

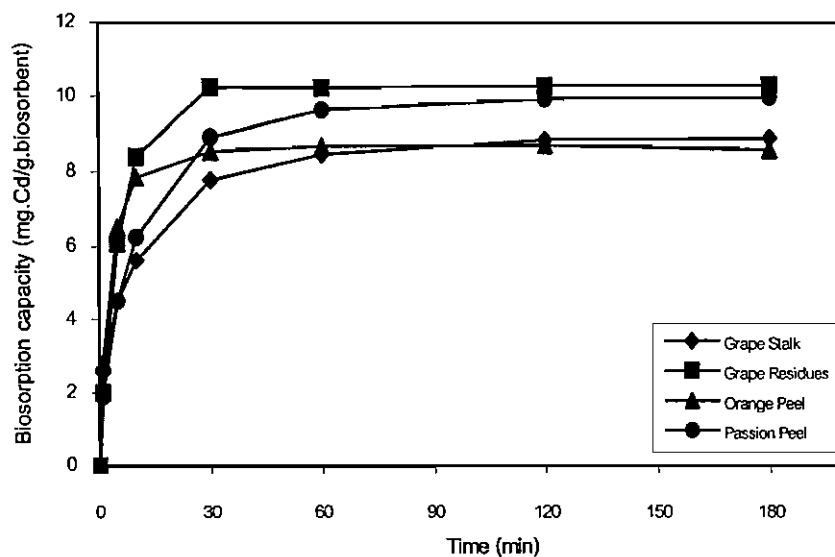
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

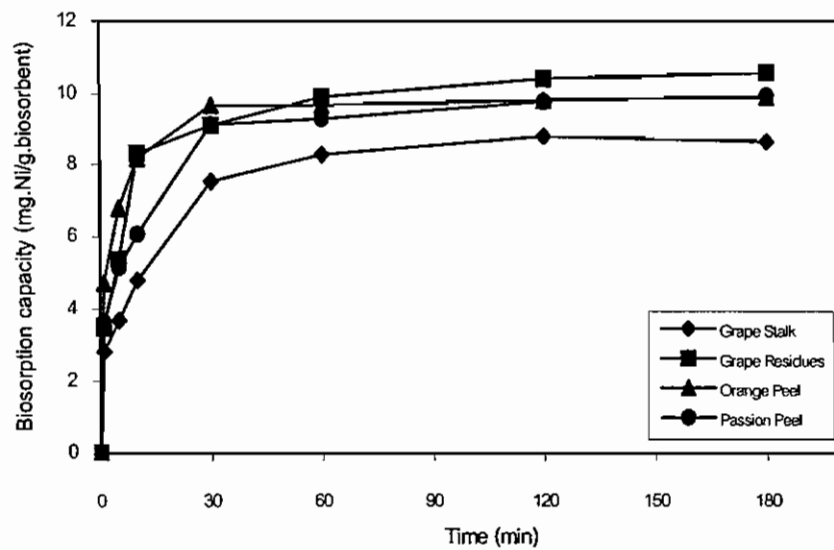
ผลการทดลองศึกษาการดูดซับโลหะหนัก แคดเมียม นิเกิล และสังกะสี ด้วยของเสียจาก ขบวนการผลิตน้ำผลไม้ มีรายละเอียดดังนี้

อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับโลหะหนัก

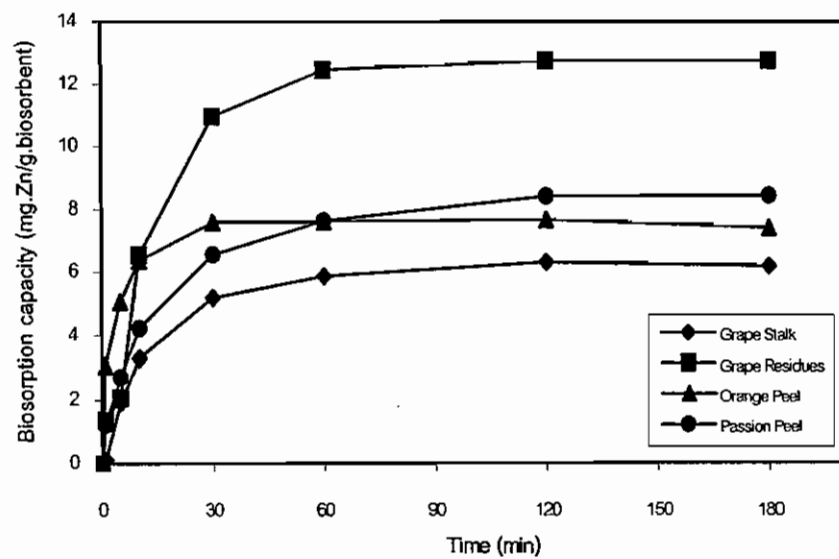
จากการศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับโลหะหนักของ ก้านองุ่น กากองุ่น เปลือกส้ม และเปลือกแพชชั่นฟรุต โดยใช้เวลาสัมผัส 0-180 นาที ดังแสดงในภาพ 15-17 พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วช่วงเวลา 0-30 นาที และเริ่มเข้าสู่สมดุลภายในเวลาประมาณ 60 นาที ซึ่งอธิบายได้ว่าที่มีอัตราเร็วของการดูดซับดำเนินไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเพราะ active site ที่สามารถดูดซับโลหะหนักบนพื้นผิววัสดุยังมีอยู่มาก อัตราการดูดซับในช่วงนี้จึงมากกว่าอัตราการคาย แต่เมื่อเวลาผ่านไป active site จะลดลงเพราะมีไอออนโลหะหนักเข้าไปเกาะอัตราการดูดซับจึงลดลง (Kuh & Kim, 2000) สังเกตได้จากความชันของกราฟที่ลดลง ให้ผลคล้ายกันทั้งก้านองุ่น กากองุ่น เปลือกส้ม และเปลือกแพชชั่นฟรุต โดยที่เวลาสัมผัส 60 นาที มีค่าความจุและเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะหนักดังแสดงในตาราง 1



ภาพ 15 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อความจุในการดูดซับแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร



ภาพ 16 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อความจุในการดูดซับนิกเกิล ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร



ภาพ 17 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อความจุในการดูดซับสังกะสี ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร

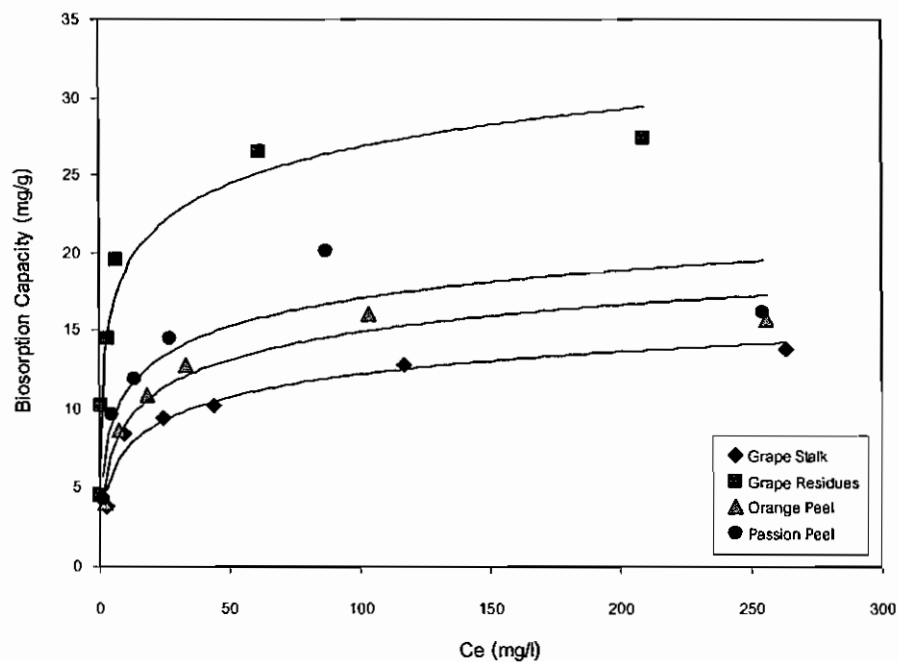
ตาราง 1 แสดงค่าความจุการดูดซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะหนักที่เวลาสัมผัส 60 นาที

Biosorbent	Heavy metals					
	Cadmium		Nickel		Zinc	
	Capacity(mg/g)	Removal(%)	Capacity(mg/g)	Removal(%)	Capacity(mg/g)	Removal(%)
ก้านองุ่น	8.46	78.44	8.27	76.99	5.87	46.04
กากองุ่น	10.21	98.19	9.90	92.14	12.45	97.70
เปลือกส้ม	8.68	81.99	9.67	89.97	7.61	59.70
เปลือกแพชชันฟรุต	9.62	88.80	9.28	86.39	7.63	59.85

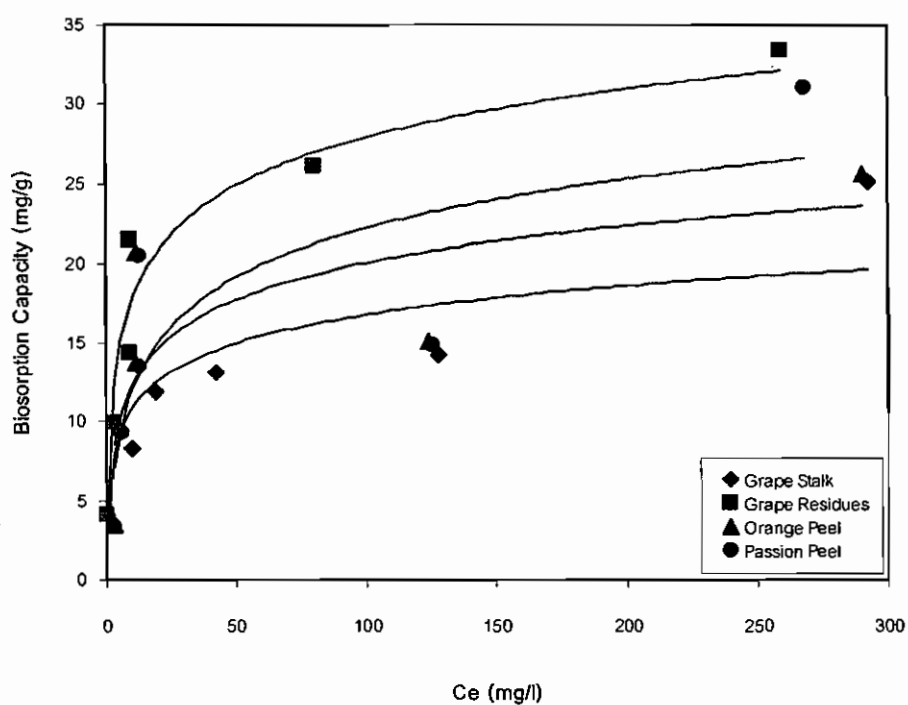
ซึ่งการดูดซับเริ่มเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 60 นาทีนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Ajmal et al. (2003) ได้ศึกษาการดูดซับแคดเมียมด้วยเปลือกข้าว (rice husk) การศึกษาของ Gupta & Ali (2000) ซึ่งใช้เถ้าลอยขานอ้อย (bagsse fly ash)ดูดซับทองแดง และการศึกษาของ Iqbal & Edyvean (2004) ได้ศึกษาการดูดซับ ทองแดง สังกะสี ด้วยชีวมวล (*P.chrysosporium*) เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้เวลาที่ 60 นาทีเป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการศึกษาการดูดซับโลหะหนักขึ้นต่อไป

อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก และ Adsorption Isotherm

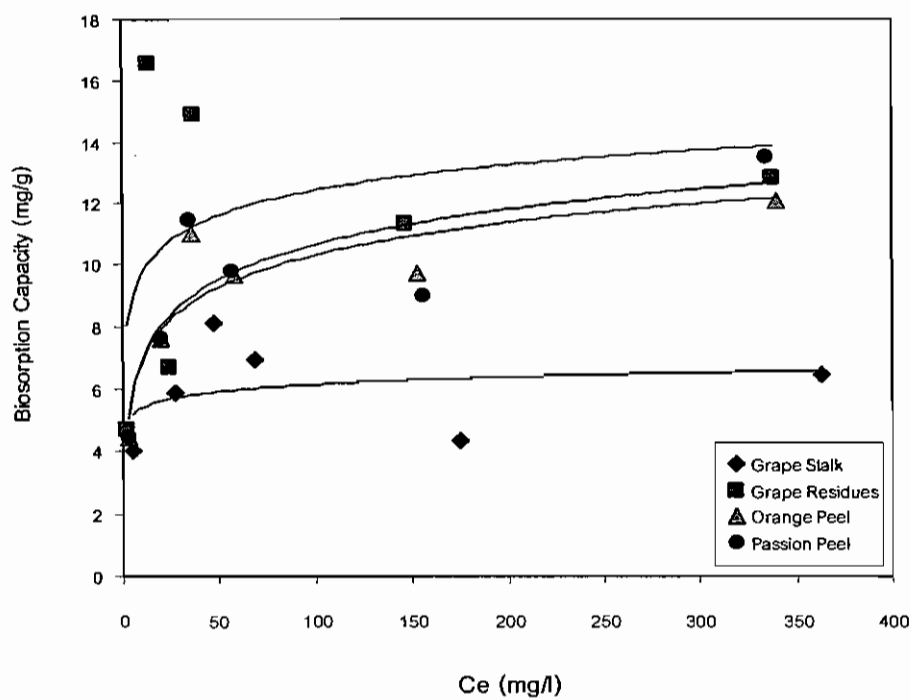
จากการทดลองใช้ ก้านองุ่น กากองุ่น เปลือกส้ม และเปลือกแพชชันฟรุต มาดูดซับโลหะหนัก แคดเมียม นิเกิล และ สังกะสี ความเข้มข้นของสารละลายระหว่าง 20-400 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำผลการทดลองมาคำนวณหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุ (สมการ 2.1) เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ตามการศึกษา Adsorption isotherm โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e เป็นแกน x และ q เป็นแกน y พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสูงกว่าจะมีจำนวนของโลหะหนักที่ถูกดูดซับมากกว่าหลังจากนั้นการดูดซับเริ่มคงที่ ผลแสดงดังภาพ 18-20 และเมื่อนำผลการทดลองไปทำการวิเคราะห์ Adsorption Isotherm โดยใช้สมการของ Langmuir (สมการ 2.7) ผลแสดงดังภาพ 21-23 และสมการของ Freudlich (สมการ 2.8) ผลแสดงดังภาพ 24-26 จากนั้นคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับและค่าคงที่ตามรูปแบบของแต่ละสมการ ซึ่งข้อมูลดังแสดงในตาราง 2-4



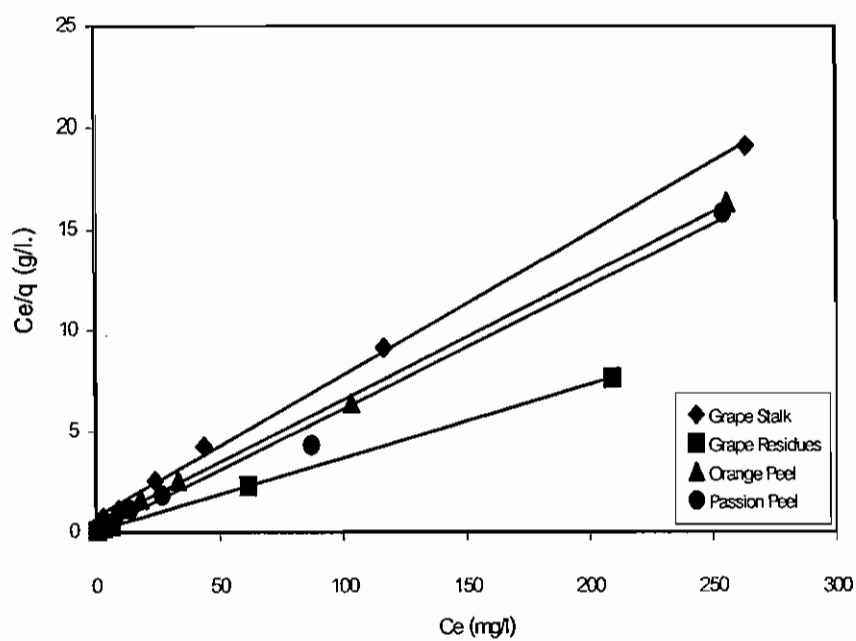
ภาพ 18 กราฟ Adsorption isotherm ระหว่างค่า C_e และ q ในการดูดซับแคดเมียม
ความเข้มข้นเริ่มต้น 20-400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร



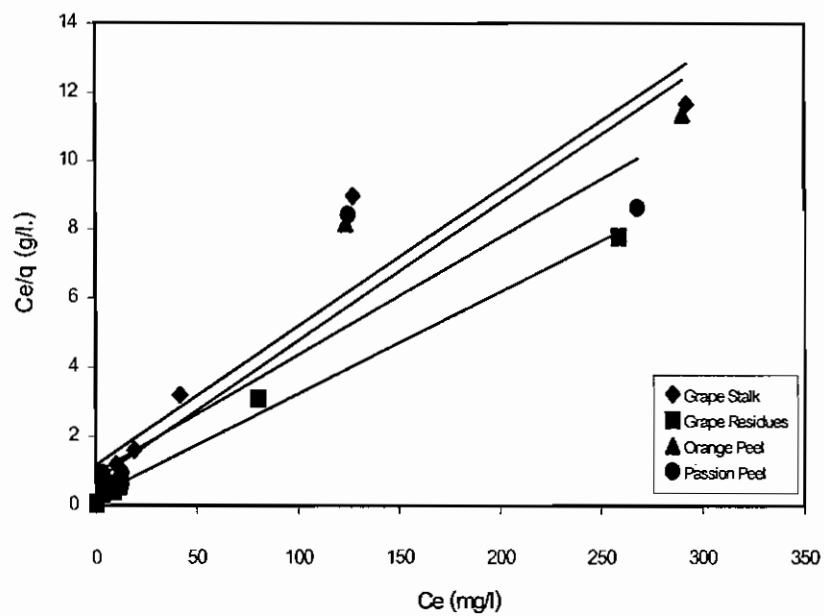
ภาพ 19 กราฟ Adsorption isotherm ระหว่างค่า C_e และ q ในการดูดซับนิกเกิล
ความเข้มข้นเริ่มต้น 20-400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร



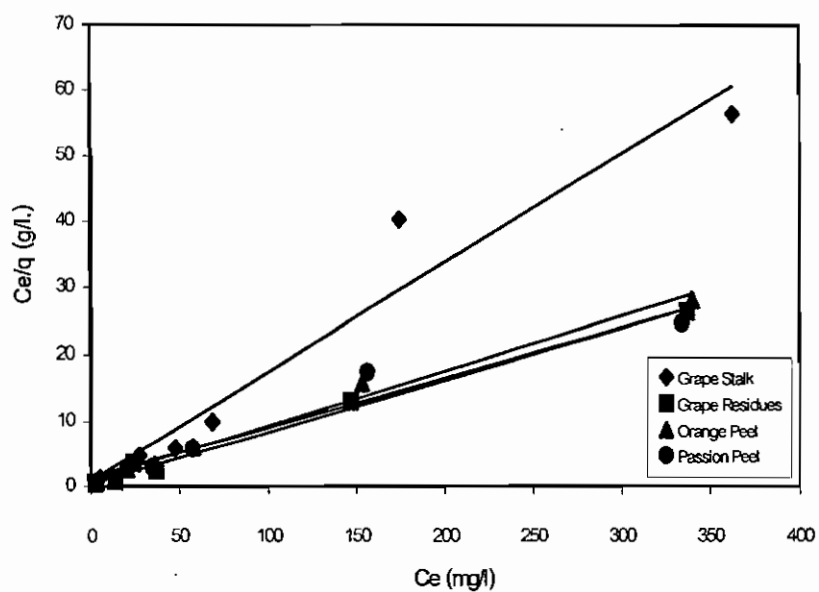
ภาพ 20 กราฟ Adsorption isotherm ระหว่างค่า C_e และ q ในการดูดซับสังกะสี
ความเข้มข้นเริ่มต้น 20-400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร



