริมาตรบรรจุ (สำหรับ 2,4-DCP) จากนั้นความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟีนอลจะลดลงเรื่อยๆ และอายุการใช้งานของชีวมวลสาหร่ายผักกาดจะหมดประสิทธิภาพเมื่อผ่านสารละลายลงในคอลัมน์เป็นเวลา 6.44 ชั่วโมง หรือปริมาตรสารละลาย 580.0 mL คิดเป็น 12.34 L ปริมาตรบรรจุ (สำหรับฟีนอล), 5.67 ชั่วโมง หรือ ปริมาตรสารละลาย 510.0 mL คิดเป็น 10.85 L ปริมาตรบรรจุ (สำหรับ 4-CP) และ 5.45 ชั่วโมง หรือ ปริมาตรสารละลาย 490.2 mL คิดเป็น 10.43 L ปริมาตรบรรจุ (สำหรับ 2,4-DCP) ซึ่งชีวมวลสาหร่ายผักกาดที่บรรจุในคอลัมน์มีความสามารถดูดซับฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP ได้เท่ากับ 10.83, 9.10 และ 7.40 mg/g ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลแบบระบบกะและระบบต่อเนื่อง โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด จะเห็นได้ว่าความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP แบบระบบต่อเนื่อง (10.83, 9.10 และ 7.40 mg/g ตามลำดับ) มีค่าสูงกว่ากรณีแบบระบบกะ (4.7, 9.2 และ 17.9 mg/g ตามลำดับ) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากว่า การบรรจุของตัวอย่างชีวมวลสาหร่ายซึ่งมีขนาดไม่คงที่ ในคอลัมน์อาจไม่สม่ำเสมอและ 2,4-DCP มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าฟีนอลและ 4-CP จึงไม่สามารถผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างตัวอย่างชีวมวลสาหร่ายได้ ทำให้มีการดูดซับได้น้อยกว่ากรณีของการทดลองดูดซับแบบระบบกะที่มีการเขย่าตลอดเวลา สารประกอบฟีนอลสัมผัสกับพื้นผิวตัวดูดซับได้ดีกว่า

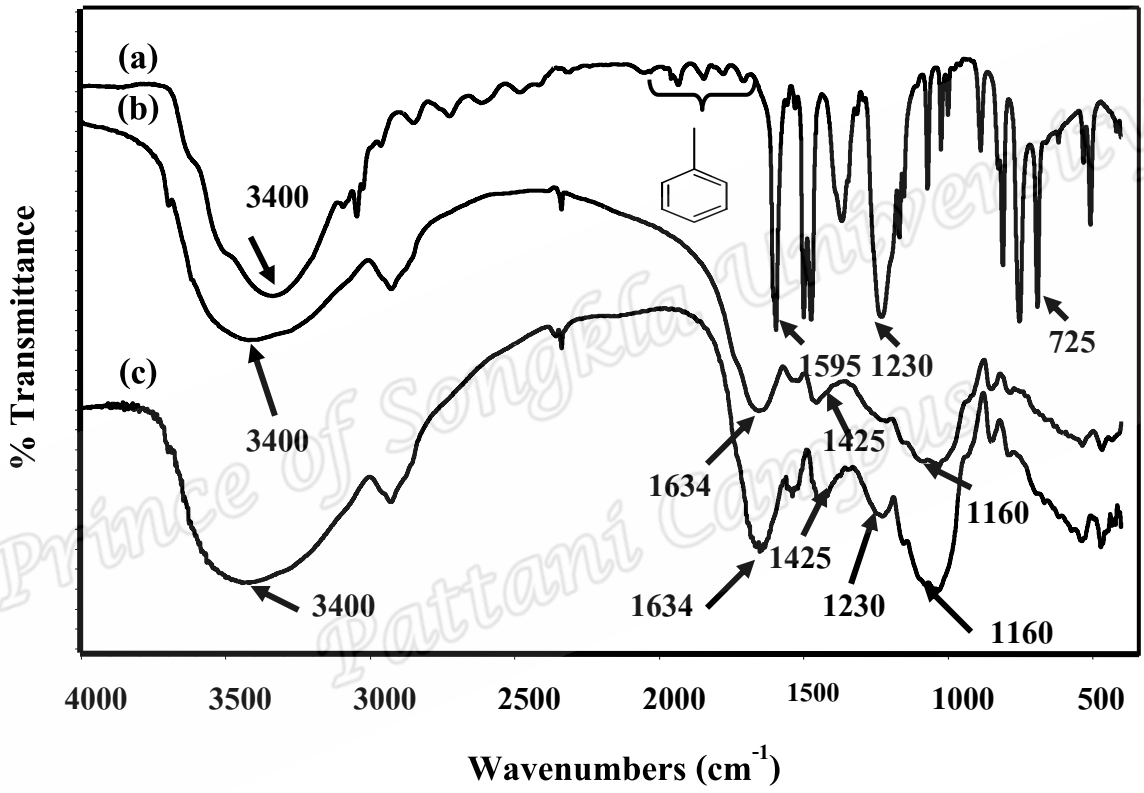
เมื่อพิจารณาความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอล โดยชีวมวลตัวดูดซับต่างๆ ที่บรรจุในคอลัมน์ พบว่า ตัวอย่างชีวมวลสาหร่ายผักกาดนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบฟีนอลได้สูงกว่าชีวมวล *Aspergillus niger* (200 mg/g) เมื่อใช้สารละลายตั้งต้น 1.0 mg/L (Rao and Viraraghavan, 2002) แต่ต่ำกว่ากรณี XAD-16 เรซิน (Abburi, 2003) ที่มีความสามารถดูดซับฟีนอล (เข้มข้น 1000 mg/L) และ 4-CP (เข้มข้น 2000 mg/L) ได้เท่ากับ 95 และ 204 mg/g ตามลำดับ ส่วนชีวมวลซังข้าวโพดและถ่านกัมมันต์ มีรายงานดูดซับเพนตะคลอโรฟีนอล (PCP) ได้เท่ากับ 10.83 และ 33.88 mg/g ตามลำดับ (จุวัลณีย์, 2546) ซึ่งถ่านกัมมันต์มีความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลได้สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากในกระบวนการดูดซับจะใช้ความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลสูงกว่าและถ่านกัมมันต์ก็มีพื้นที่ผิวจำเพาะและมีรูพรุนอยู่มาก ฉะนั้นสารประกอบฟีนอลในน้ำตัวอย่างจะถูกดูดซับเข้าไปอยู่ในรูพรุนที่มีอยู่มากของถ่านกัมมันต์ จึงทำให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบฟีนอลสูงกว่า

