

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปราย

#### 4.1 ปริมาณโลหะหนัก (ตะกั่ว ทองแดงและสารหนู) ที่ปนเปื้อนในวัสดุตัวอย่าง

ผลการตรวจสอบหาปริมาณโลหะหนัก คือ ตะกั่ว ทองแดง และสารหนู ในวัสดุตัวอย่างสาหร่ายที่เก็บจากอ่าวปัตตานี และถ่านกัมมันต์ ในช่วงที่ศึกษา แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณตะกั่ว ทองแดง และสารหนู ในวัสดุตัวอย่าง

Samples	Lead (mg/kg)	Copper (mg/kg)	Arsenic ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )
<i>Gracilaria fisheri</i>	0.35 $\pm$ 0.01	5.58 $\pm$ 0.11	nd.
<i>Ulva</i> sp.	0.41 $\pm$ 0.01	8.83 $\pm$ 0.19	nd.
<i>Chaetomorpha</i> sp.	0.21 $\pm$ 0.03	7.62 $\pm$ 0.11	nd.
Activated carbon	0.25 $\pm$ 0.02	4.87 $\pm$ 0.07	nd.

nd. = not detected

detection limit ของเครื่อง AAS ที่ใช้ = 8.6  $\mu\text{g}/\text{l}$  (Pb), 0.085 mg/l (Cu), 5.0  $\mu\text{g}/\text{l}$  (As)

limit of determination = 0.055 mg/kg สำหรับ Pb, 0.25 mg/kg สำหรับ Cu, 0.05 mg/kg สำหรับ As

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ปริมาณโลหะหนักที่พบในวัสดุตัวอย่างทั้งสี่ชนิดมีปริมาณน้อย คือ พบปริมาณตะกั่วในช่วง 0.25-0.41 mg/kg ทองแดง ในช่วง 4.87-8.83 mg/kg และตรวจไม่พบสารหนูในวัสดุตัวอย่าง ปริมาณที่ตรวจพบนี้มีค่าต่ำกว่าที่รายงานโดยปรียาและคณะ (2541) ซึ่งพบตะกั่วในสาหร่ายผสมนางที่เก็บจากอ่าวปัตตานีมีค่าเท่ากับ 4.74 mg/kg และจินตนา (2543) ซึ่งพบปริมาณปนเปื้อนตะกั่วในสาหร่ายผสมนางและสาหร่ายไส้ไก่อยู่ในช่วง 0.84-2.80 mg/kg และ 1.62-3.11 mg/kg ตามลำดับ.

อนึ่ง ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างสาหร่ายผสมนาง ซึ่งตรวจไม่พบแคดเมียมในตัวอย่างที่ศึกษา (limit of determination ของแคดเมียม = 0.07 mg/kg) ดังนั้นจึงใช้วัสดุตัวอย่างทั้งสี่ชนิดสำหรับการศึกษาการดูดซับโลหะหนักต่อไป

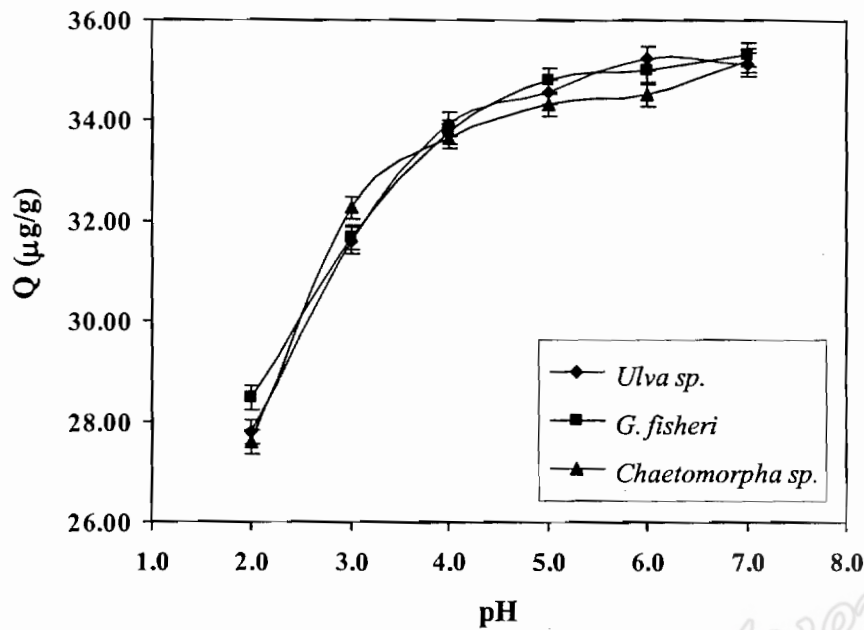
#### 4.2 การศึกษาความสามารถดูดซับโลหะหนัก (Heavy Metal Uptake Capacity) โดยวัสดุตัวอย่างแบบ Batch Equilibrium Experiment

ความสามารถดูดซับโลหะหนักโดยวัสดุตัวอย่าง รายงานในรูปของ Q ซึ่งหมายถึงปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (mg/l หรือ  $\mu\text{g}/\text{l}$ ) ต่อปริมาณวัสดุตัวอย่างที่ใช้ (g) ดังนั้น หน่วยของ Q คือ mg/g หรือ  $\mu\text{g}/\text{g}$

##### 4.2.1 การศึกษาผลของ pH ต่อความสามารถดูดซับโลหะหนักของตัวอย่างสาหร่าย

1) จากการศึกษาความสามารถดูดซับตะกั่วโดย *Gracilaria fisheri*, *Ulva* sp. หรือ *Chaetomorpha* sp. ปริมาณชนิดละ 0.1 g ในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 70  $\mu\text{g}/\text{l}$  ปริมาตร 50 ml ณ pH ต่าง ๆ คือ 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 ให้ผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.1

000  
19/3/25  
e 46 n



รูปที่ 4.1 ความสามารถดูดซับตะกั่ว ( $Q$ ,  $\mu\text{g/g}$ ) โดย *Gracilaria fisheri*, *Ulva sp.* และ *Chaetomorpha sp.* ที่ pH ต่าง ๆ

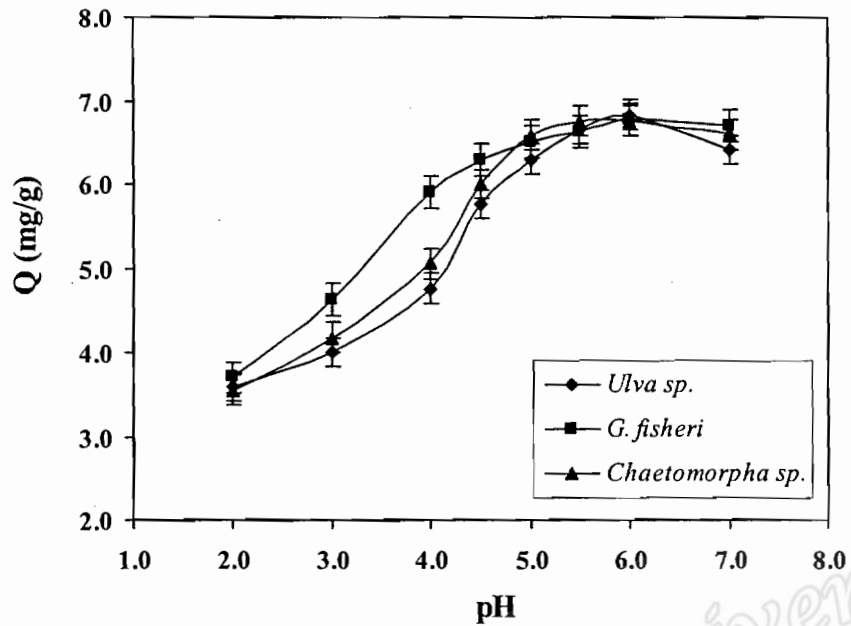
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า การดูดซับตะกั่วโดยวัสดุสาหร่ายแต่ละชนิดมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ มีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จาก pH 2.0 ถึง pH 4.0 อัตราการเพิ่มการดูดซับจะลดลงและเริ่มคงที่ ณ pH 5.0-7.0 โดย *Gracilaria fisheri* จะดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 28.50  $\mu\text{g/g}$  ที่ pH 2.0 ไปเป็น 35.30  $\mu\text{g/g}$  ที่ pH 7.0 ส่วน *Ulva sp.* และ *Chaetomorpha sp.* ดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 27.8 และ 27.60  $\mu\text{g/g}$  ที่ pH 2.0 ไปเป็น 35.10 และ 35.20  $\mu\text{g/g}$  ที่ pH 7.0 ตามลำดับ

ดังนั้นจึงเลือกค่า pH 5.0 เป็น pH ที่เหมาะสมของสารละลายตะกั่วสำหรับการทดลองต่อไป

2) จากการศึกษาความสามารถดูดซับโลหะทองแดงโดยใช้วัสดุตัวอย่าง *Gracilaria fisheri*, *Ulva sp.* หรือ *Chaetomorpha sp.* ปริมาณอย่างละ 0.1 g ในสารละลายทองแดง เข้มข้น 20 mg/l ปริมาตร 50 ml ณ pH ต่าง ๆ คือ 2.0, 3.0, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 7.0 ให้ผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.2

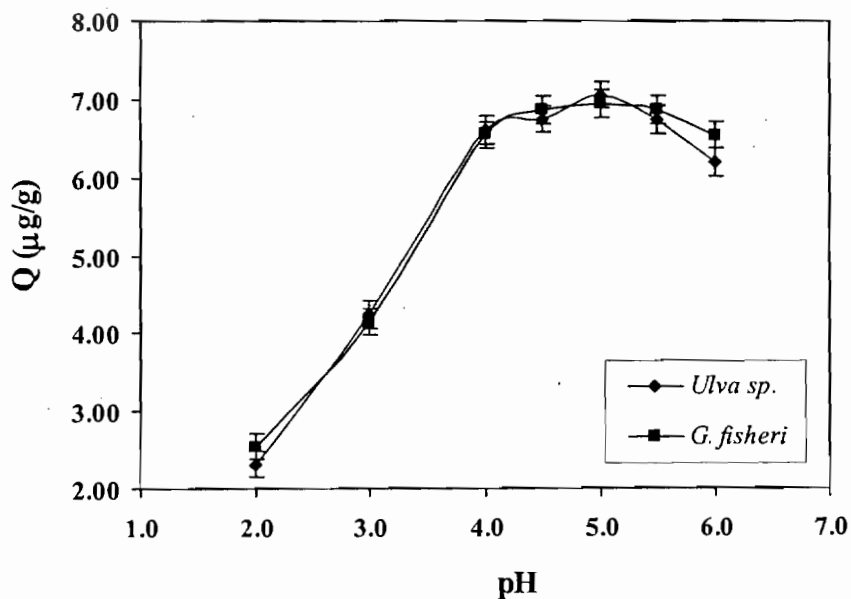
จากรูป จะเห็นว่า pH มีผลต่อการดูดซับทองแดงเช่นเดียวกับกรณีของตะกั่ว คือ วัสดุตัวอย่างสาหร่ายสามารถดูดซับทองแดงได้เพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จาก pH 2.0 ถึง pH 5.0 อัตราการเพิ่มการดูดซับโลหะจะลดลงและการดูดซับโลหะเกิดค่อนข้างคงที่ในช่วง pH 5.0-7.0 โดย *Gracilaria fisheri* จะดูดซับทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 3.70 mg/g ที่ pH 2.0 ไปเป็น 6.70 mg/g ที่ pH 7.0 ส่วน *Ulva sp.* และ *Chaetomorpha sp.* ดูดซับทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 3.58 และ 3.55 mg/g ที่ pH 2.0 ไปเป็น 6.41 และ 6.60 mg/g ที่ pH 7.0 ตามลำดับ

ดังนั้นจึงเลือกค่า pH 5.0 เป็น pH ที่เหมาะสมของสารละลายทองแดงสำหรับการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.2 ความสามารถดูดซับทองแดง (Q, mg/g) โดย *Gracilaria fisheri*, *Ulva sp.* หรือ *Chaetomorpha sp.* ที่ pH ต่าง ๆ

3) จากการศึกษาความสามารถดูดซับสารหนูโดยใช้ *Gracilaria fisheri* หรือ *Ulva sp.* ปริมาณอย่างละ 0.1 g ในสารละลายสารหนู เข้มข้น 50  $\mu\text{g/l}$  ปริมาตร 50 ml ณ pH ต่าง ๆ คือ 2.0, 3.0, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, และ 6.0 ให้ผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสามารถดูดซับสารหนู (Q,  $\mu\text{g/g}$ ) โดย *Gracilaria fisheri* และ *Ulva sp.* ที่ pH ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.3 ที่สภาวะ steady state วัสดุตัวอย่างสาหร่ายทั้งสองชนิดสามารถดูดซับสารหนูได้เพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จาก pH 2.0 ถึง pH 4.0 และเริ่มคงที่ ณ pH 4.5-5.5 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการดูดซับสารหนูได้ดี และมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า pH มากกว่า 5.5 ดังนั้นจึงเลือกค่า pH 4.5 เป็น pH ที่เหมาะสมของสารละลายสารหนูสำหรับการทดลองต่อไป

จากการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ว่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักเหล่านี้อยู่ในช่วง 4-6 ตรงกับผลที่ได้จากฉัฐกมล (2541) ซึ่งทดลองการดูดซับทองแดงโดยสาหร่ายผสมนาง (*Gracilaria fisheri*) และใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Matheickal และ Yu (1996) ในการดูดซับตะกั่วโดยสาหร่ายสีน้ำตาล (*Ecklonia radiata*) ซึ่งรายงาน pH ที่เหมาะสมคือ 4.5-5.5

pH ของสารละลายมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักทั้งสามชนิดในทำนองเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจาก pH มีความสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่อยู่บริเวณพื้นผิวของสาหร่าย ซึ่งประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์ ประเภทเซลลูโลสและมักมีหมู่ต่าง ๆ อยู่ด้วย เช่น carbonyl group, phosphate group, amino group เป็นต้น ที่ pH ต่ำ ๆ (ช่วง 2-3) จะมีความเข้มข้นของโปรตอนสูง ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มักมีประจุเป็นศูนย์หรือเป็นบวก มีการแข่งขันในการจับบนผิวหน้าของสาหร่ายระหว่างโปรตอนและไอออนของโลหะหนัก จึงทำให้พันธะระหว่างโลหะกับตัวดูดซับไม่คงที่ และโปรตอนมีประสิทธิภาพในการจับกับไอออนของโลหะได้ดีกว่า เป็นผลให้การดูดซับโลหะไม่ดีนัก เมื่อ pH ของสารละลายสูงขึ้น (มากกว่า 4) ความเข้มข้นโปรตอนลดลง ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ จะมีประจุเป็นลบ ไอออนโลหะมีความสามารถแข่งขันกับโปรตอนได้สูง จึงทำให้การดูดซับโลหะเกิดได้ดีขึ้น (Darnall *et al.*, 1986, Fourest and Roux, 1992) ในการทดลองนี้ไม่ได้ทดลองที่ pH สูงกว่า 7 เนื่องจากจะเกิดการตกตะกอนของโลหะหนักในสารละลาย ทำให้ไม่สามารถทดลองได้