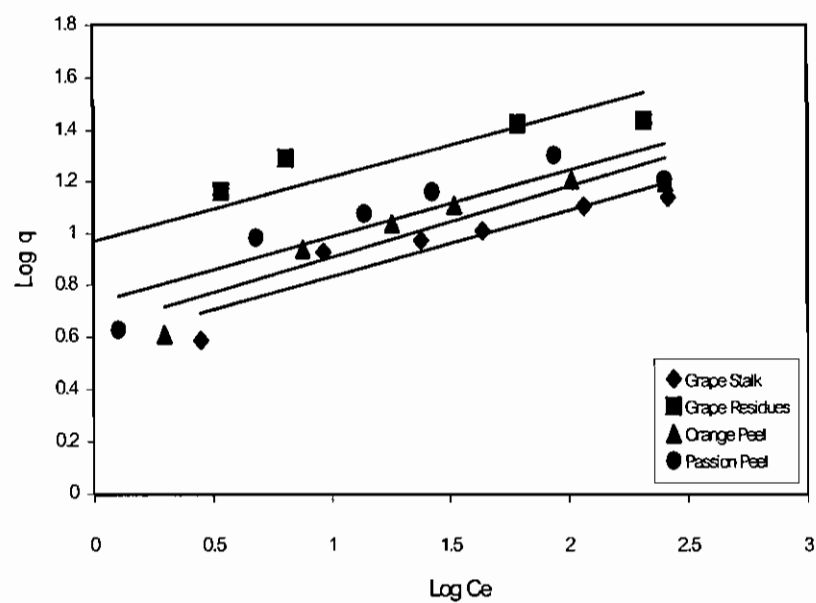
ภาพ 21 กราฟ Linearized langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับแคดเมียม



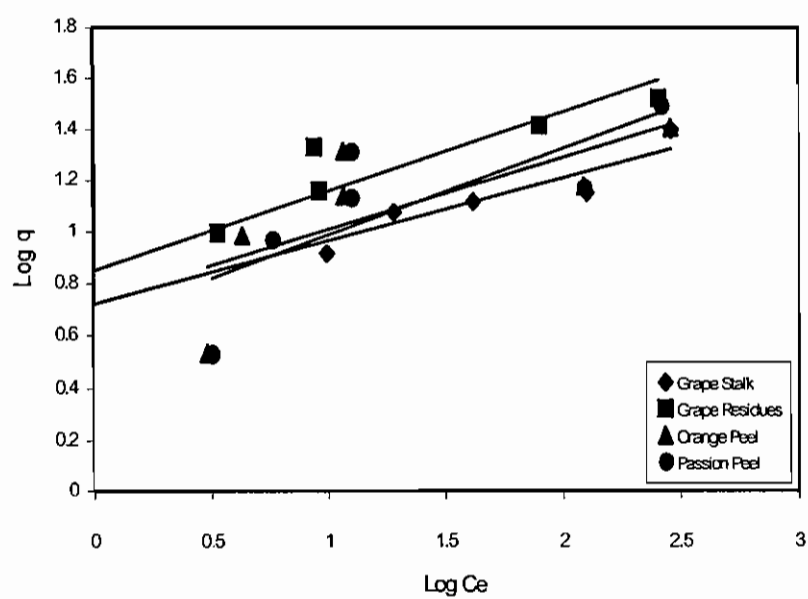
ภาพ 22 กราฟ Linearized langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับนินเกิล



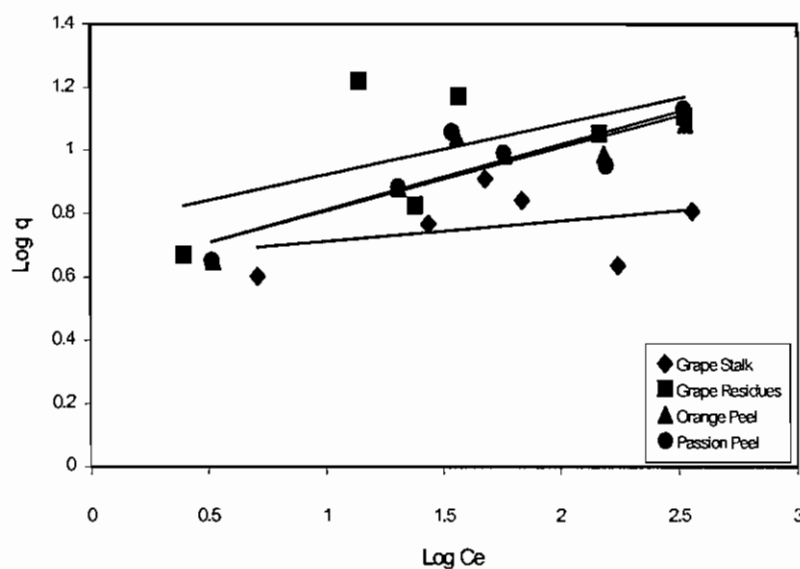
ภาพ 23 กราฟ Linearized langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับสังกะสี



ภาพ 24 กราฟ Linearized freudlich adsorption isotherm ของการดูดซับแคดเมียม



ภาพ 25 กราฟ Linearized freudlich adsorption isotherm ของการดูดซับนิกเกิล



ภาพ 26 กราฟ Linearized freudlich adsorption isotherm ของการดูดซับสังกะสี

ตาราง 2 แสดงค่าการดูดซับและค่าคงที่ของการดูดซับแคดเมียม

แคดเมียม	Langmuir Adsorption Isotherm			Freundlich Adsorption Isotherm		
	$q_{\max}$ (mg/g)	b	r^2	k_F (mg/g)	n	r^2
ก้านองุ่น	14.27	0.0902	0.998	3.76	3.904	0.863
กากองุ่น	27.62	0.4701	0.999	9.32	4.0518	0.865
เปลือกส้ม	16.21	0.1518	0.999	4.31	3.663	0.871
เปลือกแพชชันฟรุต	16.50	0.8620	0.993	5.37	3.8986	0.805

ตาราง 3 แสดงค่าการดูดซับและค่าคงที่ของการดูดซับนิกเกิล

นิกเกิล	Langmuir Adsorption Isotherm			Freundlich Adsorption Isotherm		
	$q_{\max}$ (mg/g)	b	r^2	k_F (mg/g)	n	r^2
ก้านองุ่น	25.06	0.0338	0.908	1.75	4.0816	0.951
กากองุ่น	34.01	0.1035	0.994	7.07	3.2341	0.910
เปลือกส้ม	24.94	0.0541	0.932	5.35	3.5599	0.525
เปลือกแพชชันฟรุต	29.33	0.0364	0.832	4.48	2.9691	0.600

ตาราง 4 แสดงค่าการดูดซับและค่าคงที่ของการดูดซับสังกะสี

สังกะสี	Langmuir Adsorption Isotherm			Freundlich Adsorption Isotherm		
	$q_{\max}$ (mg/g)	b	r^2	k_F (mg/g)	n	r^2
ก้านองุ่น	6.08	0.1845	0.945	4.45	15.384	0.124
กากองุ่น	12.82	0.1521	0.992	5.76	6.1881	0.322
เปลือกส้ม	12.17	0.0772	0.989	4.05	4.9975	0.807
เปลือกแพชชันฟรุต	13.33	0.0501	0.951	4.03	4.8403	0.759

จากตาราง 2-4 พบว่าการดูดซับแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี ของก้านองุ่น กากองุ่น เปลือกส้ม และเปลือกแพชชันฟรุต ลักษณะกราฟมีความสอดคล้องกับสมการ Langmuir มากกว่า Freundlich ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Benguella & Benaissa (2002) ได้ศึกษาการดูดซับแคดเมียมด้วยไคติน (crushed crab shells) การศึกษาของ Padmavathy et al. (2003) ศึกษาการใช้ยีสต์ (baker's yeast) ดูดซับนิกเกิล และ Demirbas et al. (2002) ได้ศึกษาการดูดซับนิกเกิลด้วยเปลือกถั่ว (hazelnut shell) เนื่องจากกราฟมีความสอดคล้องกับสมการ Langmuir ดังนั้นจึงใช้ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด ($q_{\max}$) ในการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งพบว่าความสามารถในการดูดซับ ก้านองุ่น กากองุ่น เปลือกส้ม และเปลือกแพชชันฟรุต เรียงตามลำดับคือ $Ni > Cd > Zn$

Holan & Volesky (1994) อธิบายความแตกต่างของการดูดซับไอออนโลหะหนักเกิดจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น การเลือกจับไอออนโลหะหนักของหมู่เคมีบนผนังเซลล์ ความแรงทางไฟฟ้าของไอออนโลหะหนัก เป็นต้น ยากที่จะทำนายการดูดซับไอออนโลหะหนักได้อย่างถูกต้อง แต่ลำดับการดูดซับไอออนโลหะหนักมีแนวโน้มมากขึ้นตามค่าวาเลนซ์ (valence) และเลขอะตอม (atomic number)

Tobin et al. (1984) อธิบายเสริมว่าความแตกต่างของการดูดซับไอออนโลหะหนักมีความสัมพันธ์กับรัศมีไอออน (ionic radius) โดยไอออนโลหะที่มีขนาดใหญ่จะถูกดูดซับได้แข็งแรงกว่า ไอออนขนาดเล็ก ทำให้ปริมาณการดูดซับโลหะหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามรัศมีไอออนที่เพิ่มขึ้น

Matos & Arruda (2003); Tarleg & Arruda (2004) ได้อธิบายว่า อิทธิพลของการดูดซับไอออนโลหะหนักมีความสัมพันธ์กับค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) โดยการดูดซับไอออนโลหะหนักมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามค่า อิเล็กโตรเนกาติวิตีที่สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาค่า

อิเล็กโตรเนกาติวิตี พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.91, 1.69, 1.65 สำหรับนิเกิล แคดเมียม และสังกะสี ตามลำดับ ซึ่งค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีแสดงถึงความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนเข้ามาในอะตอม หากมีค่ามากจะสามารถเกิดโพลาไรด์ได้ดี ดังนั้นนิเกิล มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี มากกว่า แคดเมียม และ สังกะสี จึงเกิดการดูดซับได้ดีกว่า ส่วน แคดเมียม มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี มากกว่าสังกะสีจึงเกิดการดูดซับได้ดีกว่าเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามลำดับของการดูดซับ และกลไกการดูดซับไอออนโลหะหนักสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุดูดซับ และชนิดของไอออนโลหะหนัก (Leush et al., 1995; An et al., 2001)