Prince of Songkla University Pattani Campus

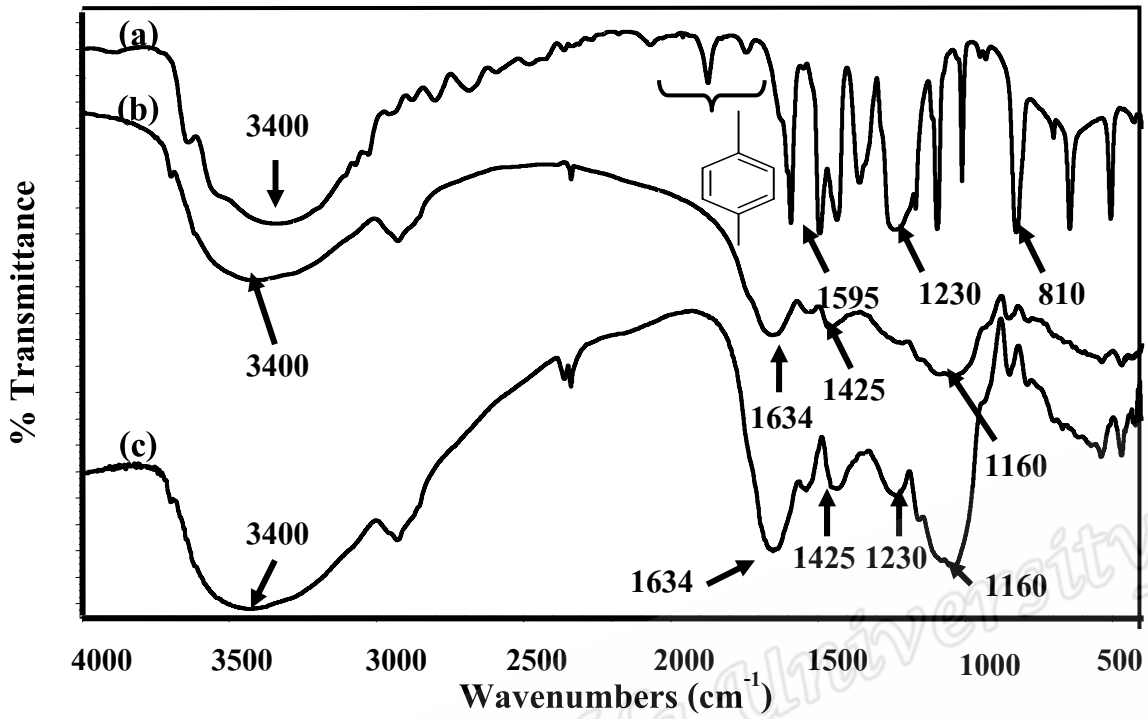
4.5 สมบัติทางกายภาพและเคมีของชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata*