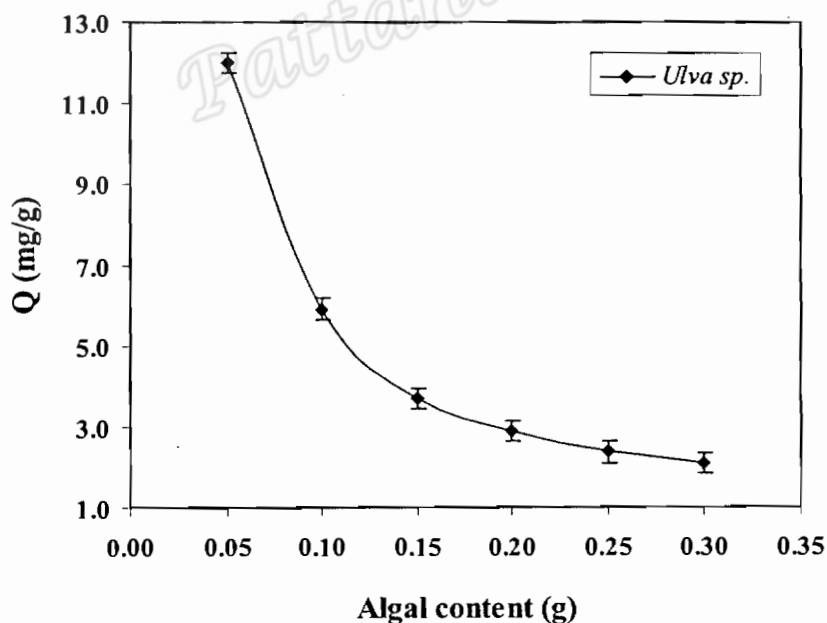
การที่การดูดซับสารหนูของตัวอย่างสาหร่ายทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อ pH ของสารละลายมีค่ามากกว่า 5.5 อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากการที่สารหนูมีเลขออกซิเดชันหลายค่าในสารละลาย ที่พบมากในธรรมชาติ คือ As(III) (arsenite) และ As(V) (arsenate) จึงทำให้สารหนูมีหลายสปีชีส์ในสารละลาย ซึ่งได้แก่  $H_3AsO_3$ ,  $H_2AsO_3^-$ ,  $HAsO_3^{2-}$  และ  $AsO_3^{3-}$  สำหรับ As(III) และ  $H_3AsO_4$ ,  $H_2AsO_4^-$ ,  $HAsO_4^{2-}$  และ  $AsO_4^{3-}$  สำหรับ As(V) โดยมีสัดส่วนของแต่ละสปีชีส์ไม่เท่ากันขึ้นกับสภาพสิ่งแวดล้อมได้แก่ ค่า pH สภาพออกซิไดส์หรือรีดิวซ์ และอนุพลชนิดอื่น ๆ (Jekel, 1994) มีรายงานว่า ณ pH 5-8 มักจะพบ  $H_2AsO_4^-$  และ  $HAsO_4^{2-}$  เป็นส่วนใหญ่ในน้ำธรรมชาติที่มี oxidised environment (0.2-0.5V) ในขณะที่จะพบสปีชีส์  $H_3AsO_3$  ในสภาพ reduced condition (0-0.1V) (Mok และ Wei, 1994) นอกจากนี้ การดูดซับสารหนูบนพื้นผิวของ sediments ขึ้นอยู่กับประจุของ adsorbing species และลักษณะประจุพื้นผิวของตัวดูดซับ (Bhumbla และ Keefer, 1994) ดังนั้นเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของสารหนูสปีชีส์ต่าง ๆ รวมถึงประจุบนพื้นผิวของสาหร่าย ซึ่งอาจมีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารหนูกับหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนพื้นผิวสาหร่ายลดลง การดูดซับโลหะโดยตัวอย่างสาหร่ายจึงมีค่าลดลง

#### 4.2.2 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

จากการหาปริมาณวัสดุสาหร่ายที่เหมาะสมในการทดลองการดูดซับโลหะหนัก (ทองแดง และสารหนู) โดยเลือกใช้สาหร่าย *Ulva* sp. ปริมาณ 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 g แช่ในสารละลายโลหะหนัก ปริมาตร 50 ml (ความเข้มข้นสารละลายทองแดง 20 mg/l สารละลายสารหนู 50 µg/l, pH 5.0) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5

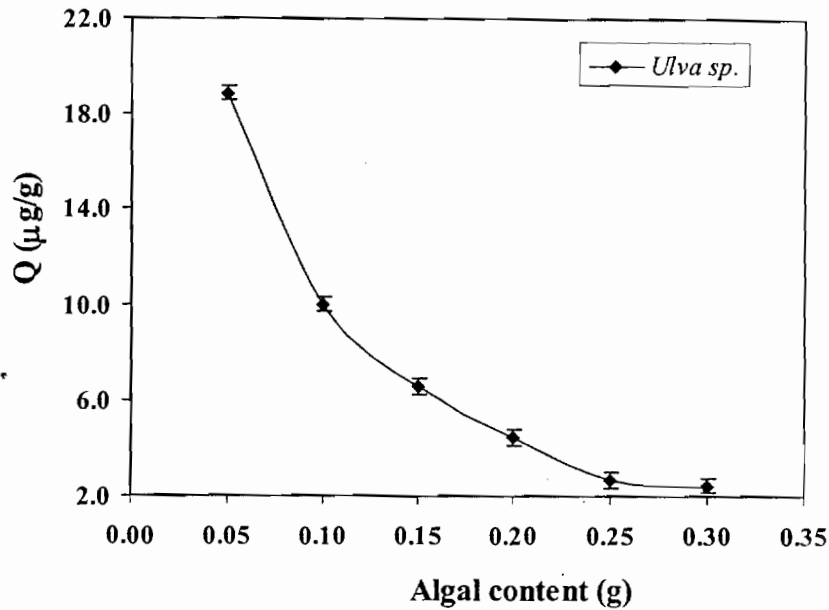
จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะเห็นได้ว่า ในสารละลายโลหะหนัก 50 ml การดูดซับโลหะหนักทองแดงหรือสารหนูของสาหร่าย *Ulva* sp. มีแนวโน้มเหมือนกันคือ มีความสามารถดูดซับโลหะหนักลดลงเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณสาหร่ายเป็น 0.05 g จะมีการดูดซับทองแดงและสารหนูได้สูงสุดเท่ากับ 12.0 mg/g และ 18.9 µg/g ตามลำดับ และเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับโลหะหนักจะลดลง และเกือบคงที่เมื่อใช้ปริมาณสาหร่ายมากกว่า 0.15 g

เนื่องจากในการวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลือในสารละลายหลังการทดลองดูดซับโดยใช้ AAS นั้น ถ้าใช้สาหร่ายตัวอย่าง 0.5 g จะต้องเจือจางสารละลายก่อนการวัด และกรณีใช้สาหร่ายตัวอย่างมากกว่า 0.15 g ต้องทำให้สารละลายเข้มข้นก่อนการวัด ดังนั้นในการทดลองการดูดซับแบบ Batch experiment ต่อๆ ไป จึงได้เลือกใช้ปริมาณสาหร่าย 0.1 g ในสารละลายโลหะหนักปริมาตร 50 ml เพื่อให้ใช้ตัวอย่างสาหร่ายอย่างประหยัด สามารถใช้ได้ตลอดการทดลอง และเมื่อทำการวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลือในสารละลายโดยใช้เครื่อง AAS จะให้ค่าที่เหมาะสมโดยไม่ต้องทำการเจือจางหรือทำให้เข้มข้นหลายขั้นตอน



รูปที่ 4.4 ความสามารถดูดซับทองแดงโดย *Ulva* sp. ในปริมาณต่าง ๆ กัน

(สารละลายทองแดงเข้มข้น 20 mg/l, pH 5.0)



รูปที่ 4.5 การดูดซับสารหนูโดย *Ulva sp.* ปริมาณต่าง ๆ กัน  
(สารละลายสารหนูเข้มข้น 50 μg/l, pH 4.5)

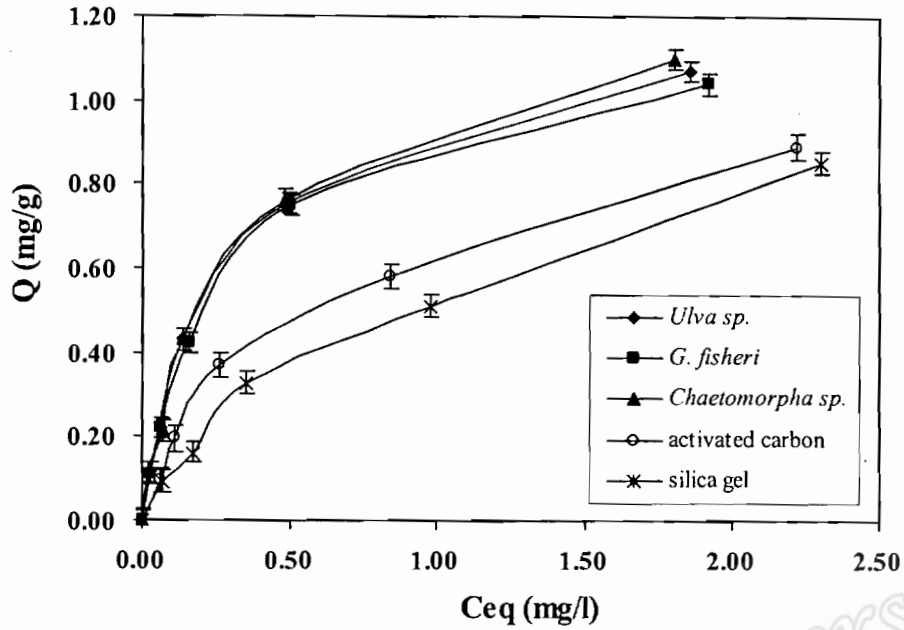
#### 4.2.3 ความสามารถดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายเปรียบเทียบกับสารดูดซับสังเคราะห์

1) ผลการทดลองการดูดซับโลหะหนักตะกั่วโดย *Ulva sp.*, *Gracilaria fisheri* และ *Chaetomorpha sp.* เปรียบเทียบกับสารดูดซับสังเคราะห์ (synthetic adsorbents) คือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) และซิลิกาเจล (silica gel) แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.2 ความสามารถดูดซับตะกั่ว (Q, mg/g) และ %Adsorption (%Ad) ที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น ( $C_0$ , mg/l) ต่าง ๆ (pH 5.0) โดย *G. fisheri*, *Ulva sp.*, *Chaetomorpha sp.*, activated carbon และ silica gel

$C_0$ (mg/l)	<i>G. fisheri</i>		<i>Ulva sp.</i>		<i>Chaetomorpha sp.</i>		activated carbon		silica gel	
	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad
0.25	0.112	89.6	0.113	90.4	0.115	92.0	0.095	76.0	0.09	72.0
0.5	0.226	91.0	0.22	88.0	0.215	86.0	0.195	78.0	0.17	68.0
1.0	0.42	84.6	0.43	86.0	0.43	86.9	0.37	74.0	0.325	65.0
2.0	0.75	75.0	0.753	75.3	0.76	76.0	0.58	58.0	0.51	51.0
4.0	1.04	52.0	1.07	53.5	1.10	55.0	0.89	44.7	0.85	42.5

หมายเหตุ : %Adsorption (%Ad) = ปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับ (mg/l) / ปริมาณโลหะเริ่มต้น ( $C_0$ , mg/l) x 100



รูปที่ 4.6 ความสามารถดูดซับตะกั่ว ( $Q$ , mg/g) โดยวัสดุตัวอย่างชนิดต่าง ๆ เทียบกับความเข้มข้นของตะกั่วที่สภาวะสมดุล ( $C_{eq}$ , mg/l) (pH 5.0)

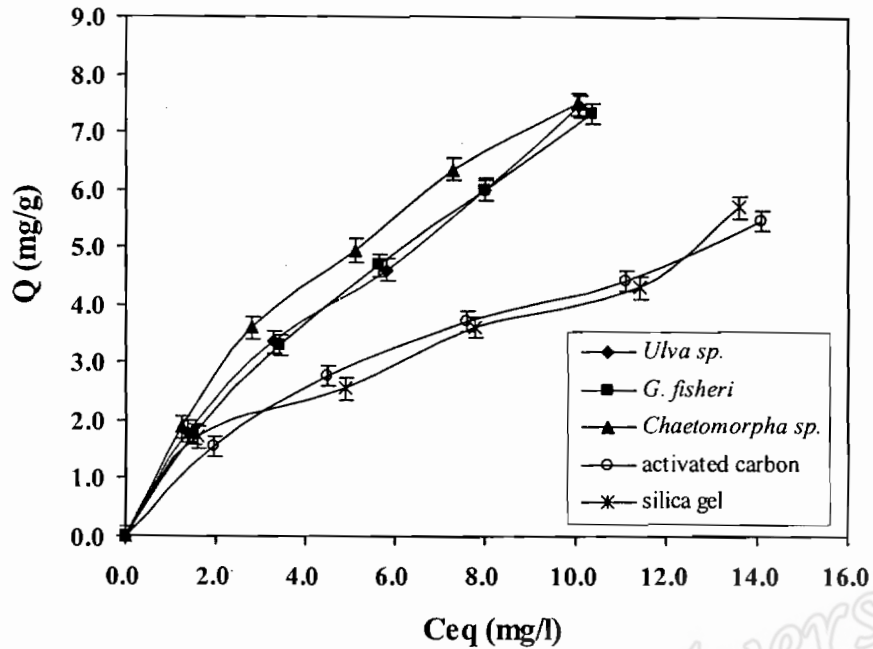
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.6 พบว่า วัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดมีความสามารถดูดซับโลหะหนักตะกั่วได้ใกล้เคียงกันและเป็นไปอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นโลหะต่ำ ๆ และจะดูดซับได้น้อยลงที่ความเข้มข้นโลหะสูงขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากค่า %Adsorption ซึ่งมีค่าลดลง ส่วนสารดูดซับสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจลมีการดูดซับโลหะหนักได้น้อยกว่าสาหร่ายและเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไป

2) ผลการทดลองการดูดซับโลหะหนักทองแดงโดย *Gracilaria fisheri*, *Ulva sp.* และ *Chaetomorpha sp.* เปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจล แสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.3 ความสามารถดูดซับทองแดง ( $Q$ , mg/g) และ %Adsorption (%Ad) ที่ความเข้มข้นทองแดงเริ่มต้น ( $C_0$ , mg/l) ต่าง ๆ (pH 5.0) โดย *G. fisheri*, *Ulva sp.*, *Chaetomorpha sp.*, activated carbon และ silica gel

