

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 ปริมาณโลหะหนักในตัวอย่าง

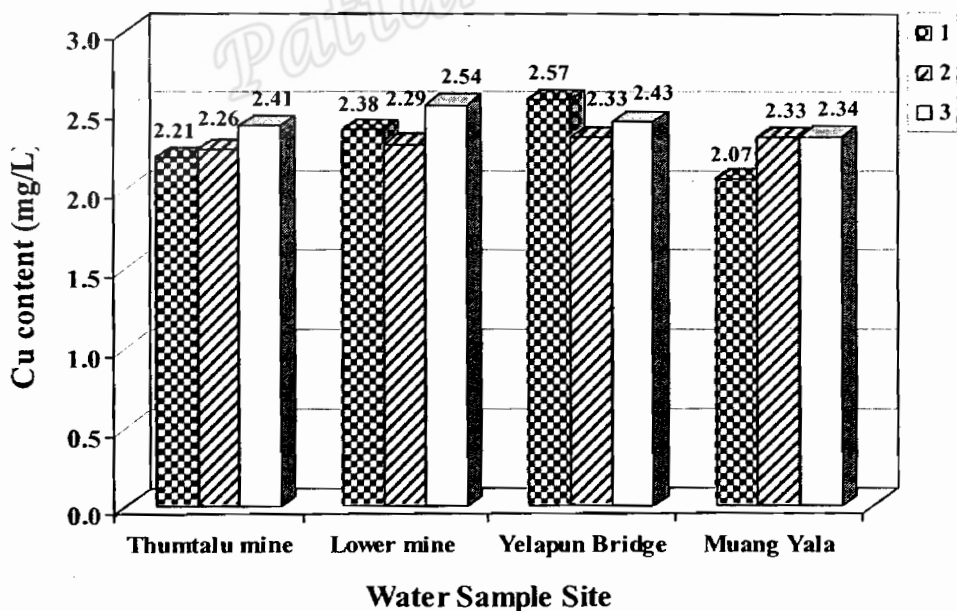
4.1.1 ตัวอย่างน้ำ

ค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำที่เก็บจากลำน้ำปัดตานีตอนบน 4 จุด จำนวน 3 ครั้ง พบว่าอยู่ในช่วง 7.19-7.47 (ตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพีเอช ในน้ำตัวอย่างที่เก็บจากแม่น้ำปัดตานีตอนบน 3 ครั้ง

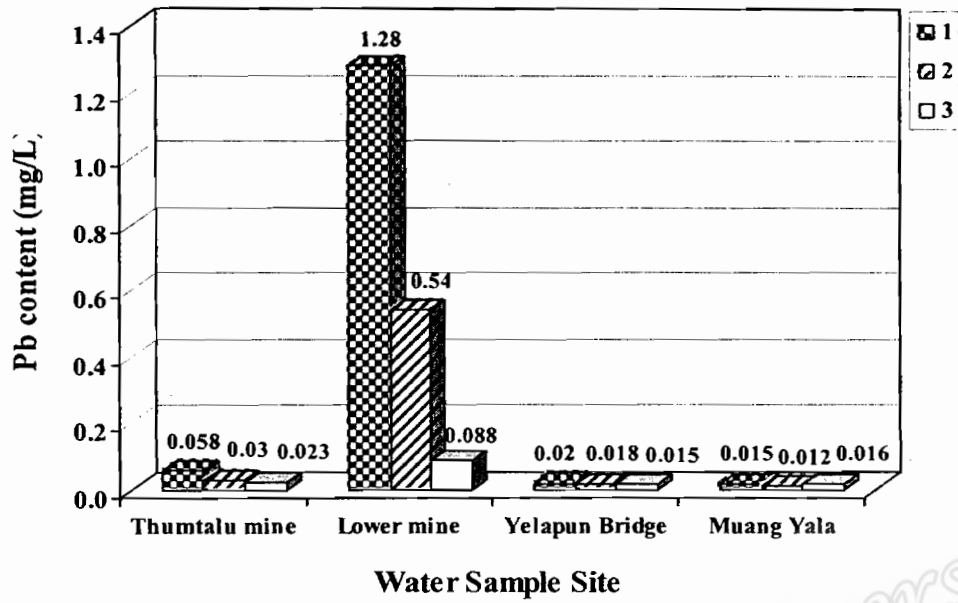
สถานที่	1 (พย. 2544)	2 (ธค. 2544)	3 (มค. 2545)
เหมืองแร่โกสั่วค้ำทะลุ	7.19	7.28	7.25
บริเวณเหมืองแร่ตอนล่าง	7.27	7.42	7.34
อ. บ้านนังस्ता	7.47	7.39	7.42
อ. เมือง	7.26	7.36	7.31

ปริมาณของโลหะทองแดง ตะกั่ว และสารหนู ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำซึ่งเก็บจากบริเวณลำน้ำปัดตานีตอนบน 4 แห่ง จำนวน 3 ครั้ง แสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

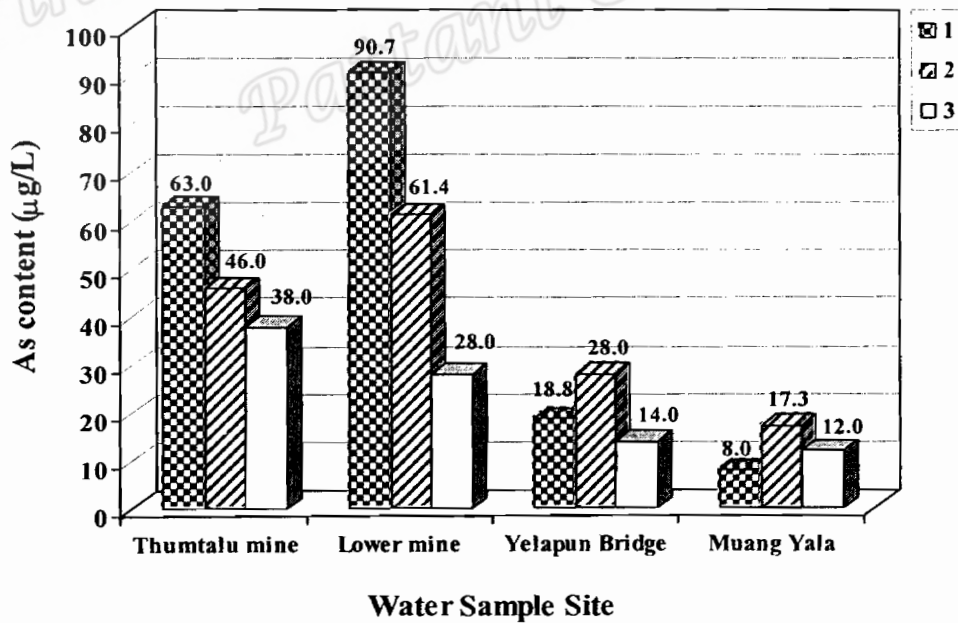


รูปที่ 4.1 ปริมาณทองแดง (mg/L) ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำ บริเวณลำน้ำปัดตานี 4 แห่ง เมื่อ

1) เดือนพฤศจิกายน 2544 2) เดือนธันวาคม 2544 และ 3) เดือนมกราคม 2545



รูปที่ 4.2 ปริมาณตะกั่ว (mg/L) ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำ บริเวณลำนํ้าปัดตานี 4 แห่ง เมื่อ
1) เดือนพฤศจิกายน 2544 2) เดือนธันวาคม 2544 และ 3) เดือนมกราคม 2545



รูปที่ 4.3 ปริมาณสารหนู (µg/L) ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำ บริเวณลำนํ้าปัดตานี 4 แห่ง เมื่อ
1) เดือนพฤศจิกายน 2544 2) เดือนธันวาคม 2544 และ 3) เดือนมกราคม 2545

ปริมาณการปนเปื้อนของโลหะหนักทองแดงในตัวอย่างน้ำทั้งสี่แห่งของลำน้ำปัดตานี พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ในแต่ละเดือนและแต่ละสถานที่ ตั้งแต่บริเวณลำธารที่เหมืองแร่ใกล้วัดถ้ำทะลุ บริเวณตอนล่างของวัดถ้ำทะลุ ตำบลถ้ำทะลุ มาตามลำน้ำถึงสะพานยี่ลาป็น ตำบลคลังชัน อำเภอบันนังสตา จนถึงอำเภอเมือง จังหวัดยะลา คือ อยู่ในช่วง 2.07-2.57 mg/L โลหะทองแดงมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดลำน้ำ แม้ว่าช่วงเดือนพฤศจิกายนและธันวาคมจะมีฝนตกชุก ปริมาณทองแดงที่ตรวจพบนี้ มีค่าสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำแหล่งผิวดินที่ระบุไว้ไม่เกิน 0.1 mg/L (คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย, 2540)

ปริมาณตะกั่วในตัวอย่างน้ำที่เก็บจากลำน้ำปัดตานี พบว่า อยู่ในช่วง 0.012 - 1.28 mg/L โดยพบการปนเปื้อนมากที่สุดที่บริเวณส่วนล่างของวัดถ้ำทะลุ (1.28 mg/L) ซึ่งสูงกว่าที่บริเวณเหมืองใกล้วัดถ้ำทะลุ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในแต่ละบริเวณมีความแตกต่างของอนุภาคดินและการไหลของน้ำ โดยที่ลำธารบริเวณใกล้วัดถ้ำทะลุมีพื้นดินที่เป็นดินปนทรายมาก และมีน้ำไหลด้วยอัตราเร็วมากกว่าบริเวณตอนล่างที่เป็นแอ่งน้ำตื้นความลึก 10-20 cm และดินที่อยู่ด้านล่างมีลักษณะค่อนข้างละเอียด ดังนั้นจึงมีอนุภาคในน้ำที่ไม่เหมือนกันและมีปริมาณไม่เท่ากัน โดยที่บริเวณตอนล่างของถ้ำทะลุอาจมีอนุภาคในน้ำชนิดที่สามารถดูดซับโลหะได้มากกว่า เมื่อย่อยตัวอย่างน้ำด้วยกรดไนตริก โลหะตะกั่วที่ถูกดูดซับไม่แข็งแรงจะถูกย่อยออกมา อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่ตรวจพบทั้งสองแห่งนี้มีค่าสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำแหล่งผิวดินที่ระบุไว้ไม่เกิน 0.05 mg/L (คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย, 2540) ปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่วจะลดลงตามระยะทางจากเหมืองเก่าที่เพิ่มขึ้น โดยที่ลำน้ำได้สะพานยี่ลาป็น และสะพานท่าสาบ เทศบาลเมือง จังหวัดยะลา ตรวจพบในช่วง 0.012-0.02 mg/L ตรงกับรายงานของกรมควบคุมมลพิษ (2545) ซึ่งย่อยตัวอย่างน้ำด้วยกรดไนตริก ตรวจพบปริมาณตะกั่วทั้งหมดในลำน้ำปัดตานี ที่สะพานยี่ลาป็น เท่ากับ 15.85 µg/L และสุทธิพันธ์ (2545) รายงานปริมาณตะกั่วทั้งหมดในตัวอย่างน้ำแม่น้ำปัดตานีในอำเภอเมืองปัดตานีอยู่ในช่วง 5.78-8.53 µg/L

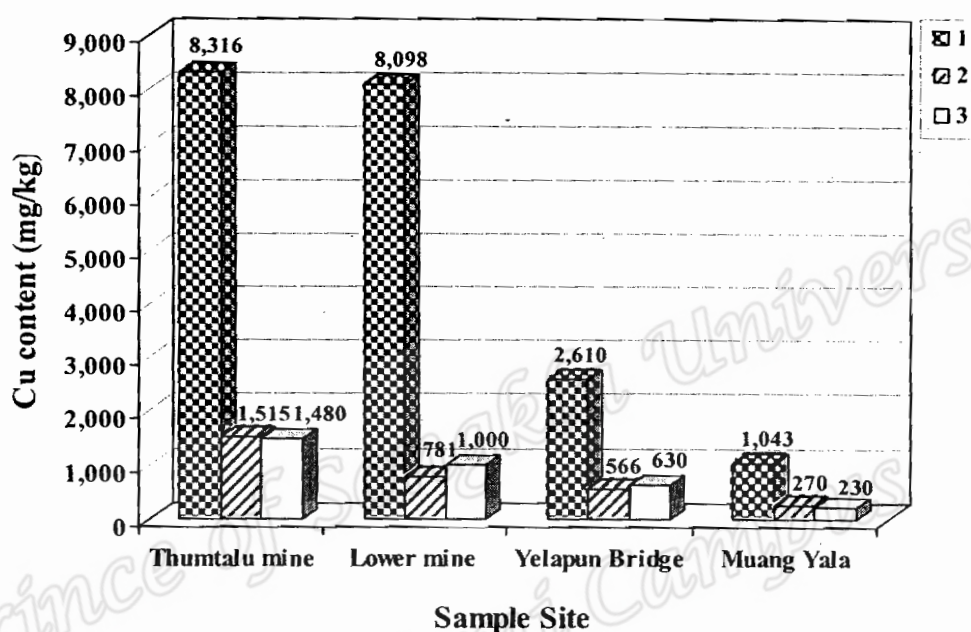
สำหรับสารหนูที่ปนเปื้อนในตัวอย่างน้ำที่เก็บจากลำน้ำปัดตานี พบว่า อยู่ในช่วง 8.0-90.7 µg/L การกระจายตัวของสารหนูเป็นไปทำนองเดียวกับกรณีตะกั่ว คือตรวจพบมากที่สุดบริเวณตอนล่างของวัดถ้ำทะลุ (90.7 µg/L) (รูปที่ 4.3) และปริมาณการปนเปื้อนของสารหนูลดลงตามระยะทางจากเหมืองเก่าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในบริเวณเหมืองแร่ นอกจากนี้ปริมาณสารหนูในตัวอย่างน้ำที่เก็บจากแม่น้ำปัดตานีที่สะพานยี่ลาป็น และที่เทศบาลเมืองยะลาในครั้งที่ 2 (เดือนธันวาคม) และครั้งที่ 3 (เดือนมกราคม 2545) พบว่ามีค่าสูงกว่าตัวอย่างน้ำที่เก็บครั้งแรก (เดือนพฤศจิกายน 2544) อาจเนื่องมาจากในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคม 2544 ฝนตกหนัก และเกิดน้ำท่วมหลายบริเวณ จึงทำให้สารหนูมีการกระจายตัวมากขึ้นหลังจากน้ำลด เป็นที่น่าสังเกตว่า ช่วงเดือนพฤศจิกายนและธันวาคมมีฝนตกชุก ปริมาณสารหนูที่ตรวจพบในลำน้ำปัดตานีทั้งสี่แห่งยังมีค่าสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำแหล่งผิวดินที่ระบุไว้ไม่เกิน 10 µg/L (คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย, 2540) และมีค่าสูงกว่าในกลุ่มน้ำปากพอง จังหวัดนครศรีธรรมราชซึ่งอยู่ในช่วง 10-43 mg/L (วรพิน, 2537)