4.5.1 หมู่ฟังก์ชันของสารที่เป็นองค์ประกอบพื้นผิวของสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* โดย FTIR

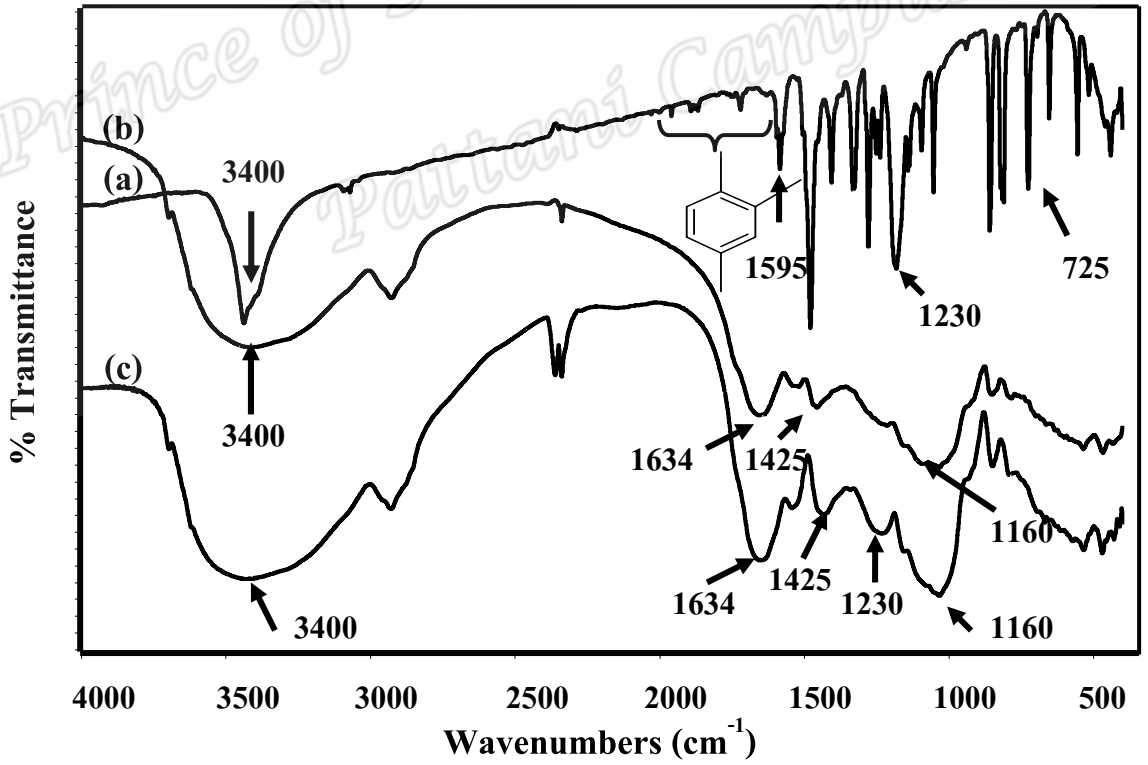
ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวของชีวมวลสาหร่ายผักกาดก่อนและหลังผ่านการดูดซับสารประกอบฟีนอลแต่ละชนิดด้วยเทคนิค FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400-4,000 cm^{-1} เปรียบเทียบกับสารประกอบฟีนอลทั้ง 3 ชนิด แสดงในรูปที่ 4.13-4.15



รูปที่ 4.13 IR สเปกตรัมของฟีนอล (a), ชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata* (b) และชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ที่ผ่านกระบวนการดูดซับฟีนอล (c)



รูปที่ 4.14 IR สเปกตรัมของ 4-CP (a), ชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata* (b) และชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ที่ผ่านกระบวนการดูดซับ 4-CP (c)



รูปที่ 4.15 IR สเปกตรัมของ 2,4-DCP (a), ชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata* (b) และชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ที่ผ่านกระบวนการดูดซับ 2,4-DCP (c)