ซึ่งในทางปฏิบัติการประยุกต์ใช้ biosorbent ในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียมักประสบปัญหาในการแยก biosorbent ออกจากน้ำเสีย (ภายหลังเสร็จกระบวนการ biosorption) เนื่องจาก biosorbent ส่วนใหญ่มักจะมีขนาดหนาแน่นต่ำ มีขนาดเล็กและมีความแข็งแรงต่ำ (Veglio & Beolchini, 1997) ดังนั้นเมื่อต้องการพัฒนากระบวนการ biosorption เพื่อใช้ในระบบจริงซึ่งมีปริมาณน้ำเสียสูงมักจะประสบกับปัญหาในทางปฏิบัติ

เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวการคัดเลือก biosorbent ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการศึกษาต่อไปจะพิจารณาจากค่าการดูดซับสูงสุด และความสามารถในการตกตะกอนของ biosorbent

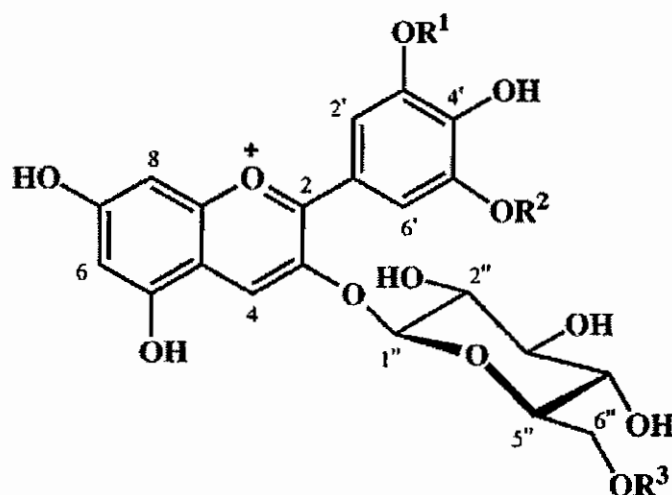
จากการพิจารณาผลการทดสอบ adsorption isotherm ของ biosorbent ทั้ง 4 ชนิดพบว่า biosorbent ที่มีค่าการดูดซับสูงสุด (q_{max}) มากที่สุดได้แก่ กากองุ่น รองลงมาคือ เปลือกแพชชั่น ฟรุต เปลือกส้มเขียวหวาน และก้านองุ่น ตามลำดับ

และจากการวัดความสามารถในการตกตะกอนหลังจากเวลาสัมผัสผ่านไป 60 นาที พบว่า กากองุ่นไม่สามารถตกตะกอนได้หมด ส่วนเปลือกแพชชั่นฟรุตสามารถตกตะกอนได้ทั้งหมด เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้เปลือกแพชชั่นฟรุตเป็น biosorbent เพื่อใช้สำหรับศึกษาการดูดซับโลหะหนักชั้นต่อไป

แพชชั่นฟรุตเป็นผลไม้ที่ปลูกมากในประเทศเขตร้อนโดยมีปริมาณผลผลิต 120,000 ตันต่อปี ประเทศที่มีการปลูกอย่างแพร่หลายได้แก่ บราซิล ออสเตรเลีย แอฟริกาใต้ ศรีลังกา มาเลเซีย ไต้หวัน มาเลเซีย (Souza et al., 2004) สำหรับประเทศไทยมีการปลูกแพชชั่นฟรุตในหลายพื้นที่ เช่น ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และได้มีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น น้ำแพชชั่นฟรุต การแปรรูปดังกล่าวทำให้เกิดของเสียซึ่งกากของเสียเหล่านี้ไม่มีราคาและมีปัญหาการกำจัด เช่น เมล็ด และเปลือก ซึ่งมีองค์ประกอบดังแสดงดัง ตาราง 5 และมีโครงสร้างทางเคมีของเปลือกแพชชั่นฟรุต ดังแสดงดัง ภาพ 27

ตาราง 5 องค์ประกอบของแพชชั่นฟรุต (Chau & Huang, 2004)

Composition	g/100 g raw, dry weight
Moisture	6.60 ± 0.28
Crude protein	8.25 ± 0.58
Crude lipid	24.5 ± 1.58
Total dietary fibre (TDF)	64.8 ± 0.05
Insoluble dietary fibre (IDF)	64.1 ± 0.02
Soluble dietary fibre (SDF)	0.73 ± 0.07
Ash	1.34 ± 0.08
Carbohydrate	1.11



ภาพ 27 โครงสร้างทางเคมีของเปลือกแพชชั่นฟรุต (Kidoy et al., 1997)

อิทธิพลของพีเอชต่อการดูดซับโลหะหนัก

จากการศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับโลหะหนักของเปลือกแพชชั่นฟรุตโดยใช้ค่า pH เริ่มต้นของสารละลายระหว่าง 2-9 ผลแสดงดังภาพ 28 ซึ่งพบว่าความจุในการดูดซับโลหะหนัก แคดเมียม นิเกิล และสังกะสี จะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH เพิ่มขึ้นจาก pH 2 ถึง pH 5 และเมื่อ pH เพิ่มขึ้นจาก pH 5 ถึง pH 9 ความจุของการดูดซับแคดเมียมจะลดลงเล็กน้อย ส่วนความจุของการดูดซับนิเกิล

จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึง pH 7 และลดลงอย่างรวดเร็วจาก pH 7 ถึง pH 9 สำหรับความจุของการดูดซับสังกะสีจะลดลงอย่างรวดเร็วจาก pH 5 ถึง pH 9

จากผลการทดลองซึ่งพบว่าค่า pH เริ่มต้นของสารละลายต่ำ ๆ จะมีปริมาณการดูดซับโลหะหนักได้น้อย ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าที่ pH ต่ำจะเกิดการจับกันระหว่างไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) กับ active site ที่เป็นประจุลบบริเวณผิวเซลล์ได้ดี ซึ่งไฮโดรเนียมไอออนนี้จะส่งแรงผลักไม่ให้โลหะหนักเข้ามาจับกับ active site ที่เป็นประจุลบบริเวณผิวเซลล์ จึงทำให้โลหะหนักถูกดูดซับได้น้อยลงซึ่งผลของแรงผลักนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ลดลง (Zhou & Kiff, 1991)

ขณะที่ความจุในการดูดซับลดลงเมื่อ pH เริ่มต้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น พฤติกรรมการดูดซับเช่นนี้ สอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับนิเกิลของ Ajmal et al. (2000) ซึ่งใช้เปลือกส้ม (*Citrus reticulata*) เป็นวัสดุดูดซับ การศึกษาของ Gupta et al. (2003) ใช้เถ้าลอยขานอ้อย (bagsse fly ash) และการศึกษาของ Kalyani et al. (2004) ใช้สาหร่าย (*Sargassum sp.*) ส่วนการดูดซับสังกะสีสอดคล้องกับการศึกษาของ Gupta & Ali (2000) ซึ่งใช้เถ้าลอยขานอ้อย (bagsse fly ash) ดูดซับสังกะสี ซึ่งพฤติกรรมการดูดซับดังกล่าวอาจอธิบายได้ดังนี้

Aksu (2001) อธิบายว่า การดูดซับลดลงเมื่อ pH สูงขึ้น อาจเป็นผลมาจากการเกิดคอมเพล็กซ์ของโลหะหนัก (complexation) โดยไฮดรอกซิลกรุป (OH^- groups)

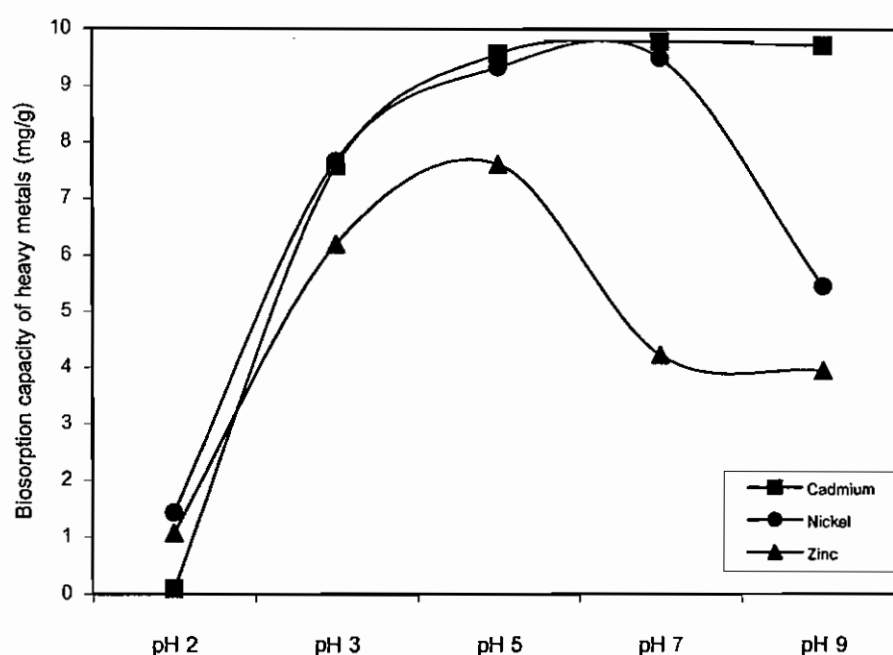
Gupta et al. (2003) อธิบายว่า การดูดซับลดลงเมื่อ pH สูงขึ้น อาจเป็นผลมาจากการเกิดไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของโลหะหนัก

Kalyani et al. (2004) อธิบายว่า การดูดซับลดลงเมื่อ pH สูงขึ้น อาจเกิดจากการก่อสารเชิงซ้อนไฮดรอกไซด์ เพราะค่า pH สูงขึ้นลิแกนด์ (ligands) เช่นหมู่ carboxylate และ sulfonate สามารถดูดซับไอออนโลหะหนักได้น้อย

สำหรับการดูดซับแคดเมียม และนิเกิลพบว่า pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 7 เป็น pH ที่เหมาะสมโดยมีความจุในการดูดซับเท่ากับ 9.78 mg Cd/g และ 9.49 mg Ni/g คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 86.17% และ 72.83% ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาของ Chojnacka et al. (2005) ใช้สาหร่าย (*Spirulina sp.*) ดูดซับแคดเมียม และการศึกษาของ Tungtakanpoung (2002) ซึ่งใช้รา (*Streptomyces subrutilus*) ส่วนการดูดซับนิเกิลสอดคล้องกับการศึกษาของ Demirbas et al. (2002) ซึ่งใช้เปลือกถั่ว (hazelnut shell) และการศึกษาของ Ho et al. (1995) ได้ศึกษาการดูดซับนิเกิลโดยพีท (*Sphagnum moss peat*) พบว่าการดูดซับนิเกิลเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่ pH 7 เช่นเดียวกัน