4.1.2 ตัวอย่างตะกอนดิน

จากการวิเคราะห์ปริมาณของโลหะทองแดงในตะกอนดินบริเวณลำน้ำปัดตานี จังหวัดยะลา พบว่า อยู่ในช่วง 230-8,316 mg/kg (รูปที่ 4.4) ซึ่งปริมาณการปนเปื้อนทองแดงสูงสุดพบที่บริเวณเหมืองแร่เก่า วัดถ้ำทะลุในการเก็บตัวอย่างครั้งแรก (พฤศจิกายน 2544) และพบการปนเปื้อนของทองแดงในปริมาณสูงรอบๆ

เหมือง และค่อย ๆ ลดลงเมื่อระยะห่างจากเหมืองเพิ่มขึ้น ปริมาณทองแดงที่ตรวจพบนี้มีค่าสูงกว่าปริมาณทองแดงที่บริเวณแม่น้ำปัดตานี อำเภอเมืองจังหวัดปัดตานี รายงานโดยปรียาและคณะ (2541) ซึ่งพบการปนเปื้อนทองแดงสูงสุดในตะกอนดินที่สะพานเดชาอนุชิตเท่ากับ 44.62 mg/kg.

ลักษณะแนวโน้มการลดลงของการปนเปื้อนทองแดงตามระยะทางที่ห่างจากเหมืองเพิ่มขึ้นนี้ พบในกรณีการปนเปื้อนทองแดงครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 แต่ในสองครั้งหลังนี้ตรวจพบทองแดงในปริมาณที่ต่ำกว่าครั้งแรกมาก อาจเนื่องมาจากการเกิดน้ำท่วมในช่วงปลายเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคม 2544

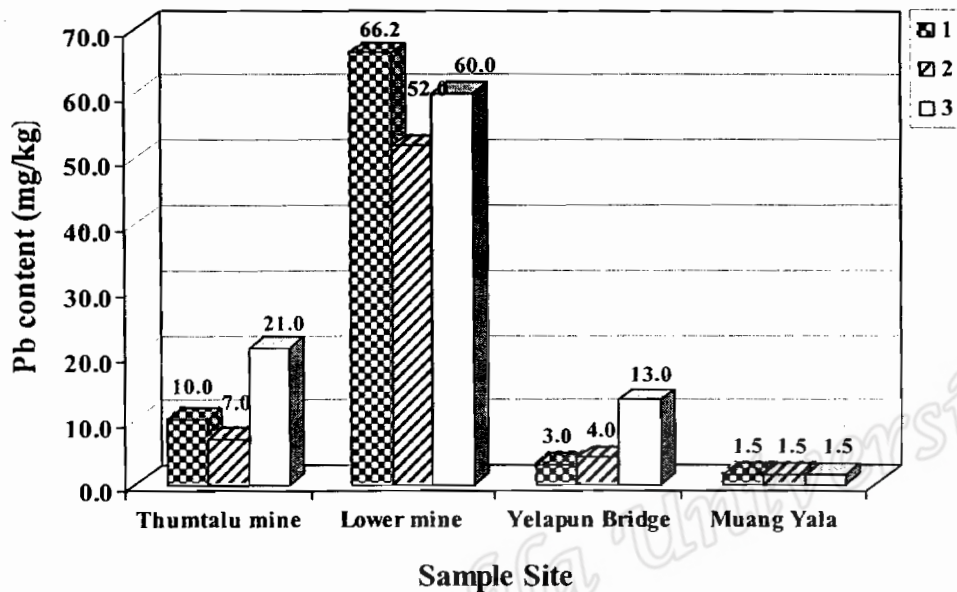


รูปที่ 4.4 ปริมาณทองแดงที่ปนเปื้อนในตัวอย่างตะกอนดิน (mg/kg) ซึ่งเก็บจากบริเวณลำน้ำปัดตานี 4 แห่ง จำนวน 3 ครั้งคือ 1) เดือนพฤศจิกายน 2544 2) เดือนธันวาคม 2544 และ 3) เดือนมกราคม 2545

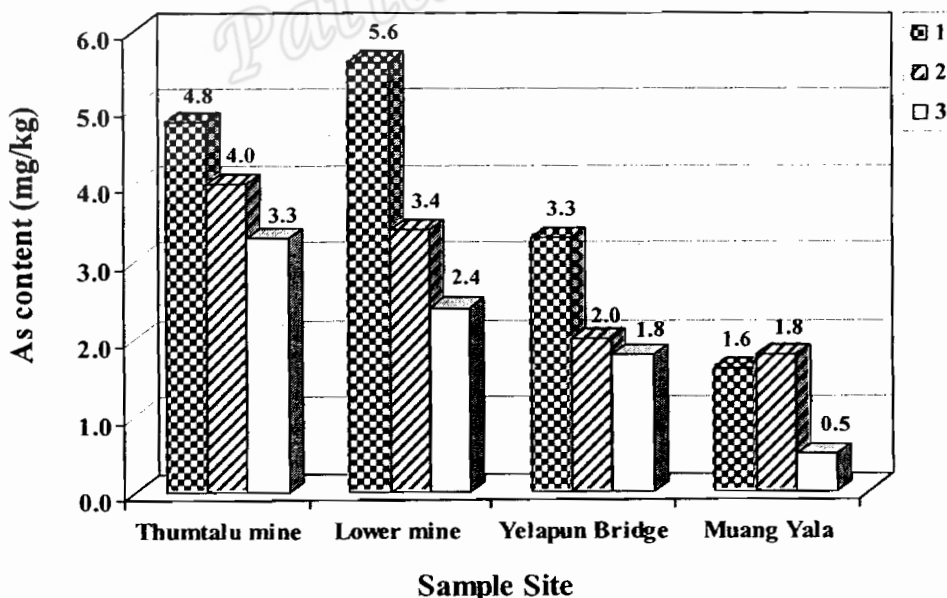
ปริมาณตะกั่วที่ตรวจพบในตะกอนดินบริเวณแม่น้ำปัดตานี จังหวัดยะลา พบว่าอยู่ในช่วง 1.47-66.2 mg/kg (รูปที่ 4.5) โดยปริมาณการปนเปื้อนตะกั่วที่สูงสุดนี้อยู่บริเวณส่วนล่างของวัดถ้ำทะเล ในการเก็บตัวอย่างครั้งแรก (เดือนพฤศจิกายน 2544) และพบการปนเปื้อนของตะกั่วในปริมาณค่อย ๆ ลดลงเมื่อระยะห่างจากเหมืองเพิ่มขึ้น ตัวอย่างตะกอนดินที่เก็บในครั้งที่ 2 และ 3 ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

ปริมาณตะกั่วที่ตรวจพบนี้มีค่าต่ำกว่าที่รายงาน โดยกรมควบคุมมลพิษ (2545) ซึ่งตรวจพบตะกั่วในตะกอนดินลำธารขนาดต่ำกว่า 53 μm ที่เก็บในเดือนมีนาคม 2545 อยู่ในช่วง 4,767-28,679 mg/kg การที่มีค่าแตกต่างกันนี้ อาจเนื่องมาจากวิธีการย่อยตะกอนดินที่ต่างกัน ซึ่งในการศึกษานี้ใช้กรดไนตริกและกรดเปอร์คลอริกในการย่อยตัวอย่างตะกอนลำธาร ในขณะที่กรมควบคุมมลพิษใช้กรดไนตริกเข้มข้น (1:1) ในการย่อยตัวอย่างเพื่อหาปริมาณตะกั่วละลายน้ำ และตะกั่วแขวนลอย นอกจากนี้การเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่ต่างกันก็อาจจะมีผล เพราะในช่วงที่เก็บตัวอย่างเป็นช่วงมีฝนตกชุก ซึ่งตะกอนดินบางส่วนอาจจะถูกชะไปตามน้ำได้มากกว่า

สำหรับการปนเปื้อนสารหนูในตะกอนดิน พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 0.5-5.6 mg/kg (รูปที่ 4.6) โดยพบปริมาณสูงสุดในบริเวณล่างของวัดถ้ำทะลุ การกระจายของสารหนูในตะกอนดินมีแนวโน้มลดลงตามระยะทางห่างจากเหมืองที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของทองแดงและตะกั่ว



รูปที่ 4.5 ปริมาณตะกั่วที่ปนเปื้อนในตัวอย่างตะกอนดิน (mg/kg) ซึ่งเก็บจากบริเวณลำน้ำปัดตานี 4 แห่ง จำนวน 3 ครั้งคือ 1) เดือนพฤศจิกายน 2544 2) เดือนธันวาคม 2544 และ 3) เดือนมกราคม 2545



รูปที่ 4.6 ปริมาณสารหนูที่ปนเปื้อนในตัวอย่างตะกอนดิน (mg/kg) ซึ่งเก็บจากบริเวณลำน้ำปัดตานี 4 แห่ง จำนวน 3 ครั้งคือ 1) เดือนพฤศจิกายน 2544 2) เดือนธันวาคม 2544 และ 3) เดือนมกราคม 2545

ปริมาณสารหนูที่ตรวจพบนี้ ต่ำกว่าปริมาณสารหนูที่สำรวจโดยเคโซ (2537) ซึ่งรายงานปริมาณสารหนูในตะกอนดินรวมบริเวณวัดถ้ำทะลุเท่ากับ 2.1 g/kg ความแตกต่างนี้เนื่องจากมีวิธีการขุดตัวอย่างที่แตกต่างกัน และตำแหน่งจุดเก็บไม่ใช่จุดเดียวกัน

4.1.3 ตัวอย่างสัตว์น้ำ

สัตว์น้ำที่สามารถเก็บได้ในลำน้ำปัดตานีในช่วงเวลาที่ศึกษาซึ่งเป็นฤดูฝนนั้น เป็นพวกปลาตะเพียน หอยขม กุ้งฝอย และลูกอ๊อด โดยปริมาณของชนิดสัตว์น้ำที่พบในลำธารบริเวณวัดถ้ำทะลุมีน้อยและส่วนใหญ่ยังไม่เป็นตัวเต็มวัยเมื่อเทียบกับในบริเวณแม่น้ำปัดตานี ที่สะพานยี่ลาป็น อำเภอบันนังสตา และที่อำเภอเมือง จังหวัดยะลา โดยเฉพาะที่วัดถ้ำทะลุ บริเวณที่หนึ่งไม่พบตัวอย่างสัตว์น้ำ ปริมาณน้ำในลำธารมีน้อยมาก แต่ในการเก็บตัวอย่างครั้งที่สาม (เดือนมกราคม 2545) พบตัวอย่างสัตว์ น้ำในทุกบริเวณ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากช่วงที่เก็บตัวอย่างเป็นช่วงแพร่พันธุ์ของสัตว์น้ำ และในช่วงปลายเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคม 2544 เกิดน้ำท่วมจึงมีน้ำในปริมาณมากในทุกแหล่งน้ำ ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจพบในตัวอย่างสัตว์น้ำชนิดต่าง ๆ ที่เก็บได้จากลำน้ำปัดตานี 4 บริเวณ แสดงในตารางที่ 4.2 โดยปริมาณโลหะทองแดงอยู่ในช่วง $14.6 \pm 1.6 - 1,036 \pm 120$ mg/kg ตะกั่วอยู่ในช่วง ตรวจไม่พบ - 1.79 ± 0.64 mg/kg และ สารหนู ตรวจไม่พบ - 64.0 ± 5.5 μ g/kg ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปริมาณโลหะหนักทั้งสามชนิดที่ตรวจพบในสัตว์น้ำมีค่าสูงกว่าปริมาณที่พบในตัวอย่างน้ำ แต่ต่ำกว่าปริมาณที่พบในตะกอนดินมาก โดยมีแนวโน้มในการทำงานเดียวกับกรณีตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน คือพบการปนเปื้อนสูงในบริเวณเหมืองแร่เก่าใกล้วัดถ้ำทะลุ และมีการลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นจากเหมืองแร่เก่า

เป็นที่น่าสังเกตว่าสัตว์น้ำประเภทหอยขม และลูกอ๊อดที่เก็บได้ตามลำน้ำปัดตานีทั้งสามแห่ง มีการปนเปื้อนของโลหะหนักทั้งสามชนิดมากกว่าสัตว์น้ำประเภทอื่น ๆ โดยเฉพาะสารหนูมีการปนเปื้อนในสัตว์น้ำทั้งสองชนิดค่อนข้างสูงในบริเวณเหมืองแร่เก่า ทั้งนี้เนื่องจากลูกอ๊อดและหอยฝาดียวจัดเป็นสัตว์ประเภทหากินบริเวณหน้าดินที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักในปริมาณสูง ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการแพร่กระจายของโลหะหนักเหล่านี้เป็นไปตามลำดับห่วงโซ่อาหาร