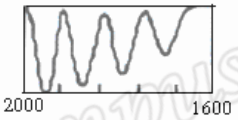
Prince of Songkla University Pattani Campus

พื้นผิวชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* ซึ่งเป็นสาหร่ายสีเขียว ประกอบด้วยโครงสร้างผนังเซลล์โพลีแซคคาไรด์ ชนิด ulvan, cellulose, xyloglucan และ glucuronan (Lahaye and Robic, 2007) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ หมู่ carboxyl, amino, hydroxyl และ sulfonate และจากรูป 4.13-4.15 แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบฟีนอลทั้ง 3 ชนิด หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญบนพื้นผิวสาหร่ายผักกาดและพื้นผิวสาหร่ายผักกาดที่ผ่านการดูดซับสารประกอบฟีนอล ดังสรุปในตารางที่ 4.4-4.5 โดยที่องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของพื้นผิวสาหร่ายผักกาด ดังแสดงที่เลขคลื่น 3400 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นแสดงหมู่ฟังก์ชัน O–H stretching และ –NH stretching ซึ่งเป็นผลมาจาก hydroxyl group และ –NH จาก amino group ตามลำดับ ให้พีกที่มีลักษณะกว้าง (broad peak) ที่เลขคลื่น 1634 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นหมู่ -C=O จากหมู่ –COOH ที่เลขคลื่น 1425 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นของ Symmetric -C = O ที่เลขคลื่น 1160 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นของ $–SO_3$ stretching และที่เลขคลื่น 851 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นของ $R\text{-}NH_2$ (ตารางที่ 4.4) ส่วนองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของสารประกอบฟีนอล ได้แก่ ที่เลขคลื่น 3400 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นแสดงของ Broad intermolecular hydrogen bonded ที่เลขคลื่น 1595 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นแสดงหมู่ C=====C ring stretch ที่เลขคลื่น 810 และ 725 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นแสดงหมู่ Out-of-plane -C-H bend และที่เลขคลื่น 1230 cm^{-1} คือ -C–O stretching (ตารางที่ 4.5) เมื่อชีวมวลสาหร่ายผักกาดผ่านกระบวนการดูดซับสารประกอบฟีนอล ได้แก่ ฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP IR สเปกตรัมที่แสดงว่าพื้นผิวชีวมวลสาหร่ายผักกาดเกิดการเกาะติดกับสารประกอบฟีนอล แสดงที่เลขคลื่น 1230 cm^{-1} คือ -C–O stretching จากสารประกอบฟีนอลทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากเป็นพีกที่ใช้สำหรับพิจารณาว่ามีสารพวกฟีนอลิกหรือไม่ ซึ่งการศึกษาพบว่าปรากฏพีกของ -C–O ก็แสดงว่าสารประกอบฟีนอลเกิดการดูดซับบนพื้นผิวของชีวมวลสาหร่าย

ตารางที่ 4.4 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของชีวมวลสาหร่ายที่ผ่านการดูดซับสารประกอบฟีนอลทั้ง 3 ชนิด ที่ค่าเลขคลื่นต่างๆ

Wavenumber (cm^{-1})	**Vibration mode of functional group**
3400	–OH, –NH stretching
1634	–C = O stretch of –COOH
1425	Symmetric –C = O
1230	–C - O stretching
1160	Symmetric $–SO_3$ stretching
851	$R\text{-}NH_2$

