

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

Passion fruit (*Passionflora edulis*) peel as an biosorbent for the removal
of heavy metals from aqueous solution

การใช้เปลือกแพชชั่นฟรุตเพื่อกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลาย

Passion Fruit (*Passiflora Edulis*) Peel as an Biosorbent for the Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution

ดลเดช ตั้งตระการพงษ์^{1*} และ ภาณุมาศ พรหมเทศ²

Dondej Tungtakanpoung^{1*} and Panumas Promtet²

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เปลือกแพชชั่นฟรุต โลหะหนักที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ แคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ คือ พีเอช เวลาสัมผัส ความเข้มข้นโลหะหนัก อุณหภูมิ สารละลายที่เหมาะสมในการสกัดโลหะหนัก และประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ ผลการทดลอง พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับ แคดเมียม นิกเกิล เท่ากับ 7 และสังกะสีเท่ากับ 5 เวลาสมดุลการดูดซับโลหะหนักประมาณ 60 นาที ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{max}) ของแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี เท่ากับ 16.50, 29.33 และ 13.33 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ตามสมการแลงเมียร์ (Langmuir) ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น สารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.1 โมล สามารถสกัดโลหะหนักได้ดีที่สุด และประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ 5 รอบ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียม นิกเกิล สังกะสี ลดลงเฉลี่ยเท่ากับ 21.05, 39.08 และ 36.91 เปอร์เซ็นต์ของการดูดซับรอบที่ 1 ตามลำดับ

คำสำคัญ : โลหะหนัก; การกำจัดโลหะหนัก; แคดเมียม; นิกเกิล; สังกะสี; การดูดซับทางชีวภาพ

Abstract

In this work, passion fruit (*Passiflora Edulis*) peel was used to study its efficiency as an biosorbent for the removal of cadmium, nickel and zinc from aqueous solution. Batch experiments were performed as a function of contact time, initial metal concentration, temperature and pH. The efficiency of metals recovery by desorption was also determined with a range of chemical extractants. Moreover, the reuse of biosorbent was investigated by following sorption/desorption efficiency over 5 cycles. The results show that, the biosorption process was relatively fast and equilibrium was reached after about 60 min of contact. The optimum pH for cadmium and nickel sorption was 7 while for zinc was 5. The biosorption capacity increased with increased temperature. The Langmuir isotherm model was found to be suitable for describing the

^{1*} อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000;

² นิสิตบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000;

* โทรศัพท์ 0-5526-1914 โทรสาร 0-5526-1914. E-mail address: dondejt@yahoo.com.

biosorption equilibrium. The maximum biosorption capacity as calculated from Langmuir isotherm was 16.50mg/g for 88 cadmium, 29.33 mg/g for nickel and 13.33 mg/g for zinc. 0.1 M. hydrochloric acid show high efficiency for desorption of metals. Investigation of the biosorption/desorption behaviour over 5 cycles, found that cadmium, nickel and zinc biosorption capacity at the fifth cycles was decreased average 21.05%, 39.08% and 36.91%, respectively, of the biosorption capacity at the first cycle.

Keyword : heavy metals; metal removal; cadmium; nickel; zinc; biosorption

บทนำ

การแพร่กระจายของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่สำคัญเนื่องจากโลหะหนักสามารถถูกสะสมผ่านทางห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสุขภาพของมนุษย์[1][2] แหล่งแพร่กระจายของโลหะหนักที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือ อุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การชุบโลหะ ผลิตภัณฑ์ แบตเตอรี่ และโลหะผสม[3] ซึ่งจำเป็นต้องควบคุมระดับของโลหะหนักในน้ำเสียให้อยู่ในมาตรฐานก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยปกติวิธีที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียได้แก่ การตกตะกอนเคมี การแลกเปลี่ยนประจุด้วยเรซิน ออสโมซิสแบบย้อนกลับ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์[4] ซึ่งวิธีการเหล่านี้อาจไม่มีประสิทธิภาพและมีค่าใช้จ่ายที่สูงเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายอยู่ในช่วง 1-100 mg/L[5] การค้นหาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียโลหะหนักแนวใหม่ได้มุ่งไปที่เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและราคาถูก จากการทบทวนเอกสารพบว่าผู้นำกากของเสียจากขบวนการผลิตทางด้านอุตสาหกรรมหรือการเกษตรหลายชนิดมาใช้กำจัดโลหะหนัก เช่น การใช้เปลือกถั่วดำ(black gram husk)เป็นวัสดุดูดซับแคดเมียม พบว่าสามารถลดปริมาณแคดเมียมได้ 99.99% ในสถานะที่สารละลายแคดเมียมมีความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร[1]การใช้กากเบียร์(spent grain)ในการดูดซับแคดเมียมและตะกั่ว พบว่าสามารถลดปริมาณแคดเมียมได้ 95.6% และตะกั่วได้ 77.8% เมื่อสารละลายแคดเมียมและตะกั่วมีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร[6] นอกจากนี้ยังมีผู้ทดลองใช้ เปลือกส้ม[3] แอปเปิ้ล[7] ของเสียจากการผลิตน้ำตาล[8] แครอท[9] เปลือกต้นมะม่วงและต้นนิม[10] เปลือกสน[11] เปลือกข้าว[12] เปลือก hazelnut[13] ฯลฯ ในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งกลไกการกำจัดโลหะหนักของกากของเสียดังกล่าวอาจเกิดจากขบวนการเดียวหรือหลายขบวนการรวมกัน เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การดูดซับทางกายภาพ (adsorption) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation) การตกตะกอนด้วยสารอนินทรีย์ (inorganic microprecipitation) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน(coordination)และการคีเลต (chelation)[5]

แพชชั่นฟรุตเป็นผลไม้ที่ปลูกมากในประเทศเขตร้อนโดยปริมาณการผลิต 80-90% ของโลกมาจากประเทศ เช่น บราซิล อเมริกา ออสเตรเลีย ปาปัวนิวกินี แอฟริกาใต้ ศรีลังกา ไต้หวัน มาเลเซีย ฯลฯ [14] สำหรับประเทศไทยมีการปลูกแพชชั่นฟรุตในหลายพื้นที่ เช่น ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และได้มีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น น้ำแพชชั่นฟรุต การแปรรูปดังกล่าวทำให้เกิดของเสีย เช่น เมล็ด เปลือก ซึ่งกากของเสียเหล่านี้ไม่มีราคาและมีปัญหาการกำจัด ดังนั้นการนำกากของเสียจากขบวนการผลิตน้ำแพชชั่นฟรุตมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำทรัพยากรที่เหลือทิ้งนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี โดยใช้เปลือกแพชชั่นฟรุต โดยศึกษาอิทธิพลของ พีเอช เวลาสัมผัส อุณหภูมิ ความเข้มข้นโลหะหนัก สารละลายในการสกัดโลหะหนัก และประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่

การเตรียมวัสดุดูดซับ (biosorbent) นำเปลือกแพชชันฟรุต ล้างน้ำกลั่น และอบที่อุณหภูมิ 105 °ซ นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดและร่อนผ่านตะแกรงเพื่อให้มีขนาดระหว่าง 0.250 - 0.850 มม.

การทดลองศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก เปลือกแพชชันฟรุตที่ผ่านการเตรียม 2 กรัม ถูกนำมาศึกษาพฤติกรรมในการกำจัดโลหะหนักแคดเมียม นิเกิล และสังกะสี ในสารละลายปริมาตร 0.5 ลิตร โดยใช้เครื่อง Jar test ด้วยความเร็วรอบการกวน 120 รอบต่อนาทีโดยใช้เวลาสัมผัสต่างๆ ตามที่กำหนดจากนั้นนำสารละลายโลหะหนักไปวัดค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

อิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นต่อการกำจัดโลหะหนัก เตรียมสารละลายโลหะหนักความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับพีเอชให้มีค่าระหว่าง 2-9 ด้วย HCl 0.1 M. และ NaOH 0.1 M. นำไปศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนักดังที่กล่าวมาโดยใช้เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการกำจัดโลหะหนัก เปลือกแพชชันฟรุต 2 กรัม ถูกใช้ในการกำจัดสารละลายโลหะหนักความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เครื่อง Incubator shaker ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ใช้เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง โดยแปรเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่าง 10-40 °ซ นำสารละลายโลหะหนักไปวัดค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักและการวิเคราะห์ Adsorption Isotherm เตรียมสารละลายโลหะหนักความเข้มข้นระหว่าง 20-400 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปศึกษาพฤติกรรมในการกำจัดโลหะหนักดังที่กล่าวมาโดยใช้เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง ดังที่กล่าวมา จากนั้นนำผลการทดลองไปคำนวณ ความจุของการดูดซับโลหะหนัก(q) ดังสมการ(1) และวิเคราะห์ Adsorption Isotherm โดยใช้สมการของ Langmuir ดังสมการ(2)

$$q = \frac{V(C_i - C_e)}{W} \quad (1)$$

เมื่อ q ค่าความจุของการดูดซับโลหะหนัก (mg/g), C_i ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (mg/l), C_e ความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาสมดุล (mg/l), V ปริมาตรสารละลายโลหะหนัก (ml), W น้ำหนักเปลือกแพชชันฟรุต (g)

$$q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (2)$$

เมื่อ $q_{\max}$ ปริมาณการดูดซับสูงสุด (mg/g), C_e ความเข้มข้นสารละลายที่เวลาสมดุล (mg/l), b ค่าคงที่การดูดซับโลหะหนัก

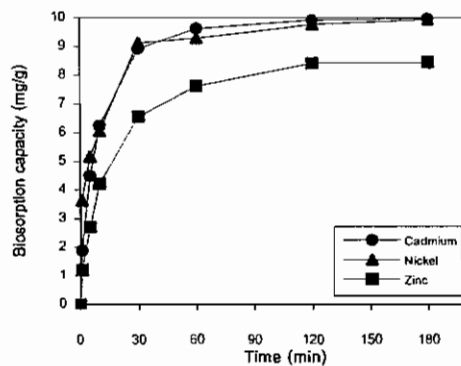
อิทธิพลของสารละลายที่เหมาะสมในการสกัดโลหะหนัก เปลือกแพชชันฟรุต 2 กรัม ถูกใช้ในการกำจัดสารละลายโลหะหนักความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรสารละลาย 0.5 ลิตร โดยใช้เวลาสัมผัสเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นล้างเปลือกแพชชันฟรุตที่อิ่มตัวด้วยโลหะหนักด้วยน้ำกลั่นและนำไปศึกษาความสามารถในการสกัดโลหะหนักของสารละลาย HCl, HNO₃, CaCl₂ และ NaCl ความเข้มข้น 0.1 M. โดยใช้ปริมาตร 0.5 ลิตร เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารละลายโลหะหนักไปวัดค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

การศึกษานำกลับมาใช้ใหม่ของเปลือกแพชชันฟรุตเพื่อการกำจัดโลหะหนัก เปลือกแพชชันฟรุตที่ผ่านการเตรียมเรียบร้อยแล้ว ถูกนำมาศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนักแคดเมียม นิเกิล และสังกะสี ในสารละลายและความสามารถในการนำกลับมาใช้โดยใช้สารละลาย HNO₃ 0.1 M. โดยทำการทดลอง Adsorption/Desorption ดังกล่าวจำนวน 5 รอบ

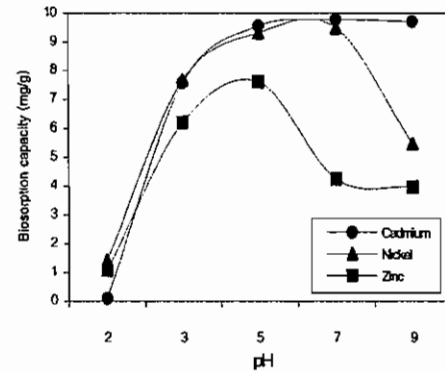
ผลการทดลองและอภิปรายผล

อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการกำจัดโลหะหนัก

จากการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับโลหะหนักของเปลือกแพลงก์ตอนพืช โดยใช้เวลาสัมผัส 0-180 นาที เป็นดังรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าการดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 30 นาทีแรก และเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาประมาณ 60 นาที ซึ่งพบว่า สามารถกำจัดแคดเมียมได้ 88.80 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 86.39 เปอร์เซ็นต์ สังกะสี 59.85 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าความจุในการดูดซับเท่ากับ 9.62 mgCd/g, 9.28 mgNi/g, 7.63 mgZn/g ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับแคดเมียมด้วยเปลือกข้าว (rice husk) [12] การดูดซับทองแดงด้วยเถ้าลอยขานอ้อย (bagsse fly ash) [15] การดูดซับตะกั่ว ทองแดง สังกะสี ด้วยขี้มูล (*P.chrysosporium*) [16] ซึ่งการดูดซับโลหะหนักเริ่มเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 60 นาทีเช่นเดียวกัน



รูปที่ 1 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อความจุในการดูดซับแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี ที่เวลา 0-180 นาที



รูปที่ 2 อิทธิพลของ pH เริ่มต้นต่อความจุในการดูดซับแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี

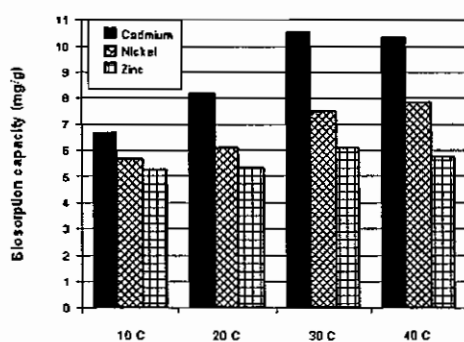
อิทธิพลของพีเอชต่อการกำจัดโลหะหนัก

จากการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับโลหะหนักของเปลือกแพลงก์ตอนพืช โดยใช้ค่า pH เริ่มต้นของสารละลายระหว่าง 2-9 เป็นดังรูปที่ 2 ซึ่งพบว่าความจุในการดูดซับโลหะหนักแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี จะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH เพิ่มขึ้นจาก pH2 ถึง pH5 และเมื่อ pH เพิ่มขึ้นจาก pH5 ถึง pH9 ความจุของการดูดซับแคดเมียมจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วน ความจุของการดูดซับนิกเกิลจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึง pH7 และลดลงอย่างรวดเร็วจาก pH7 ถึง pH9 สำหรับความจุของการดูดซับสังกะสีจะลดลงอย่างรวดเร็วจาก pH5 ถึง pH9 ซึ่งอธิบายได้ว่า pH 2 มีปริมาณการดูดซับโลหะหนักได้น้อย อธิบายได้ว่าที่ pH ต่ำจะเกิดการจับกันระหว่างไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) กับ active site ที่เป็นประจุลบบริเวณผิวเซลล์ได้ดี ซึ่งไฮโดรเนียมไอออนนี้จะส่งแรงผลักไม่ให้โลหะหนักเข้ามาจับกับ active site ที่เป็นประจุลบบริเวณผิวเซลล์ จึงทำให้โลหะหนักดูดซับได้น้อยลง ซึ่งผลของแรงผลักนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ลดลง [17] ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่ากระบวนการดูดซับโลหะหนักของเปลือกแพลงก์ตอนพืชเป็นกลไกการแลกเปลี่ยนไอออน ในขณะที่นิกเกิลและสังกะสีความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อ pH เพิ่มขึ้นมากกว่า pH 5 พฤติกรรมดูดซับเช่นนี้สอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับนิกเกิลด้วยเถ้าลอยขานอ้อย (bagsse fly ash) [18] สาหร่าย (*sargassum sp.*) [19] เปลือกส้ม (*citrus reticulata*) [3] และการดูดซับสังกะสีด้วยเถ้าลอยขานอ้อย (bagsse fly ash) [15] และจากกราฟรูปที่ 2 สามารถกล่าวได้ว่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแคดเมียม และนิกเกิลโดยเปลือกแพลงก์ตอนพืชคือเท่ากับ 7 ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการใช้ *Streptomyces subrutilus* [20] สาหร่าย (*spirulina sp.*) [21] ดูดซับแคดเมียม และการใช้เปลือกถั่ว (hazelnut shell) [13] พีท (*sphagnum moss peat*) [22] ดูดซับนิกเกิล ส่วนการดูดซับสังกะสี พบว่าที่ pH เริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 เป็น pH ที่เหมาะสม ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับสังกะสีด้วยมอซ (*fontinalis antipyretica moss*) [2] และกากแครอท (carrot residues) [9]

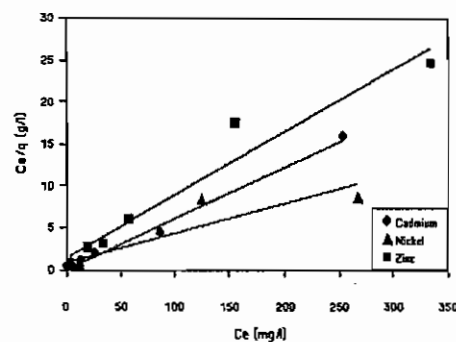
อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการกำจัดโลหะหนัก

91

จากการศึกษาความจุของการดูดซับโลหะหนักของเปลือกแพชชั่นฟรุตโดยใช้อุณหภูมิสารละลายระหว่าง 10-40 °ซ ดังรูปที่ 3 พบว่าเปลือกแพชชั่นฟรุตสามารถดูดซับแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสีได้เท่ากับ 6.68 mgCd/g 5.67 mgNi/g และ 5.29 mgZn/g ที่อุณหภูมิสารละลายเท่ากับ 10 °ซ และเพิ่มเป็น 10.38 mgCd/g, 7.87 mgNi/g และ 5.77 mgZn/g เมื่ออุณหภูมิสารละลายเท่ากับ 40 °ซ ซึ่งกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับนิกเกิลด้วยเปลือกส้ม(*Citrus reticulata*)[3]และการดูดซับปรอท โครเมียม แคดเมียมด้วยเปลือกต้นมะม่วงและนิม(mango and neem bark)[10] และการดูดซับแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสีด้วยเถ้าลอยขานอ้อย (bagasse fly ash)[15][18] อาจอธิบายได้ว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนโลหะหนักจากสารละลายสู่ผิวหน้าตัวดูดซับได้เร็วขึ้น[10] หรือทำให้เกิดการขยายของโครงหรือกระตุ้นผิวหน้าตัวดูดซับทำให้สามารถดูดซับโลหะหนักได้เพิ่มขึ้น[3]



รูปที่ 3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความจุในการดูดซับแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี



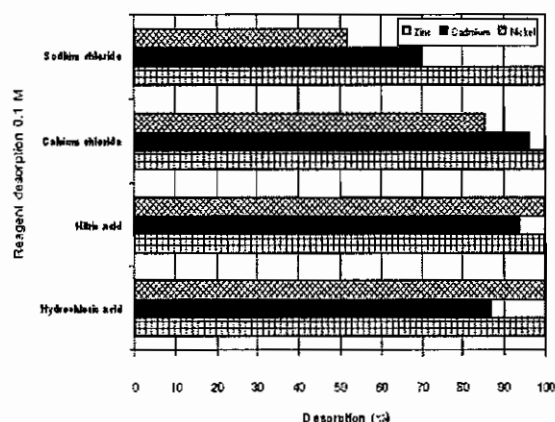
รูปที่ 4 กราฟ Langmuir adsorption isotherm

อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักและการวิเคราะห์ Adsorption Isotherm

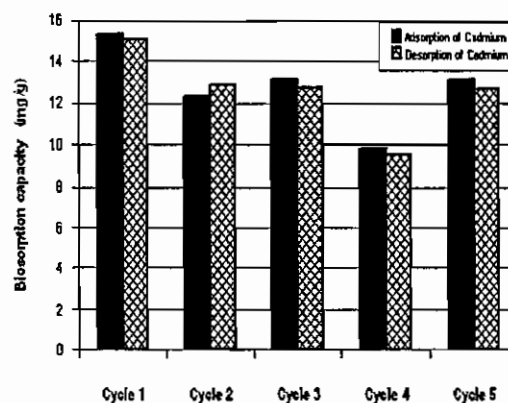
จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสูงกว่าจะมีจำนวนของโลหะหนักที่ถูกดูดซับมากกว่า หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มคงที่ และเมื่อนำผลการทดลองไปทำการวิเคราะห์ Adsorption Isotherm โดยใช้สมการของ Langmuir ดังรูปที่ 4 พบว่ากราฟดังกล่าวพิจารณาเข้ากับสมการ Langmuir ได้ดี โดยมีค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด(q_{max}) และ correlation coefficient (r^2) เท่ากับ 16.50 mgCd/g ($r^2=0.99$), 29.33 mgNi/g ($r^2=0.83$), 13.33 mgZn/g ($r^2=0.95$) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าลำดับความชอบในการดูดซับโลหะหนักของเปลือกแพชชั่นฟรุตสามารถเรียงตามลำดับได้ดังนี้คือ นิกเกิล > แคดเมียม > สังกะสี ซึ่งอธิบายได้ว่าอิทธิพลของการดูดซับไอออนโลหะหนักมีความสัมพันธ์กับค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีโลหะหนัก[4][23] อย่างไรก็ตามลำดับของการดูดซับและกลไกการดูดซับไอออนโลหะหนักสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุดูดซับและไอออนโลหะหนัก[24][25]

อิทธิพลของสารละลายต่อความสามารถในการสกัดโลหะหนัก

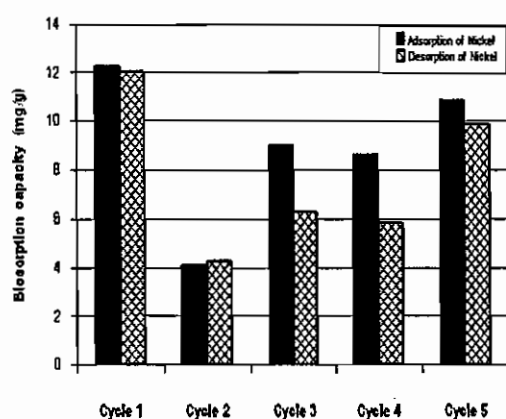
จากการทดลองความสามารถการสกัดโลหะหนักแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสีออกจากเปลือกแพชชั่นฟรุตของสารละลาย HCl, HNO₃, CaCl₂ และ NaCl ความเข้มข้น 0.1 M. พบว่าสารละลาย HNO₃ สามารถการสกัดแคดเมียมและนิกเกิล ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ HCl, CaCl₂ และ NaCl ตามลำดับ ส่วนสังกะสี พบว่าสารละลายทั้ง 4 ชนิดมีความสามารถในการสกัดใกล้เคียงกัน ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาในการสกัดแคดเมียม นิกเกิล ออกจาก *Aspergillus niger* [26] การสกัดสังกะสีออกจากชีวมวล(root bark)[27]