ส่วนการดูดซับสังกะสี พบว่า pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 เป็น pH ที่เหมาะสม โดยมีความจุในการดูดซับเท่ากับ 7.60 mgZn/g คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 57.19 % ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาของ Martins et al. (2004) ศึกษาการดูดซับสังกะสีด้วยมอส (*Fontinalis antipyretica* moss) และ Nasernejad et al. (2004) ได้ศึกษาการดูดซับสังกะสีโดยกากแครอท (carrot residues) พบว่า การดูดซับสังกะสีเกิดได้ดีที่ pH 5 เช่นเดียวกัน

เพราะฉะนั้นในการทดลองศึกษาการดูดซับแคดเมียมและนิเกิลจะเลือกใช้ pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 7 ส่วนสังกะสีจะเลือกใช้ pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 และการทดลองศึกษาการดูดซับแคดเมียม นิเกิล สังกะสี ที่อยู่ร่วมกันจะใช้ pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5



ภาพ 28 อิทธิพลของพีเอชต่อการดูดซับโลหะหนักของเปลือกแพชชั่นฟรุต ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับโลหะหนัก

จากการศึกษาความจุของการดูดซับโลหะหนักของเปลือกแพชชั่นฟรุตโดยใช้อุณหภูมิสารละลายระหว่าง 10-40 องศาเซลเซียส พบว่าเปลือกแพชชั่นฟรุตสามารถดูดซับแคดเมียม นิเกิล และสังกะสีได้เท่ากับ 6.68 mgCd/g, 5.67 mgNi/g และ 5.29 mgZn/g เมื่ออุณหภูมิสารละลาย

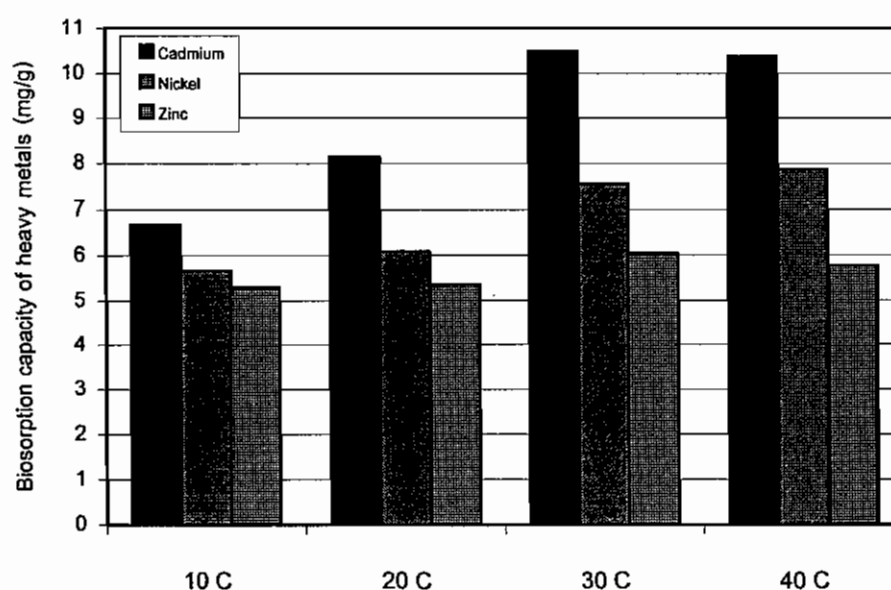
เท่ากับ 10 องศาเซลเซียส และความสามารถการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 10.38 mgCd/g, 7.87 mgNi/g และ 5.77 mgZn/g เมื่ออุณหภูมิสารละลายเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ผลแสดงดังภาพ 29

ซึ่งความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของเปลือกแพชชันฟรุตเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาของ Ajmal et al. (2000) ซึ่งศึกษาการดูดซับนิเกิลด้วยเปลือกส้ม (*Citrus reticulata*) การศึกษาของ Tiwari et al. (1999) การใช้เปลือกต้นมะม่วงและ นีม (mango and neem bark) ดูดซับแคดเมียม และการศึกษาของ Gupta et al. (2003) และ Gupta & Ali (2000) ใช้เถ้าลอยขานอ้อย (bagasse fly ash) ดูดซับแคดเมียม นิเกิล และสังกะสี ซึ่งความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

พฤติกรรมดูดซับดังกล่าว Ajmal et al. (2000) อธิบายว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการขยายของโพรงหรือกระตุ้นผิวหน้าตัวดูดซับทำให้สามารถดูดซับโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น

Tiwari et al. (1999) อธิบายว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนโลหะหนักจากสารละลายสู่ผิวหน้าตัวดูดซับได้เร็วขึ้น

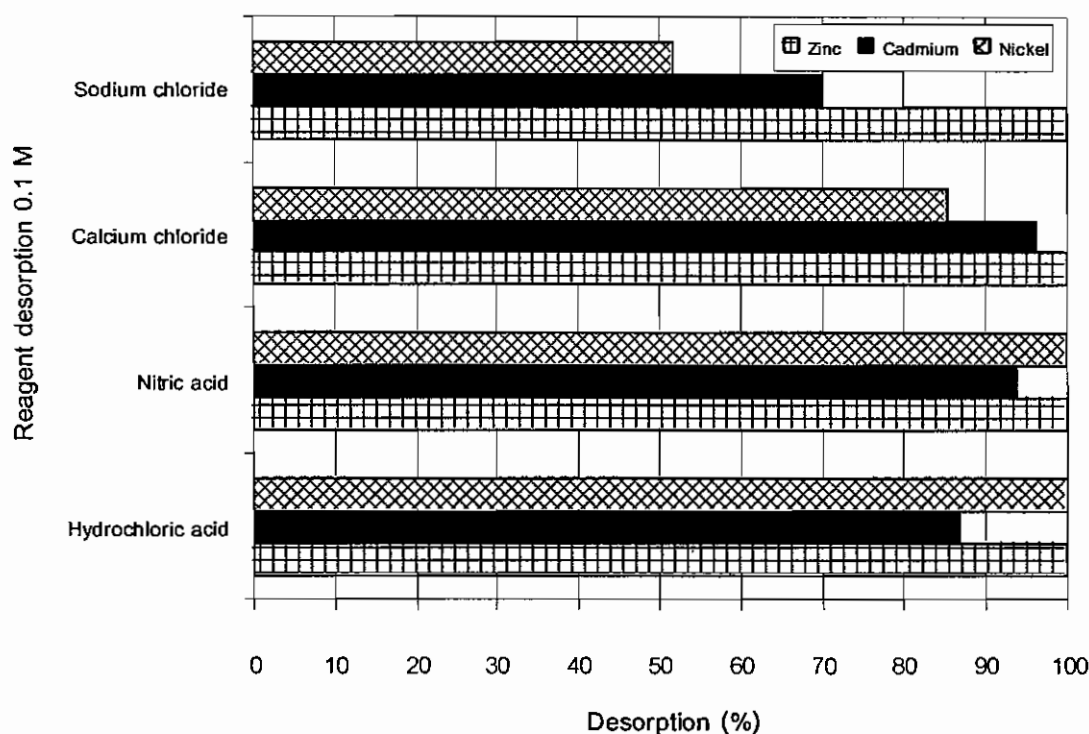
Ashes & Duvnjak (1995) อธิบายว่า อาจเกิดเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) สารประกอบบริเวณผิวหน้าตัวดูดซับมีผลทำให้ตอบสนองต่อการดูดซับโลหะหนักได้ดีขึ้น



ภาพ 29 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับโลหะหนักของเปลือกแพชชันฟรุต ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร

อิทธิพลของสารละลายต่อความสามารถในการสกัดโลหะหนัก

จากการทดลองความสามารถการสกัดโลหะหนักแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี ออกจากเปลือกแพชชั่นฟรุตของสารละลาย HCl, HNO₃, CaCl₂ และ NaCl ความเข้มข้น 0.1 M. พบว่าสารละลาย HNO₃ สามารถสกัดแคดเมียมและนิกเกิล ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ HCl, CaCl₂ และ NaCl ตามลำดับ โดยสารละลาย HNO₃ สามารถสกัดแคดเมียมได้เท่ากับ 93.68% นิกเกิล 100% ส่วนสังกะสี พบว่าสารละลายทั้ง 4 ชนิดสามารถสกัดได้ดีโดยสกัดได้เท่ากับ 100% ผลแสดงดังภาพ 30



ภาพ 30 อิทธิพลของชนิดสารละลายต่อประสิทธิภาพในการสกัดโลหะหนัก

ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาของ Kapoor et al. (1999) ซึ่งศึกษาสารละลายในการสกัดแคดเมียม นิกเกิล ออกจาก *Aspergillus niger* และการศึกษาของ Sekhar et al. (2003) ศึกษาสารละลายในการสกัดสังกะสี ออกจากชืวมวล (root bark) และการศึกษาของ Chojnacka et al. (2005) ศึกษาสารละลายในการสกัดแคดเมียมออกจากสาหร่าย (*Spirulina sp.*) ซึ่งพบว่าสารละลาย HNO₃ สามารถสกัดโลหะหนักได้ดีที่สุดเช่นเดียวกัน

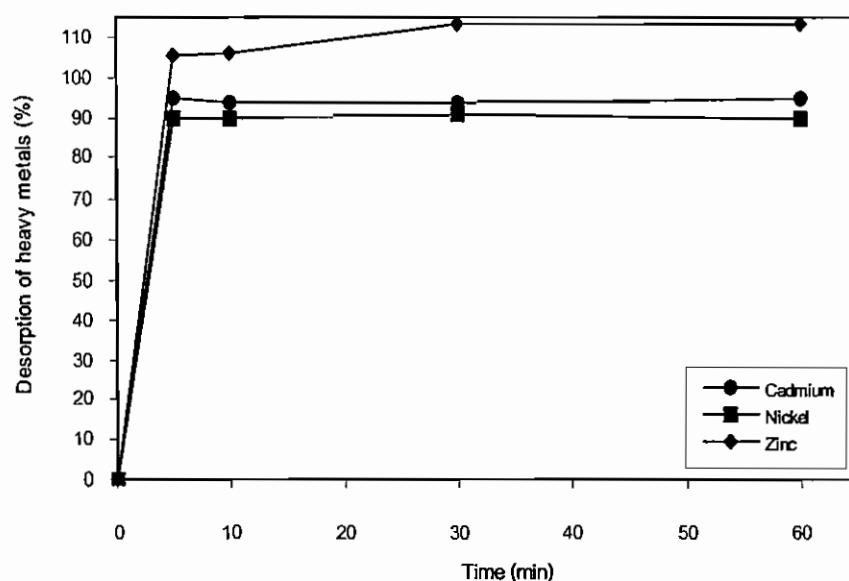
Yu et al. (2001) ได้ศึกษาการสกัดทองแดงและตะกั่วออกจากขี้เลื่อยด้วยสารละลาย HNO₃ ความเข้มข้น 0.1 M. พบว่า สามารถสกัดทองแดงและตะกั่วออกได้มากกว่า 97%