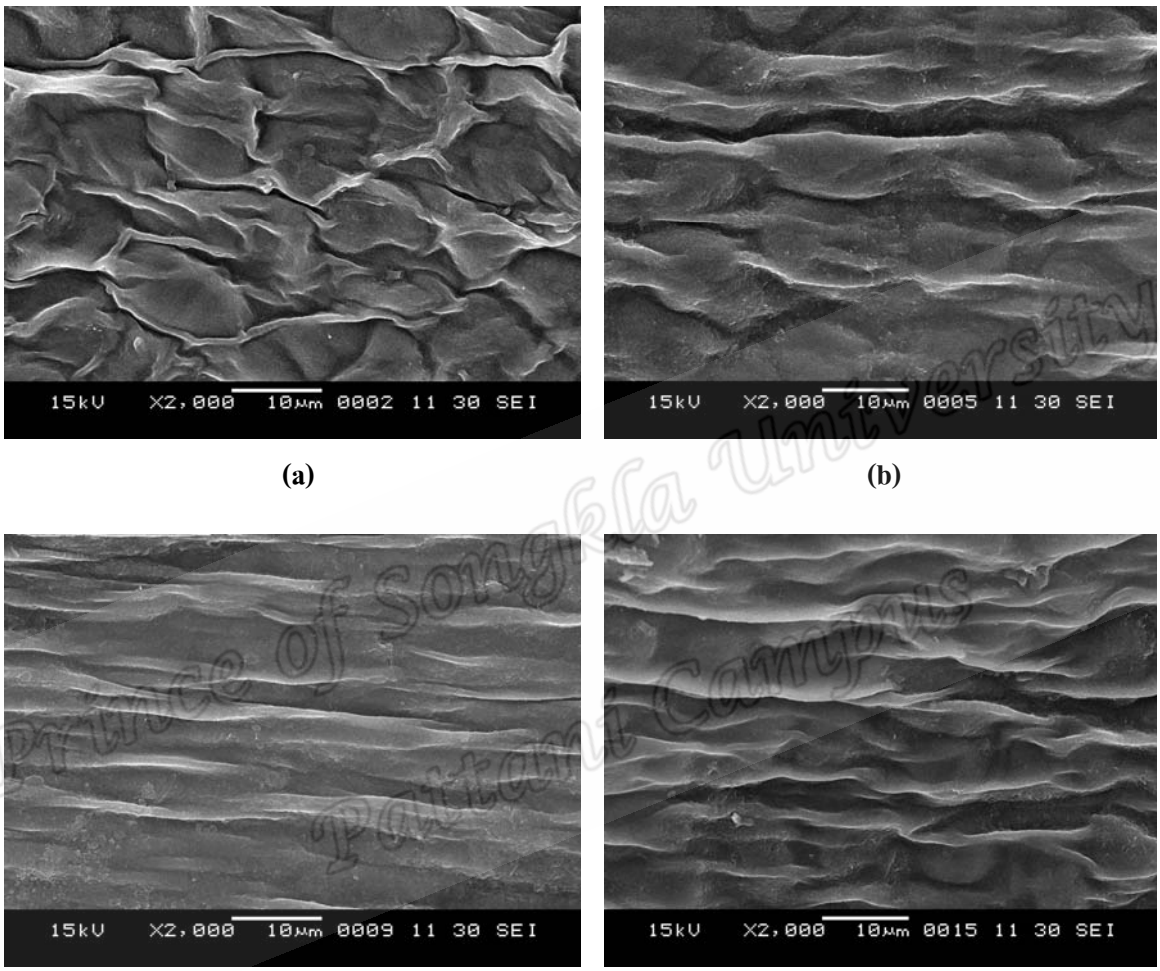
ตารางที่ 4.5 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของสารประกอบฟีนอล ได้แก่ phenol, 4-CP และ 2,4-DCP ที่ค่าเลขคลื่นต่างๆ

Wavenumber (cm^{-1})	**Vibration mode of functional group**
3400	Broad intermolecular hydrogen bonded
3373	–O-H stretch
1595, 1499, 1470	C=C ring stretch
1360	In-plane –O-H
1224 (1230)	–C-O stretch
810, 725	Out-of-plane –C-H bend
2000-1667	Overtone or combination bends
	Mono - substituted of phenol
	
	Di - para - substituted of 4-CP
	Tri-1,2,4 - substituted of 2,4-DCP

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.5.2 สภาพพื้นผิวของชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata*

ผลการศึกษาสภาพพื้นผิวของชีวมวลสาหร่ายผักกาด โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.16 (a-d)