ปริมาณสารหนูในสัตว์น้ำที่ตรวจพบนี้ มีค่าต่ำกว่าที่รายงานโดยครีร์ดน์ (2540) ซึ่งตรวจพบปริมาณสารหนูในสัตว์น้ำบริเวณตำบลร่อนพิบูลย์ ถึงลุ่มน้ำปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช มีค่าอยู่ระหว่าง ตรวจไม่พบ - 2.45 mg/kg โดยพบปริมาณสูงสุดในหอยขม ซึ่งตรงกับกรณีการศึกษา

ตารางที่ 4.2 ปริมาณทองแดง ตะกั่ว และสารหนูที่ตรวจพบในตัวอย่างสัตว์น้ำที่เก็บจากลำน้ำปัดตานี จังหวัด
ยะลา 4 บริเวณ จำนวน 3 ครั้ง (1 : พฤศจิกายน 2544, 2 : ธันวาคม 2544, 3 : มกราคม 2545)

สถานที่/ ตัวอย่าง	1			2			3		
	ทองแดง (mg/kg)	ตะกั่ว (mg/kg)	สารหนู (µg/kg)	ทองแดง (mg/kg)	ตะกั่ว (mg/kg)	สารหนู (µg/kg)	ทองแดง (mg/kg)	ตะกั่ว (mg/kg)	สารหนู (µg/kg)
1) วัดถ้ำทะเล									
-ลูกปลา	*	*	*	26.1±1.5	0.74±0.30	28.2±1.2	33.5±2.6	1.25±0.45	47.0±2.1
คะเพียนแดง									
-หอยขม	*	*	*	*	*	*	70.3±3.8	1.79±0.64	45.0±3.4
-ลูกอีอด	*	*	*	*	*	*	235.0±22.5	0.61±0.23	64.0±5.5
2) ส่วนล่างของวัดถ้ำทะเล									
-ลูกปลา	240.1±32.3	0.14±0.10	36.2±3.4	*	*	*	28.6±2.5	0.12±0.10	37.6±2.7
-ปลาหางนกยูง	*	*	*	*	*	*	14.6±1.6	0.23±0.13	32.5±1.9
-ปลาคะเพียน	56.3±4.1	nd	nd	11.4±0.50	nd	6.7±1.1	*	*	*
-ลูกอีอด	*	*	*	*	*	*	277.8±31.0	0.33±0.15	41.0±2.4
3) สะพานยี่ลาป็น									
-ปลาคะเพียน	105.0±32.0	nd	7.4±0.5	11.3±0.7	nd	10.4±0.8	*	*	*
-กุ้งฝอย	112.3±30.7	nd	nd	*	*	*	*	*	*
-หอยขม	*	*	*	253.4±35.3	0.11±0.09	10.0±1.2	375.2±38.2	0.25±0.11	34.0±2.6
-กบ	*	*	*	*	*	*	43.1±3.5	nd	nd
4) เมืองยะลา									
-ลูกปลาคะเพียน	80.4±7.6	nd	6.1±1.1	*	*	*	21.9±1.6	nd	nd
-กุ้งฝอย	*	*	*	203.2±31.1	nd	12.0±1.6	*	*	*
-หอยขม	1036±120	0.12±0.10	41.2±4.5	125.9±22.5	0.11±0.07	28.0±3.7	45.0±4.0	nd	4.9±0.9

หมายเหตุ : - = ไม่พบตัวอย่างในวันที่เก็บ, nd = not detectable

Limit of quantitation : 13.5 mg/L (Cu, FAAS), 14.0 µg/L (Pb, GFAAS), 6.20 µg/L (As)

Limit of detection : 4.08 mg/L (Cu, FAAS), 5.33 µg/L (Pb, GFAAS), 2.20 µg/L (As)

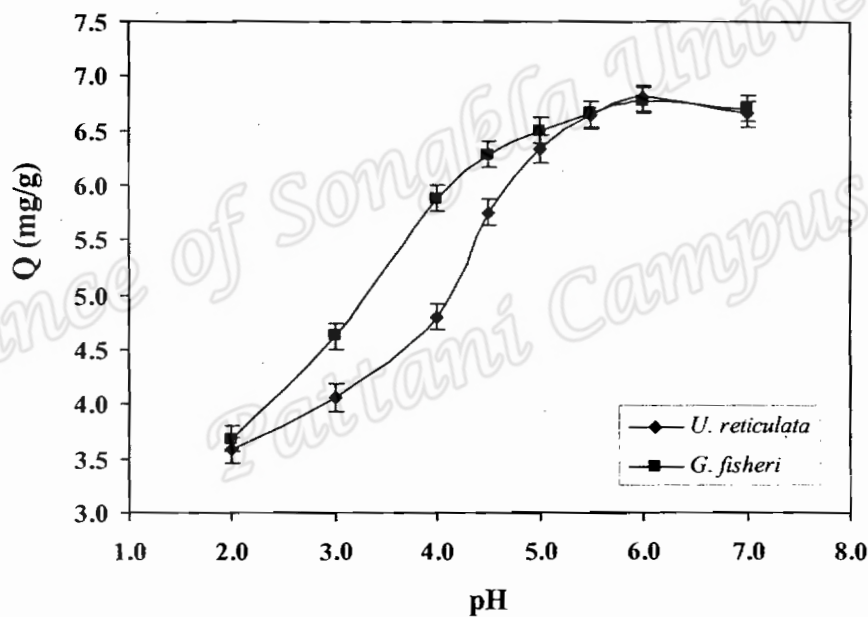
4.2 การศึกษาความสามารถดูดซับโลหะหนักโดยตัวอย่างสาหร่ายแบบไม่ต่อเนื่อง

ตัวอย่างสาหร่ายที่พบในปริมาณมากในอ่าวปัตตานีบริเวณบ้านคาโต๊ะ และแหลมดาซี คือ สาหร่ายพมนาง (*Gracilaria fisheri*) และสาหร่ายผักกาด (*Ulva reticulata*) จึงได้เลือกสาหร่ายทั้งสองชนิดนี้ในการทดสอบความสามารถดูดซับโลหะหนัก คือ ทองแดง ตะกั่ว และสารหนู

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

* 4.2.1 ผลของพีเอชต่อการดูดซับโลหะหนักโดยตัวอย่างสาหร่าย

1) จากการศึกษาความสามารถดูดซับโลหะทองแดงโดยใช้วัสดุตัวอย่างสาหร่ายพมนาง (*G. fisheri*) และสาหร่ายผักกาด (*U. reticulata*) ปริมาณอย่างละ 0.1 g ในสารละลายทองแดง เข้มข้น 20 mg/L ปริมาตร 50 mL ณ พีเอช ต่าง ๆ คือ 2.0, 3.0, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 7.0 เขย่าด้วยความเร็ว 100 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.7

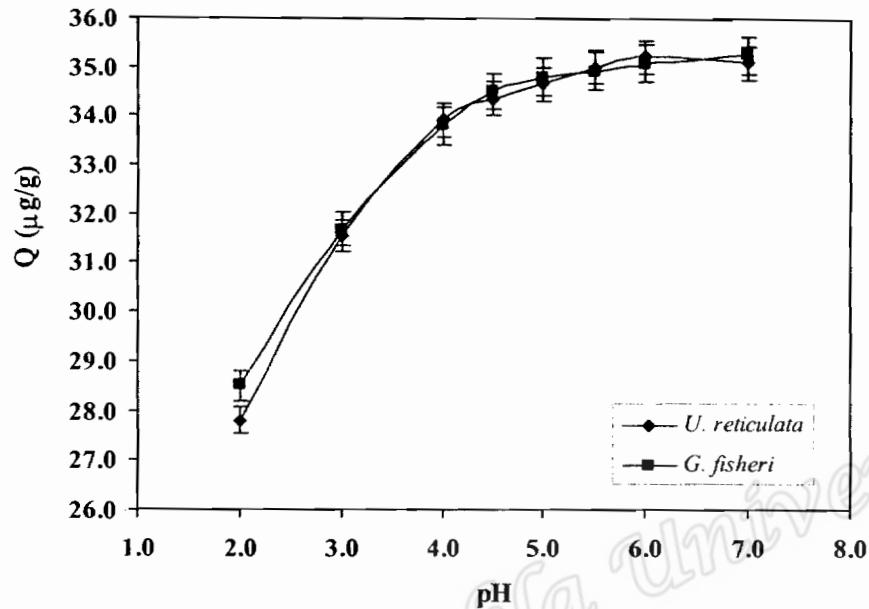


รูปที่ 4.7 ความสามารถดูดซับทองแดง ($Q \pm \text{SD}$, mg/g) โดยสาหร่ายพมนาง (*G. fisheri*) และสาหร่ายผักกาด (*U. reticulata*) ที่พีเอชต่าง ๆ (ทองแดง 20 mg/L, pH 5.0 ± 0.5 ; สาหร่าย 0.2 g/100 mL)

จะเห็นได้ว่า วัสดุตัวอย่างสาหร่ายสามารถดูดซับทองแดงได้เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 2.0 ถึง 5.0 อัตราการเพิ่มการดูดซับโลหะจะลดลงและการดูดซับโลหะเกิดค่อนข้างคงที่ในช่วงพีเอช 5.0-7.0 โดยสาหร่ายพมนางจะดูดซับทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 3.70 mg/g ที่พีเอช 2.0 ไปเป็น 6.70 mg/g ที่พีเอช 7.0 ส่วนสาหร่ายผักกาด ดูดซับทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 3.58 mg/g ที่พีเอช 2.0 ไปเป็น 6.41 mg/g ที่พีเอช 7.0 ตามลำดับ

ดังนั้นจึงเลือกค่าพีเอช 5.0 เป็นค่าที่เหมาะสมของสารละลายทองแดงสำหรับการทดลองต่อไป

2) การศึกษาความสามารถดูดซับตะกั่วโดยสาหร่ายพมมานง และสาหร่ายผักกาด ปริมาณชนิดละ 0.1 g ในสารละลายตะกั่วเข้มข้นตั้งต้น 70 $\mu\text{g/L}$ ปริมาตร 50 mL ณ พีเอชต่าง ๆ คือ 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 เจาะด้วยความเร็ว 100 rpm, 24 ชั่วโมง ให้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.8

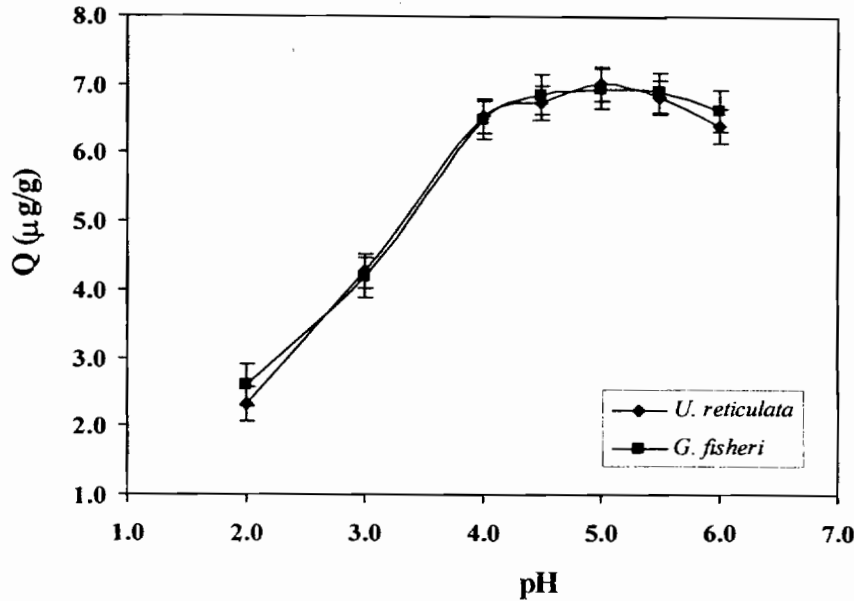


รูปที่ 4.8 ความสามารถดูดซับตะกั่ว ($Q \pm \text{SD}$, $\mu\text{g/g}$) โดยสาหร่ายพมมานง (*G. fisheri*) และสาหร่ายผักกาด (*U. reticulata*) ที่พีเอชต่าง ๆ (ตะกั่ว 70 $\mu\text{g/L}$, pH 5.0 ± 0.5 ; สาหร่าย 0.2 g/100 mL)

การดูดซับตะกั่วโดยวัสดุสาหร่ายแต่ละชนิดมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน และคล้ายกับกรณีของทองแดง คือมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 2.0 ถึง 4.0 อัตราการเพิ่มการดูดซับจะลดลงและเริ่มคงที่ ณ พีเอช 5.0-7.0 โดยวัสดุสาหร่ายพมมานงจะดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 28.50 $\mu\text{g/g}$ ที่ พีเอช 2.0 ไปเป็น 35.30 $\mu\text{g/g}$ ที่พีเอช 7.0 ส่วนสาหร่ายผักกาดดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 27.8 $\mu\text{g/g}$ ที่ พีเอช 2.0 ไปเป็น 35.10 $\mu\text{g/g}$ ที่พีเอช 7.0 ดังนั้นจึงเลือกค่าพีเอช 5.0 เป็นค่าที่เหมาะสมของสารละลายตะกั่วสำหรับการทดลองต่อไป

3) การศึกษาความสามารถดูดซับสารหนูโดยใช้สาหร่ายพมมานง และสาหร่ายผักกาด ปริมาณอย่างละ 0.1 g ในสารละลายสารหนูเข้มข้น 50 $\mu\text{g/L}$ ปริมาตร 50 mL ณ พีเอช ต่าง ๆ คือ 2.0, 3.0, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, และ 6.0 ให้ผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ที่สภาวะสมดุล วัสดุตัวอย่างสาหร่ายทั้งสองสามารถดูดซับสารหนูได้เพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 2.0 ถึง 4.0 และเริ่มคงที่ ณ พีเอช 4.5-5.5 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการดูดซับสารหนูได้ดี และมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 5.5 ดังนั้นจึงเลือกค่าพีเอช 5 เป็นพีเอชที่เหมาะสมของสารละลายสารหนูสำหรับการทดลองต่อไป

จากการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ว่า พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักเหล่านี้อยู่ในช่วง 4-6 ตรงกับผลที่ได้จากณัฐกมล (2541) กรณีการดูดซับทองแดงโดยสาหร่ายพมมานง (*G. fisheri*) และผลการทดลองของ Matheickal และ Yu (1996) กรณีตะกั่วโดยสาหร่ายสีน้ำตาล (*Ecklonia radiata*) (พีเอช 4.5-5.5)



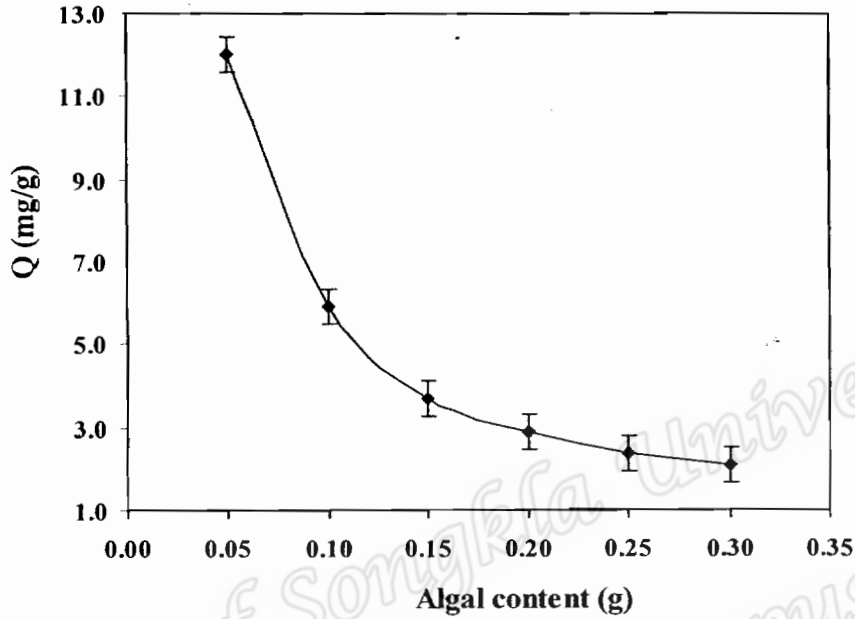
รูปที่ 4.9 ความสามารถดูดซับสารหนู ($Q \pm SD$, $\mu\text{g/g}$) โดยสาหร่ายผมนาง (*G. fisheri*) และสาหร่ายผักกาด (*U. reticulata*) ที่พีเอชต่าง ๆ (สารหนู $50 \mu\text{g/L}$, $\text{pH } 5.0 \pm 0.5$; สาหร่าย 0.2 g/100 mL)

พีเอชของสารละลายมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักทั้งสามชนิดในทำนองเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากพีเอชของสารละลาย มีความสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่อยู่บนพื้นผิวของสาหร่าย ซึ่งประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์ และมักมีหมู่ต่าง ๆ อยู่ด้วย เช่น C=O , $-\text{NH}_2$ และ $-\text{PO}_4^{3-}$ ที่พีเอชต่ำ (2-3) จะมีความเข้มข้นของโปรตอนสูงและหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มักมีประจุเป็นศูนย์หรือบวก มีการแข่งขันในการจับบนผิวของสาหร่ายระหว่างโปรตอนและไอออนของโลหะหนัก จึงทำให้พันธะระหว่างโลหะกับตัวดูดซับไม่คงที่ และโปรตอนมีประสิทธิภาพจับกับไอออนโลหะได้ดีกว่า เป็นผลให้การดูดซับโลหะไม่คืนก เมื่อพีเอชสารละลายสูงขึ้น (> 4) ความเข้มข้นโปรตอนลดลง ส่วนหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ จะมีประจุเป็นลบ ไอออนโลหะมีความสามารถแข่งขันกับโปรตอนได้สูง จึงทำให้การดูดซับโลหะเกิดได้ดีขึ้น (Darnall *et al*, 1986, Fourest and Roux, 1992) ในการทดลองนี้ไม่ได้ทดลองที่พีเอชสูงกว่า 7 เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของโลหะในสารละลาย

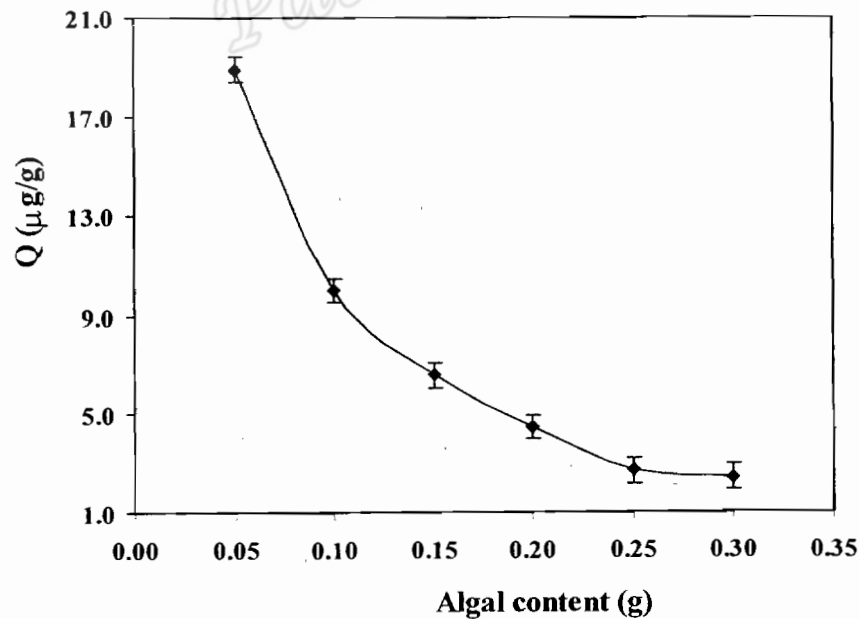
การดูดซับสารหนูของตัวอย่างสาหร่ายทั้งสองชนิดมีแนวโน้มลดลง เมื่อพีเอชของสารละลายมากกว่า 5.5 อาจจะเป็นเนื่องมาจากการที่สารหนูมีเลขออกซิเดชันหลายค่า ที่พบมากคือ As(III) และ As(V) ทำให้สารหนูมีหลายสปีชีส์ในสารละลาย ได้แก่ H_3AsO_3 , H_2AsO_3^- , HAsO_3^{2-} และ AsO_3^{3-} สำหรับ As(III) และ H_3AsO_4 , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} และ AsO_4^{3-} สำหรับ As(V) โดยมีสัดส่วนของแต่ละสปีชีส์ไม่เท่ากันขึ้นกับสภาพสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ค่า pH สภาพออกซิไดส์หรือรีดิวซ์ และอนุภาคนิวคลีอื่น ๆ (Jekel, 1994) มีรายงานว่าที่พีเอช 5-8 มักจะพบ H_2AsO_4^- และ HAsO_4^{2-} มากในน้ำธรรมชาติที่มีสภาพออกซิไดส์ และพบสปีชีส์ H_3AsO_3 ในสภาพรีดิวซ์ (Mok and Wei, 1994) และการดูดซับสารหนูบนพื้นผิวของเซดีเมนต์จะขึ้นกับประจุของ adsorbing species และลักษณะประจุพื้นผิวของตัวดูดซับ (Bhumbla and Keefer, 1994) ดังนั้นเมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของสารหนูสปีชีส์ต่าง ๆ รวมถึงประจุบนพื้นผิวของสาหร่าย ซึ่งอาจมีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารหนูกับหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนพื้นผิวสาหร่ายลดลง

4.2.2 ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก (ทองแดง และสารหนู)

ผลการศึกษาปริมาณวัสดุสาหร่ายที่เหมาะสมในการทดลองการดูดซับโลหะหนักทองแดง และสารหนู โดยเลือกใช้สาหร่ายฝักกาดปริมาณ 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 g แช่ในสารละลายโลหะหนัก ปริมาตร 50 mL (สารละลายทองแดงเข้มข้น 20 mg/L, สารหนู 50 $\mu\text{g/L}$, พีเอช 5.0 ± 0.5) เขย่าความเร็ว 100 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ผลแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.10 ความสามารถดูดซับทองแดง ($Q \pm \text{SD}$, mg/g) โดยสาหร่ายฝักกาดในปริมาณต่าง ๆ กัน ($\text{Cu} = 20 \text{ mg/L}$, $\text{pH} 5.0 \pm 0.5$, 100 rpm agitation)



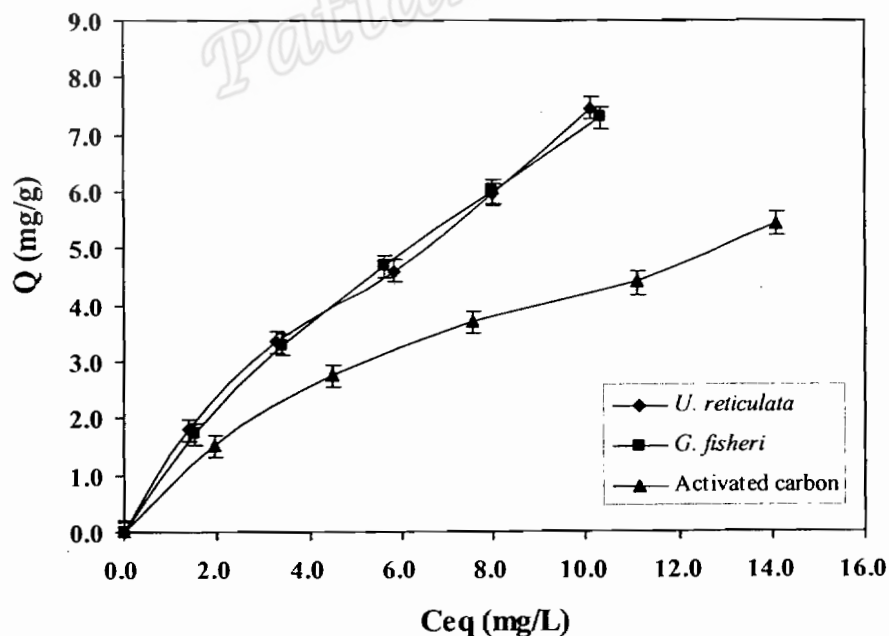
รูปที่ 4.11 ความสามารถดูดซับสารหนู ($Q \pm \text{SD}$, $\mu\text{g/g}$) โดยสาหร่ายฝักกาดในปริมาณต่าง ๆ กัน ($\text{As} = 50 \mu\text{g/L}$, $\text{pH} 5.0 \pm 0.5$, 100 rpm agitation)

จะเห็นได้ว่า ในสารละลายโลหะปริมาตร 50 mL การดูดซับโลหะทองแดงหรือสารหนูของสาหร่าย ผักกาดมีแนวโน้มเหมือนกันคือ มีความสามารถดูดซับโลหะหนักลดลงเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่ม ขึ้น โดยที่ ปริมาณสาหร่ายเป็น 0.05 g จะมีการดูดซับทองแดงและสารหนูได้สูงสุดเท่ากับ 12.0 mg/g และ 18.9 $\mu\text{g/g}$ ตามลำดับ และเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับโลหะหนักจะลดลง และเกือบคงที่เมื่อใช้ปริมาณ สาหร่ายมากกว่า 0.15 g

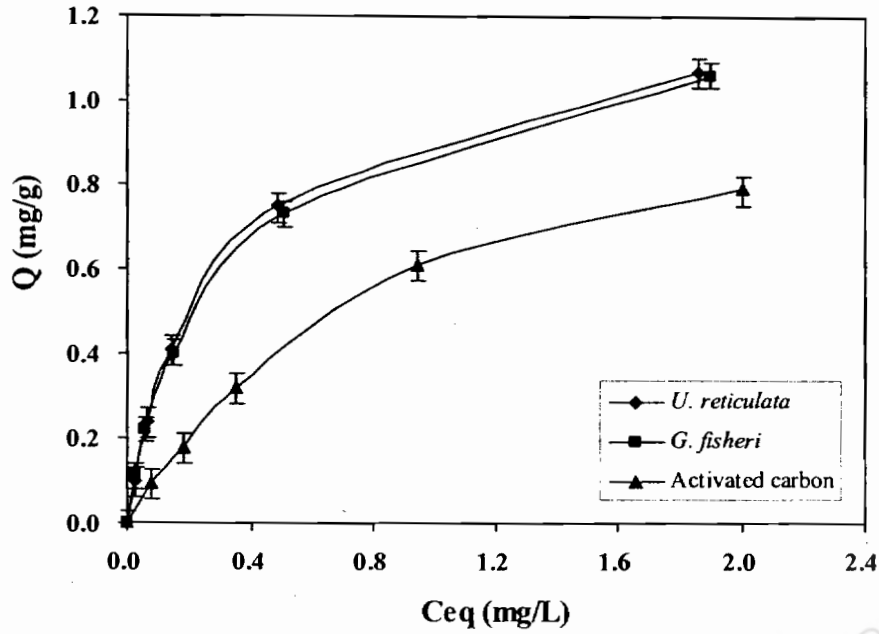
เนื่องจากการวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลือในสารละลายหลังการทดลองดูดซับโดยใช้ AAS นั้น ถ้าใช้สาหร่ายตัวอย่าง 0.5 g จะต้องเจือจางสารละลายก่อนการวัด และกรณีใช้สาหร่ายตัวอย่างมากกว่า 0.15 g ต้องทำให้สารละลายเข้มข้นก่อนการวัด ดังนั้นในการทดลองการดูดซับแบบไม่ต่อเนื่องต่อไป จึงได้ เลือกใช้ปริมาณสาหร่าย 0.1 g ในสารละลายโลหะหนักปริมาตร 50 mL เพื่อให้ใช้ตัวอย่างสาหร่ายอย่าง ประหยัด สามารถใช้ได้ตลอดการทดลอง และเมื่อทำการวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลือในสารละลายโดยใช้ เครื่อง AAS จะให้ค่าที่เหมาะสมโดยไม่ต้องทำการเจือจางหรือทำให้เข้มข้นหลายขั้นตอน