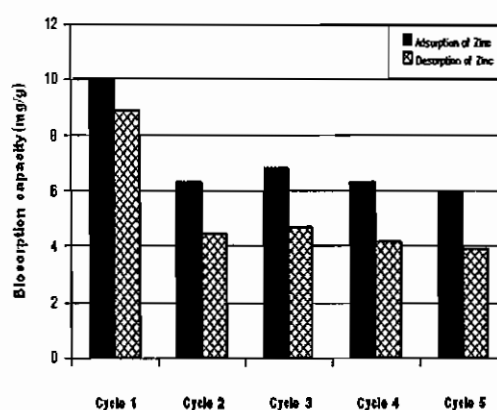
รูปที่ 5 ชนิดของสารละลายต่อความสามารถในการสกัด แคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี



รูปที่ 6a ประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ 5 รอบในการดูดซับและสกัดแคดเมียม



รูปที่ 6b ประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ 5 รอบในการดูดซับและสกัดนิกเกิล



รูปที่ 6c ประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ 5 รอบในการดูดซับและสกัดสังกะสี

อิทธิพลของการนำกลับมาใช้ใหม่ของเปลือกแพะชันฟรุตในการกำจัดโลหะหนัก

จากการทดลองนำเปลือกแพะชันฟรุตมาผ่านการดูดซับโลหะหนักและการสกัดด้วยสารละลาย HNO_3 0.1 M. จำนวน 5 รอบ พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักลดลงโดยแคดเมียมลดลงเฉลี่ย 21.05 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล ลดลงเฉลี่ย 39.08 เปอร์เซ็นต์ และสังกะสี ลดลงเฉลี่ย 36.91 เปอร์เซ็นต์ ของการดูดซับรอบที่ 1 ดังรูปที่ 6a-6c จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของเปลือกแพะชันฟรุตลดลง ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับและสกัดแคดเมียมด้วยเปลือกถั่วดำ (*cicer arietinum*)[1] เปลือกสน (pine bark)[11] และการดูดซับและสกัดสังกะสี ด้วยชีวมวล (*streptovercillium cinnamomeum*)[28] ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากขบวนการ physical-chemical ซึ่งทำให้โครงสร้างเมตริกซ์ได้รับความเสียหายโดยสาเหตุทาง physical อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้เครื่องกวนในระหว่างทดลอง ส่วนทาง chemical อาจเกิดจากการใช้กรดเป็นสารละลายในการสกัดมีผลทำให้เพิ่มการสีกกร่อนของโครงสร้างเมตริกซ์เซลล์เปลือกแพะชันฟรุต[1][28]

สรุปผลการทดลอง

เปลือกแพะชันฟรุตซึ่งเป็นกากของเสียจากการผลิตน้ำแพะชันฟรุตมีประสิทธิภาพดี และมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสียเนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้งทำให้ลดต้นทุนในการบำบัดโดยมีเวลาสมดุลการดูดซับเท่ากับ 60 นาที ค่าการดูดซับสูงสุด (q_{max}) เท่ากับ 16.50 mgCd/g, 29.33 mgNi/g, 13.33 mgZn/g ตามรูปแบบสมการ Langmuir โดยความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และพบว่าสารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.1 M. สามารถการสกัดโลหะหนักได้ดีที่สุด มากกว่า 93.68 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่จำนวน 5 รอบพบว่า เปลือกแพะชันฟรุตสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักลดลงเฉลี่ย 21.05 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแคดเมียม 39.08 เปอร์เซ็นต์ สำหรับนิกเกิล และ 36.91 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสังกะสี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Saeed, A. and Iqbal, M., 2003. **Bioremoval of cadmium from aqueous solution by black gram husk (*Cicer arientinum*)**, Water Research, 37, 3472-3480.
- [2] Martins, R.J.E., Pardo, R. and Boaventura, R.A.R., 2004. **Cadmium and zinc adsorption by the moss *Fontinalis antipyretica*: effect of temperature, pH and water hardness**, Water Research, 38, 693-699.
- [3] Ajmal, M. *et al.*, 2000. **Adsorption studies on *Citrus reticulata* (fruit peel of orange) : removal and recovery of Ni(II) from electroplating wastewater**, Journal of Hazardous Materials, B79, 117-131.
- [4] Tarley, C.R.T. and Arruda, M.A.Z., 2004. **Biosorption of heavy metals using rice milling by-products. Characterisation and application for removal of metals from aqueous effluents**, Chemosphere, 54, 987 -995.
- [5] Volesky, B., 1990. **Biosorption of heavy metals**, CRC Press, Boca Raton, FL, USA
- [6] Low, K.S. *et al.*, 2000. **Sorption of cadmium and lead from aqueous solutions by spent grain**, Process Biochemistry, 36, 59-64.
- [7] Lee, S.H. *et al.*, 1998. **Removal of heavy metals from aqueous solution by apple residues**, Process Biochemistry, 33, 205-211.
- [8] Senthikumar, S. *et al.*, 2000. **Biosorption of toxic heavy metals from aqueous solutions**, Bioresource Technology, 75, 163-165.
- [9] Nasemejad, B. *et al.*, 2005. **Camparison for biosorption modeling of heavy metals (Cr,Cu,Zn) adsorption from wastewater by carrot residues**, Process Biochemistry, 40, 1319-1322.
- [10] Tiwari, D. *et al.*, 1999. **Biosorptive behaviour of Mango (*Mangifera indica*) and Ncem (*Azadirachta indica*) bark for Hg, Cr and Cd toxic ions from aqueous solutions: a radiotracer study**, Applied Radiation Isotopes, 50, 631-642.
- [11] Ashch, S. and Dubnjak, Z., 1997. **Sorption of cadmium and other heavy metals by pine bark**, Journal of Hazardous Materials, 56, 35-51.
- [12] Ajmal, M. *et al.*, 2003. **Adsorption studies on rice husk: removal and recovery of Cd(II) from wastewater**, Bioresource Technology, 86, 147 -149.