โดยสารละลาย NaCl มีความสามารถในการสกัดแคดเมียม และนิเกิล ออกจากเปลือกแพชชั่นฟรุตได้น้อย ซึ่งอาจอธิบายได้ว่า สารละลายที่อยู่ในสภาพเป็นด่างมีผลทำให้ค่า pH สูงขึ้น จึงทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนัก และหรือเกิดกระบวนการคอมเพล็กซ์ของเกลือโลหะ (Saeed & Iqbal, 2003; Puranik & Paknikar, 1997)

สำหรับการทดลองขั้นต่อไปจะเลือกใช้สารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.1 M. เป็นสารละลายในการสกัดโลหะหนัก เพื่อศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการสกัดโลหะหนักต่อไป

อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการสกัดโลหะหนัก

จากการทดลองความสามารถในการสกัดโลหะหนักแคดเมียม นิเกิล และสังกะสีออกจากเปลือกแพชชั่นฟรุตของสารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.1 M. โดยใช้เวลาสัมผัสการสกัด 0 – 60 นาที พบว่า แคดเมียม และนิเกิล ถูกสกัดออกจากเปลือกแพชชั่นฟรุตได้อย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 5 นาทีแรก จากนั้นประสิทธิภาพในการสกัดเริ่มคงที่ในเวลา 10-60 นาที ส่วนสังกะสีนั้นประสิทธิภาพในการสกัดสูงขึ้นตามเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้นจาก 5-30 นาที และเริ่มคงที่ในช่วงเวลา 30-60 นาที ผลแสดงดังภาพ 31



ภาพ 31 อิทธิพลของเวลาสัมผัสในการสกัดโลหะหนักด้วยสารละลาย HNO_3 0.1 M.

ซึ่งโดยภาพรวมของการสกัดโลหะหนักแคดเมียม นิเกิล และสังกะสี เวลาสัมผัส 30 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดโลหะหนัก โดยสามารถสกัดแคดเมียมได้เท่ากับ 93.68% นิเกิล 91.09% และสังกะสี 113.16% ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาของ

Chojnacka et al. (2005) ศึกษาการสกัดแคดเมียมออกจากสาหร่าย (*Spirulina sp.*) โดยใช้เวลาสัมผัสในการสกัด 30 นาที พบว่า สารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.1 M. สามารถสกัดแคดเมียมได้ 90%

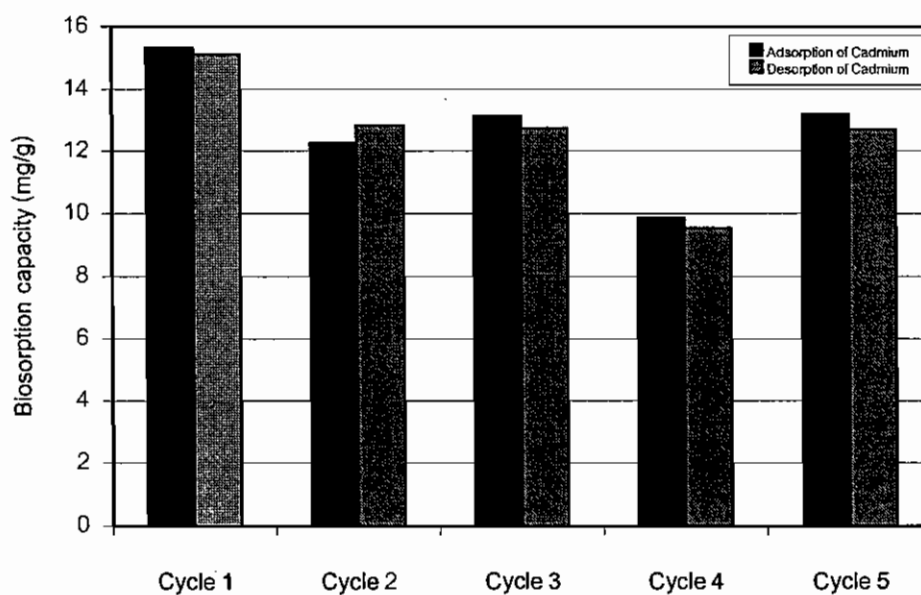
Saeed & Iqbal (2003) ศึกษาการสกัดแคดเมียมออกจากเปลือกถั่วดำ (*Cicer arietinum*) โดยใช้เวลาสัมผัสในการสกัด 30 นาที พบว่า สารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.1 M. สามารถสกัดแคดเมียมได้มากกว่า 98%

Kapoor et al. (1999) ศึกษาการสกัดแคดเมียม และนิเกิล ออกจากรา (*Aspergillus niger*) โดยใช้เวลาสัมผัสในการสกัด 30 นาที พบว่า สารละลาย HNO_3 สามารถสกัดแคดเมียมได้ 98.9% และนิเกิล 99.3% เช่นเดียวกัน

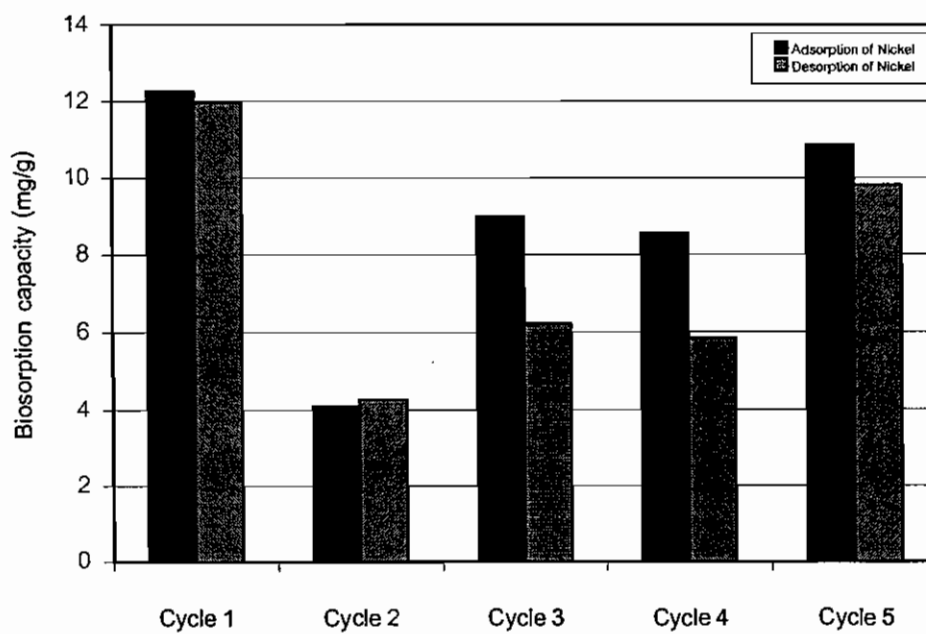
การทดลองขั้นต่อไปจะใช้สารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.1 M. และเวลาสัมผัสในการสกัดโลหะหนักแคดเมียม นิเกิล และสังกะสีเท่ากับ 30 นาที สำหรับศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ใหม่ของเปลือกแพชชั่นฟรุตในการดูดซับโลหะหนักหลายรอบ

อิทธิพลของการนำกลับมาใช้ใหม่ในการดูดซับโลหะหนัก

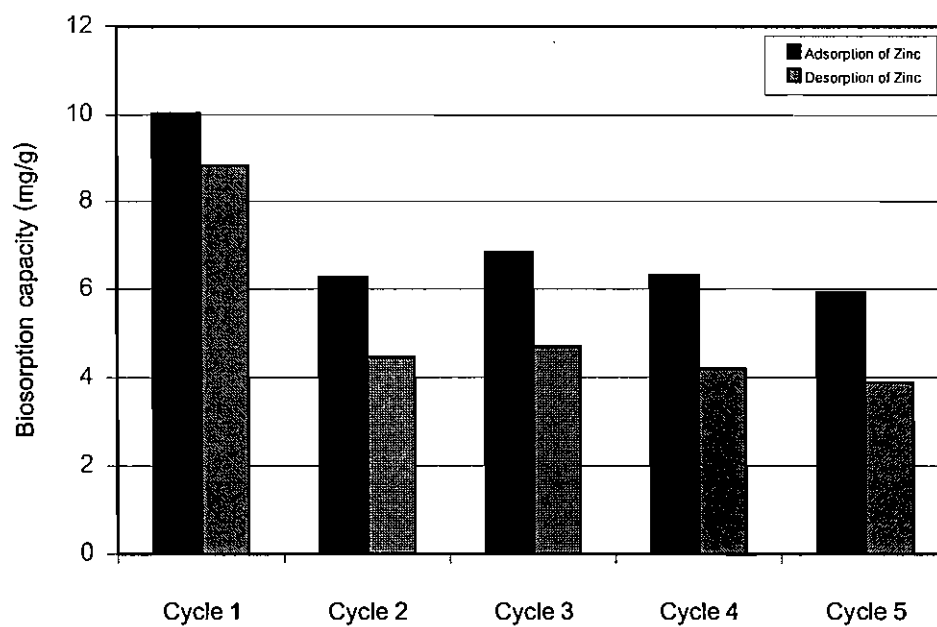
จากการทดลองนำเปลือกแพชชั่นฟรุตมาผ่านการดูดซับโลหะหนักและสกัดด้วยสารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.1 M. จำนวน 5 รอบ พบว่าเมื่อผ่านการดูดซับและสกัดจำนวน 1 รอบ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของเปลือกแพชชั่นฟรุต รอบที่ 2-5 ลดลง 20% , 14.38%, 35.70%, 14.10%, ส่วนนิเกิล ประสิทธิภาพการดูดซับรอบที่ 2-5 ลดลงเท่ากับ 67.63%, 34.31%, 36.05%, 18.35% และสังกะสี ประสิทธิภาพการดูดซับรอบที่ 2-5 ลดลงเท่ากับ 37.61%, 31.96%, 37.11%, 40.93% เมื่อเทียบกับการดูดซับรอบที่ 1 ตามลำดับผลแสดงดังภาพ 32-34