$C_0$ (mg/l)	<i>G. fisheri</i>		<i>Ulva sp.</i>		<i>Chaetomorpha sp.</i>		activated carbon		silica gel	
	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad	Q (mg/g)	%Ad
5	1.75	70.0	1.80	72.0	1.88	75.4	1.53	61.5	1.70	68.0
10	3.30	66.0	3.35	67.0	3.60	72.0	2.76	55.2	2.55	51.0
15	4.68	62.4	4.60	61.3	4.94	65.9	3.71	49.5	3.61	48.0
20	6.00	60.0	6.00	60.0	6.35	63.5	4.40	44.0	4.30	43.0
25	7.33	58.6	7.45	59.6	7.48	59.8	5.45	43.6	5.70	45.6

หมายเหตุ : %Adsorption (%Ad) = ปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับ (mg/l) / ปริมาณโลหะเริ่มต้น ( $C_0$ , mg/l) x 100



รูปที่ 4.7 ความสามารถดูดซับทองแดง (Q, mg/g) โดยวัสดุตัวอย่างชนิดต่าง ๆ เทียบกับความเข้มข้นของทองแดงที่สถานะสมดุล ( $C_{eq}$ , mg/l) (pH 5.0)

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า กราฟมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีของตะกั่ว คือ สาหร่ายทั้งสามชนิด สามารถดูดซับโลหะทองแดงได้ใกล้เคียงกันและเป็นไปอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นโลหะต่ำ ๆ และจะดูดซับได้น้อยลงที่ความเข้มข้นโลหะสูงขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากค่า %Adsorption ซึ่งมีค่าลดลง ส่วนถ่านกัมมันต์และซิลิกาเจลมีการดูดซับโลหะหนักได้น้อยกว่าและเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไป การที่สาหร่ายสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีในสารละลายช่วงความเข้มข้นต่ำ ๆ น่าจะเป็นประโยชน์ในการกำจัดโลหะหนักในแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักปริมาณน้อย ๆ

3) ผลการทดลองการดูดซับโลหะหนักสารหนูโดย *Gracilaria fisheri*, *Ulva* sp. และ *Chaetomorpha* sp. เปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ และซิลิกาเจล แสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.8

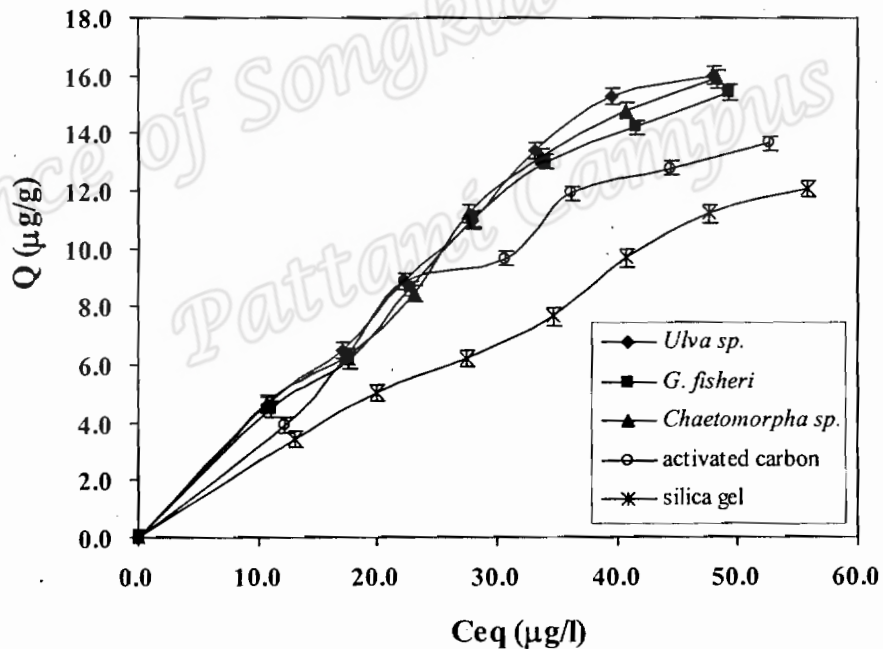
จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า วัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดคือ *G. fisheri*, *Ulva* sp. และ *Chaetomorpha* sp. มีความสามารถดูดซับสารหนูได้ใกล้เคียงกัน ที่แต่ละความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะ และมีประสิทธิภาพการดูดซับ (%Adsorption) ที่ใกล้เคียงกันคือ อยู่ในช่วงร้อยละ 38.5-44.5, 25.8-46 และ 39.8-46.6 ตามลำดับ และมีค่าสูงกว่ากรณีของ ถ่านกัมมันต์ และ ซิลิกาเจล โดยที่ ซิลิกาเจล มีความสามารถดูดซับสารหนูได้น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของโลหะทองแดงและตะกั่ว พบว่า วัสดุตัวอย่างทั้งห้าชนิดมีการดูดซับสารหนูได้น้อยกว่า



ตารางที่ 4.4 ความสามารถดูดซับสารหนู (Q,  $\mu\text{g/g}$ ) และ %Adsorption (%Ad) ที่ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น ( $C_0$ ,  $\mu\text{g/l}$ ) ต่าง ๆ (pH 4.5) โดย *G. fisheri*, *Ulva sp.*, *Chaetomorpha sp.*, activated carbon และ silica gel

$C_0$ ( $\mu\text{g/l}$ )	<i>G. fisheri</i>		<i>Ulva sp.</i>		<i>Chaetomorpha sp.</i>		activated carbon		silica gel	
	Q ( $\mu\text{g/g}$ )	%Ad	Q ( $\mu\text{g/g}$ )	%Ad	Q ( $\mu\text{g/g}$ )	%Ad	Q ( $\mu\text{g/g}$ )	%Ad	Q ( $\mu\text{g/g}$ )	%Ad
20	4.45	44.5	4.60	46.0	4.66	46.6	3.90	39.0	3.50	35.0
30	6.16	41.1	6.48	43.2	6.30	42.0	6.28	41.9	5.10	34.0
40	8.62	43.1	8.86	44.3	8.45	42.3	8.85	44.2	6.22	31.1
50	11.00	44.0	10.98	43.9	11.20	44.8	9.64	38.6	7.65	30.6
60	13.00	43.3	13.40	44.6	13.17	43.9	11.90	39.7	9.67	32.2
70	14.20	40.6	15.27	43.6	14.80	42.3	12.80	36.6	11.20	32.0
80	15.40	38.5	16.10	25.8	15.88	39.8	13.66	34.1	12.06	30.1

หมายเหตุ : %Adsorption (%Ad) = ปริมาณ โลหะที่ถูกดูดซับ ( $\mu\text{g/l}$ ) / ปริมาณ โลหะเริ่มต้น ( $C_0$ ,  $\mu\text{g/l}$ ) x 100



รูปที่ 4.8 ความสามารถดูดซับสารหนู (Q,  $\mu\text{g/g}$ ) โดยวัสดุตัวอย่างชนิดต่าง ๆ เทียบกับความเข้มข้นของสารหนูที่สถานะสมดุล ( $C_{eq}$ ,  $\mu\text{g/l}$ ) (pH 4.5)

เป็นที่น่าสังเกตว่าการดูดซับสารหนูโดยตัวอย่างสาหร่ายมีค่าใกล้เคียงกับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเมื่อทดสอบความแตกต่างของข้อมูลระหว่างกลุ่มสาหร่ายทั้งสามชนิดกับถ่านกัมมันต์ โดยใช้วิธีทางสถิติคือ ANOVA analysis และ Multiple combinations (ดูภาคผนวก) พบว่า กลุ่มตัวอย่างสาหร่ายทั้งสามมีค่าการดูดซับสารหนูที่แตกต่างจากของถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) และเมื่อพิจารณาความ

แตกต่างระหว่างความสามารถดูดซับสารหนูโดยสาหร่ายแต่ละชนิดกับถ่านกัมมันต์ พบว่า วัสดุสาหร่าย ผักกาดหรือสาหร่ายไส้ไก่ มีค่าการดูดซับสารหนูที่แตกต่างจากถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ส่วนวัสดุสาหร่ายพมนามีการดูดซับสารหนูไม่แตกต่างจากของถ่านกัมมันต์ ( $p = 0.06$ ) ซึ่งน่าจะเพิ่มจำนวนของค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้ และทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งเพื่อยืนยันผลการทดลองอีกครั้ง

#### 4.2.4 Adsorption Isotherms ของการดูดซับโลหะหนักโดยวัสดุดูดซับตัวอย่าง

จากผลการศึกษาเบื้องต้นในข้อ 4.2.3 สามารถนำมาศึกษา adsorption isotherms ได้โดยการเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการของ Langmuir และ Freundlich model ดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.14 และสรุปค่าคงที่ของ Langmuir และ Freundlich isotherms ในตารางที่ 4.5

$$\text{Langmuir model : } C_{\text{eq}}/Q = 1/Q_m \cdot b + C_{\text{eq}}/Q_m \quad (1)$$

เมื่อ  $C_{\text{eq}}$  = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (steady state) (mg/l)

$Q$  = ความสามารถดูดซับแบบ monolayer = ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (mg/g)

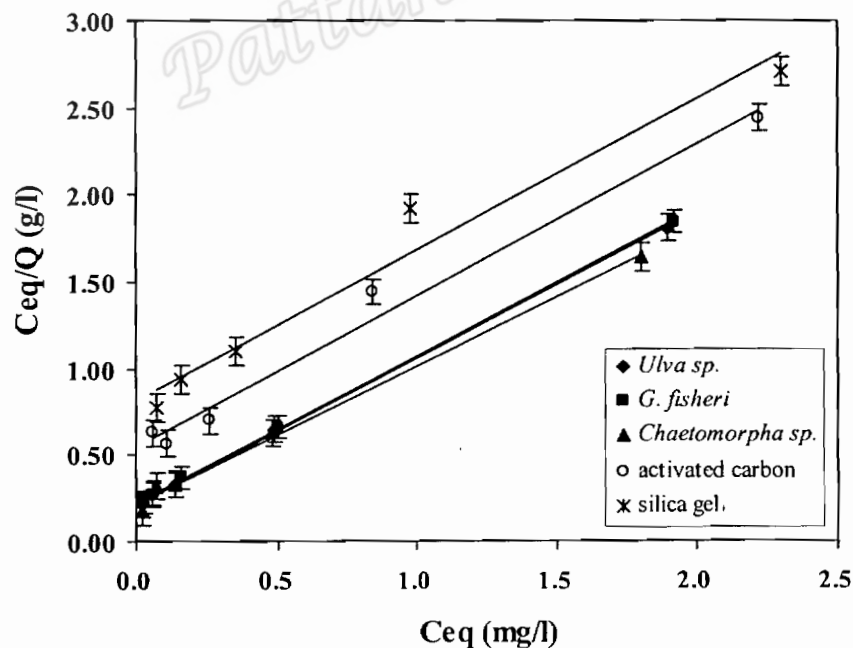
$Q_m$  = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)

$b$  = ค่าคงที่การดูดซับแบบ monolayer (Adsorption affinity)

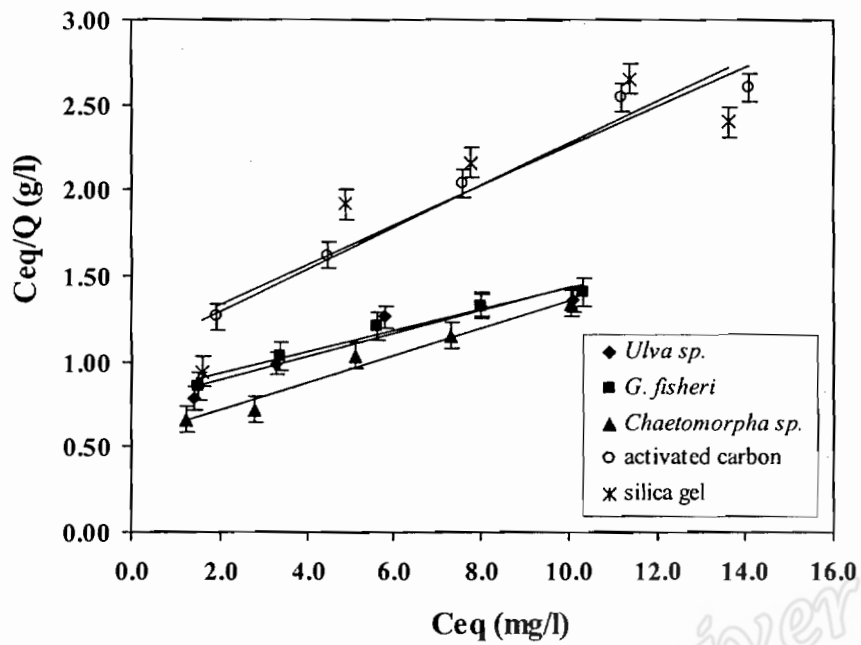
$$\text{Freundlich model : } \ln Q = \ln K + 1/n \ln C_{\text{eq}} \quad (2)$$

เมื่อ  $K$  = Freundlich sorption isotherm หรือค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบ multilayer (mg/l)

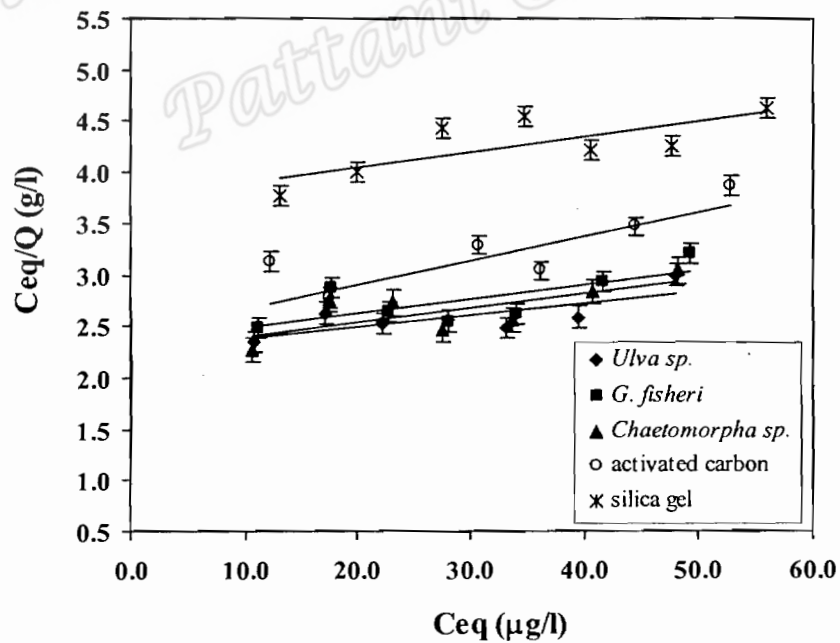
$n$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นตรงกับค่าความเข้มข้นของสารละลาย