(a) **(b)**

(c) **(d)**

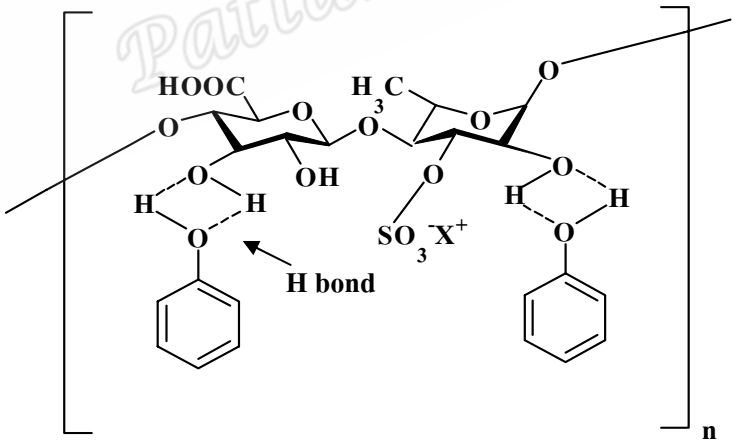
รูปที่ 4.16 ภาพ SEM ของพื้นผิวชีวมวลสาหร่ายผักกาด (a), ชีวมวลสาหร่ายที่ผ่านการดูดซับฟีนอล (b), ชีวมวลสาหร่ายที่ผ่านการดูดซับ 4-CP (c) และชีวมวลสาหร่ายที่ผ่านการดูดซับ 2,4-DCP (d) (กำลังขยาย 2,000 เท่า)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะช่วยให้เห็นลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าของวัตถุต่างๆ จากรูปที่ 4.16 (a) จะเห็นได้ว่าพื้นผิวหน้าของชีวมวลสาหร่ายผักกาดที่กำลังขยาย 2000 เท่า มีลักษณะเป็นรอยพับ (รอยย่น) ซึ่งแตกต่างจากกรณีของตัวอย่างชีวมวลสาหร่ายผักกาดที่ผ่านการดูดซับสารประกอบฟีนอล ได้แก่ ฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP (รูปที่ 4.16,

b-d) พบว่าสภาพของลักษณะพื้นผิวของชีวมวลเปลี่ยนแปลงไป โดยมีลักษณะเรียบขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผิวหน้าของชีวมวลสาหร่ายถูกทำลายไประหว่างการแช่ในสารละลายฟีนอลแต่ละชนิดในการทดลอง

จากการศึกษาการดูดซับสารประกอบฟีนอลทั้งสามชนิดโดยตัวอย่างชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* พบว่าการดูดซับมีโอกาสเป็นไปตามกลไกการการดูดซับแบบชั้นเดียว (แบบแลงค์เมียร์) และแบบหลายชั้น (แบบฟรุนดิช) ซึ่งเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) โดยสารประกอบฟีนอลจะเกิดการดูดซับด้วยพันธะไฮโดรเจนตรงตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลของโครงสร้างผนังเซลล์โพลีแซคคาไรด์ ชนิด ulvan, cellulose, xyloglucan และ glucuronan บนพื้นผิวชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* (Lahaye and Robic, 2007) ดังรูปที่ 4.17 และการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วง pH 5-8 นอกจากนี้ จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวชีวมวลสาหร่ายผักกาดที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ได้แก่ หมู่ carboxyl, amino, hydroxyl และ sulfonate เมื่อชีวมวลสาหร่ายผักกาดผ่านการดูดซับสารประกอบฟีนอล จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวอย่างด้วย FTIR พบว่ามีสารประกอบฟีนอลเกิดการดูดซับบนพื้นผิวของชีวมวลสาหร่าย แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารประกอบฟีนอลกับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นแบบแรงระหว่างขั้ว (electrostatic force) โดยเฉพาะพันธะไฮโดรเจน (รูปที่ 4.17)

$$[\beta\text{-D-GlcA}\ (1\rightarrow4)\text{-L-Rha 3S}\rightarrow4)\ \beta\text{-D-GlcA}\ (1\rightarrow4)\text{-R-L-Rha 3S}\ (1\rightarrow]_n$$



รูปที่ 4.17 กลไกการดูดซับสารประกอบฟีนอลบนโครงสร้างโพลีแซคคาไรด์ชนิด Ulvanobiuronic acid 3-sulphate (A_{3s}) ของพื้นผิวชีวมวลสาหร่ายผักกาด (X ; หมู่ multivalent cations) (ดัดแปลงมาจาก: Robic *et al*., 2008)

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.6 ความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลจากน้ำเสียโรงงานไม้ยางพารา โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata*

4.6.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของน้ำเสียโรงงานไม้ยางพารา

โรงงานไม้ยางพารา “เอกสยามพาราวูด” อำเภอนาทวี จังหวัดสงขลา เป็นโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา สำหรับเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน โดยนำไม้ยางพาราผ่านกระบวนการอบและอาบน้ำยารักษาเนื้อไม้ ซึ่งน้ำยารักษาเนื้อไม้มีส่วนผสมของสารประกอบผสมของโบรอน กรดบอริก และ DNT (ชื่อทางการค้า) ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานไม้ยางพาราแห่งนี้ ซึ่งได้แก่ สี กลิ่น อุณหภูมิ pH ของแข็งแขวนลอย (TSS) COD และปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ฟีนอล, 4-CP และ 2,4-DCP แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของน้ำเสียโรงงานไม้ยางพารา จังหวัดสงขลา