4.2.3 ความสามารถดูดซับโลหะหนัก (ทองแดง ตะกั่ว และสารหนู) ของตัวอย่างสาหร่ายเปรียบเทียบกับผงถ่านกัมมันต์

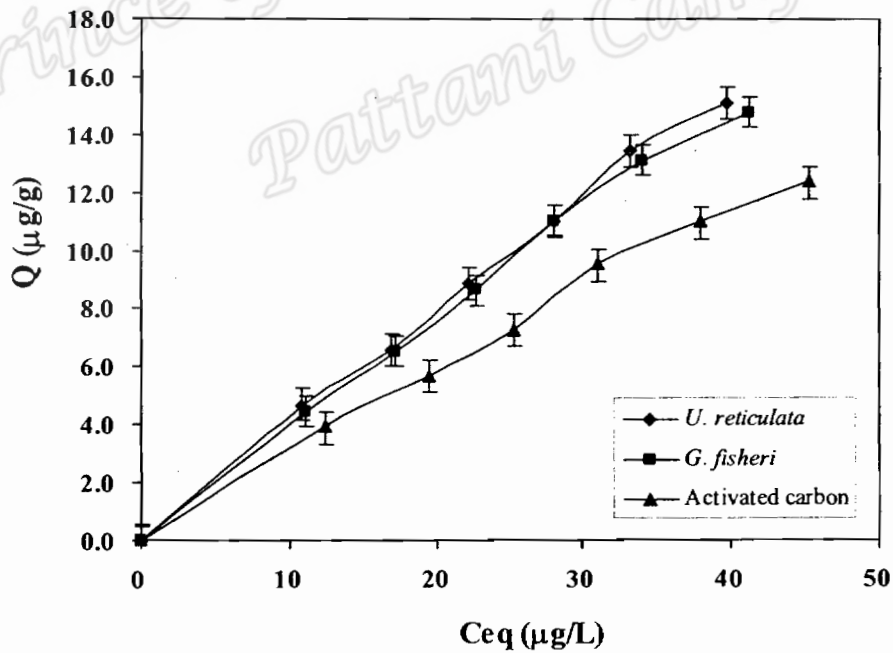
จากการทดสอบความสามารถดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด คือ ทองแดง (ความเข้มข้นตั้งต้น 0-20 mg/L, พีเอช 5.0 ± 0.5) ตะกั่ว (เข้มข้น 0-4 mg/L, พีเอช 5.0 ± 0.5) และสารหนู (เข้มข้น 0-70 $\mu\text{g/L}$, พีเอช 5.0 ± 0.5) โดยตัวอย่างสาหร่ายผสมนางและสาหร่ายผักกาด แสดงผลในรูปที่ 4.12, 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ความสามารถดูดซับโลหะทองแดง ($Q \pm \text{SD}$, mg/g) โดยตัวอย่างสาหร่ายผสมนาง สาหร่ายผักกาด และถ่านกัมมันต์ (ทองแดงตั้งต้น 0-20 mg/L, pH 5.0 ± 0.5 ; สาหร่าย 0.2 g/100 mL)



รูปที่ 4.13 ความสามารถดูดซับโลหะหนักตะกั่ว โดยตัวอย่างสาหร่ายผมนาง สาหร่ายผักกาด และ ถ่านกัมมันต์ (ตะกั่วตั้งต้น 0-4 mg/L, pH 5.0±0.5; สาหร่าย 0.2 g/100 mL)



รูปที่ 4.14 ความสามารถดูดซับโลหะหนักสารหนู โดยตัวอย่างสาหร่ายผมนาง สาหร่ายผักกาด และ ถ่านกัมมันต์ (สารหนูตั้งต้น 0-70 µg/L, pH 5.0±0.5; สาหร่าย 0.2 g/100 mL)

ตัวอย่างสาหร่ายทั้งสองชนิดมีความสามารถดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด ที่คล้ายคลึงกัน และมีค่าการดูดซับที่สูงกว่ากรณีของผงถ่านกัมมันต์ นั่นคือ เมื่อคำนวณค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับโลหะ (Q_m) ของสารดูดซับแต่ละชนิด โดยอาศัยสมการการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ (Langmuir adsorption model) พบว่า สาหร่ายพมนางมีค่า Q_m สำหรับ ทองแดง ตะกั่ว และสารหนู เท่ากับ 16.10 ± 0.46 mg/g, 1.20 ± 0.05 mg/g และ 133.0 ± 6.0 μ g/g ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) ซึ่งใกล้เคียงกับ Q_m ของสาหร่ายผักกาด คือ 14.64 ± 0.42 mg/g, 1.22 ± 0.05 mg/g และ 128.0 ± 5.0 μ g/g ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์มีการดูดซับโลหะแต่ละชนิดได้ต่ำกว่า (8.70 ± 0.44 mg/g; 1.10 ± 0.05 mg/g และ 71.0 ± 5.0 μ g/g ตามลำดับ)

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับโลหะ ($Q_m \pm SD$) แต่ละชนิด ของตัวอย่างสาหร่ายพมนาง สาหร่ายผักกาด และถ่านกัมมันต์

สารดูดซับ	$Q_m \pm SD$		
	Cu (mg/g)	Pb (mg/g)	As (μ g/g)
สาหร่ายพมนาง	16.10 ± 0.46	1.20 ± 0.05	133.0 ± 6.0
สาหร่ายผักกาด	14.64 ± 0.42	1.22 ± 0.07	128.0 ± 5.0
ถ่านกัมมันต์	8.70 ± 0.44	1.10 ± 0.05	71.0 ± 5.0

การดูดซับโลหะทองแดงของตัวอย่างวัสดุสาหร่ายทั้งสองชนิดนี้ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุดูดซับพวกเชื้อรา *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) ตลอดจนวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *Ecklonia radiata* (70.5 mg/g) (Matheickal *et al.*, 1997)

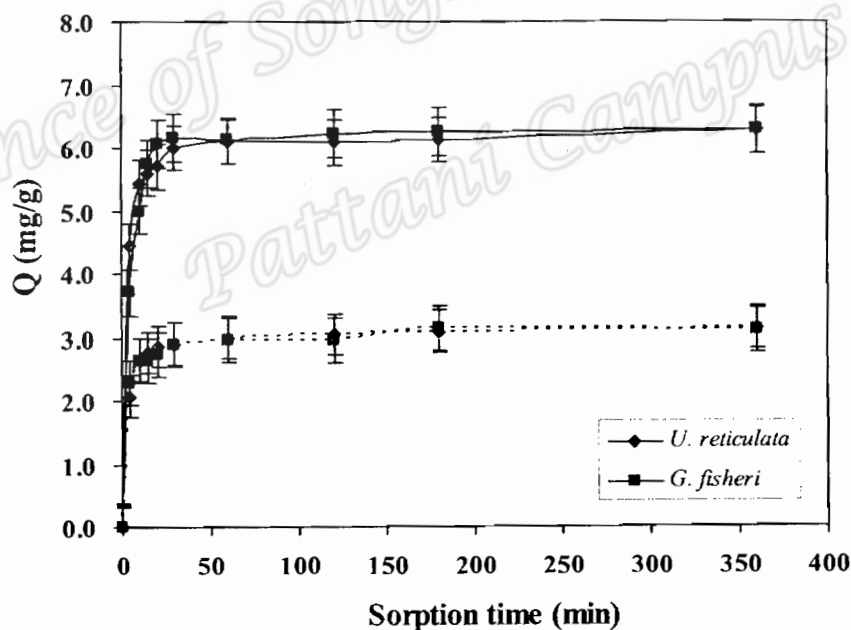
สำหรับการดูดซับตะกั่ว พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *Undaria pinnatifida* ซึ่ง treat ด้วย xanthate ($Q_m = 1.21$ mg/g) (Kim *et al.*, 1999) แต่ต่ำกว่า natural zeolites ($Q_m = 16.6$ mg/g) (Blanchard *et al.*, 1984) แบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* PU21 (70 mg/g) (Chang *et al.*, 1997) และสาหร่ายสีน้ำตาล *Ecklonia radiata* (282 mg/g) (Matheickal and Yu, 1996)

ส่วนการดูดซับสารหนู พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับกรณีเห็ด *Laccaria amethystina* และผักตบชวา (*Eichonia craaiplies*) ในส่วนลำต้น ซึ่งสามารถดูดซับสารหนูได้ 100 μ g/g และ 170 μ g/g dry weight ตามลำดับ (Maeda, 1994) แต่มีค่าต่ำกว่ากรณีของโปรโตซัว *Euglena mutabilis* (336 μ g/g) (Casiot *et al.*, 2004) แบคทีเรีย *Klebsiella oxytoca* (347 μ g/g) และสาหร่ายน้ำจืด *Chlorella vulgaris* (260 μ g/g) (Maeda, 1994)

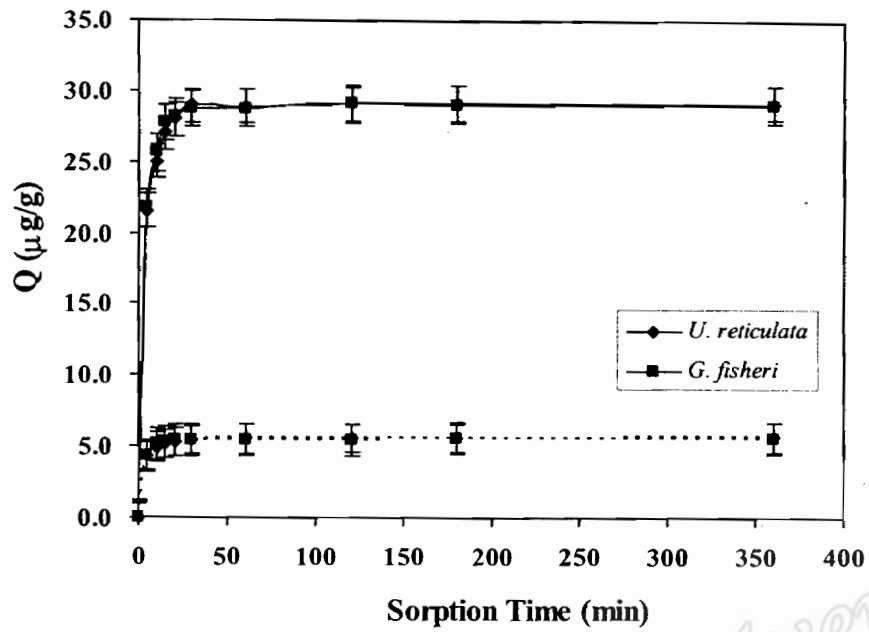
4.2.4 จลนศาสตร์ (Kinetic profiles) ของดูดซับโลหะหนักโดยวัสดุตัวอย่างสาหร่าย

ผลการศึกษาการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด คือ ทองแดง (ความเข้มข้น 10 และ 20 mg/L, พีเอช 5.0 ± 0.5) ตะกั่ว (ความเข้มข้น 25 และ 50 $\mu\text{g/L}$, พีเอช 5.0 ± 0.5) และ สารหนู (ความเข้มข้น 5 และ 50 $\mu\text{g/L}$, พีเอช 5.0 ± 0.5) โดยวัสดุสาหร่ายพมนางและสาหร่ายผักกาดที่เวลาต่าง ๆ คือ 0, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 180 และ 360 นาที แสดงดังรูปที่ 4.15-4.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่า วัสดุตัวอย่างสาหร่ายสามารถดูดซับโลหะแต่ละชนิดได้ในเวลารวดเร็ว โดยที่ความเข้มข้นของโลหะทองแดงและตะกั่วเท่ากับ 10 mg/L และ 25 $\mu\text{g/L}$ สามารถดูดซับได้ถึง 90% ภายในเวลา 15 นาที และที่ความเข้มข้นของโลหะทองแดงและตะกั่วค่าสูง จะดูดซับได้ 90% ภายในเวลา 20-30 นาที ส่วนกรณีสารหนู การดูดซับจะเกิดขึ้นค่อนข้างช้ากว่าเล็กน้อย คือดูดซับได้ 90% ภายในเวลา 30-50 นาที

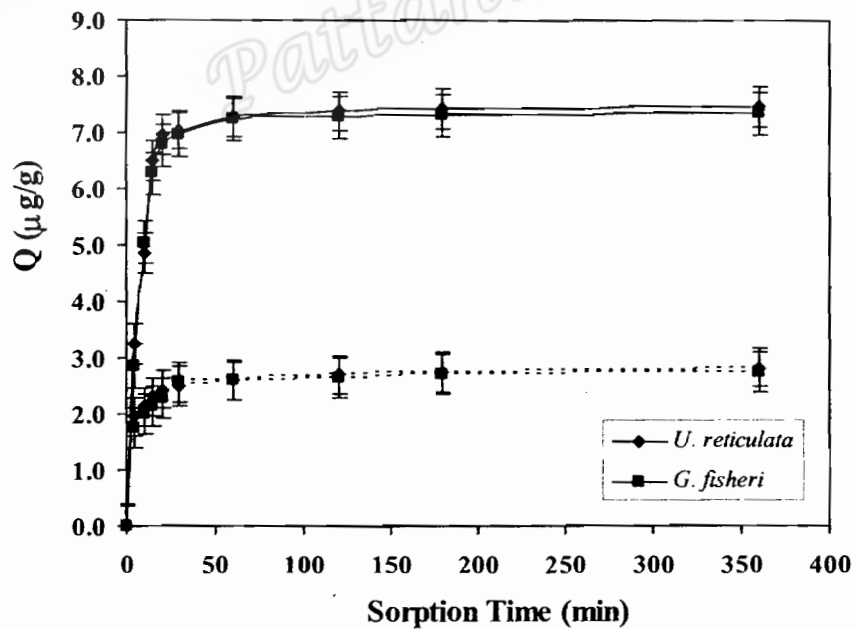
ผลการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วนี้ตรงกับผลการศึกษาของ Matheickal *et al.* (1997) และ Matheickal and Yu (1996) กรณีวัสดุสาหร่ายสีน้ำตาล *Ecklonia radiata* ซึ่งรายงานการดูดซับทองแดงและตะกั่วได้ 90% ภายในระยะเวลา 15 นาที