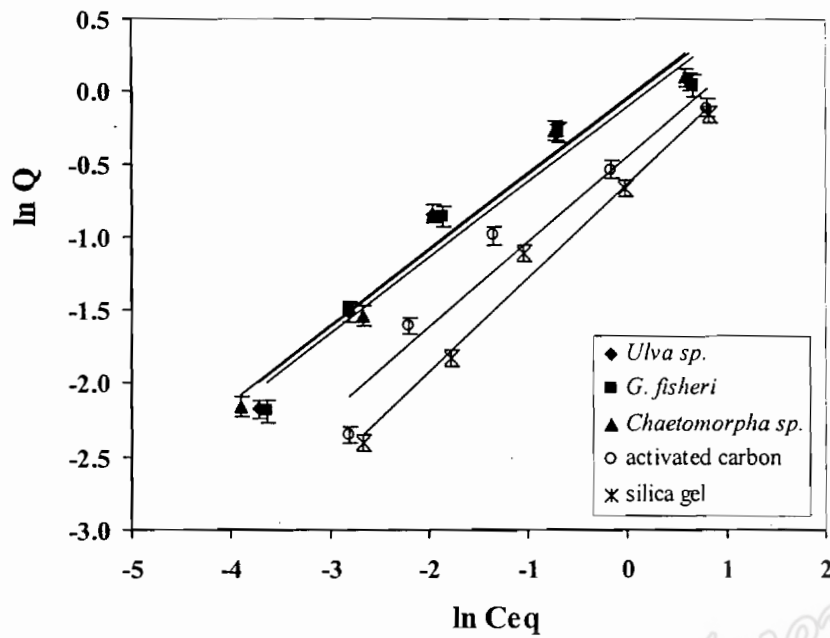
รูปที่ 4.9 Langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับตะกั่วโดยวัสดุตัวอย่าง *Ulva sp.*, *Gracilaria fisheri*, *Chaetomorpha sp.*, activated carbon และ silica gel



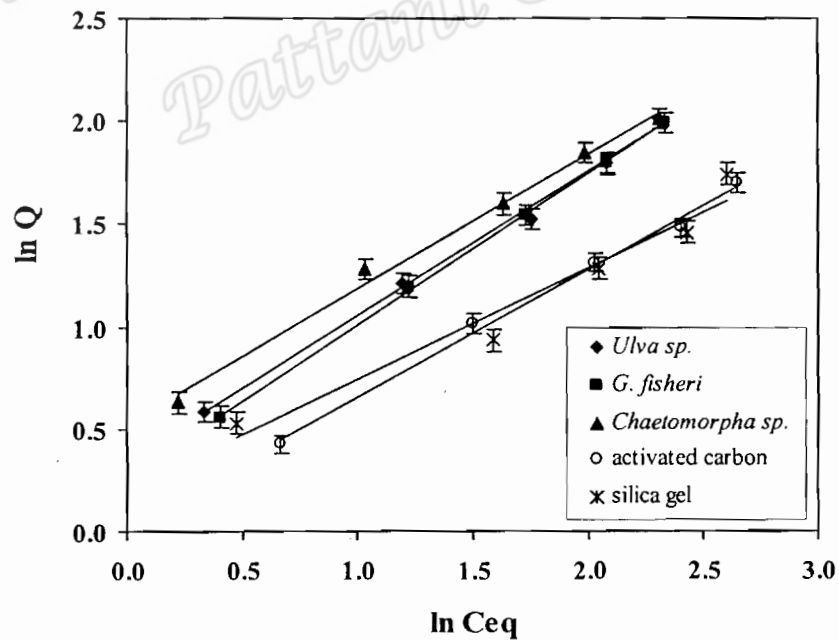
รูปที่ 4.10 Langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับทองแดงโดยวัสดุตัวอย่าง *Ulva sp.*, *Gracilaria fisheri*, *Chaetomorpha sp.*, activated carbon และ silica gel



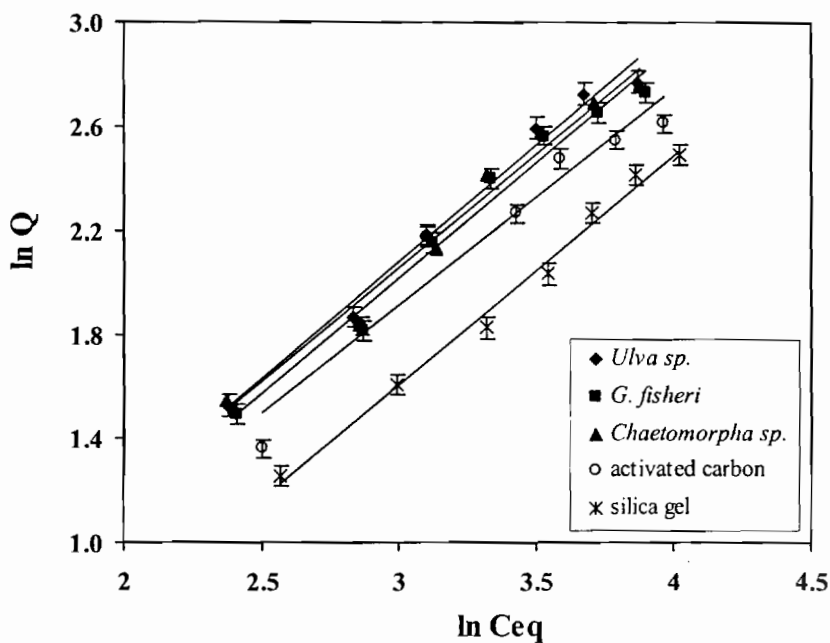
รูปที่ 4.11 Langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับสารหนูโดยวัสดุตัวอย่าง *Ulva sp.*, *Gracilaria fisheri*, *Chaetomorpha sp.*, activated carbon และ silica gel



รูปที่ 4.12 Freundlich isotherm ของการดูดซับตะกั่วโดยวัสดุตัวอย่าง *Ulva sp.*, *Gracilaria fisheri*, *Chaetomorpha sp.*, activated carbon และ silica gel



รูปที่ 4.13 Freundlich isotherm ของการดูดซับทองแดงโดยวัสดุตัวอย่าง *Ulva sp.*, *Gracilaria fisheri*, *Chaetomorpha sp.*, activated carbon และ silica gel



รูปที่ 4.14 Freundlich isotherm ของการดูดซับสารหนูโดยวัสดุตัวอย่าง *Ulva sp.*, *Gracilaria fisheri*, *Chaetomorpha sp.*, activated carbon และ silica gel

ตารางที่ 4.5 Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm ของการดูดซับตะกั่ว ทองแดง และสารหนูโดยวัสดุดูดซับชีวภาพ และวัสดุดูดซับสังเคราะห์

	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	$Q_m$ (mg/g)	b	$r^2$	K	n	$r^2$
<b>Pb :</b> <i>Ulva sp.</i>	1.186	3.94	0.999	0.944	1.93	0.955
<i>Gracilaria fisheri</i>	1.183	3.74	0.999	0.910	1.93	0.954
<i>Chaetomorpha sp.</i>	1.261	3.59	0.995	0.959	1.92	0.965
activated carbon	1.140	1.62	0.984	0.636	1.71	0.948
silica gel	1.156	1.05	0.967	0.529	1.56	0.984
<b>Cu :</b> <i>Ulva sp.</i>	14.71	0.090	0.901	1.418	1.43	0.996
<i>Gracilaria fisheri</i>	15.87	0.078	0.966	1.313	1.36	0.999
<i>Chaetomorpha sp.</i>	12.35	0.147	0.966	1.705	1.53	0.993
activated carbon	8.64	0.105	0.966	1.040	1.61	0.994
silica gel	8.16	0.117	0.809	1.232	1.87	0.953
<b>As :</b> <i>Ulva sp.</i>	0.0850	$5.18 \times 10^{-3}$	0.557	0.538	1.11	0.986
<i>Gracilaria fisheri</i>	0.0725	$5.86 \times 10^{-3}$	0.532	0.525	1.13	0.978
<i>Chaetomorpha sp.</i>	0.0704	$6.29 \times 10^{-3}$	0.535	0.569	1.14	0.979
activated carbon	0.0431	$9.51 \times 10^{-3}$	0.593	0.563	1.20	0.943
silica gel	0.0671	$3.97 \times 10^{-3}$	0.555	0.360	1.14	0.991

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า ทั้ง Langmuir model และ Freundlich model สามารถอธิบายกลไกการดูดซับโลหะของวัสดุทั้งห้าชนิดได้ โดยเฉพาะกรณีของโลหะตะกั่วและทองแดง ซึ่งวัสดุตัวอย่างสำหรับทั้งสามชนิด มีกลไกการดูดซับที่น่าจะเป็นไปได้ทั้งแบบ Langmuir และ Freundlich model เนื่องจากให้ค่า  $r^2$  ใกล้เคียงกัน (0.809-0.999 และ 0.948-0.999 ตามลำดับ) ในขณะที่กรณีของสารหนู วัสดุตัวอย่างมีการดูดซับสารหนูได้น้อยและกลไกการดูดซับแบบ Langmuir เกิดได้ไม่ดี ( $r^2=0.532-0.593$ ) แต่กลไกการดูดซับแบบ Freundlich จะเกิดได้ดี ( $r^2=0.942-0.991$ ) การที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก สารหนูมีหลายสปีชีส์เมื่ออยู่ในสารละลาย ได้แก่  $H_3AsO_3$ ,  $H_2AsO_3^-$ ,  $HAsO_3^{2-}$ ,  $AsO_3^{3-}$ ,  $H_3AsO_4$ ,  $H_2AsO_4^-$ ,  $HAsO_4^{2-}$  และ  $AsO_4^{3-}$  ซึ่งอาจทำให้การดูดซับมีกลไกที่สลับซับซ้อนและเป็นไปได้ยากกว่าทองแดงหรือตะกั่ว มีรายงานว่า การดูดซับสารหนูบนพื้นผิวของ sediments ขึ้นอยู่กับประจุของ adsorbing species และลักษณะประจุพื้นผิวของตัวดูดซับ และการดูดซับสารหนูจะเกิดได้ดีขึ้นถ้ามีอนุผลของเหล็ก (ในรูปของ iron oxides และ hydroxides) อยู่ด้วย เนื่องจากจะเกิด co-precipitation ระหว่างสารหนู กับ hydrous iron oxides บนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Bhumbla และ Keefer, 1994; Mok และ Wai, 1994)

เมื่อพิจารณาการดูดซับแบบ Langmuir model พบว่า ตัวอย่างสำหรับ *Chaetomorpha* sp. มีการดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าสาหร่ายอีกสองชนิด คือ มีค่าความสามารถดูดซับตะกั่วสูงสุด ( $Q_m$ ) เท่ากับ 1.261 mg/g ส่วน *Ulva* sp. และ *Gracilaria fisheri* มีค่า  $Q_m$  ไม่แตกต่างกัน (1.186 และ 1.183 mg/g ตามลำดับ) ซึ่งสูงกว่าของถ่านกัมมันต์ ( $Q_m = 1.14$  mg/g) และชิลิกาเจล ( $Q_m = 1.156$  mg/g) สำหรับการดูดซับทองแดง พบว่า *G. fisheri* ดูดซับได้ดีกว่าวัสดุตัวอย่างอื่นๆ คือ มีค่า  $Q_m$  สูงที่สุดเท่ากับ 15.87 mg/g รองลงมาคือ *Ulva* sp. ( $Q_m = 14.71$  mg/g) และ *Chaetomorpha* sp. ( $Q_m = 12.35$  mg/g) ส่วนถ่านกัมมันต์และชิลิกาเจลมีค่า  $Q_m$  ที่ไม่แตกต่างกัน (8.64 และ 8.16 mg/g ตามลำดับ) กรณีของสารหนู วัสดุตัวอย่างให้ค่า  $Q_m$  ที่ต่ำกว่ากรณีของทองแดงและตะกั่ว โดย *Ulva* sp. มีแนวโน้มที่จะดูดซับได้ดีกว่า ( $Q_m = 0.085$  mg/g) รองลงมาคือ *G. fisheri* และ *Chaetomorpha* sp. ( $Q_m = 0.0725$  และ 0.0704 mg/g ตามลำดับ)

ความสามารถดูดซับโลหะตะกั่วของวัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดนี้ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *Undaria pinnatifida* ซึ่ง treat ด้วย xanthate ( $Q_m = 1.21$  mg/g) (Kim *et al.*, 1984) แต่ต่ำกว่า natural zeolites ( $Q_m = 16.6$  mg/g) (Blanchard *et al.*, 1984) แบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* PU21 (70 mg/g) (Chang *et al.*, 1997) และวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *Ecklonia radiata* (282 mg/g) (Matheickal and Yu, 1996)

สำหรับความสามารถดูดซับทองแดง พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุดูดซับที่เป็นเชื้อรา *Rhizopus arrhizus* ( $Q_m = 15.9$  mg/g) (Tobin *et al.*, 1984) แบคทีเรีย *Streptomyces noursei* (13.3 mg/g) (Mattuschka and Strabe, 1993) และมีค่ามากกว่าเชื้อรา *Aspergillus oryzae* (4.4 mg/g) (Huang *et al.*, 1991) แต่มีค่าน้อยกว่ากรณีของเชื้อรา *Penicillium chrysogenum* ( $Q_m = 24.7$  mg/g) (Fourest *et al.*, 1994) แบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* PU21 (23 mg/g) (Chang *et al.*, 1997) วัสดุสาหร่าย microalgae พวก

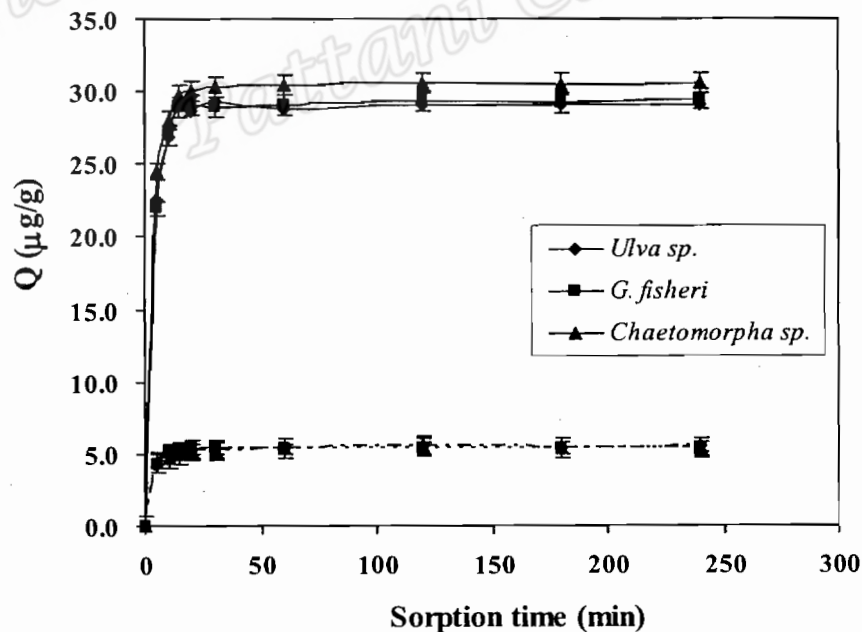
*Scenedesmus obliquus* และ *Synechocystis* sp. (26.7 และ 32.4 mg/g) (Donmez *et al.*, 1999) ตลอดจนวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาลพวก *Ecklonia radiata* (70.5 mg/g) (Matheickal *et al.*, 1997)