สมบัติทางกายภาพ/เคมี	ลักษณะ/ปริมาณ
ลักษณะทางกายภาพ	ขุ่น สีน้ำตาล
กลิ่น	มีกลิ่นฉุน และ กลิ่นไม้ยางพารารวมอยู่ด้วย
อุณหภูมิ (°C)	28.9
pH	7.63
TSS (mg/L)	272.67
COD (mg/L)	7,040
ความเข้มข้นของ ฟีนอล (mg/L)	2.80
ความเข้มข้นของ 4-CP (mg/L)	0.90
ความเข้มข้นของ 2,4-DCP (mg/L)	nd

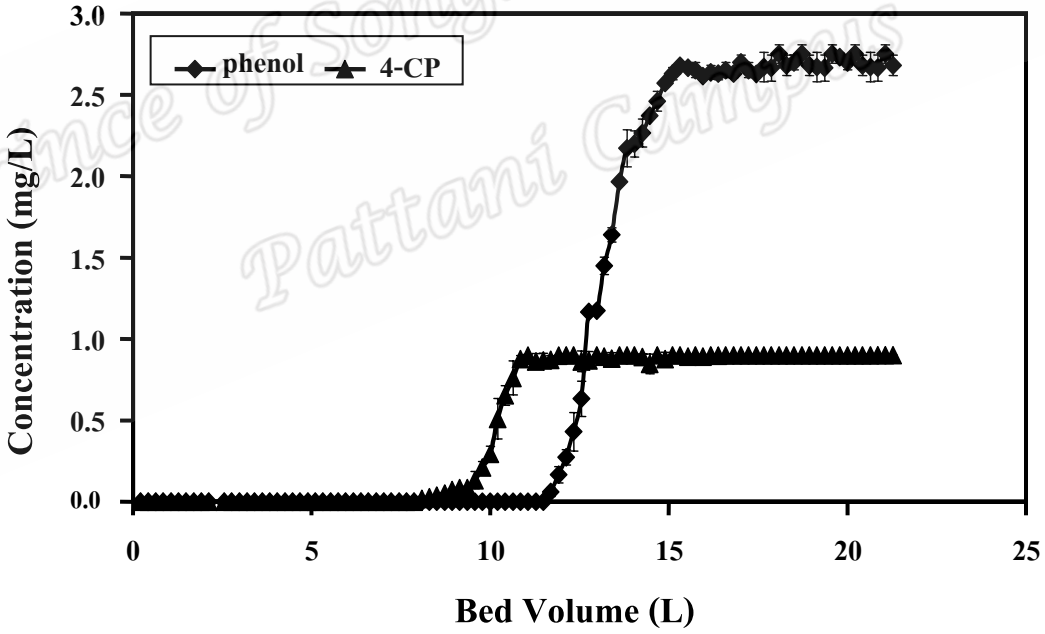
น้ำเสียจากโรงงานไม้ยางพารา มีสีน้ำตาลเข้ม กลิ่นฉุน ค่า pH ช่วงเป็นกลาง (7.63) ค่า TSS 272.67 mg/L และค่า COD สูงถึง 7,040 mg/L มีปริมาณฟีนอล และ 4-CP เข้มข้น 2.80 และ 0.90 mg/L แต่ตรวจไม่พบ 2,4-DCP ซึ่งค่ามาตรฐานสารประกอบฟีนอลในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ยอมรับได้ เท่ากับ 1.0 mg/L ดังนั้นน้ำเสียจากโรงงานไม้ยางพารานี้มีปริมาณฟีนอลสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ เนื่องจากไม้ยางพาราหลังผ่านกระบวนการอบและอาบน้ำยารักษาเนื้อไม้แล้วจะมีส่วนของสารประกอบฟีนอลออกมาจากเนื้อไม้ด้วย เพราะในเนื้อไม้ยางพารามีส่วนประกอบของสารกลุ่มฟีนอลด้วย ได้แก่ ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เป็นต้น โดยทางโรงงานไม้

Prince of Songkla University Pattani Campus

ยางพาราไม่มีกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งในส่วนของน้ำเสียคือน้ำยารักษาเนื้อไม้ที่ผ่านการใช้แล้วเป็นจำนวนหลายๆ ครั้ง และอาจมีผลทำให้มีปริมาณสารฟีนอลสูงก็ได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนจะปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ แต่ปริมาณของ 4-CP มีค่าความเข้มข้นต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ (1.0 mg/L) (กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539)