รูปที่ 4.15 ความสามารถดูดซับทองแดง ($Q \pm \text{SD}$, mg/g) ของสาหร่าย 2 ชนิด ที่เวลาต่าง ๆ (เส้นประ-10 mg/L Cu และ เส้นทึบ-20 mg/L Cu)



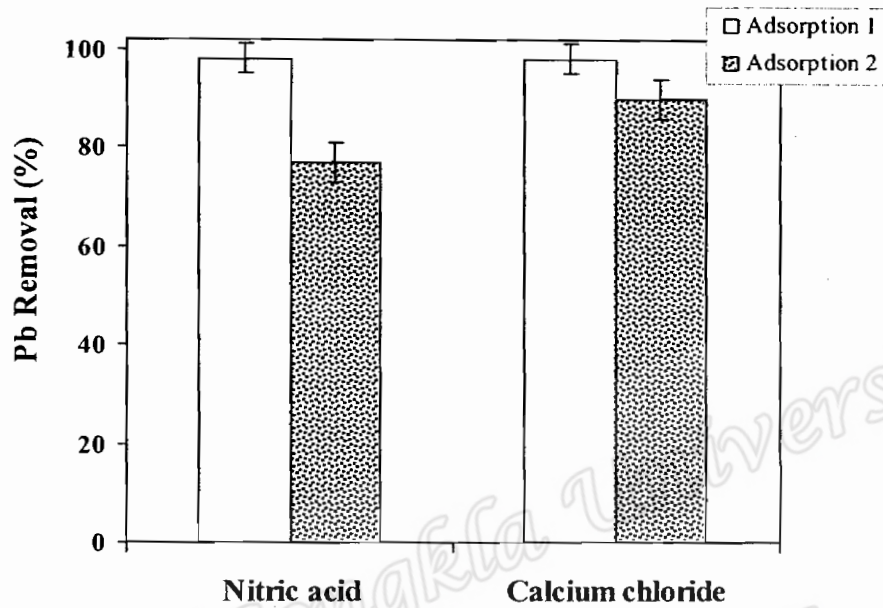
รูปที่ 4.16 ความสามารถดูดซับตะกั่ว ($Q \pm SD$, $\mu\text{g/g}$) ของสาหร่าย 2 ชนิด ที่เวลาต่าง ๆ (เส้นประ-25 $\mu\text{g/L}$ Pb และ เส้นทึบ-50 $\mu\text{g/L}$ Pb)



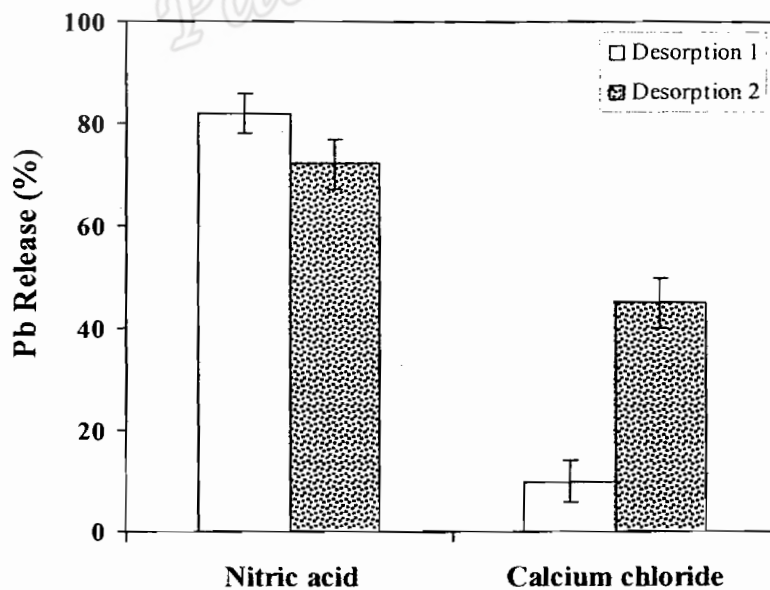
รูปที่ 4.17 ความสามารถดูดซับสารหนู ($Q \pm SD$, $\mu\text{g/g}$) ของสาหร่าย 2 ชนิด ที่เวลาต่าง ๆ (เส้นประ-25 $\mu\text{g/L}$ As และ เส้นทึบ- 50 $\mu\text{g/L}$ As)

4.3 กระบวนการ Adsorption-desorption ของตะกั่วโดยวัสดุตัวอย่างสาหร่ายพมนาง

ผลการศึกษาระบวนการ adsorption ของตะกั่วในสารละลายซึ่งเข้มข้น 20 mg/L โดยตัวอย่างสาหร่ายพมนาง และกระบวนการ desorption ของตะกั่วโดยใช้ 0.1 M HNO_3 เป็นตัวชะ จำนวน 2 ครั้ง ต่อเนื่องกัน แสดงในรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 Adsorption ของตะกั่ว (20 mg/L) โดยตัวอย่างสาหร่ายพมนางที่ผ่านการชะด้วย 0.1 M HNO_3 และ 0.1 M CaCl_2 ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2



รูปที่ 4.19 Desorption ของตะกั่วโดยตัวอย่างสาหร่ายพมนางที่ผ่านการชะด้วย 0.1 M HNO_3 และ 0.1 M CaCl_2 ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

จะเห็นได้ว่า 0.1 M HNO₃ สามารถชะโลหะตะกั่วออกจากวัสดุสาหร่ายได้ดีกว่า 0.1 M CaCl₂ โดยชะออกมาได้ 82% และ 72% ในรอบการชะที่ 1 และ 2 ในขณะที่ 0.1 M CaCl₂ ชะออกได้เพียง 10% และ 45% ตามลำดับ (รูปที่ 4.19) ในกรณีการกำจัดโลหะหลังการชะรอบแรกแล้ว ตัวอย่างสาหร่ายที่ผ่านการชะครั้งแรกด้วย 0.1 M CaCl₂ สามารถดูดซับตะกั่วได้ดี ในช่วง 93-95% ส่วนตัวอย่างสาหร่ายที่ผ่านการชะครั้งแรกด้วย 0.1 M HNO₃ จะมีการดูดซับลดลงเหลือ 66-75% (รูปที่ 4.18) การที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากวัสดุสาหร่ายที่ผ่านการชะด้วย 0.1 M HNO₃ มีการเปลี่ยนแปลงสภาพจากเดิมที่ค่อนข้างแข็งคงรูปเป็นอ่อนลักษณะบวมค่อนข้างยุบ ทำให้ไม่สามารถนำมาทดสอบการดูดซับในรอบต่อ ๆ ไปได้ ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการชะด้วย 0.1 M CaCl₂ มีลักษณะที่บวม เปื่อยยุบน้อยกว่า แต่ก็ไม่สามารถนำมาทดสอบต่อไปได้

การทดลองนี้แตกต่างจากกรณีของชีวมวลของสาหร่ายสีน้ำตาล *Durvillaea potatorum* ในการกำจัดโลหะทองแดง ซึ่งสามารถใช้ได้ถึง 7 รอบ โดยใช้ระบบคอลัมน์ต่อเนื่อง (continuous fixed-bed column) (Yu and Kaewsam, 1999, 2001) และกรณีวัสดุสาหร่ายสีเขียว *Ulva lactuca* ในการดูดซับปรอท โดยใช้ระบบคอลัมน์ต่อเนื่อง สามารถใช้ได้ถึง 5 รอบโดยประสิทธิภาพไม่เปลี่ยนแปลง (Zeroual *et al.*, 2003) การที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากตัวอย่างสาหร่ายเหล่านี้มีองค์ประกอบโครงสร้างผนังเซลล์ที่แตกต่างจากสาหร่ายผสมซึ่งเป็นสาหร่ายสีแดงที่ใช้ในการทดลองนี้ นอกจากนี้ วิธีการทดสอบการดูดซับโลหะนี้เป็นแบบสมดุล (batch equilibrium) ดังนั้นจึงควรมีการทดสอบยืนยันโดยวิธีเดียวกัน และควรมีการศึกษาวิธีการปรับเปลี่ยนสภาพพื้นผิวของวัสดุสาหร่ายผสมให้มีความทนทานและเหมาะสมต่อการดูดซับโลหะก่อน เช่น การใช้ calcium chloride pretreatment (ยุพดี, 2546; Methelickal *et al.*, 1999) รวมถึงการทดสอบความสามารถดูดซับโลหะของวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ ที่มีมากในท้องถิ่นและยังไม่มีมีการใช้ประโยชน์

4.4 การคัดแยกเชื้อจากธรรมชาติและการทดสอบความสามารถดูดซับโลหะหนักสารหนู

ในการทดลองการดูดซับโลหะโดยเชื้อจุลินทรีย์นั้น เนื่องจากสารหนูเป็นโลหะหนักที่พบการปนเปื้อนสูงในบริเวณลุ่มน้ำปัดตานีตอนบน และเวลาการทดลองมีจำกัด จึงได้เลือกทำการทดลองการดูดซับเฉพาะสารหนูโดยเชื้อจุลินทรีย์เพื่อเป็นแนวทางในการบำบัดโลหะที่ปนเปื้อนในธรรมชาติ

4.4.1 การคัดแยกเชื้อจากธรรมชาติ

ทำการเก็บตัวอย่างดินและน้ำจากแหล่งที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักสารหนู 4 แห่ง ได้แก่ ที่บริเวณเหมืองเก่าไถลัดถ้ำทะลุ (2 สถานที่) แม่น้ำปัดตานี ที่สะพานยี่ลาป็น อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา และที่สะพานท่าสาบ เทศบาลเมือง จังหวัดยะลา และทำการคัดแยกเชื้อจุลินทรีย์ได้จำนวนทั้งหมด 158 ไอโซเลต จากนั้นนำไปทดสอบความสามารถดูดซับสารหนูเข้มข้น 1-12 mg/L เพื่อคัดเลือกเชื้อที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีโลหะสารหนูอยู่ต่อไป

4.4.2 ความสามารถในการเจริญของแบคทีเรียที่คัดแยกได้จากธรรมชาติ

จากการทดลอง พบว่าในอาหาร NB ที่มีสารหนูเข้มข้นต่ำกว่า 12 mg/L ในเวลา 24 ชั่วโมง แบคทีเรียที่คัดแยกได้จากธรรมชาติส่วนมากสามารถเจริญได้ดี ในขณะที่ความเข้มข้นของสารหนู 12 mg/L

มีแบคทีเรียจำนวนเพียง 8 ไอโซเลต สามารถเจริญได้ดี (ตารางที่ 4.4) จึงเลือกเฉพาะ 8 ไอโซเลตนี้สำหรับการศึกษาการดูดซับสารหนูต่อไป

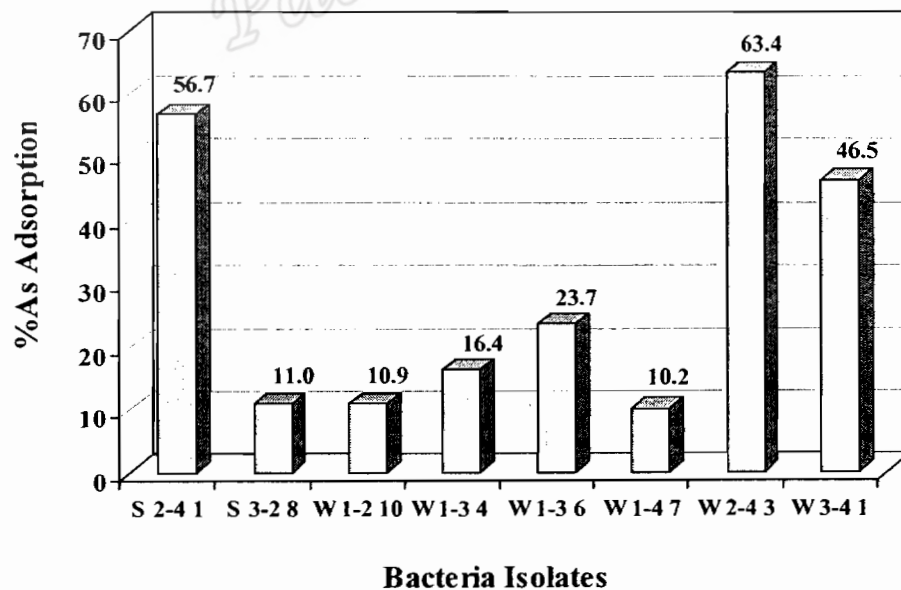
ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดกลืนแสง (Optical density, OD) ของเชื้อที่คัดแยกได้จากธรรมชาติ เจริญในอาหาร NB ที่มีสารหนูเข้มข้น 12 mg/L เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (เจือจาง 30 เท่า)

เชื้อจุลินทรีย์	ค่า OD ในอาหาร NB	ค่า OD ในอาหาร NB ที่มี 12 mg/L As
1. S 2-4 1	0.097	0.111
2. S 3-2 8	0.018	0.046
3. W 1-2 10	0.093	0.109
4. W 1-3 4	0.082	0.120
5. W 1-3 6	0.121	0.136
6. W 1-4 7	0.087	0.118
7. W 2-4 3	0	0.067
8. W 3-4 1	0.021	0.116

หมายเหตุ S = sediment, W = water

4.4.3 การคัดแยกเชื้อจากธรรมชาติที่สามารถดูดซับสารหนูปริมาณสูงสุด

ผลการทดสอบความสามารถดูดซับสารหนูของแบคทีเรียทั้ง 8 ไอโซเลตในอาหารเหลว NB ที่มีสารหนูเข้มข้น 12 mg/L แสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งพบว่า เซลล์ของแบคทีเรียไอโซเลต W 2-4 3 มีปริมาณการดูดซับสารหนูสูงที่สุด คือ 63.4% ดังนั้น จึงเลือกเซลล์ W 2-4 3 นี้เพื่อนำไปทดลองในขั้นต่อไป