กรณีของ Freundlich model วัสดุตัวอย่างสาหร่ายมีความสามารถดูดซับตะกั่วที่คล้ายกับกรณีของ Langmuir model คือ *Chaetomorpha* sp. ให้ค่า sorption coefficient สูงที่สุด ( $K = 0.959$  mg/g) รองลงมาคือ *Ulva* sp. และ *G. fisheri* ( $K = 0.944$  และ  $0.910$  mg/g ตามลำดับ) ซึ่งพบว่ามีความต่ำกว่ากรณีวัสดุเชื้อรา *Aspergillus niger* ( $K = 1.69$ ,  $n = 2.56$ ) (Jianlong *et al.*, 2001) ส่วนการดูดซับทองแดง *Chaetomorpha* sp. ก็ให้ค่า  $K$  สูงที่สุด (1.705 mg/g) รองลงมาคือ *Ulva* sp. และ *G. fisheri* ( $K = 1.418$  และ  $1.313$  mg/g ตามลำดับ) สำหรับการดูดซับสารหนู วัสดุตัวอย่างสาหร่ายและถ่านกัมมันต์ให้ค่า  $K$  ที่ไม่แตกต่างกันนัก (0.525-0.569 mg/g) ในขณะที่ซีลิกาเจล มีค่า  $K$  น้อยที่สุด (0.360 mg/g)

การที่วัสดุชีวภาพชนิดต่าง ๆ เหล่านี้มีความสามารถดูดซับโลหะหนักได้แตกต่างกัน ส่วนหนึ่งอาจเนื่องมาจากองค์ประกอบพวกโพลีแซคคาไรด์ของโครงสร้างผนังเซลล์ของวัสดุชีวภาพ ประกอบด้วยชนิดจำนวนและสมบัติที่แตกต่างกัน

#### 4.2.5 จลนศาสตร์ (Kinetics Profiles) ของการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายตัวอย่าง

จากการทดลองจลนศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด คือ ตะกั่ว ( $Pb^{2+}$  15 และ 50  $\mu\text{g/l}$ , pH  $5.0 \pm 0.5$ ) ทองแดง ( $Cu^{2+}$  10 และ 20 mg/l, pH  $5.0 \pm 0.5$ ) และ สารหนู ( $As^{3+}$  25 และ 50  $\mu\text{g/l}$ , pH  $4.5 \pm 0.5$ ) โดยวัสดุสาหร่ายต่าง ๆ คือ *Ulva* sp., *G. fisheri* และ *Chaetomorpha* sp. ให้ผลแสดงในรูปที่ 4.15 – 4.17

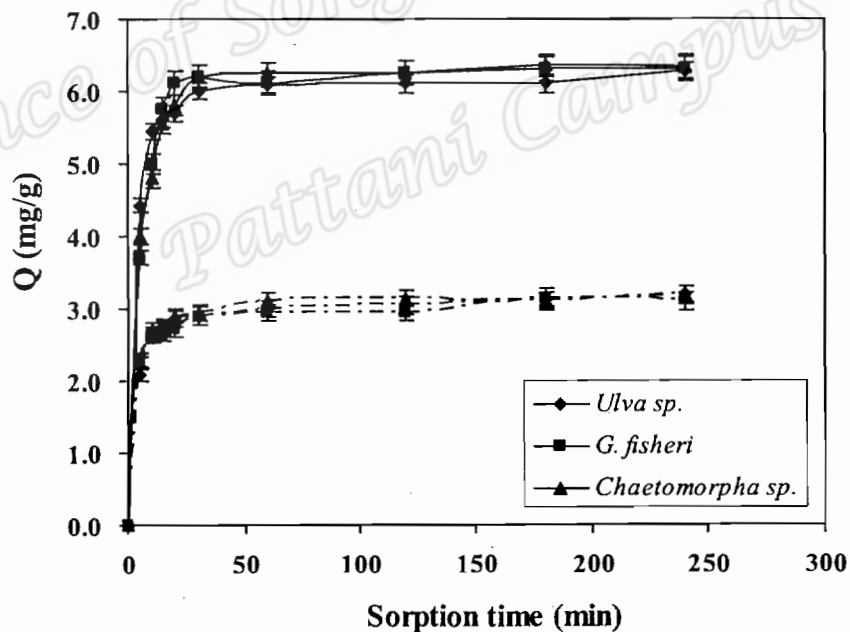


รูปที่ 4.15 ความสามารถดูดซับตะกั่ว ( $Q$ ,  $\mu\text{g/g}$ ) ของสาหร่าย 3 ชนิด ที่เวลาต่าง ๆ (เส้นประ-15  $\mu\text{g/l}$  Pb และ เส้นทึบ-50  $\mu\text{g/l}$  Pb)

จากรูปที่ 4.15 พบว่า ตัวอย่างสาหร่ายแต่ละชนิดมีความสามารถดูดซับตะกั่วได้ในเวลาที่รวดเร็ว โดยดูดซับตะกั่วได้ถึงร้อยละ 90 ของการดูดซับโดยสมบูรณ์ ภายในเวลา 15-30 นาที ซึ่งตรงกับผลการทดลองของ Matheickal และ Yu (1996) กรณี biomass ของสาหร่ายสีน้ำตาล *Ecklonia radiata* ซึ่งรายงานการดูดซับตะกั่วได้เกือบ 100 % ภายในระยะเวลา 15 นาที

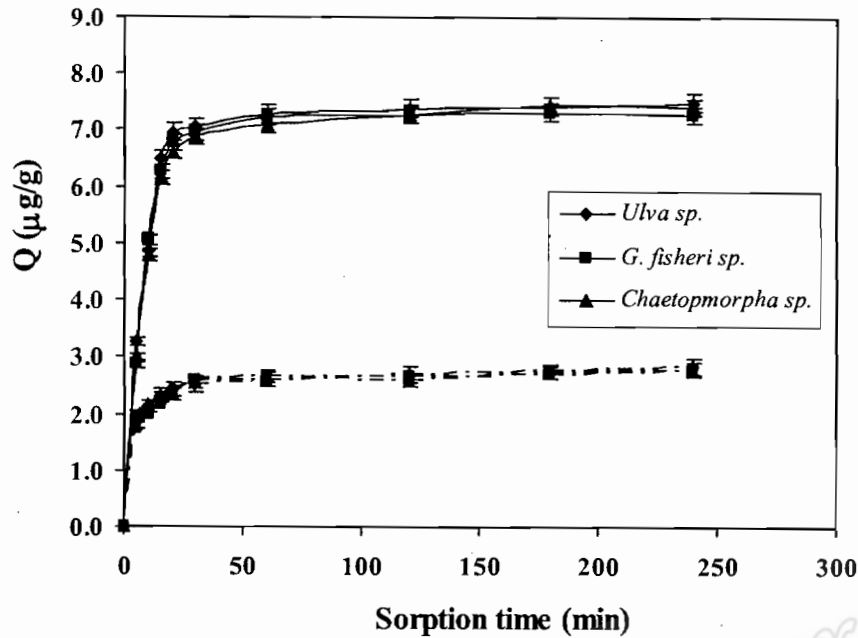
สำหรับการดูดซับทองแดงก็เช่นเดียวกัน จากรูปที่ 4.16 พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงเท่ากับ 10 และ 20 mg/l สาหร่ายทั้งสามชนิดมีความสามารถดูดซับทองแดงได้ในเวลาที่รวดเร็ว และดูดซับทองแดงได้เกือบถึงสถานะสมดุล ภายในระยะเวลา 15-30 นาที ซึ่งตรงกับผลการทดลองของ Matheickal *et al.* (1997) ซึ่งรายงานวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *E. radiata* ดูดซับโลหะได้ 90 % ภายในระยะเวลา 15 นาที

ส่วนการดูดซับสารหนูที่เวลาต่าง ๆ (รูปที่ 4.17) พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารหนู เท่ากับ 25 และ 50  $\mu\text{g/l}$  สาหร่ายแต่ละชนิดสามารถดูดซับสารหนูได้ภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว ภายใน 15-30 นาที เป็นที่น่าสังเกตว่า ณ ความเข้มข้นของโลหะน้อย ๆ วัสดุตัวอย่างสาหร่ายมีแนวโน้มดูดซับโลหะได้เร็วกว่าที่ความเข้มข้นโลหะสูง ๆ



รูปที่ 4.16 ความสามารถดูดซับทองแดง (Q, mg/g) ของสาหร่าย ที่เวลาต่าง ๆ (เส้นประ-10 mg/l Cu และ เส้นทึบ-20 mg/l Cu)





รูปที่ 4.17 ความสามารถดูดซับสารหนู ( $Q$ ,  $\mu\text{g/g}$ ) ของสาหร่าย ที่เวลาต่าง ๆ (เส้นประ-25  $\mu\text{g/l}$  และ เส้นทึบ- 50  $\mu\text{g/l}$ )

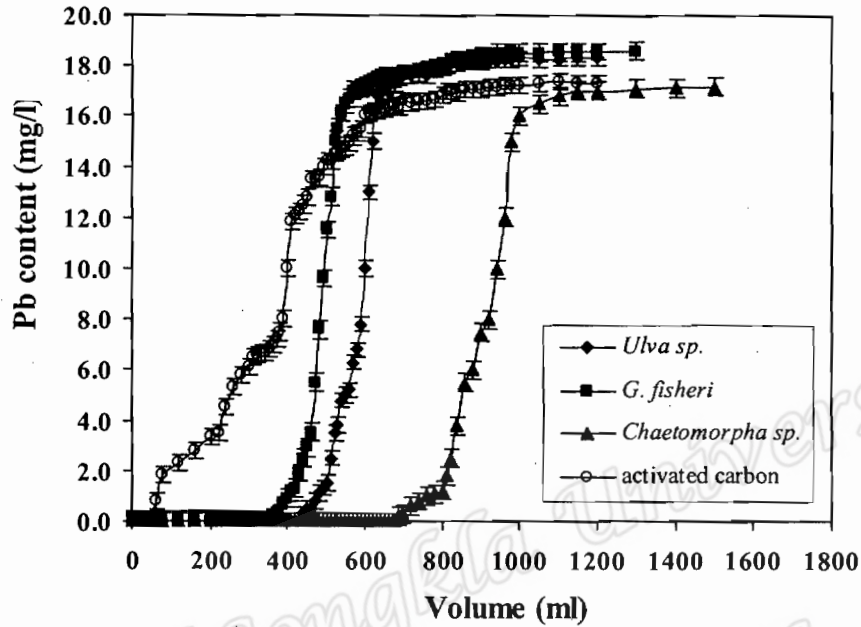
#### 4.3 ผลการทดสอบการดูดซับโลหะหนักโดย Continuous Flow Experiment

ผลการศึกษาการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด คือ ตะกั่ว และทองแดง แบบ continuous flow system โดยใช้วัสดุตัวอย่างสาหร่ายที่อบแห้ง (*Ulva sp.*, *G. fisheri* หรือ *Chaetomorpha sp.*) และถ่านกัมมันต์ จำนวนอย่างละ 1.5 g บรรจุในคอลัมน์ขนาด 1.8 x 15 cm และผ่านสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 20 mg/l, pH 5.0±0.5 ลงไป อัตราการไหลของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์คือ 3 ml/min เก็บตัวอย่างที่ได้หลอดละ 10 ml มาวัดปริมาณโลหะที่เหลือโดยเครื่อง AAS พบว่า กราฟที่พลอตระหว่างความเข้มข้นโลหะที่เหลือเทียบกับปริมาตรของสารละลายโลหะที่ใช้ มีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (รูปที่ 4.18) คอลัมน์ที่บรรจุวัสดุสาหร่าย *Chaetomorpha sp.* มีความสามารถลดปริมาณตะกั่วได้มากกว่า *G. fisheri* และ *Ulva sp.* โดย 1 กรัมของตัวอย่าง สามารถกำจัดตะกั่วได้ 480 ml ในขณะที่ *Ulva sp.* และ *G. fisheri* กำจัดตะกั่วได้ 305 และ 260 ml/g ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์มีความสามารถกำจัดตะกั่วได้น้อยที่สุด (80 ml/g)

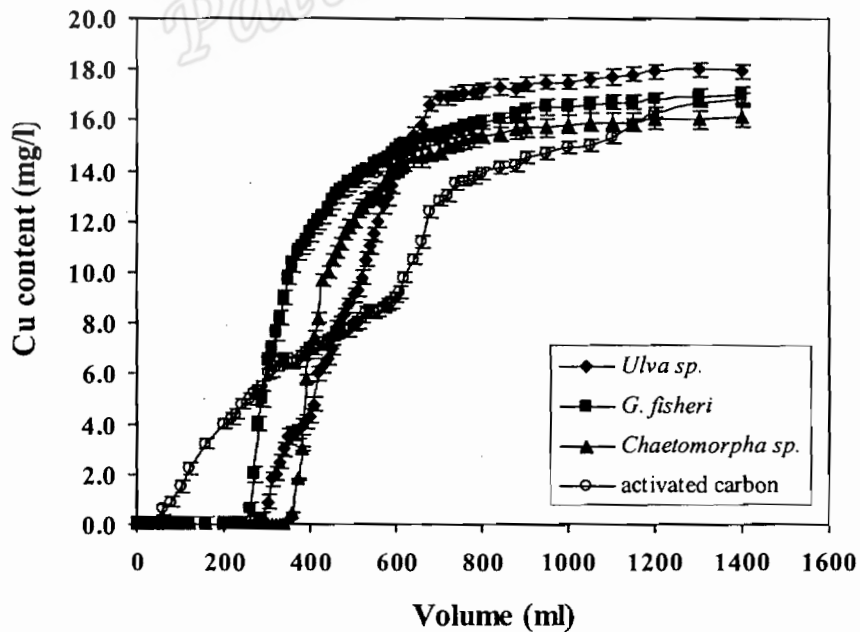
การทดลองการดูดซับโลหะตะกั่วแบบ continuous flow system นี้ให้ผลการทดลองตรงกับกรณีแบบ batch system ซึ่งพบว่า วัสดุตัวอย่างสาหร่าย *Chaetomorpha sp.* สามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด

ในกรณีของการดูดซับโลหะทองแดงก็ให้ผลเช่นเดียวกัน คือ เมื่อใช้สารละลายทองแดงเข้มข้น 20 mg/l, pH 5.0±0.5 ผ่านลงในคอลัมน์แต่ละชุดซึ่งบรรจุวัสดุสาหร่ายอบแห้ง 1.5 g พบว่า กราฟที่พลอตระหว่างความเข้มข้นโลหะที่เหลือเทียบกับปริมาตรของสารละลายโลหะที่ใช้ มีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (รูปที่ 4.19) วัสดุสาหร่าย *Chaetomorpha sp.* สามารถกำจัดทองแดงได้ 240 ml/g ซึ่งดีกว่า *Ulva sp.* และ *G.*