- [13] Demirbas, E. *et al.*, 2002. **Removal of Ni(II) from aqueous solution by adsorption onto hazelnut shell activated carbon: equilibrium studies**, *Bioresource Technology*, 84, 291-293.
- [14] Souza, M.M. *et al.*, 2004. **Flower receptivity and fruit characteristics associated to time of pollination in the yellow passion fruit *Passiflora edulis* Sims f. *flavicarpa* (Passifloraceae)**, *Scientia Horticulturae* 101, 373-385
- [15] Gupta, V.K. and Ali, I., 2000. **Utilisation of bagasse fly ash (a sugar industry waste) for the removal of copper and zinc from wastewater**, *Separation and Purification Technology*, 18, 131-140.
- [16] Iqbal, M. and Edyvean, R.G.J., 2004. **Biosorption of lead, copper and zinc ions on loofa sponge immobilized biomass of *Phanerochaete chrysosporium***, *Minerals Engineering*, 17, 217-223.
- [17] Zhou, J.L. and Kiff, R.J., 1991. **The uptake of copper from aqueous solution by immobilized fungal biomass**, *Journal of chemical technology and biotechnology*, 52, 317-330.
- [18] Gupta, V.K. *et al.*, 2003. **Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash- a sugar industry waste**, *Water Research*, 37, 4038-4044.
- [19] Kalyani, S., Srinivasa Rao, P. and Krishnaiah, K., 2004. **Removal of nickel (II) from aqueous solutions using marine macroalgae as the sorbing biomass**, *Chemosphere*, 57, 1225-1229.
- [20] Tungtapanpong, D. 2002. **Biosorption of heavy metals by *Streptomyces subutilus* (A101) Biofilm in a fluidized bed reactor**, Ph.D. Thesis, The university of newcastle upon Tyne.
- [21] Chojnaeka, K., Chojnacki, A. and Gorecka, H., 2004. **Biosorption of Cr^{3+} , Cd^{2+} and Cu^{2+} ions by blue-green algae *Spirulina sp.*: kinetics, equilibrium and the mechanism of the process**, *Chemosphere*, Article in press.
- [22] Ho, Y.S., John Wase, D.A. and Forster, C.F., 1995. **Batch nickel removal from aqueous solution by *sphagnum moss peat***, *Water Research*, 29, 1327-1332.
- [23] Mohan, D. and Singh, K.P. 2002. **Single and multi component adsorption of cadmium and zinc using activated carbon derived from bagasse – an agricultural waste**, *Water Research*, 36, 2304-2318.
- [24] An, H.K., Park, B.Y. and Kim, D.S. 2001. **Crab shell for the removal of heavy metals from aqueous solution**, *Water Research*, 35, 3551-3556.
- [25] Leush A., Holan Z.R. and Volesky B. 1995. **Biosorption of heavy metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) by chemically-reinforced biomass of marine algae**, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 62, 279-288.
- [26] Kapoor, A. *et al.*, 1999. **Removal of heavy metals using the fungus *Aspergillus niger***, *Bioresource Technology*, 70, 95-104.
- [27] Chandra Sekhar, K. *et al.*, 2003. **Removal of heavy metals using a plant biomass with reference environmental control**, *Int. J. Miner. Process.*, 68, 37-45.
- [28] Puranik, P.R. and Paknikar, K.M., 1997. **Biosorption of lead and zinc from solutions using *Streptovercillium cinnamomeum* waste biomass**, *J. Biotechnol.*, 55, 113-124.

ภาคผนวก ข
ตารางข้อมูลการทดลอง

ตารางข้อมูลการทดลองอิทธิพลของเวลาสัมพัทธ์

Cadmium : Initial Concentration 50 mg/l. : Biosorbent 2 g./500 ml.								
pH 7 : Contact time adsorption 0-180 min								
Time	Grape Stalk		Grape Residues		Orange Peel		Passion Peel	
	q(mg/g)	Removal(%)	q(mg/g)	Removal(%)	q(mg/g)	Removal(%)	q(mg/g)	Removal(%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2.56	23.70	2.01	19.29	2.83	26.74	1.89	17.48
5	4.49	41.66	6.08	58.41	6.52	61.57	4.49	41.49
10	5.61	51.97	8.39	80.71	7.84	74.09	6.24	57.65
30	7.78	72.13	10.23	98.38	8.54	80.64	8.92	82.34
60	8.46	78.45	10.21	98.20	8.68	82.00	9.62	88.81
120	8.84	81.92	10.26	98.68	8.70	82.17	9.91	91.46
180	8.89	82.39	10.29	98.97	8.56	80.87	9.96	91.92

Nickel : Initial Concentration 50 mg/l. : Biosorbent 2 g./500 ml.								
pH 7 : Contact time adsorption 0-180 min								
Time	Grape Stalk		Grape Residues		Orange Peel		Passion Peel	
	q(mg/g)	Removal(%)	q(mg/g)	Removal(%)	q(mg/g)	Removal(%)	q(mg/g)	Removal(%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2.81	26.15	3.48	32.40	4.72	43.92	3.63	33.80
5	3.68	34.29	5.37	49.97	6.79	63.18	5.15	47.96
10	4.79	44.62	8.31	77.37	8.17	76.03	6.06	56.43
30	7.52	70.01	9.11	84.79	9.67	89.99	9.13	84.93
60	8.27	76.99	9.90	92.14	9.67	89.97	9.28	86.39
120	8.78	81.70	10.40	96.78	9.81	91.27	9.76	90.87
180	8.62	80.22	10.56	98.28	9.88	92.00	9.92	92.32

Zinc : Initial Concentration 50 mg/l. : Biosorbent 2 g./500 ml.								
pH 5 : Contact time adsorption 0-180 min								
Time	Grape Stalk		Grape Residues		Orange Peel		Passion Peel	
	q(mg/g)	Removal(%)	q(mg/g)	Removal(%)	q(mg/g)	Removal(%)	q(mg/g)	Removal(%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.12	0.94	1.37	10.78	3.08	24.17	1.22	9.58
5	1.93	15.15	2.08	16.31	5.06	39.74	2.72	21.36
10	3.29	25.84	6.54	51.34	6.38	50.05	4.21	33.08
30	5.18	40.67	10.96	85.99	7.58	59.51	6.56	51.50
60	5.87	46.04	12.45	97.70	7.61	59.70	7.63	59.85
120	6.31	49.55	12.74	100	7.68	60.27	8.41	66.03
180	6.19	48.57	12.74	100	7.41	58.16	8.43	66.19

ตารางข้อมูลการทดลองอิทธิพลของความเข้มข้น

Cadmium : Initial Concentration 20-400 mg/l. : Biosorbent 2 g./500 ml. pH 7 : Contact time adsorption 60 min.						
Biosorbent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	Q (mg/g)	Ce/q	log Ce	log q
Grape Stalks	18.26	2.82	3.86	0.7306	0.4502	0.5866
Grape Stalks	43.15	9.3	8.4625	1.0990	0.9685	0.9275
Grape Stalks	61.55	24	9.3875	2.5566	1.3802	0.9725
Grape Stalks	84.6	43.7	10.225	4.2738	1.6405	1.0097
Grape Stalks	167.6	116.6	12.75	9.1451	2.0667	1.1055
Grape Stalks	318.8	263.6	13.8	19.1014	2.4209	1.1399

Cadmium : Initial Concentration 50 mg/l. : Biosorbent 2 g./500 ml. pH 7 : Contact time adsorption 60 min						
Biosorbent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	Q (mg/g)	Ce/q	log Ce	log q
Grape Residues	18.26	0.23	4.5075	0.0510	-0.6383	0.6539
Grape Residues	41.6	0.75	10.2125	0.0734	-0.1249	1.0091
Grape Residues	61.55	3.45	14.525	0.2375	0.5378	1.1621
Grape Residues	84.6	6.5	19.525	0.3329	0.8129	1.2906
Grape Residues	167.6	61.5	26.525	2.3186	1.7889	1.4237
Grape Residues	318.8	209.4	27.35	7.6563	2.3210	1.4370

Cadmium : Initial Concentration 20-400 mg/l. : Biosorbent 2 g./500 ml. pH 7 : Contact time adsorption 60 min						
Biosorbent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	q (mg/g)	Ce/q	log Ce	log q
Orange Peel	18.26	1.99	4.0675	0.4892	0.2989	0.6093
Orange Peel	42.35	7.625	8.6812	0.8783	0.8822	0.9386
Orange Peel	61.55	18.05	10.875	1.6598	1.2565	1.0364
Orange Peel	84.6	33.25	12.8375	2.5901	1.5218	1.1085
Orange Peel	167.6	103.3	16.075	6.4261	2.0141	1.2062
Orange Peel	318.8	256	15.7	16.3057	2.4082	1.1959