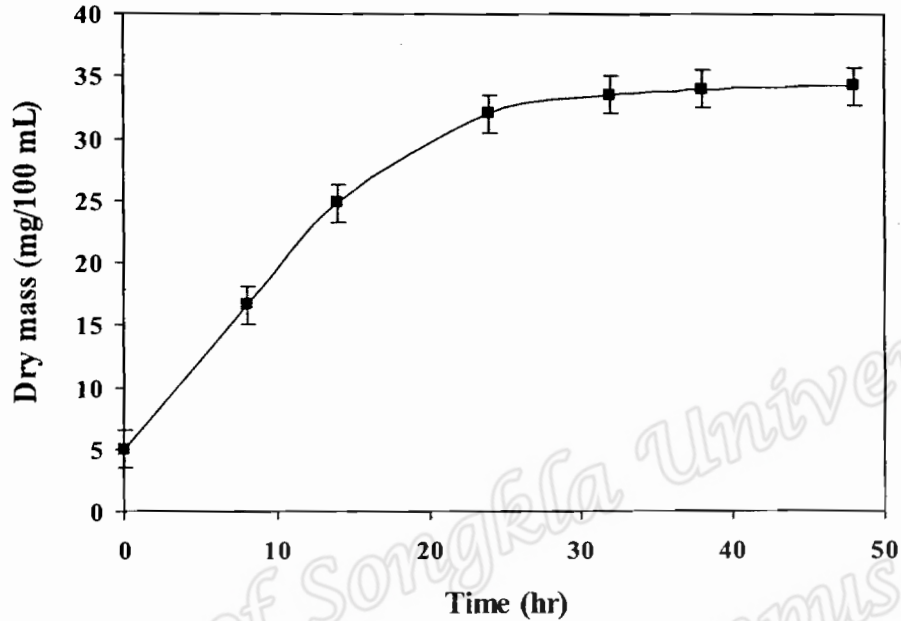


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับสารหนู (% As Adsorption) โดยแบคทีเรีย 8 ไอโซเลต ที่คัดแยกจากธรรมชาติเลี้ยงในอาหาร NB ที่มีสารหนูเข้มข้น 12 mg/L เป็นเวลา 7 วัน

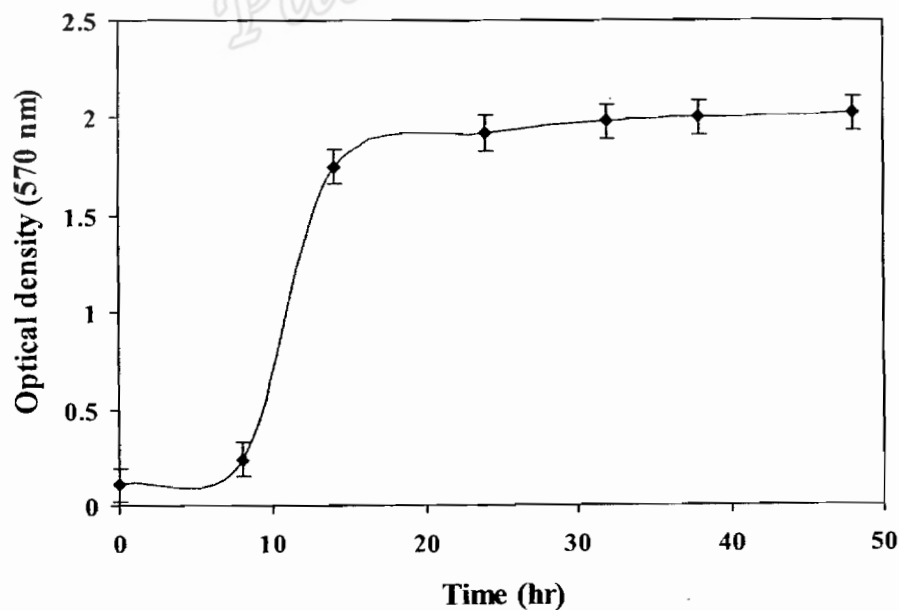
4.4.4 การเจริญของเซลล์แบคทีเรียที่คัดแยกจากธรรมชาติ (W 2-4 3)

การเจริญของเซลล์แบคทีเรียไอโซเลต W 2-4 3 แสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งจะเห็นว่าไม่ปรากฏช่วง lag phase แบคทีเรียชนิดนี้ใช้เวลาในการเจริญ 28-32 ชั่วโมง เซลล์จึงจะอยู่ในช่วง early stationary phase

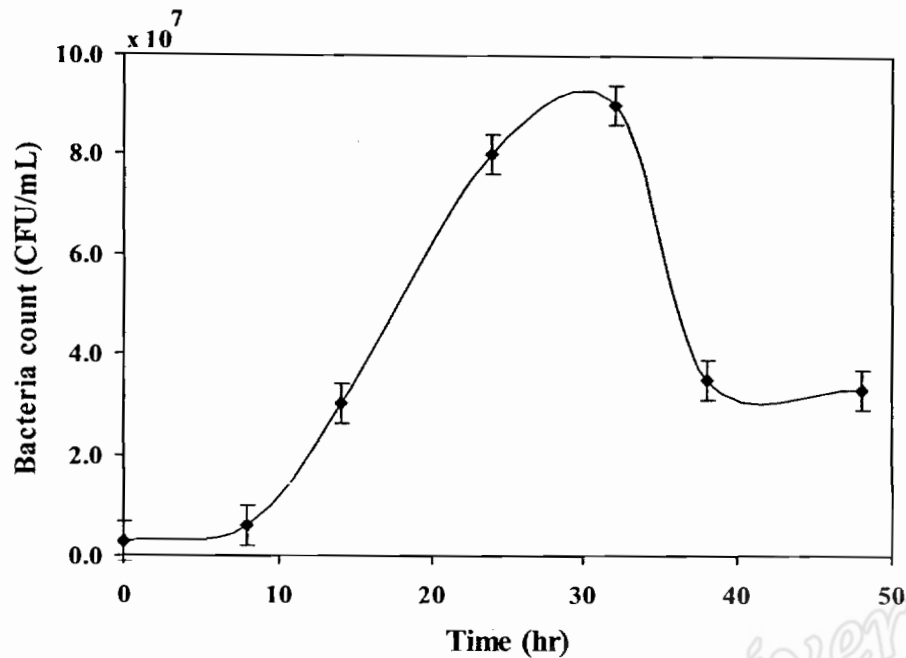
ทำการศึกษากการเจริญของเซลล์ *Pseudomonas aeruginosa* TISTR 358 เพื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ไอโซเลต W 2-4 3 ที่คัดแยกได้ ผลการเจริญของเซลล์ *P. aeruginosa* TISTR 358 แสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงน้ำหนักแห้งของเซลล์แบคทีเรียไอโซเลต W 2-4 3 (mg/100 L) ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเจริญของเซลล์ *Pseudomonas aeruginosa* TISTR 358 ในหน่วยค่าการดูดกลืนแสง (Optical density) ที่ 570 nm



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเจริญของเซลล์ *Pseudomonas aeruginosa* TISTR 358 ในหน่วยจำนวนจุลินทรีย์

จากรูปที่ 4.22 พบว่า จุลินทรีย์มีการเจริญได้ดีที่สุดในช่วงเวลา 26-30 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาการเจริญของเซลล์โดยใช้ค่าจำนวนจุลินทรีย์ พบว่า ช่วงเวลาที่จุลินทรีย์มีการเจริญได้ดีที่สุดก็อยู่ในช่วงเวลา 26-30 ชั่วโมงเช่นกัน (รูปที่ 4.23)

4.4.5 การตรวจสอบชนิดของแบคทีเรียที่คัดแยกได้ (W 2-4 3) เปรียบเทียบกับแบคทีเรียที่ทราบชนิด

4.4.5.1 การติดสีย้อมแกรมและการย้อมสีสปอร์

จากผลการย้อมสีแกรมและการย้อมสีสปอร์ พบว่าเชื้อ W 2-4 3 เป็นแบคทีเรียชนิดแกรมลบ (รูปที่ 4.24) ไม่สร้างสปอร์ มีรูปร่างลักษณะเป็นท่อน เคลื่อนที่ด้วยแฟลกเจลลา ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกับแบคทีเรีย *P. aeruginosa* TISTR 358 (รูปที่ 4.25) เป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงทำการทดสอบสมบัติทางชีวเคมีต่อเพื่อยืนยันผลต่อไป

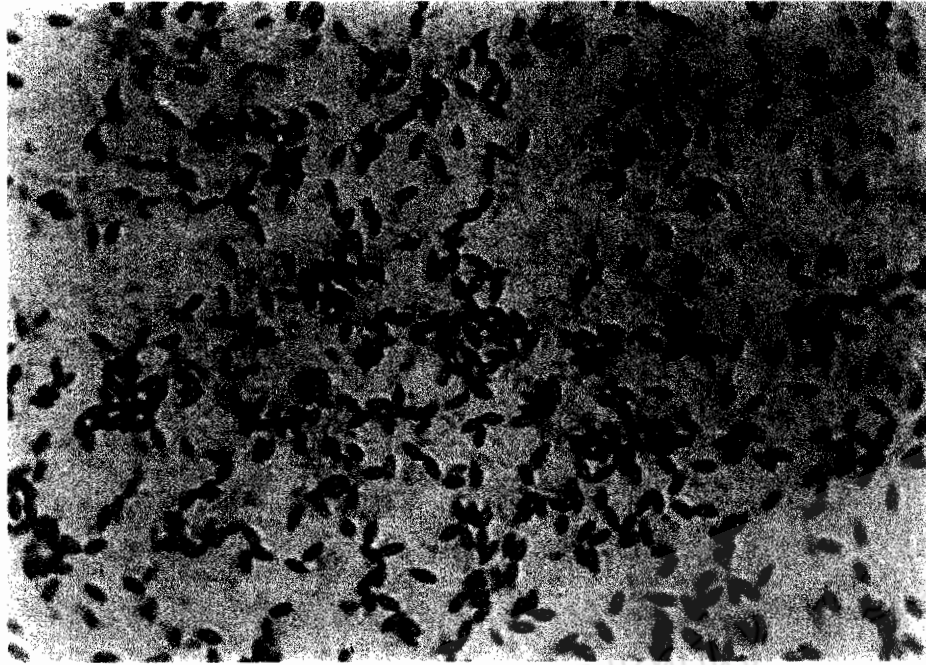
4.4.5.2 การทดสอบสมบัติทางชีวเคมีของเชื้อ W 2-4 3

ผลการทดสอบสมบัติทางชีวเคมีบางประการของเชื้อที่คัดแยกได้จากธรรมชาติ (ไอโซเลต W 2-4 3) เปรียบเทียบกับแบคทีเรีย *P. aeruginosa* TISTR 358 (ตารางที่ 4.5) พบว่า เชื้อ W 2-4 3 นี้มีสมบัติทางชีวเคมีที่ใกล้เคียงกับ *P. aeruginosa* TISTR 358 มาก ทั้งในด้านการเคลื่อนที่ การไม่ผลิตไนไตรท์ มีความสามารถในการสร้างเอ็นไซม์เจลาติเนส ออกซิเดสและอะมิเลสในปริมาณใกล้เคียงกัน รวมถึงทำให้เกิดการหมักได้ แบคทีเรียไอโซเลต W 2-4 3 นี้จึงน่าที่จะเป็นชนิด *P. aeruginosa*

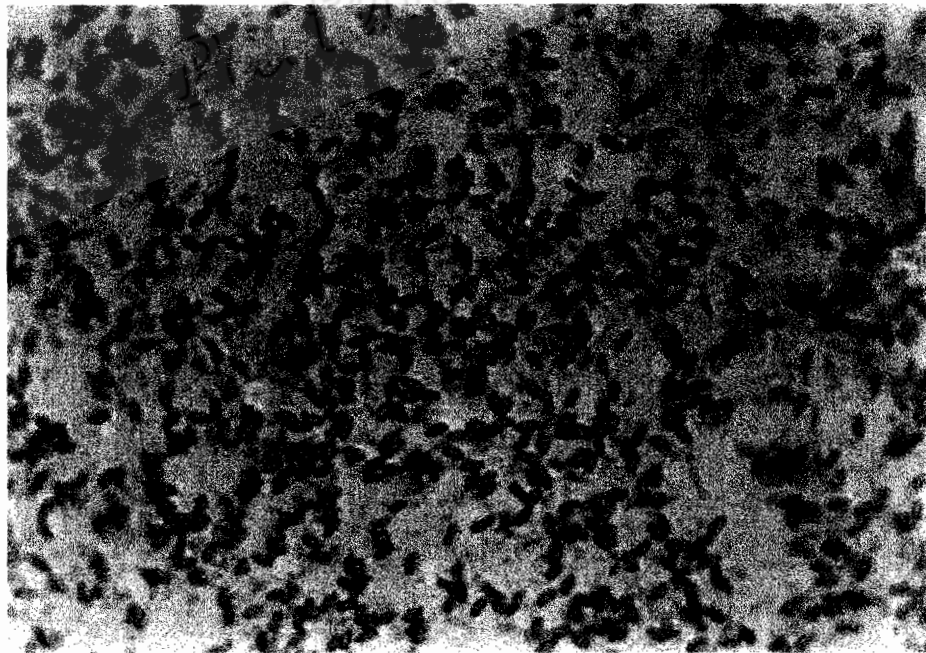
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติทางชีวเคมีของเชื้อ W 2-4 3 เปรียบเทียบกับ *P. aeruginosa* TISTR 358

Biochemical Test	W 2-4 3	<i>P. aeruginosa</i> TISTR 358
1) Motility test		
- Hanging drop method	++	+
- Semisolid method	+	+
2) Oxidase test		
- Indirect paper procedure	+	+++
- Direct plate procedure	+++	++
3) Nitrite production	-	-
4) Denitrification	+++	++
5) Gelatinase test	+++	+++
6) Litmus milk peptonized	+++	++
7) Starch hydrolysis	+++	++
8) Growth on SS agar	+	+++
9) Oxidative-fermentative test	+++	++