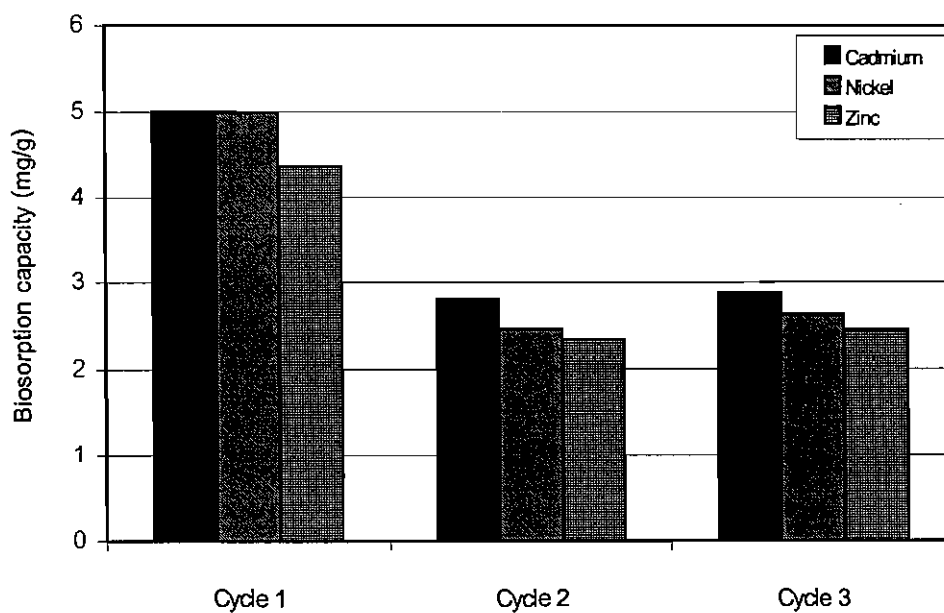
ภาพ 32 ประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ 5 รอบ สำหรับการดูดซับแคดเมียม



ภาพ 33 ประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ 5 รอบ สำหรับการดูดซับนิกเกิล



ภาพ 34 ประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ 5 รอบ สำหรับการดูดซับสังกะสี



ภาพ 35 อิทธิพลของการมีอยู่ร่วมกันของโลหะหนัก และการนำกลับมาใช้ใหม่ 3 รอบ

จึงอาจกล่าวได้ว่าเมื่อผ่านขบวนการดูดซับและการสกัดจำนวน 5 รอบทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับแคดเมียมลดลงเฉลี่ย 21.05% ส่วนนิกเกิล ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเฉลี่ย 39.08% และสังกะสีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเฉลี่ย 36.91%

สำหรับการทดลองผลของไอออนแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี ที่อยู่ร่วมกันเมื่อผ่านขบวนการดูดซับและการสกัดจำนวน 3 รอบ จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี มีค่าแตกต่างกัน โดยในรอบที่ 1 สามารถดูดซับแคดเมียมได้ 34.82% นิกเกิล 34.75% และสังกะสี 30.42% ส่วนในรอบที่ 2 และ 3 สามารถดูดซับไอออนโลหะหนักเปลือกแพชชั่นฟรุตลดลง โดยประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมลดลง 44.03%, 42.47% นิกเกิลลดลง 50.66%, 47.23% และสังกะสีลดลง 46.40%, 43.91% ตามลำดับ ผลแสดงดังภาพ 35

ซึ่งลำดับความชอบในการดูดซับโลหะหนักของเปลือกแพชชั่นฟรุต เป็นดังนี้ $Cd > Ni > Zn$ เปลือกแพชชั่นฟรุตสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่า อาจเป็นเพราะแคดเมียมมีรัศมีไอออน และเลขอะตอมมากกว่า นิกเกิลและสังกะสี เป็นผลทำให้ดูดซับแคดเมียมได้มากกว่า และรัศมีไอออน และเลขอะตอมของนิกเกิลและสังกะสีมีขนาดใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดการแย่งกันจับกับ active site ที่ผิวเซลล์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohan & Singh (2002) ได้ทำการศึกษการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon bagasse) ในสารละลายที่มีไอออนแคดเมียมและสังกะสี พบว่าสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าสังกะสี ซึ่งอธิบายได้ว่า รัศมีไอออน (ionic radius) อิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) และค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (standard reduction potential) ของแคดเมียมมีค่ามากกว่าสังกะสี ทำให้ไอออนแคดเมียมมีความแข็งแรงในการจับบนผิวหน้าเซลล์ได้มากกว่าสังกะสี

อาจกล่าวได้ว่าเปลือกแพชชั่นฟรุตเมื่อผ่านการดูดซับและการสกัดจำนวนหลาย ๆ รอบมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักลดลง ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Saeed & Iqbal (2003) ได้ศึกษการดูดซับและสกัดแคดเมียมของเปลือกถั่วดำ (*Cicer arietinum*) ซึ่งอธิบายว่า สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเป็นผลมาจากขบวนการ physical-chemical ซึ่งทำให้โครงสร้างเมตริกซ์ได้รับความเสียหาย สาเหตุทาง physical อาจเกิดขึ้นเนื่องจากช่วงเวลาที่ใช้เครื่องกวนในระหว่างการทดลอง ส่วนทาง chemical เกิดจากการใช้กรดเป็นสารละลายในการสกัดซึ่งมีผลทำให้เพิ่มการสีกกร่อนของโครงสร้างเมตริกซ์

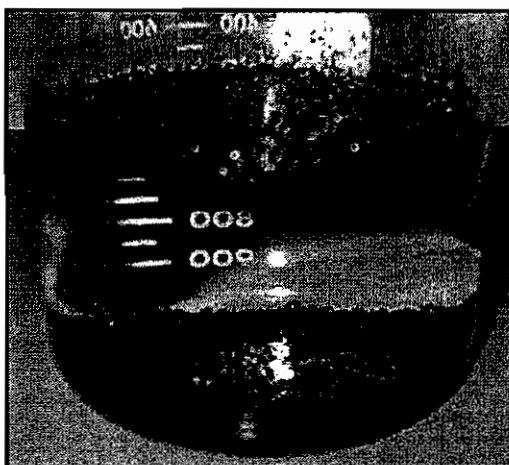
Puranik & Paknikar (1997) ได้ศึกษาการดูดซับและสกัด สังกะสี ของขี้วมวล (*Streptovercillium cinnamomeum*) อธิบายว่า สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสีย หรือการทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมลดน้อยลงเนื่องจากการปิดบัง active site ที่ใช้ดูดซับ โดยโลหะหนักเกิดการคอมเพล็กซ์หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของโครงสร้างเมตริกซ์

Asheh & Dubnjak (1997) ได้ศึกษาการดูดซับและสกัดแคดเมียม ของเปลือกต้นสน (pine bark) อธิบายไว้ว่าสาเหตุที่ทำให้การดูดซับแคดเมียมลดน้อยลงเป็นเพราะ active site ถูกปกคลุมโดยไฮดรอนโลหะหนักในกระบวนการดูดซับ ซึ่งไฮดรอนโลหะหนักมีความต้านทานสารละลายในการสกัด

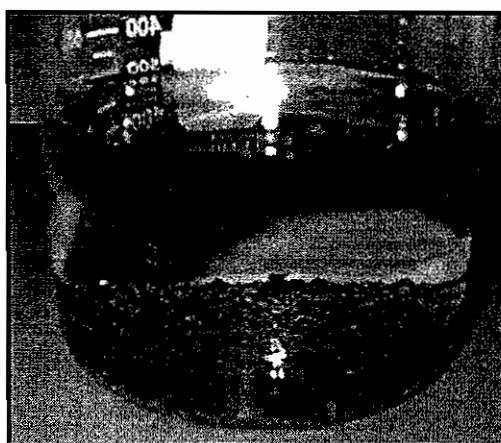
Tsezos (1984); Tsezos et al. (1989) ได้ศึกษาการสกัดยูเรเนียมจากขี้วมวล อธิบายว่าการสกัดขี้วมวลด้วยกรดมีผลทำให้โครงสร้างได้รับความเสียหาย และการสูญเสียประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักอาจเกิดขึ้นระหว่างการทำซ้ำหลาย ๆ รอบ

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในถังปฏิกริยา

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพ หรือความสามารถในการใช้งานของวัสดุดูดซับ (biosorbent) ในแบบจำลอง ซึ่งในทางปฏิบัติการประยุกต์ใช้ biosorbent ในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียมักประสบปัญหาในการแยก biosorbent ดังกล่าวออกจากน้ำเสีย (ภายหลังเสร็จกระบวนการ biosorption) เนื่องจาก biosorbent ส่วนใหญ่มักจะมีความหนาแน่นต่ำ มีขนาดเล็กและมีความแข็งแรงต่ำ (Veglio & Beolchini, 1997) ดังนั้นเมื่อต้องการพัฒนากระบวนการ biosorption เพื่อใช้ในระบบจริง ซึ่งมีปริมาณน้ำเสียสูงมักจะประสบกับปัญหาในทางปฏิบัติ เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าว biosorbent ที่ใช้ในการทดลองในแบบจำลอง จะพิจารณาจากผลจากการทดสอบ Adsorption isotherm และความสามารถในการตกตะกอน ซึ่งจากการทดสอบ Adsorption isotherm ของ biosorbent ทั้ง 4 ชนิดคือ ก้านองุ่น (grape stalks) กากองุ่น (grape residues) เปลือกส้ม (orange peel) เปลือกแพชชั่นฟรุต (passion fruit peel) พบว่า ข้อมูลจากการทดลองสอดคล้องกับสมการแบบ Langmuir เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้สมการ Langmuir ในการคำนวณปริมาณ biosorbent ที่ใช้ในระบบ ส่วน biosorbent มีค่าการดูดซับสูงสุด (q_{max}) มากที่สุดได้แก่ กากองุ่น (grape residues) รองลงมาคือ เปลือกแพชชั่นฟรุต (passion fruit peel) และจากการสังเกตความสามารถในการตกตะกอน พบว่า เปลือกแพชชั่นฟรุตสามารถตกตะกอนได้ดีกว่า ผลแสดงดังภาพ 36-37 จึงเลือกใช้เปลือกแพชชั่นฟรุตเป็น biosorbent ในระบบ