Cadmium : Initial Concentration 20-400 mg/l. : Biosorbent 2 g./500 ml. pH 7 : Contact time adsorption 60 min						
Biosorbent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	q (mg/g)	Ce/q	log Ce	log q
Passion Peel	18.26	1.28	4.245	0.3015	0.1072	0.6279
Passion Peel	43.325	4.85	9.6187	0.5042	0.6857	0.9831
Passion Peel	61.55	13.8	11.9375	1.1560	1.1399	1.0769
Passion Peel	84.6	26.75	14.4625	1.8496	1.4273	1.1602
Passion Peel	167.6	87.2	20.1	4.3383	1.9405	1.3032
Passion Peel	318.8	254.4	16.1	15.8012	2.4055	1.2068

Nickel: Initial Concentration 20-400 mg/l.: Biosorbent 2 g./500 ml. pH 7: Contact time adsorption 60 min						
Biosorbent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	Q (mg/g)	Ce/q	log Ce	log q
Grape Stalks	16.765	0.31	4.11375	0.075357	-0.5086	0.6142
Grape Stalks	42.975	9.8875	8.271875	1.195315	0.9951	0.9176
Grape Stalks	66.9	19.125	11.94375	1.601256	1.2816	1.0771
Grape Stalks	94.525	41.975	13.1375	3.195052	1.6230	1.1185
Grape Stalks	184.55	127.6	14.2375	8.962248	2.1059	1.1534
Grape Stalks	392.3	292.1	25.05	11.66068	2.4655	1.3988

Nickel: Initial Concentration 20-400 mg/l.: Biosorbent 2 g./500 ml. pH 7: Contact time adsorption 60 min						
Biosorbent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	Q (mg/g)	Ce/q	log Ce	log q
Grape Residues	16.765	0.3265	4.109625	0.079448	-0.4861	0.6138
Grape Residues	42.975	3.379	9.899	0.341348	0.5288	0.9956
Grape Residues	66.9	9.202	14.4245	0.637942	0.9639	1.1591
Grape Residues	94.525	8.825	21.425	0.411902	0.9457	1.3309
Grape Residues	184.55	80.45	26.025	3.091258	1.9055	1.4154
Grape Residues	392.3	259	33.325	7.771943	2.4133	1.5228

Nickel: Initial Concentration 20-400 mg/l.: Biosorbent 2 g./500 ml. pH 7: Contact time adsorption 60 min						
Biosorbent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	q (mg/g)	Ce/q	log Ce	log q
Orange Peel	16.765	3.0405	3.431125	0.886153	0.4829	0.5354
Orange Peel	42.975	4.3125	9.665625	0.446169	0.6347	0.9852
Orange Peel	66.9	11.65	13.8125	0.843439	1.0663	1.1403
Orange Peel	94.525	11.65	20.71875	0.562293	1.0663	1.3164
Orange Peel	184.55	123.85	15.175	8.16145	2.0929	1.1811
Orange Peel	392.3	290.2	25.525	11.36925	2.4627	1.4070

Nickel: Initial Concentration 20-400 mg/l.: Biosorbent 2 g./500 ml. pH 7: Contact time adsorption 60 min						
Biosorbent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	q (mg/g)	Ce/q	log Ce	log q
Passion Peel	16.765	3.204	3.39025	0.945063	0.5057	0.5302
Passion Peel	42.975	5.85	9.28125	0.630303	0.7672	0.9676
Passion Peel	66.9	12.675	13.55625	0.934993	1.1029	1.1321
Passion Peel	94.525	12.675	20.4625	0.619426	1.1029	1.3110
Passion Peel	184.55	125.1	14.8625	8.417157	2.0973	1.1721
Passion Peel	392.3	268.1	31.05	8.634461	2.4283	1.4921

Zinc: Initial Concentration 20-400 mg/l.: Biosorbent 2 g./500 ml. pH 5: Contact time adsorption 60 min						
Biosorbent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	q (mg/g)	Ce/q	log Ce	log q
Grape Stalks	21.2065	5.15	4.014125	1.28297	0.7118	0.6036
Grape Stalks	50.9625	27.4975	5.86625	4.687407	1.4393	0.7684
Grape Stalks	80.305	47.83	8.11875	5.891301	1.6797	0.9095
Grape Stalks	96.615	68.8075	6.951875	9.897689	1.8376	0.8421
Grape Stalks	192.305	174.945	4.34	40.30991	2.2429	0.6375
Grape Stalks	388.32	362.57	6.4375	56.32155	2.5594	0.8087

Zinc : Initial Concentration 20-400 mg/l. : Biosorbent 2 g./500 ml. pH 5 : Contact time adsorption 60 min						
Biosorbent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	q (mg/g)	Ce/q	log Ce	log q
Grape Residues	21.2065	2.5	4.676625	0.534574	0.3979	0.6699
Grape Residues	50.9625	24.16125	6.700313	3.605988	1.3831	0.8261
Grape Residues	80.305	13.9725	16.58313	0.842573	1.1453	1.2197
Grape Residues	96.615	37.1	14.87875	2.493489	1.5694	1.1726
Grape Residues	192.305	147.12	11.29625	13.02379	2.1677	1.0529
Grape Residues	388.32	337.21	12.7775	26.39092	2.5279	1.1064

Zinc: Initial Concentration 20-400 mg/l.: Biosorbent 2 g./500 ml. pH 5: Contact time adsorption 60 min						
Biosorbent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	q (mg/g)	Ce/q	log Ce	log q
Orange Peel	21.2065	3.3415	4.46625	0.748167	0.5239	0.6499
Orange Peel	50.9625	20.53625	7.606563	2.699807	1.3125	0.8812
Orange Peel	80.305	36.3825	10.98063	3.313334	1.5609	1.0406
Orange Peel	96.615	57.9875	9.656875	6.004789	1.7633	0.9848
Orange Peel	192.305	153.435	9.7175	15.78955	2.1859	0.9876
Orange Peel	388.32	339.97	12.0875	28.12575	2.5314	1.0823

Zinc: Initial Concentration 20-400 mg/l.: Biosorbent 2 g./500 ml. pH 5: Contact time adsorption 60 min						
Biosorbent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	q (mg/g)	Ce/q	log Ce	log q
Passion Peel	21.2065	3.285	4.480375	0.733198	0.5165	0.6513
Passion Peel	50.9625	20.46	7.625625	2.683059	1.3109	0.8823
Passion Peel	80.305	34.5725	11.43313	3.023888	1.5387	1.0582
Passion Peel	96.615	57.4975	9.779375	5.879466	1.7596	0.9903
Passion Peel	192.305	156.4	8.97625	17.42376	2.1942	0.9531
Passion Peel	388.32	334.28	13.51	24.74315	2.5241	1.1307

ตารางข้อมูลการทดลองอิทธิพลของ pH

Cadmium: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent 2 g./500 ml. Contact time adsorption: 60 min: Biosorbent: Passion Peel						
pH	Co(mg/l)	Ce(mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	Removal (%)	pH _{initial}	pH _{final}
2	45.39	44.99	0.41	0.88	2.01	2.09
3	45.39	15.12	30.27	66.68	3.11	3.36
5	45.39	7.15	38.23	84.23	5.04	5.74
7	45.39	6.27	39.12	86.17	7.04	4.96
9	45.39	6.56	38.83	85.54	9.23	8.69

Cadmium: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent 0 g./500 ml. (Blank) Contact time adsorption: 60 min: Biosorbent: Passion Peel						
pH	Co(mg/l)	Ce(mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	Removal (%)	pH _{initial}	pH _{final}
2	45.84	48.92	-3.08	-6.72	2.08	2.15
3	45.84	46.73	-0.89	-1.95	3.13	2.97
4	45.84	44.97	0.86	1.89	4.06	3.94
5	45.84	44.71	1.13	2.46	5.07	6.04
6	45.84	46.36	-0.51	-1.13	6.15	5.71
7	45.84	44.78	1.05	2.30	7.02	5.36
8	45.84	43.62	2.21	4.83	8.10	8.21
9	45.84	31.55	14.29	31.17	9.18	8.81
10	45.84	3.67	42.16	91.98	10.01	10.67