*fisheri* (200 และ 175 ml/g ตามลำดับ) จะเห็นว่า ความสามารถดูดซับทองแดงระหว่างวัสดุสำหรับทั้งสามชนิดนี้ไม่แตกต่างกันมากนัก อยู่ในช่วง 175-240 ml/g ซึ่งต่างจากกรณีของการดูดซับตะกั่ว ส่วนถ่านกัมมันต์ดูดซับโลหะทองแดงได้น้อยที่สุด



รูปที่ 4.18 Breakthrough curve ของการกำจัดตะกั่วโดยสาหร่ายชนิดต่าง ๆ แบบ continuous flow system (ความเข้มข้นตะกั่ว 20 mg/l, pH 5.0)



รูปที่ 4.19 Breakthrough curve ของการกำจัดทองแดงโดยวัสดุสาหร่ายชนิดต่าง ๆ แบบ continuous flow system (ความเข้มข้นทองแดง 20 mg/l, pH 5.0)

อนึ่ง ได้ทำการทดสอบการดูดซับสารหนูแบบต่อเนื่องกับวัสดุตัวอย่างสาหร่าย *Ulva* sp. โดยใช้สารละลายสารหนูเข้มข้น 50  $\mu\text{g/l}$ , pH  $4.5 \pm 0.5$  พบว่า ตัวอย่างสาหร่ายสามารถกำจัดสารหนูได้ 270 ml/g โดย breakthrough curve ที่ได้มีลักษณะเป็นรูปตัวเอสเช่นเดียวกับกรณีการดูดซับตะกั่วและทองแดง

#### 4.4 ผลการศึกษาการพัฒนาคุณภาพสารดูดซับชีวภาพ

##### 4.4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารดูดซับ

###### 4.4.1.1 มวลของแข็ง (%Total solid) ของวัสดุตัวอย่าง

จากการทดลองหามวลของแข็ง (%) ของวัสดุตัวอย่างที่ใช้คือ สาหร่ายผสมนาง (*Gracilaria fisheri*) สาหร่ายผักกาด (*Ulva* sp.) และสาหร่ายไส้ไก่ (*Chaetomorpha* sp.) เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งปราศจากความชื้น ให้ผลการทดลองแสดงดังในตารางที่ 4.6

จากตารางพบว่า วัสดุตัวอย่างทั้งสี่ที่ใช้ในการทดลองมีค่ามวลของแข็งที่ใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วงร้อยละ 87-90 โดยสาหร่ายผสมนางมีค่ามวลของแข็งมากที่สุด (ร้อยละ 90) และถ่านกัมมันต์มีค่าน้อยที่สุด (ร้อยละ 87)

ตารางที่ 4.6 มวลของแข็ง (%Total solid) ของวัสดุตัวอย่าง

วัสดุตัวอย่าง	%Total solid $\pm$ SD
<i>Gracilaria fisheri</i>	90.00 $\pm$ 0.72
<i>Ulva</i> sp.	88.48 $\pm$ 0.61
<i>Chaetomorpha</i> sp.	88.90 $\pm$ 0.15
Activated carbon	87.19 $\pm$ 0.03

###### 4.4.1.2 สมบัติการบวมตัว (Swelling characteristics) ของวัสดุตัวอย่างสาหร่าย

จากการทดสอบสมบัติการบวมตัวคือ Swelling ratio (Q) และ Volume of absorbed solvent (VAS) ของวัสดุตัวอย่างสาหร่ายชนิดต่าง ๆ ให้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 Swelling ratio (Q) และ Volume of absorbed solvent (VAS) ของวัสดุสาหร่ายชนิดต่าง ๆ

Sample material	Swelling ratio (Q)	Volume of absorbed solvent (VAS)
<i>Gracilaria fisheri</i>	0.191	0.81
<i>Ulva</i> sp.	0.154	0.84
<i>Chaetomorpha</i> sp.	0.156	0.81

$$Q = W_s/W_d \text{ และ } VAS = (W_s - W_d)/W_d \text{ (} W_s = \text{น้ำหนักวัสดุที่แห้ง, } W_d = \text{น้ำหนักวัสดุที่เปียก)}$$

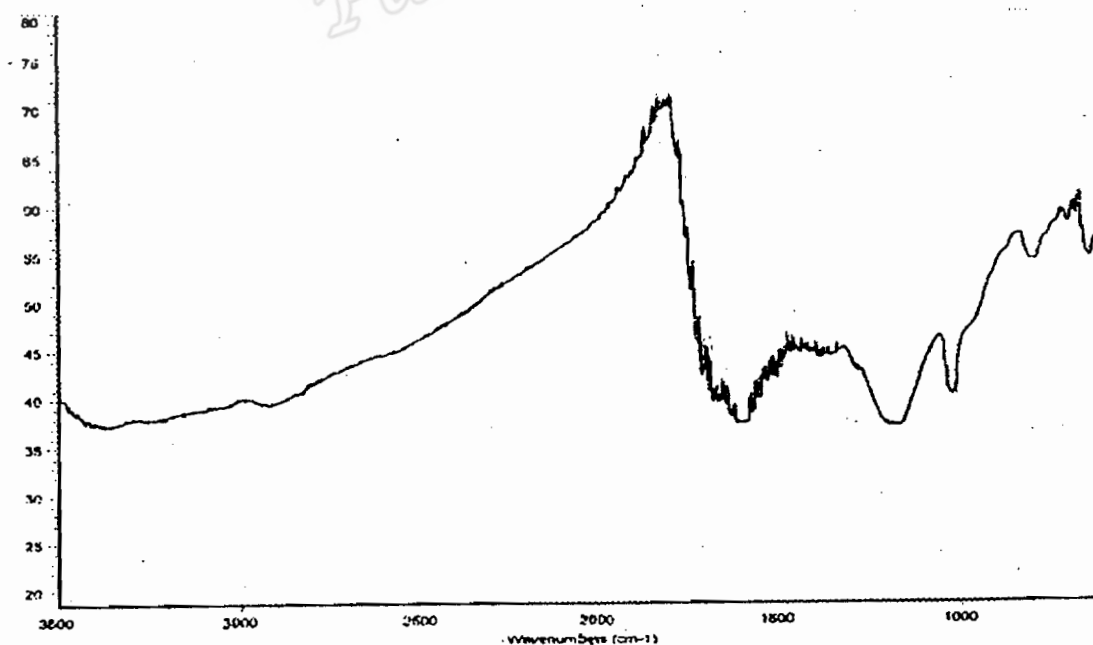
จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า วัสดุตัวอย่างสาหร่ายผสมนามีค่า swelling ratio (0.191) ซึ่งมากกว่าของสาหร่ายอีกสองชนิด แต่สามารถดูดซับน้ำเข้าไปในตัวได้ใกล้เคียงกับสาหร่ายอีกสองชนิด โดยที่วัสดุสาหร่าย *Gracilaria fisheri* มีลักษณะภายนอกที่บวมพองชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากชั้นตัวอย่าง *G. fisheri* มีขนาดใหญ่กว่าสาหร่ายอีกสองชนิด จึงมองเห็นได้ชัดเจนกว่า

ค่า swelling ratio (Q) และ volume of absorbed solvent (VAS) ของวัสดุสาหร่ายทั้งสามชนิดนี้พบว่า มีค่าต่ำกว่ากรณีของวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *Undaria pinnatifida* (Q = 4.42, VAS = 3.61) (Kim *et al.*, 1999) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างผนังเซลล์ด้านนอกของสาหร่ายแต่ละชนิดจะประกอบด้วยสารโพลีแซคคาไรด์ที่แตกต่างกันทั้งในด้านชนิดและจำนวนของแต่ละองค์ประกอบย่อย

#### 4.4.1.3 หมู่ฟังก์ชันของวัสดุตัวอย่าง

จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสาหร่ายผสมนามที่อบแห้งโดยใช้เครื่อง FTIR พบว่า พื้นผิวของสาหร่ายประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) ที่  $3405\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีลักษณะที่เป็น broad peak หมู่อัลคิล (-CH<sub>3</sub>) ที่  $2904.61\text{ cm}^{-1}$  หมู่ C=O ซึ่งต่ออยู่กับพันธะ C=C (stretching) หรือ พันธะ -N-H ที่  $1640.50\text{ cm}^{-1}$  และหมู่ C-O (stretching) ที่  $1081.58\text{ cm}^{-1}$  (รูปที่ 4.20)

IR spectrum ที่ได้พบว่ามีค่าคล้ายคลึงกับกรณีของวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *Undaria pinnatifid* (Kim *et al.*, 1999) ซึ่งพบ peak ที่  $3400\text{ cm}^{-1}$  (-OH, broad),  $2900\text{ cm}^{-1}$  (-CH<sub>3</sub>),  $1630\text{ cm}^{-1}$  (amide) และ  $1058\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีค่าแตกต่างบ้างในบางจุด อาจเนื่องมาจากความแตกต่างขององค์ประกอบย่อยของโพลีแซคคาไรด์บนผนังเซลล์สาหร่าย



รูปที่ 4.20 IR spectrum ของวัสดุตัวอย่างสาหร่ายผสมนาม

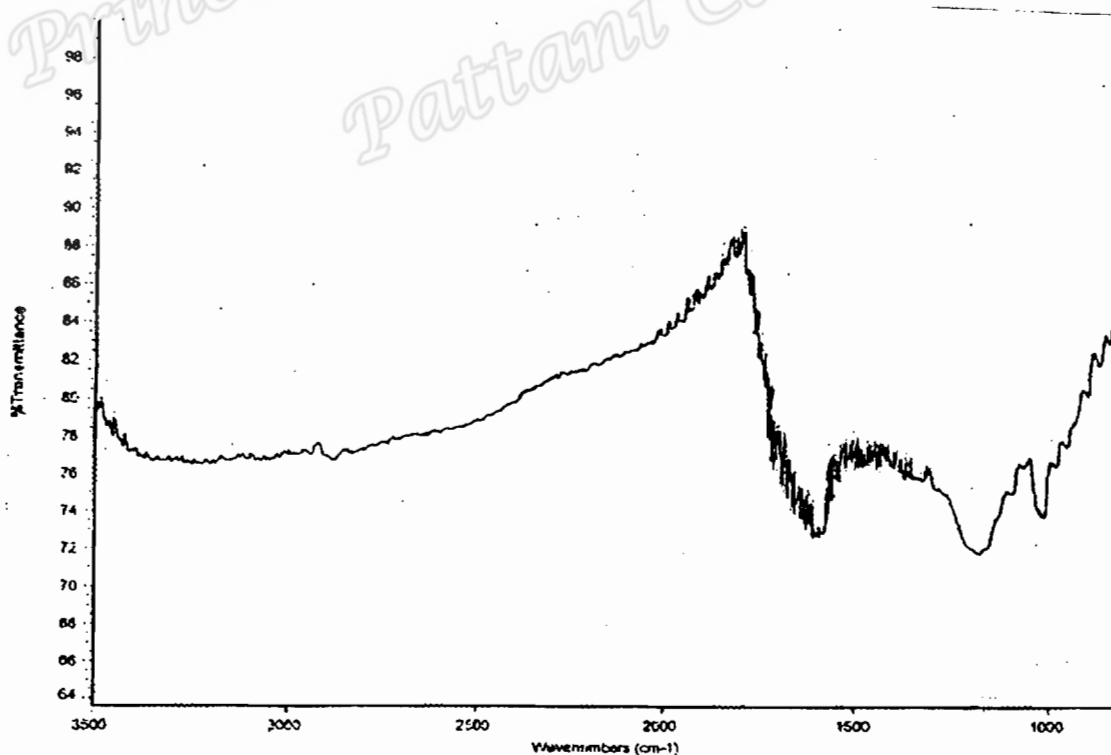
#### 4.4.2 Adsorption-Desorption experiment

จากการศึกษา Adsorption-desorption แบบ batch system ของโลหะทองแดงโดยวัสดุตัวอย่าง สาหร่ายพมนาง พบว่า ในกระบวนการ adsorption เมื่อใช้สารละลายทองแดงเริ่มต้น 20 mg/l ปริมาตร 100 ml ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับโดยวัสดุสาหร่ายเท่ากับ 1.22 mg และใน batch desorption system พบว่า ปริมาณทองแดงที่ถูกชะออกมาโดย 0.5 M HCl คือ 1.15 mg ซึ่ง desorption efficiency มีค่าเท่ากับ 94.3 %

#### 4.4.3 การเปลี่ยนแปลงพื้นผิววัสดุตัวอย่างสาหร่ายพมนางด้วย 37% Formaldehyde

##### 4.4.3.1 หมู่ฟังก์ชันของวัสดุตัวอย่าง

หลังการ treat สาหร่ายพมนางด้วย กรด  $H_2SO_4$  และ 37% Formaldehyde พบว่า หมู่ฟังก์ชัน  $-OH$  ได้หายไป พบพีคที่  $1180\text{ cm}^{-1}$  และที่  $1020\text{ cm}^{-1}$  (รูปที่ 4.21) ซึ่งน่าจะเป็นของ  $C-O$  และพีคที่  $1660\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งน่าจะเป็นของ  $C=O$  แต่ผลการทดลองยังไม่ชัดเจนว่าเกิดการ crosslink ระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์ที่เติมกับ โพลีแซคคาไรด์ (เช่น alginate, agar, carrageenan) ที่เป็นองค์ประกอบของพื้นผิวสาหร่ายได้อย่างสมบูรณ์หรือไม่ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุตัวอย่างก่อนการ crosslink ทำให้มีลักษณะไม่เหมาะสมที่จะเกิด crosslink และ/หรือปริมาณวัสดุสาหร่ายที่ใช้การหาหมู่ฟังก์ชันน้อยเกินไป นอกจากนี้ ผลของ IR peak เพียงอย่างเดียว ยังไม่สามารถอธิบายการเกิด crosslink ได้มากนัก ต้องอาศัยผลจาก NMR peak ประกอบด้วยเพื่อบ่งบอกถึง หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่อยู่บนพื้นผิววัสดุตัวอย่าง



รูปที่ 4.21 IR spectrum ของวัสดุสาหร่ายพมนางที่ปรับสภาพด้วย 37% Formaldehyde

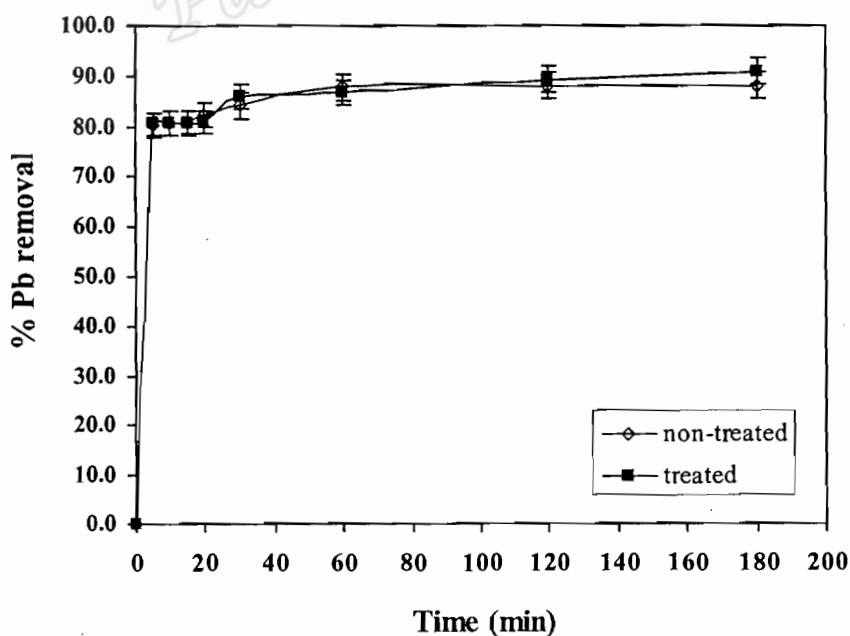
#### 4.4.3.2 ความสามารถดูดซับโลหะหนักตะกั่ว