หมายเหตุ + คือ มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น
- คือ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.24 เซลล์แบคทีเรียที่คัดแยกได้จากธรรมชาติ (W 2-4 3) ย้อมสีแกรม กำลังขยาย 100 เท่า

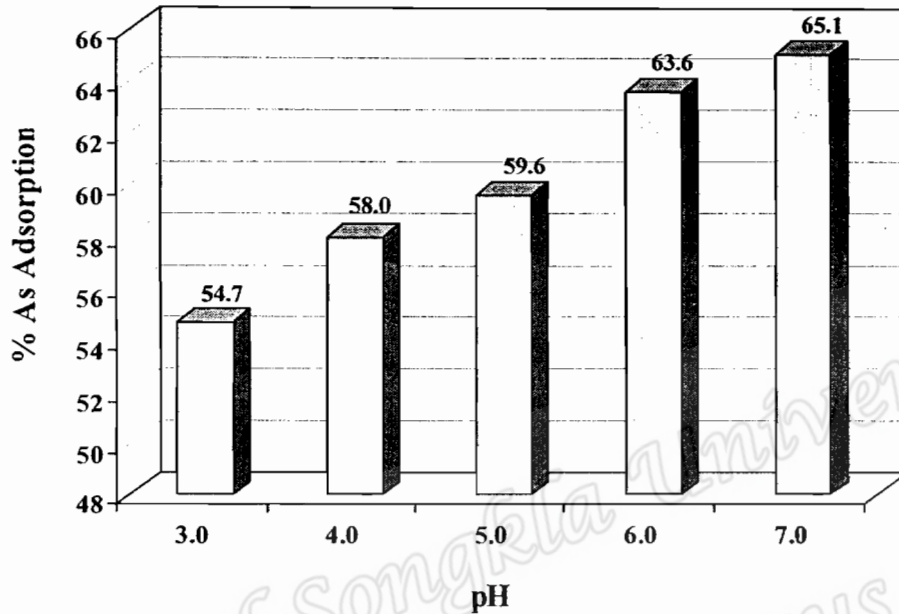


รูปที่ 4.25 เซลล์ *Pseudomonas aeruginosa* TISTR 358 ย้อมสีแกรม กำลังขยาย 100 เท่า

4.4.6 ความสามารถดูดซับโลหะหนักสารหนูโดยแบคทีเรีย W 2-4 3

4.4.6.1 พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับสารหนูโดยเซลล์ W 2-4 3

จากการทดลองการดูดซับสารหนูโดยเซลล์ W 2-4 3 ซึ่งเลี้ยงในอาหาร NB ที่มีสารหนูเข้มข้น 12 mg/L ที่พีเอชต่าง ๆ เป็นเวลา 7 วัน ให้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.26

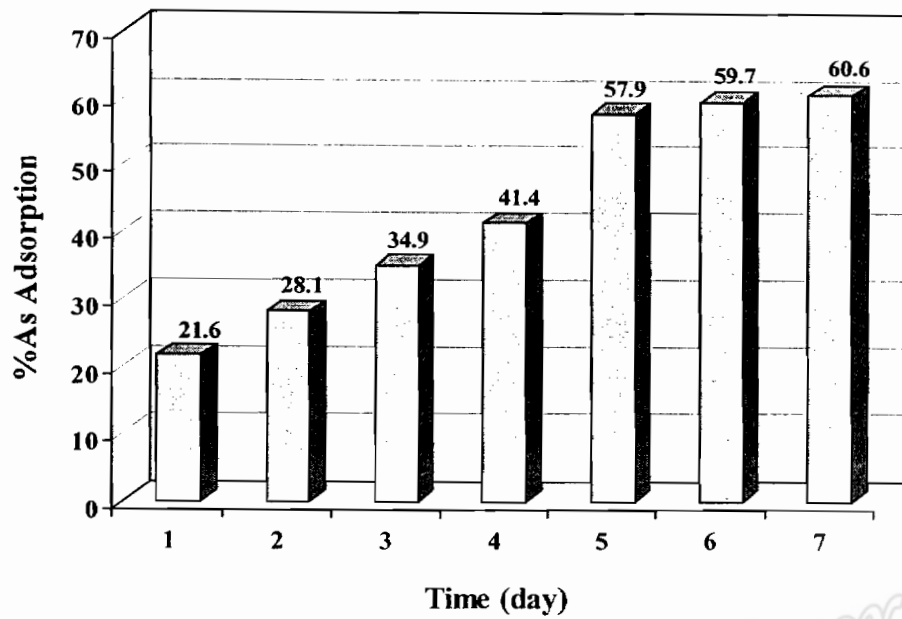


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับสารหนู (% As Adsorption) โดยเซลล์ W 2-4 3 เลี้ยงในอาหาร NB ที่พีเอชต่าง ๆ เป็นเวลา 7 วัน

จะเห็นได้ว่า เซลล์แบคทีเรีย W 2-4 3 นี้มีการดูดซับสารหนูเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น ในสารละลายที่มีพีเอชในช่วงเป็นกรด จะมีการดูดซับได้ต่ำโดยเฉพาะที่พีเอช 3 และที่พีเอช 7 มีการดูดซับสารหนูได้สูงสุดเท่ากับ 65.09% ทั้งนี้เนื่องมาจากในสภาวะที่เป็นกรดมาก ไฮโดรเจนไอออนจะเกาะกับสารอินทรีย์ได้ดี ทำให้สารอื่นๆ ที่มีประจุบวกเข้ามาแทนที่ได้ยาก (Fourast and Roux, 1992) และที่พีเอชต่ำ จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ดี ทำให้มีส่วนประกอบของเซลล์ที่มีสมบัติในการดูดซับมีปริมาณน้อย

4.4.6.2 ความสามารถดูดซับสารหนูโดยเซลล์ W 2-4 3 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ผลการศึกษาความสามารถดูดซับสารหนูโดยเซลล์ W 2-4 3 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ระยะเวลามากขึ้น เซลล์แบคทีเรียสามารถดูดซับได้มากขึ้น โดยในวันที่ 1-5 จะมีอัตราการดูดซับที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปถึงวันที่ 6 และ 7 อัตราการดูดซับจะลดลง ทำให้ปริมาณการดูดซับสารหนูเริ่มคงที่ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเซลล์ หรือมีการสะสมไอออนของสารหนูภายในเซลล์ถึงสภาวะสมดุล และเซลล์เริ่มตายลง ทำให้กระบวนการดูดซับบางส่วนที่ขึ้นกับเมตาบอลิซึมของเซลล์หยุดลง ปริมาณการดูดซับสารหนูที่ปรากฏจึงมีแนวโน้มคงที่ (Andres *et al.*, 1992)



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงปริมาณการดูดซับสารหนู (% As Adsorption) โดยเซลล์ W 2-4 3 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

4.4.6.3 ความสามารถดูดซับสารหนูโดยเซลล์ W 2-4 3 ในสภาพมีชีวิตและไม่มีชีวิต

ผลการทดสอบความสามารถดูดซับสารหนูโดยเซลล์ไอโซเลต W 2-4 3 ในสภาพมีชีวิตและไม่มีชีวิตในอาหาร NB ที่มีสารหนูเข้มข้น 12 mg/L แสดงในตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า เซลล์ในสภาพที่มีชีวิตมีความสามารถดูดซับสารหนูเท่ากับ 3.45 mg/g dried cell (63.4%) ซึ่งมากกว่าเซลล์ในสภาพไม่มีชีวิตที่มีความสามารถดูดซับสารหนูได้ 0.34 mg/g อยู่ประมาณ 10 เท่า ซึ่งอาจเนื่องมาจากในสภาพเซลล์ที่มีชีวิตจะมีโครงสร้างของผนังเซลล์ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะมากกว่า อีกทั้งมีสารเมตาบอไลต์ที่เซลล์สร้างขึ้นอยู่ตลอดเวลา ซึ่งอาจช่วยในการดูดซับสารหนู และระบบเมตาบอลิซึมในเซลล์สิ่งมีชีวิตก็มีกระบวนการบางอย่างที่ช่วยในการดูดซับ เช่น เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้เกิดการสะสมสารหนูในเซลล์ ส่วนเซลล์ในสภาพที่ไม่มีชีวิต อาจเกิดการเสื่อมสลายของบางองค์ประกอบของโครงสร้างผนังเซลล์จากการอบแห้ง ทำให้บริเวณจำเพาะในการจับกับโลหะถูกทำลายไป ทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับโลหะสูงกว่าเซลล์ในสภาพไม่มีชีวิต (Chang *et al.*, 1997)

ตารางที่ 4.6 ปริมาณการดูดซับสารหนู (%As Adsorption) และความสามารถดูดซับสารหนูของเซลล์ W 2-4 3 ในสภาพมีชีวิตและไม่มีชีวิตในอาหาร NB ที่มีสารหนูเข้มข้น 12 mg/L

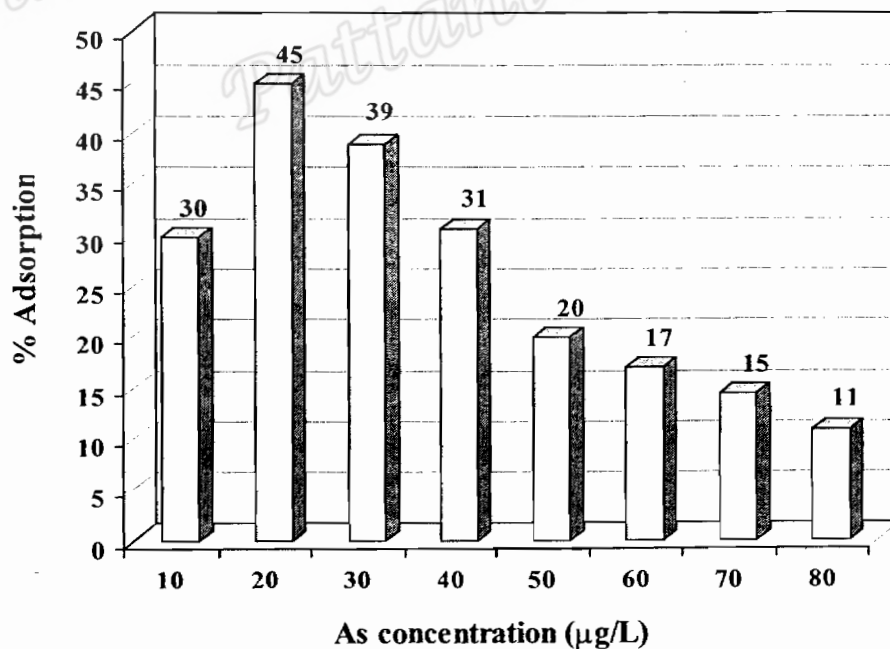
W 2-4 3 Cells	As concentration before uptake (mg/L)	As concentration after uptake (mg/L)	% As Adsorption	As adsorption capacity (mg/g)
Active	12.28	4.49	63.4 (0.2261 g)	3.45
Inactive	12.47	2.87	76.9 (2.8602 g)	0.34

เซลล์จุลินทรีย์ในสภาพมีชีวิตมีการดูดซับโลหะได้ดีกว่าเซลล์ที่ไม่มีชีวิต แต่ในการนำจุลินทรีย์ในสภาพมีชีวิตมาใช้ในการดูดซับโลหะหนักนั้น จะมีวิธีการที่สลับซับซ้อนมากกว่ากรณีใช้เซลล์ที่ไม่มีชีวิต เนื่องจากต้องมีการเตรียม inoculum ของเชื้อในอาหารที่เหมาะสมก่อน และหลังการดูดซับอาจต้องมีการเก็บเซลล์ที่ตายออก ดังนั้นจะต้องมีการศึกษาในรายละเอียดอีก

4.4.6.4 ความสามารถดูดซับสารหนูโดยเซลล์ *P. aeruginosa* TISTR 358

ผลการดูดซับสารหนูที่ความเข้มข้น 10-80 $\mu\text{g/L}$ โดยเซลล์ *P. aeruginosa* TISTR 358 แสดงในรูปที่ 4.28 พบว่า แบคทีเรียนี้มีการดูดซับสารหนูได้ดีที่สุด (44.8%) ที่ความเข้มข้นสารหนู 20 $\mu\text{g/L}$ ที่ความเข้มข้นสารหนูสูงขึ้นจนถึง 80 $\mu\text{g/L}$ จะมีการดูดซับที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องมาจากมีการตายของเซลล์ *P. aeruginosa* TISTR 358 ที่ความเข้มข้นสารหนูมากขึ้น ซึ่งเมื่อนับจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตพบว่า ที่ความเข้มข้นสารหนู 20 $\mu\text{g/L}$ แบคทีเรียยังเจริญได้ดี มีจำนวนเซลล์มากที่สุด คือ 3.5×10^6 CFU/mL ในขณะที่ความเข้มข้นของสารหนูในอาหาร 30-80 $\mu\text{g/L}$ จำนวนเซลล์อยู่ในช่วง 0.8-1.9 CFU/mL

จะเห็นได้ว่าเชื้อไอโซเลต W 2-4 3 มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะสารหนูที่สูงกว่า เซลล์ *P. aeruginosa* TISTR 358 โดยที่ความเข้มข้นสารหนู 12 mg/L มีปริมาณการดูดซับสารหนู 63.4% การที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเชื้อ W 2-4 3 อยู่ในอาหารที่มีสารหนูปริมาณสูงมาเป็นเวลานานในช่วงการเลี้ยง ทำให้ยีนมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดความต้านทานต่อสารหนูที่ความเข้มข้นสูง ซึ่งอาจเกิดจากกลไกหรือสารประกอบของเซลล์บางอย่างที่สร้างขึ้นเพื่อลดความเป็นพิษของสารหนู ทำให้เซลล์สามารถมีชีวิตรอดอยู่ได้ (Misra, 1992)



รูปที่ 4.28 ปริมาณการดูดซับสารหนู (%) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดย *P. aeruginosa* TISTR 358