Nickel: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent 2 g./500 ml. Contact time adsorption: 60 min: Biosorbent: Passion Peel						
pH	Co(mg/l)	Ce(mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	Removal (%)	pH _{initial}	pH _{final}
2	52.13	46.39	5.74	11.01	2.1	2.9
3	52.13	21.49	30.64	58.77	3.2	3.7
5	52.13	14.84	37.28	71.52	5.4	4.2
7	52.13	14.16	37.97	72.83	7.0	5.1
9	52.13	30.3	21.83	41.87	9.2	8.0

Nickel: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent 0 g./500 ml. (Blank) Contact time adsorption: 60 min: Biosorbent: Passion Peel						
pH	Co(mg/l)	Ce(mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	Removal (%)	pH _{initial}	pH _{final}
2	51.97	52.57	-0.59	-1.14	2.2	2.9
3	51.97	52.49	-0.51	-0.99	2.9	2.9
4	51.97	52.52	-0.54	-1.04	3.8	3.6
5	51.97	50.92	1.05	2.02	5.1	4.3
6	51.97	51.47	0.5	0.96	6.2	4.8
7	51.97	52.40	-0.43	-0.82	7.1	7.9
8	51.97	50.77	1.2	2.30	8.0	7.6
9	51.97	0	51.97	100	9.1	5.9
10	51.97	0	51.97	100	10.3	10.1

Zinc: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent 2 g./500 ml. Contact time adsorption: 60 min: Biosorbent: Passion Peel						
pH	Co(mg/l)	Ce(mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	Removal (%)	pH _{initial}	pH _{final}
2	53.19	48.89	4.30	8.09	2.3	2.5
3	53.19	28.42	24.77	46.56	3.1	3.6
5	53.19	22.77	30.41	57.17	5.2	4.4
7	53.19	36.26	16.92	31.82	6.9	7.6
9	53.19	37.40	15.78	29.68	9.2	7.2

Zinc: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent 0 g./500 ml. (Blank) Contact time adsorption: 60 min: Biosorbent: Passion Peel						
pH	Co(mg/l)	Ce(mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	Removal (%)	pH _{initial}	pH _{final}
2	54.07	50.82	3.24	6.00	2.3	2.9
3	54.07	49.38	4.68	8.66	3.2	3.4
4	54.07	53.75	0.31	0.58	4.2	4.1
5	54.07	50.16	3.90	7.22	5.1	5.0
6	54.07	51.50	2.57	4.75	6.3	5.9
7	54.07	42.86	11.20	20.71	7.2	8.1
8	54.07	0	54.07	100	8.3	7.9
9	54.07	0	54.07	100	9.2	8.8
10	54.07	5.24	48.82	90.29	10.1	9.8

ตารางข้อมูลการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิ

Cadmium: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml. Contact Time adsorption: 1 hr. – pH 7: Incubator shaker: 200 rpm.				
Temperature	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	Q _{Adsorption} (mg/g)
10 °C	49.93	23.23	26.70	6.68
20 °C	49.93	17.35	32.58	8.14
30 °C	52.09	10.08	42.01	10.50
40 °C	52.09	10.59	41.50	10.38

Nickel: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml. Contact Time adsorption: 1 hr. – pH 7: Incubator shaker: 200 rpm.				
Temperature	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	Q _{Adsorption} (mg/g)
10 °C	45.08	22.38	22.70	5.67
20 °C	45.08	20.74	24.34	6.08
30 °C	46.24	16.10	30.14	7.54
40 °C	46.24	14.78	31.46	7.87

Zinc: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml. Contact Time adsorption: 1 hr. - pH 5: Incubator shaker: 200 rpm.				
Temperature	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	Q _{Adsorption} (mg/g)
10 °C	50.69	29.52	21.18	5.29
20 °C	50.69	29.25	21.44	5.36
30 °C	50.16	25.99	24.17	6.04
40 °C	50.16	27.08	23.07	5.77

ตารางข้อมูลการทดลองอิทธิพลสารละลาย Desorption

Cadmium: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml. Contact Time: Adsorption 1 hr./Desorption 0.5 hr.: pH 7: Reagent desorption 0.1 M.							
Reagent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	C _{adsorp} (mg/l)	C _{desorp} (mg/l)	q _{adsorp} (mg/g)	q _{desorp} (mg/g)	desorption(%)
HCl	51.71	10.05	41.66	36.12	10.41	9.03	86.71
HNO ₃	51.71	12.67	39.05	36.58	9.76	9.14	93.68
NaCl	51.71	16.04	35.67	24.98	8.92	6.24	70.03
CaCl ₂	57.88	14.76	43.12	41.52	10.78	10.38	96.28

Nickel: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml. Contact Time: Adsorption 1 hr./Desorption 0.5 hr.: pH 7: Reagent desorption 0.1 M.							
Reagent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	C _{adsorp} (mg/l)	C _{desorp} (mg/l)	q _{adsorp} (mg/g)	q _{desorp} (mg/g)	desorption(%)
HCl	54.77	29.52	25.24	25.55	6.31	6.38	101.22
HNO ₃	54.77	26.64	28.13	28.74	7.03	7.18	102.19
NaCl	54.77	26.99	27.77	14.37	6.94	3.59	51.74
CaCl ₂	54.77	27.66	27.10	23.06	6.77	5.76	85.10

Zinc: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml. Contact Time: Adsorption 1 hr./Desorption 0.5 hr.: pH 5: Reagent desorption 0.1 M.							
Reagent	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	C _{adsorp} (mg/l)	C _{desorp} (mg/l)	q _{adsorp} (mg/g)	q _{desorp} (mg/g)	desorption(%)
HCl	51.56	27.24	24.32	25.93	6.08	6.48	106.62
HNO ₃	51.56	26.96	24.59	26.36	6.14	6.59	107.17
NaCl	51.56	24.41	27.15	27.83	6.78	6.95	102.51
CaCl ₂	51.56	24.36	27.19	27.80	6.79	6.95	102.26

ตารางข้อมูลการทดลองอิทธิพลเวลาสัมผัส Desorption

Cadmium: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml. Contact Time Adsorption: 60 min.: Contact Time Desorption: 0-60 min. Reagent desorption: HNO ₃ 0.1 M.							
Time(min)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	C _{adsorp} (mg/l)	C _{desorp} (mg/l)	q _{adsorp} (mg/g)	q _{desorp} (mg/g)	desorption(%)
5	51.71	12.67	39.05	37.12	9.76	9.28	95.08
10	51.71	12.67	39.05	36.63	9.76	9.16	93.82
30	51.71	12.67	39.05	36.58	9.76	9.14	93.68
60	51.71	12.67	39.05	36.94	9.76	9.24	94.61

Nickel: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml. Contact Time Adsorption: 60 min.: Contact Time Desorption: 0-60 min. Reagent desorption: HNO ₃ 0.1 M.							
Time(min)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	C _{adsorp} (mg/l)	C _{desorp} (mg/l)	q _{adsorp} (mg/g)	q _{desorp} (mg/g)	desorption(%)
5	54.77	26.64	28.13	25.22	7.03	6.31	89.66
10	54.77	26.64	28.13	25.28	7.03	6.32	89.85
30	54.77	26.64	28.13	25.63	7.03	6.41	91.09
60	54.77	26.64	28.13	25.25	7.03	6.31	89.76