ผลการศึกษาศามารถดูดซับตะกั่ว เข้มข้น 0.500 mg/l, pH 5.0±0.5 แบบ continuous flow system ของวัสดุตัวอย่างสาหร่ายผมนางที่ treat และไม่ treat ด้วย กรด H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ 37% Formaldehyde ที่ เวลาต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.8 และ รูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.8 การดูดซับตะกั่ว (เข้มข้น 500 µg/l) แบบ continuous flow system ที่เวลาต่าง ๆ ของ สาหร่ายผมนางที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว

Time (min)	Residual Pb concentration (µg/l)		Uptake Pb concentration (µg/l)		% Pb removal	
	before treatment	after treatment	before treatment	after treatment	before	after
0	0	0	0	0	0	0
5	98.48	97.36	401.52	402.64	80.30	80.53
10	97.52	96.80	402.48	403.20	80.50	80.64
15	97.20	96.50	402.80	403.50	80.56	80.70
20	88.51	95.70	411.49	404.30	82.30	80.90
30	79.50	71.30	420.50	428.70	84.10	85.74
60	60.71	67.08	439.30	432.92	87.86	86.60
120	59.95	53.50	440.00	446.50	88.00	89.30
180	59.60	45.55	440.40	454.45	88.08	90.90

$$\% \text{ Pb removal} = (\text{Uptake Pb concentration} / \text{Initial Pb concentration}) \times 100$$



รูปที่ 4.22 ร้อยละการกำจัดโลหะตะกั่ว (%Pb removal) ที่เวลาต่าง ๆ ของสาหร่ายผมนางที่ปรับและไม่ปรับสภาพพื้นผิวด้วย 37% formaldehyde

จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.22 พบว่า วัสดุสาหร่ายที่ปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วย 37% formaldehyde มีความสามารถดูดซับโลหะหนักได้ใกล้เคียงกับวัสดุสาหร่ายที่ไม่ปรับปรุงสภาพ แต่ที่ระยะเวลา นานขึ้น เช่นที่ 180 นาที มีแนวโน้มที่กำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าวัสดุสาหร่ายที่ไม่ปรับปรุงสภาพพื้นผิว

ผลการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วย 37% formaldehyde เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของวัสดุสาหร่ายในการ ดูดซับโลหะหนักยังไม่ชัดเจนนัก ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า ไม่มีการ crosslink ระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์กับ องค์ประกอบของพื้นผิวสาหร่าย ซึ่งยืนยันการที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวสาหร่ายจากผลทดสอบหมู่ ฟังก์ชัน โดย FTIR ดังนั้นควรที่จะต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมอีก ทั้งการทำ crosslink กับฟอร์มัลดีไฮด์ และ การทดสอบการดูดซับโลหะของวัสดุตัวอย่างที่ปรับปรุงสภาพพื้นผิวแล้ว เพื่อยืนยันผลว่าหลังการปรับปรุงสภาพ วัสดุตัวอย่างมีความสามารถดูดซับโลหะได้ดีขึ้นหรือไม่ รวมถึงควรรศึกษาลักษณะการบวมน้ำ (Swelling characteristics) ของวัสดุสาหร่ายที่ไม่ปรับและที่ปรับปรุงสภาพด้วย เนื่องจากมีการศึกษาของ Holan *et al.* (1993) ในการปรับปรุงสภาพพื้นผิววัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *Ascophyllum nodosum* โดยการ crosslink กับ formaldehyde, formaldehyde-urea, divinyl sulfone และ glutaraldehyde และทดสอบการดูดซับโลหะ แคลเมียม พบว่า วัสดุสาหร่ายที่ crosslink กับฟอร์มัลดีไฮด์ และกับไดไวนิลซัลโฟน มีความสามารถดูด ซับแคลเมียมได้เท่ากับ 125 และ 117 mg/g ตามลำดับ (สารละลายแคลเมียมเริ่มต้น 200 mg/l) แม้ว่าจะให้ ค่าการดูดซับที่น้อยกว่ากรณีวัสดุสาหร่ายที่ไม่ปรับปรุงสภาพ (170 mg/g) แต่สาหร่ายที่ crosslink กับ ฟอร์มัลดีไฮด์ จะมี swelling characteristics ที่ดีกว่า คือมีการบวมน้ำ (Swelling ratio, Q) เท่ากับ 1.2 และ การดูดซับน้ำ (Volume of absorbed solvent, VAS) เท่ากับ 0.2 ซึ่งน้อยกว่าของวัสดุสาหร่ายที่ไม่ปรับปรุงสภาพ มาก (Q = 4.0, VAS = 3.0)

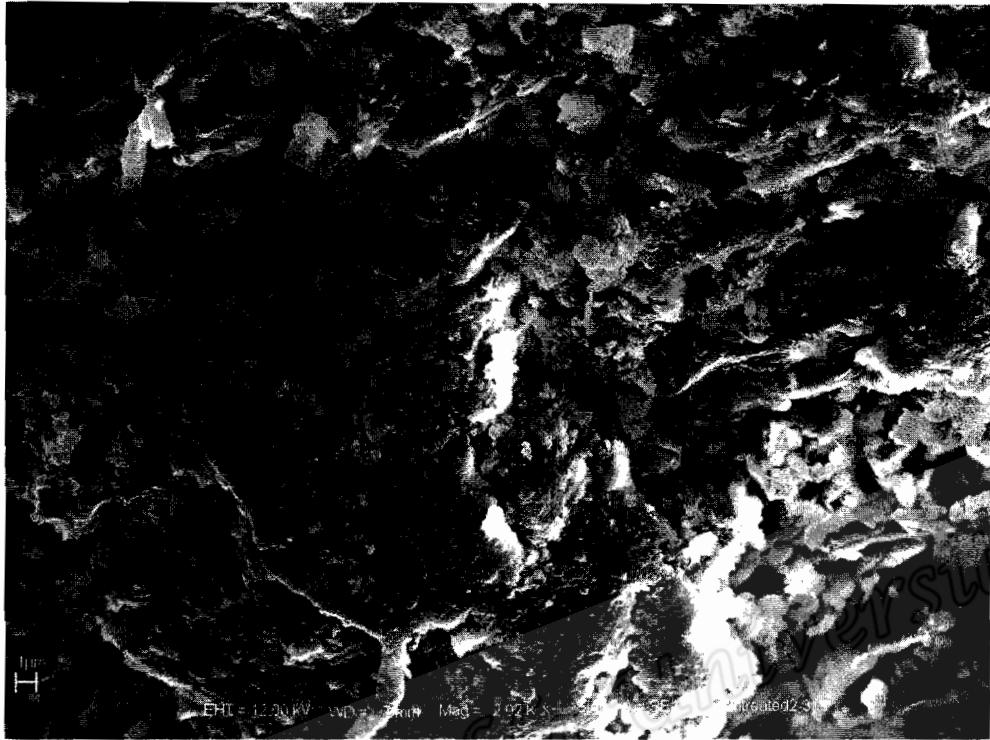
#### 4.4.4 การปรับปรุงสภาพวัสดุตัวอย่างสาหร่ายผสมนางด้วย 0.2 M CaCl<sub>2</sub>

##### 4.4.4.1 ลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่างสาหร่ายที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วย 0.2M CaCl<sub>2</sub>

จากรูปที่ 4.23 พบว่า ตัวอย่างสาหร่ายผสมนางที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วย 0.2 M CaCl<sub>2</sub> มีลักษณะ พื้นผิวเป็นร่องอย่างมีระเบียบ และมีลักษณะที่แตกต่างจากพื้นผิวของตัวอย่างสาหร่ายที่ไม่ปรับปรุงสภาพ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการที่แคลเซียมไปจับกับสาร alginate ซึ่งเป็น โมเลกุลที่สำคัญในการเกิดกระบวนการ แลกเปลี่ยนไอออน ได้เป็น crosslinked Ca-alginate อยู่ภายในเซลล์ ซึ่งน่าจะมีผลให้วัสดุสาหร่ายสามารถ ดูดซับโลหะได้ดีขึ้นกว่าเดิม (Figueira *et al.*, 2000)

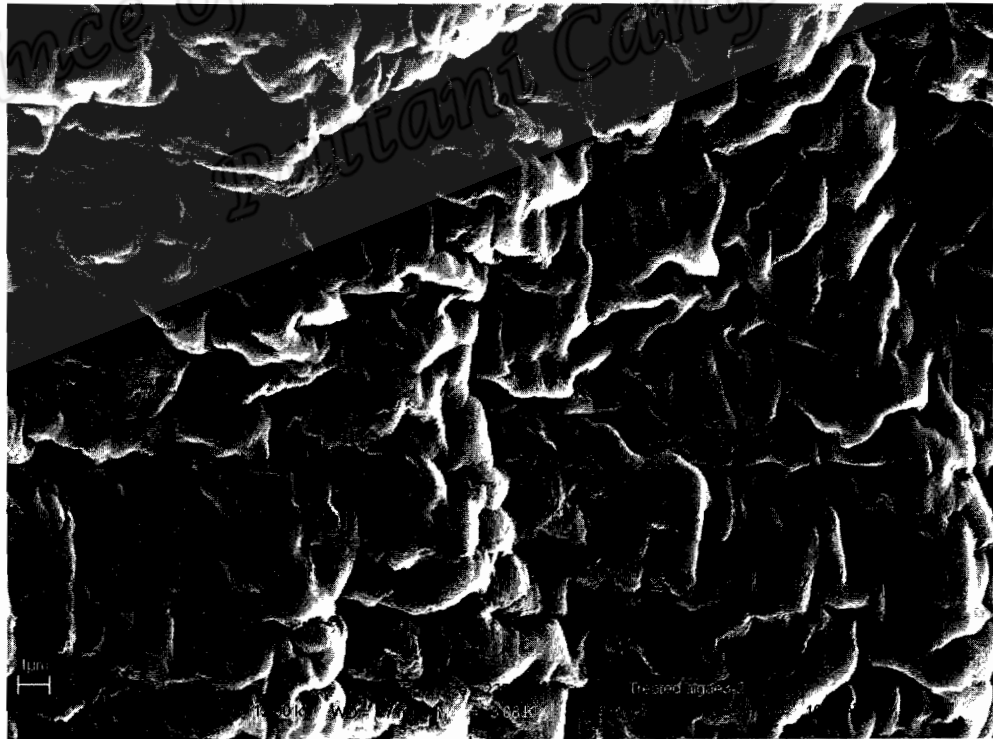
นอกจากนี้ยังได้ทดสอบสมบัติการพองตัวของตัวอย่างสาหร่ายผสมนางนี้ พบว่า วัสดุสาหร่ายมี ความสามารถการพองตัวที่ใกล้เคียงกับสาหร่ายที่ไม่ปรับปรุงสภาพ คือมีค่า Swelling ratio (Q) = 0.195 และ Volume of absorbed solvent (VAS) = 0.805 ซึ่งต่างจากกรณีของวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *Ascophyllum nodosum* (Holan *et al.*, 1993) ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น การที่มีลักษณะแตกต่างกันนี้ อาจเนื่องมาจากความ แตกต่างกันของโพลีแซคคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบของพื้นผิวสาหร่ายในแต่ละชนิด

ก.



กำลังขยาย 2.02 Kx (12 KV)

ข.



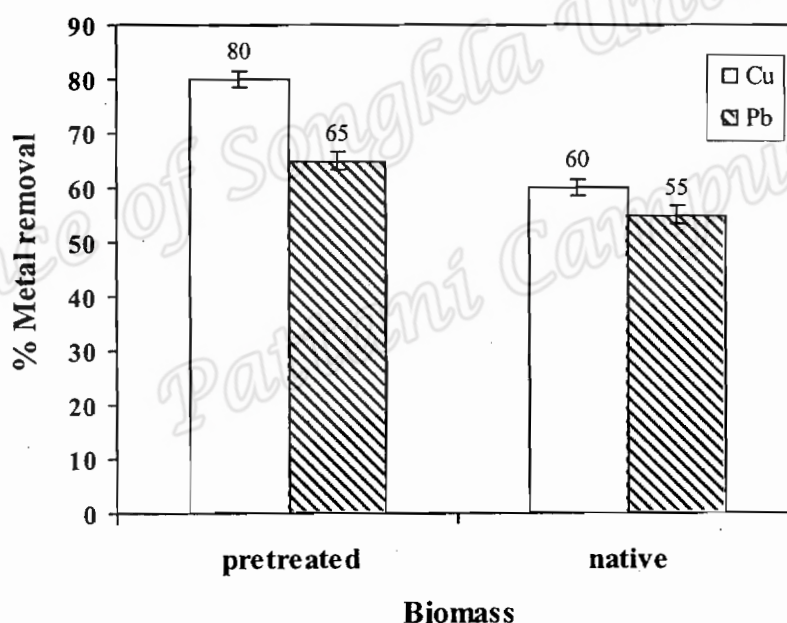
กำลังขยาย 3.08 Kx (12.50 KV)

รูปที่ 4.23 ลักษณะพื้นผิวภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของ (ก) วัสดุสายพมนางที่ไม่มี การปรับสภาพ และ (ข) วัสดุสายพมนางที่ปรับสภาพด้วย 0.2 M  $\text{CaCl}_2$