ภาพ 36 ความสามารถในการตกตะกอนของกากองุ่น (grape residues)



ภาพ 37 ความสามารถในการตกตะกอนของเปลือกแพชชั่นฟรุต (passion fruit peel)

เพื่อให้ขบวนการ biosorption มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ biosorbent จะต้องเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง ดังนั้นการสกัดโลหะออกจาก biosorbent และนำ biosorbent กลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้โดยใช้สารละลายกรด หรือสารละลายเกลือโซเดียมต่าง ๆ (Butter, 1998; Tungtakanpoung, 2002) ซึ่งจากการทดลอง พบว่า สารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.1 M. สามารถสกัดโลหะหนักออกจากเปลือกแพชชั่นฟรุตได้ดีที่สุด จึงเลือกใช้สารละลายดังกล่าวในการสกัดโลหะหนักสำหรับการทดลองในแบบจำลอง

การทดลองในแบบจำลองเลือกใช้ถังปฏิกรณ์แบบเท (Batch Reactor) โดยใช้ถังพลาสติก โพลีโพรพิลีน (polypropylene) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 55 เซนติเมตร ผลแสดง

ดังภาพ 38 ซึ่งในการทดลองจะใช้ปริมาตรน้ำเสีย 5 ลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นโลหะหนัก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ biosorbent ที่ใช้สำหรับดูดซับแคดเมียมเท่ากับ 119.85 กรัม นิเกิล 43.68 กรัม และสังกะสี 9.37 กรัม ค่า pH เริ่มต้นของโลหะหนักแคดเมียม และนิเกิล เท่ากับ 7 สังกะสีเท่ากับ 5 เวลาสัมผัสในการดูดซับ 60 นาที และเวลาสัมผัสในการสกัด 30 นาที และ ทดลองการนำกลับมาใช้ใหม่ของเปลือกแพชชันฟрутจำนวน 2 รอบ

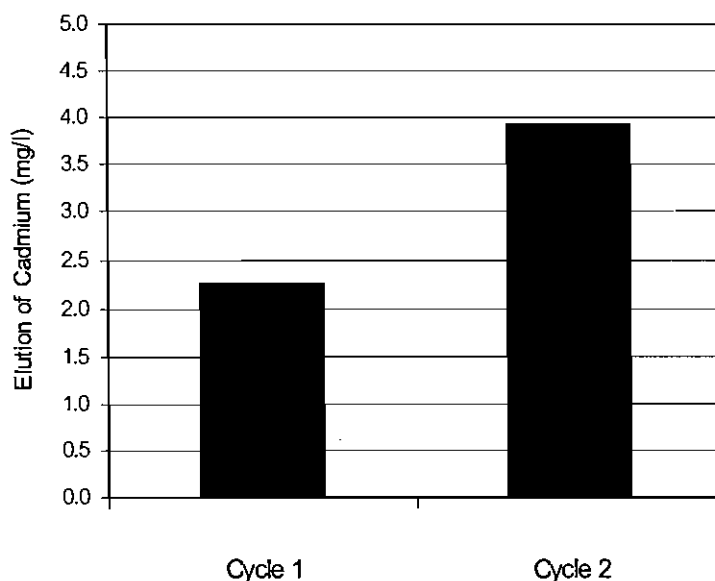


ภาพ 38 ชุดแบบจำลองถึงปฏิกิริยาแบบเบ (Bacth Reactor)

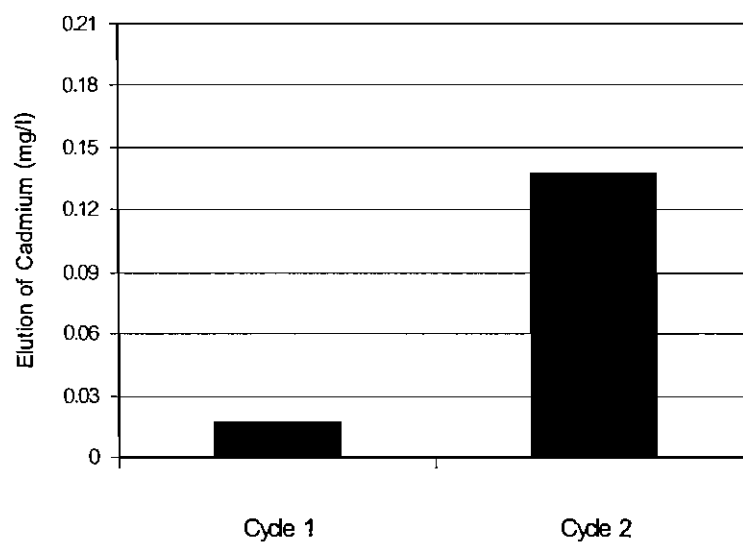
จากการทดลองความสามารถในการใช้งานของเปลือกแพชชันฟุตในแบบจำลอง พบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 9.48 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ที่เวลาสมมูล ของการดูดซับรอบที่ 1 และรอบที่ 2 เท่ากับ 2.24 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3.94 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลแสดงดังภาพ 39 สำหรับนิเกิลความเข้มข้นเริ่มต้น 8.86 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ ของการดูดซับรอบที่ 1 และรอบที่ 2 เท่ากับ 0.77 มิลลิกรัมต่อลิตรและ ไม่สามารถวัดค่าได้ ผลแสดง ดังภาพ 40 ส่วนสังกะสีความเข้มข้นเริ่มต้น 9.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ ของการดูดซับรอบที่ 1 และรอบที่ 2 เท่ากับ 7.65 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 5.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลแสดงดัง

ภาพ 41 หรืออาจกล่าวได้ว่าเปลือกแพชชั่นฟรุต ยังไม่สามารถลดความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสี ในสารละลายให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ (แคดเมียม ≤ 0.03 และสังกะสี ≤ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนนิเกิลสามารถลดความเข้มข้นในสารละลายให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ (นิเกิล ≤ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร)

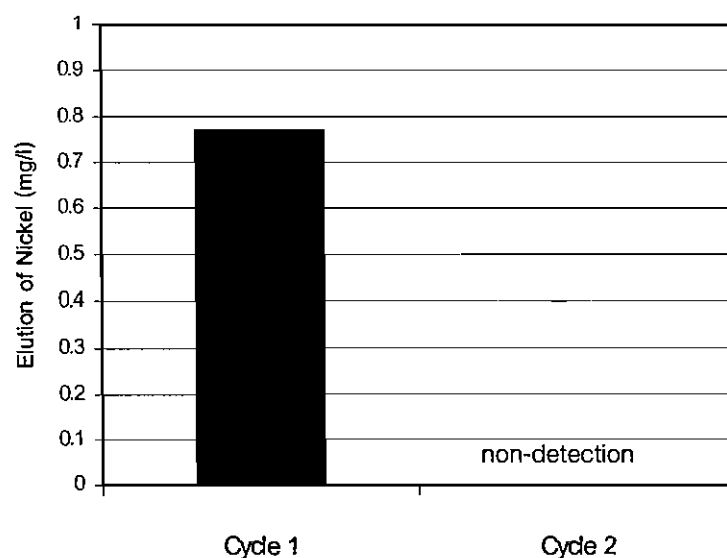
เนื่องจากโลหะหนักแคดเมียมมีความเป็นพิษสูง มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม จึงกำหนดค่าความเข้มข้นไว้ไม่เกิน ≤ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากการทดลองในแบบจำลอง ความเข้มข้นแคดเมียมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ของการดูดซับรอบที่ 1 เท่ากับ 2.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ 74.67 เท่า ดังนั้นจึงทำการทดลองต่อ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นแคดเมียม 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ biosorbent 23.68 กรัม พบว่า ความเข้มข้นแคดเมียมที่เหลืออยู่ในสารละลายของการดูดซับรอบที่ 1 และรอบที่ 2 เท่ากับ 0.0165 และ 0.137 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลแสดงดังภาพ 42 อาจกล่าวได้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เปลือกแพชชั่นฟรุตสามารถดูดซับโลหะหนักให้ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้



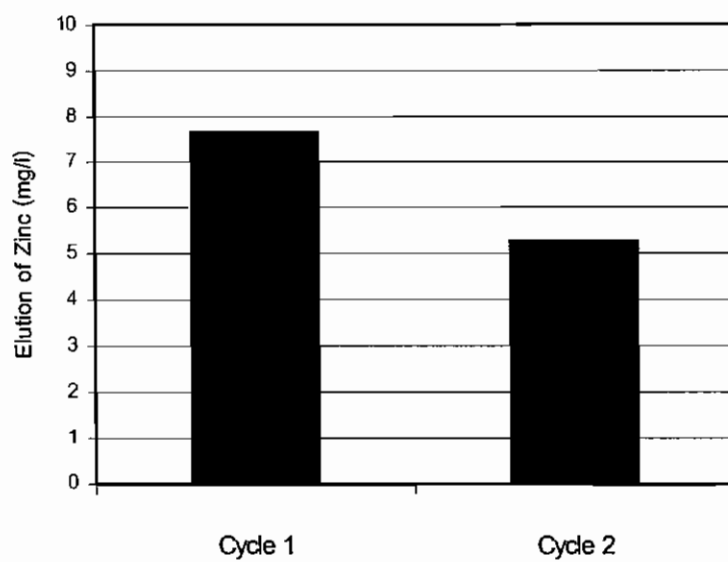
ภาพ 39 ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของเปลือกแพชชั่นฟรุตในถังปฏิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 119.85 กรัมต่อ 5 ลิตร



ภาพ 40 ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของเปลือกแพชชั่นฟรุตในถังปฏิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 23.68 กรัมต่อ 5 ลิตร



ภาพ 41 ประสิทธิภาพการดูดซับนิเกิลของเปลือกแพชชั่นฟรุตในถังปฏิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 43.68 กรัมต่อ 5 ลิตร



ภาพ 42 ประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีของเปลือกแพะชันฟรุตในถังปฏิกริยา ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณวัสดุดูดซับ 9.37 กรัมต่อ 5 ลิตร