Zinc: Initial Concentration 50 mg/l.: Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml. Contact Time Adsorption: 60 min.: Contact Time Desorption: 0-60 min. Reagent desorption: HNO ₃ 0.1 M.							
Time(min)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	C _{adsorp} (mg/l)	C _{desorp} (mg/l)	q _{adsorp} (mg/g)	q _{desorp} (mg/g)	desorption(%)
5	51.56	26.96	24.60	25.93	6.15	6.48	105.43
10	51.56	26.96	24.60	26.15	6.15	6.54	106.30
30	51.56	26.96	24.60	27.84	6.15	6.96	113.16
60	51.56	26.96	24.60	27.81	6.15	6.95	113.05

ตารางข้อมูลการทดลองอิทธิพลการมีอยู่ร่วมกันของโลหะหนัก (Cd+Ni+Zn)

Cadmium: Initial Concentration 50 mg/l. - Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml.								
Contact Time Adsorption: 60 min.: Contact Time Desorption: 30 min.								
pH 5: Reagent desorption: HNO ₃ 0.1 M.								
Cycle	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	C _{Desorption} (mg/l)	Q _{Adsorption} (mg/g)	Q _{Desorption} (mg/g)	pH _{Initial}	pH _{Final}
1	52.23	32.22	20.01	22.41	5.00	5.60	5.1	4.5
2	52.23	41.03	11.20	10.58	2.80	2.64	5.0	3.1
3	52.23	40.72	11.51	9.90	2.87	2.47	5.2	3.4
Nickel: Initial Concentration 50 mg/l. - Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml.								
Contact Time Adsorption: 60 min.: Contact Time Desorption: 30 min.								
pH 5: Reagent desorption: HNO ₃ 0.1 M.								
Cycle	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	C _{Desorption} (mg/l)	Q _{Adsorption} (mg/g)	Q _{Desorption} (mg/g)	pH _{Initial}	pH _{Final}
1	57.75	37.77	19.97	13.43	4.99	3.35	5.1	4.5
2	57.75	47.89	9.85	2.63	2.46	0.65	5.0	3.1
3	57.75	47.21	10.54	3.15	2.63	0.78	5.2	3.4
Zinc: Initial Concentration 50 mg/l. - Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml.								
Contact Time Adsorption: 60 min.: Contact Time Desorption: 30 min.								
pH 5 : Reagent desorption : HNO ₃ 0.1 M.								
Cycle	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	C _{Desorption} (mg/l)	Q _{Adsorption} (mg/g)	Q _{Desorption} (mg/g)	pH _{Initial}	pH _{Final}
1	52.01	34.52	17.48	23.38	4.37	5.84	5.1	4.5
2	52.01	42.64	9.37	9.91	2.34	2.47	5.0	3.1
3	52.01	42.20	9.80	10.24	2.45	2.56	5.2	3.4

ตารางข้อมูลการทดลองอิทธิพล Adsorption / Desorption

Cadmium: Initial Concentration 70 mg/l. - Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml.								
Contact Time Adsorption: 60 min.: Contact Time Desorption : 30 min.								
Reagent desorption: HNO ₃ 0.1 M								
Cycle	Co(mg/l)	C _e (mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	C _{Desorption} (mg/l)	Q _{Adsorption} (mg/g)	Q _{Desorption} (mg/g)	pH _{initial}	pH _{final}
1	77.39	16.10	61.29	60.48	15.32	15.12	7.0	6.2
2	77.39	28.35	49.03	51.26	12.25	12.81	7.0	6.5
3	77.39	24.91	52.47	50.90	13.11	12.72	7.2	6.8
4	77.39	37.98	39.40	38.18	9.85	9.54	7.2	4.8
5	77.39	24.74	52.65	50.73	13.16	12.68	7.1	6.7
Nickel: Initial Concentration 120 mg/l. - Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml.								
Contact Time Adsorption: 60 min.: Contact Time Desorption: 30 min.								
Reagent desorption: HNO ₃ 0.1 M								
Cycle	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	C _{Desorption} (mg/l)	Q _{Adsorption} (mg/g)	Q _{Desorption} (mg/g)	pH _{initial}	pH _{final}
1	160.87	102.09	49.10	47.90	12.27	11.97	6.8	6.4
2	160.87	139.72	16.41	17.14	4.10	4.28	6.7	3.5
3	160.87	132.60	35.96	24.86	8.99	6.21	6.9	3.9
4	160.87	130.51	34.21	23.35	8.55	5.83	6.8	4.1
5	160.87	120.30	43.41	39.20	10.85	9.80	6.8	6.3
Zinc: Initial Concentration 54 mg/l. - Biosorbent: Passion Fruit Peel 2g./ 500 ml.								
Contact Time Adsorption: 60 min.: Contact Time Desorption: 30 min.								
Reagent desorption : HNO ₃ 0.1 M								
Cycle	Co(mg/l)	C _e (mg/l)	C _{Adsorption} (mg/l)	C _{Desorption} (mg/l)	Q _{Adsorption} (mg/g)	Q _{Desorption} (mg/g)	pH _{initial}	pH _{final}
1	57.55	14.64	40.14	35.29	10.03	8.82	5.2	4.4
2	57.55	32.51	25.04	17.88	6.26	4.47	5.1	3.0
3	57.55	30.24	27.31	18.81	6.82	4.70	5.0	3.1
4	57.55	32.31	25.24	16.79	6.31	4.19	5.1	2.8
5	57.55	33.84	23.70	15.53	5.92	3.88	5.2	3.2

ตารางข้อมูลการทดลองใน REACTOR

Heavy metal: Cadmium – Biosorbent: Passion Fruit Peel – Volume 5 lites						
Contact Time Adsorption: 60 min.: Contact Time Desorption: 30 min.						
pH 7: Reagent desorption: HNO ₃ 0.1 M.						
Initial Concentration	Biosorbent (g.)	Cycle	Co (mg/l)	Ce _(Min) (mg/l)	Ce _(Max) (mg/l)	Ce _(Average) (mg/l)
10 mg/l.	119.85 g.	Cycle 1	9.48	2.22	2.26	2.24
		Cycle 2	9.48	3.94	3.95	3.94
2 mg/l.	23.68 g.	Cycle 1	2.06	0.016	0.017	0.0165
		Cycle 2	2.06	0.198	0.076	0.137

Heavy metal: Nickel – Biosorbent: Passion Fruit Peel – Volume 5 lites						
Contact Time Adsorption: 60 min.: Contact Time Desorption: 30 min.						
pH 7: Reagent desorption: HNO ₃ 0.1 M.						
Initial Concentration	Biosorbent (g.)	Cycle	Co (mg/l)	Ce _(Min) (mg/l)	Ce _(Max) (mg/l)	Ce _(Average) (mg/l)
10 mg/l.	43.65 g.	Cycle 1	8.85	0.705	0.835	0.77
		Cycle 2	8.85	Non-Detection	Non-Detection	Non-Detection
2 mg/l.	-	Cycle 1	-	-	-	-
		Cycle 2	-	-	-	-

Heavy metal: Zinc – Biosorbent: Passion Fruit Peel – Volume 5 lites						
Contact Time Adsorption: 60 min.: Contact Time Desorption: 30 min.						
pH 5: Reagent desorption: HNO ₃ 0.1 M.						
Initial Concentration	Biosorbent (g.)	Cycle	Co (mg/l)	Ce _(Min) (mg/l)	Ce _(Max) (mg/l)	Ce _(Average) (mg/l)
10 mg/l.	9.37 g.	Cycle 1	9.67	7.58	7.71	7.65
		Cycle 2	9.67	5.19	5.32	5.26
2 mg/l.	-	Cycle 1	-	-	-	-
		Cycle 2	-	-	-	-