#### 4.4.4.2 ความสามารถดูดซับโลหะ

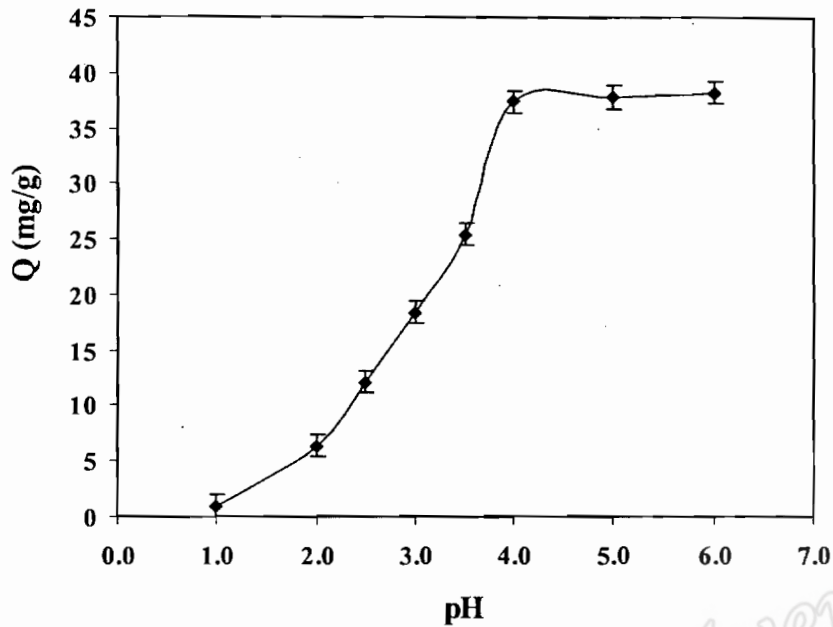
จากการทดสอบความสามารถดูดซับทองแดง และตะกั่วของวัสดุสาหร่ายพมวงที่ปรับและไม่ปรับสภาพด้วย 0.2 M  $\text{CaCl}_2$  โดยการทดลองแบบ Batch equilibrium system พบว่า สาหร่ายที่ปรับสภาพแล้วมีความสามารถกำจัดทองแดงหรือตะกั่วได้ดีกว่า คือที่ความเข้มข้น  $\text{Cu}^{2+}$  เริ่มต้น 50 mg/l จะสามารถดูดซับทองแดงได้สูงถึงร้อยละ 80 ดูดซับตะกั่วได้ร้อยละ 65 (ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 mg/l) ในขณะที่สาหร่ายพมวงที่ไม่ปรับสภาพจะสามารถดูดซับทองแดงและตะกั่วได้ร้อยละ 60 และ 55 ตามลำดับ (รูปที่ 4.24) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวของวัสดุตัวอย่างที่ปรับสภาพแล้วมีลักษณะเป็นร่องอย่างมีระเบียบ และเหมาะสมในการจับกับโลหะได้ดีกว่า เพราะเคลือบผิวไปจับกับ alginate ซึ่งเป็นสารประกอบหนึ่งของโพลีแซคคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ และเป็นโมเลกุลที่สำคัญในการเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน ได้เป็น crosslinked Ca-alginate อยู่ในเซลล์ ซึ่งน่าจะมีผลให้วัสดุสาหร่ายสามารถดูดซับโลหะได้ดีขึ้นกว่าเดิม (Figueira *et al.*, 2000)



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบการกำจัดทองแดงและตะกั่วโดยสาหร่ายพมวงที่ไม่ปรับและปรับสภาพด้วย 0.2 M  $\text{CaCl}_2$

#### 4.4.4.3 ผลของ pH ต่อความสามารถดูดซับโลหะทองแดงของตัวอย่างสาหร่ายที่ปรับสภาพด้วย 0.2M $\text{CaCl}_2$

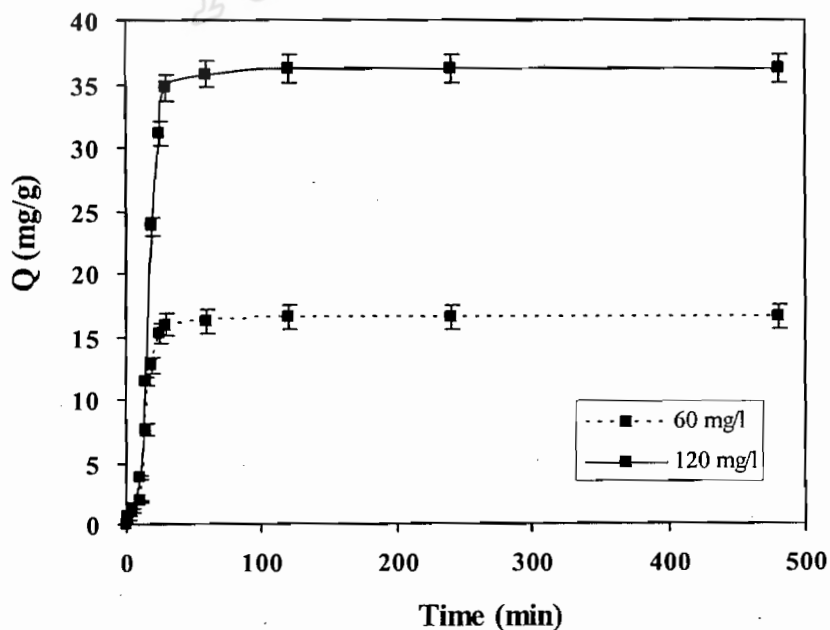
จากการแช่วัสดุสาหร่ายพมวงที่ปรับสภาพ ปริมาณ 0.1 g ในสารละลายทองแดงซึ่งเข้มข้น 127 mg/l ปริมาตร 50 ml ที่ pH ต่าง ๆ คือ 1.0, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0 และ 6.0 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงพบว่า การดูดซับทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 2.0-4.0 และคงที่ ณ ช่วง pH 4.0-6.0 ซึ่งเป็นช่วง pH ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะ(รูปที่ 4.25)



รูปที่ 4.25 ผลของ pH ต่อความสามารถดูดซับโลหะทองแดง (เข้มข้น 127 mg/l) ของตัวอย่างสาหร่ายผมนางที่ปรับสภาพด้วย 0.2 M  $\text{CaCl}_2$

#### 4.4.4.4 จลนศาสตร์ของการดูดซับทองแดงของตัวอย่างสาหร่ายที่ปรับสภาพด้วย 0.2M $\text{CaCl}_2$

จากการทดลองการดูดซับโลหะทองแดงของสาหร่ายผมนางที่ปรับสภาพด้วย 0.2 M  $\text{CaCl}_2$  พบว่าให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับกรณีสาหร่ายผมนางที่ไม่ปรับสภาพ คือ มีการดูดซับโลหะได้รวดเร็วและเข้าสู่สภาวะ steady state (การดูดซับเกิดขึ้นประมาณ 90%) ภายในระยะเวลา 15-30 นาที (ดูรูปที่ 4.26)

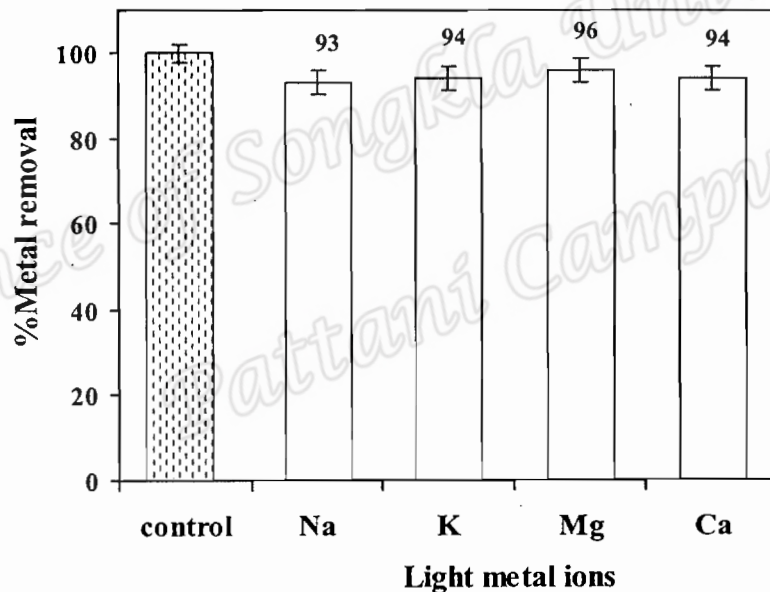


รูปที่ 4.26 จลนศาสตร์ของการดูดซับทองแดงของวัสดุสาหร่ายผมนางที่ปรับสภาพด้วย 0.2 M  $\text{CaCl}_2$

#### 4.4.4.5 ผลของโลหะเบา ( $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ ) ต่อความสามารถดูดซับโลหะหนักโดยวัสดุตัวอย่างสำหรับที่ปรับสภาพด้วย $0.2\text{M CaCl}_2$

จากการทดลองพบว่า โลหะเบาพวก  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  (ความเข้มข้น  $10\text{ mM}$ ) ไม่มีผลต่อความสามารถดูดซับทองแดงโดยวัสดุสำหรับผสมนางที่ผ่านการปรับสภาพด้วย  $0.2\text{M CaCl}_2$  อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p\text{ value} = 0.05$ ) (รูปที่ 4.27) ซึ่งแตกต่างจากกรณีของวัสดุสำหรับสีน้ำตาล *Durvillaea potatorum* ที่ปรับสภาพด้วย  $0.2\text{ M CaCl}_2$  เช่นกัน (Matheickal and Yu, 1999) โดยคณะผู้วิจัยพบว่า แคลเซียมไอออนที่ความเข้มข้น  $10\text{ mM}$  จะลดความสามารถกำจัดทองแดงและตะกั่ว  $10\text{-}18\%$  ในขณะที่แมกเนเซียมไอออนที่ความเข้มข้นเดียวกัน จะลดประสิทธิภาพการกำจัดโลหะ  $5\text{-}10\%$

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า วัสดุสำหรับผสมนางสามารถนำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักในสารละลายโดยที่มีโลหะเบาต่าง ๆ อยู่ด้วย



รูปที่ 4.27 ผลของโลหะเบา ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$ ) ต่อความสามารถดูดซับโลหะหนักทองแดงโดยวัสดุสำหรับที่ปรับสภาพด้วย  $0.2\text{ M CaCl}_2$

#### 4.4.4.6 Desorption efficiency ของวัสดุสำหรับผสมนางที่ปรับสภาพด้วย $0.2\text{ M CaCl}_2$

จากการศึกษา Adsorption-desorption แบบ batch equilibrium system ของวัสดุสำหรับผสมนางที่ปรับสภาพด้วย  $0.2\text{ M CaCl}_2$  พบว่า ในกระบวนการ adsorption เมื่อใช้สารละลายทองแดงเริ่มต้น  $20\text{ mg/l}$  ปริมาตร  $100\text{ ml}$  ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับโดยวัสดุสำหรับเท่ากับ  $1.592\text{ mg}$  และใน batch desorption system ปริมาณทองแดงที่ถูกชะออกมาโดย  $0.5\text{ M HCl}$  เท่ากับ  $1.504\text{ mg}$  โดย desorption efficiency มีค่าเท่ากับ  $94.5\%$  ซึ่งพบว่ามีความไม่แตกต่างจากกรณีของตัวอย่างที่ไม่ปรับสภาพ

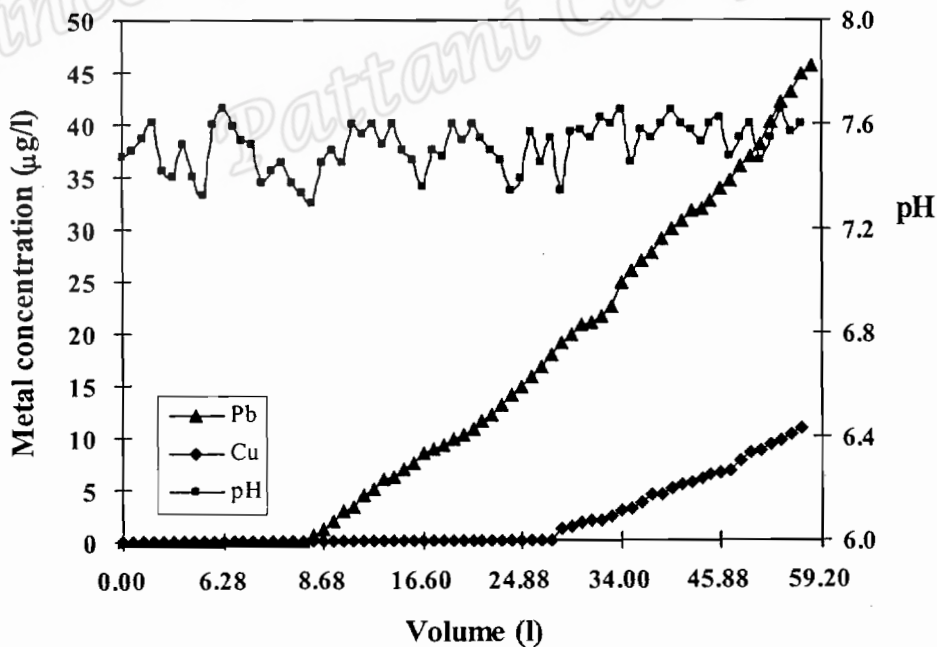
อย่างไรก็ตาม ควรจะต้องมีการทดลองซ้ำอีกเพื่อยืนยันผล และควรทำการทดลอง adsorption-desorption หลาย ๆ รอบ เพื่อคว่าสามารถนำวัสดุตัวอย่างมาใช้ได้นานเพียงใด (Yu and Kaewsarn, 1999)

#### 4.5 ผลการทดสอบการดูดซับโลหะหนักจากน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยสารดูดซับที่ปรับสภาพ

ผลการทดสอบการกำจัดโลหะหนักจากน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนัก ซึ่งเก็บจากบริเวณเหมืองแร่เก่า ตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา โดยใช้วัสดุสาหร่ายผสมนางที่ปรับสภาพด้วย 0.2 M CaCl<sub>2</sub> แสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวอย่างน้ำ

พารามิเตอร์	น้ำก่อนเข้าระบบ	น้ำหลังออกจากระบบ
pH	7.48	7.50-7.60
Hardness (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	123.5	129.2
Alkalinity (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	121.8	126.0
Lead content (µg/l)	75.27	1.25-45.60
Copper content (µg/l)	32.56	1.10-10.70



รูปที่ 4.28 Breakthrough curve ของการดูดซับโลหะตะกั่วและทองแดงในน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยวัสดุสาหร่าย *Gracilaria fisheri* (15 g) และถ่านกัมมันต์ (5 g) (flow rate = 1.2 l/hr, 1 bed volume = 120 ml)

จากตารางที่ 4.9 และ รูปที่ 4.28 พบว่า ค่า pH รวมถึงความกระด้าง (hardness) และความเป็นด่าง (alkalinity) ของน้ำตัวอย่างตลอดการทดลองมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อย คอลัมน์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างสาหร่ายผสมนาง มีความสามารถลดปริมาณตะกั่วในน้ำตัวอย่างได้ถึง 410 ml/g (98%) และทองแดง 1450 ml/g (96.6%) จะเห็นได้ว่า วัสดุสาหร่ายที่เตรียมได้สามารถนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ และวัสดุตัวอย่างสาหร่ายที่ดูดซับโลหะหนักแล้วก็ได้นำไปเผาเพื่อกำจัดทิ้ง ซึ่งสะดวกและราคาถูกลงกว่าการใช้วัสดุสังเคราะห์ในการกำจัดโลหะ

อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้ใช้เวลานานมาก เนื่องจากคอลัมน์เริ่มต้น แม้ว่าจะใช้ peristaltic pump ในการผ่านน้ำตัวอย่างเข้าไปในคอลัมน์แล้ว จึงต้องหยุดการทดลอง ดังนั้นจึงควรที่จะทดลองใช้ตัวอย่างสาหร่ายร่วมกับวัสดุอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของคอลัมน์

Prince of Songkla University  
Pattani Campus