4.6.2 ความสามารถดูดซับสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียโรงงานไม้ยางพารา โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *Ulva reticulata* แบบระบบกะและระบบต่อเนื่อง

จากการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียโรงงานไม้ยางพารา พบว่า ในน้ำเสียโรงงานไม้ยางพารามีฟีนอลและ 4-CP ปริมาณ 2.80 และ 0.90 mg/L จึงได้ทดลองการกำจัดฟีนอลในน้ำเสียโรงงานไม้ยางพารา โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาดทั้งแบบระบบกะและระบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.18 กราฟ Breakthrough ของการดูดซับฟีนอลและ 4-CP ในน้ำเสียโรงงานไม้ยางพารา โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด (phenol และ 4-CP เข้มข้น 2.80 และ 0.90 mg/L ตามลำดับ, pH 5.0 ± 0.3, ตัวอย่างชีวมวล 3 g, 1 Bed volume 0.047 L)

Prince of Songkla University Pattani Campus

ความสามารถดูดซับฟีนอล และ 4-CP ในน้ำเสียจากโรงงานไม้ยางพารา โดยชีวมวลสาหร่ายผักกาด *U. reticulata* แบบระบบกะ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 2 g/L (pH 5) ระยะเวลาในการดูดซับ 180 นาที เท่ากับ 1.4 และ 0.43 mg/g (คิดเป็น 100%) สำหรับความสามารถดูดซับฟีนอลและ 4-CP แบบระบบต่อเนื่อง โดยใช้ชีวมวลสาหร่ายผักกาด 3.0 g บรรจุในคอลัมน์ และผ่านน้ำเสียโรงงานไม้ยางพาราที่มีฟีนอลและ 4-CP เข้มข้น 2.80 และ 0.90 mg/L ตามลำดับ ลงไป พบว่า กราฟที่ได้จากการพลอตระหว่างความเข้มข้นที่เหลือกับปริมาตรของตัวดูดซับในคอลัมน์ (Bed Volume; BV) โดย 1 Bed volume เท่ากับ 0.047 L มีลักษณะเป็นรูปตัวเอสตามลักษณะของกราฟ Breakthrough (รูปที่ 4.18) ชีวมวลสาหร่ายผักกาดที่บรรจุในคอลัมน์สามารถดูดซับฟีนอล และ 4-CP ได้เท่ากับ 11.41 และ 2.00 mg/g ตามลำดับ

จากผลการศึกษาข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการนำชีวมวลสาหร่ายผักกาดมาใช้ประโยชน์ในการกำจัดสารประกอบฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแบบระบบกะ ได้แก่ ระยะเวลาในการดูดซับ 180 นาที ปริมาณของตัวอย่างตัวดูดซับที่เหมาะสม 2 g/L และ pH เท่ากับ 5 ซึ่งในการนำไปใช้ให้เหมาะสมกับโรงงานอุตสาหกรรมควรจะใช้การดูดซับแบบระบบต่อเนื่อง เพราะว่าการดูดซับแบบระบบต่อเนื่องสามารถรองรับน้ำเสียในปริมาณมากกว่าแบบระบบกะ และในการกำจัดสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียควรมีการวัดค่า TSS, COD และ BOD ก่อนและหลังการบำบัดน้ำเสียด้วย เพื่อดูว่าหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดแล้วสามารถลดปริมาณ TSS, COD และ BOD ร่วมกับปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลได้จริง เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสารกลุ่มฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่าตัวดูดซับทางชีวภาพ ดังรายงานวิจัยของ จุวัลฉีย์ (2546) ซึ่งศึกษาความสามารถดูดซับ PCP ที่ปนเปื้อนอยู่ (95.30 mg/L) ในโรงงานไม้ยางพารา ด้วยซังข้าวโพดโดยเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ พบว่า ซังข้าวโพดที่ล้างด้วยเบสสามารถดูดซับ PCP ได้ 10 mg/g น้ำหนักแห้งของซังข้าวโพด ซึ่งจะหมดประสิทธิภาพในการบำบัดเมื่อดูดซับน้ำตัวอย่างไป 61 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์โดยซังข้าวโพด ส่วนถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับ PCP ได้ถึง 33 mg/g ถ่านกัมมันต์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด PCP ในน้ำทิ้งได้ถึง 71 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์

Prince of Songkla University Pattani Campus