

UTILIZATION OF EUCALYPTUS BARK WASTE FOR RECOVERY OF
COPPER AND LEAD

Miss Phussadee Patnukao

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Environmental Management

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

การใช้เปลือกยูคาลิปตัสเหลือทิ้ง เพื่อคืนสภาพทองแดงและตะกั่ว



นางสาว ผุสดี แพทย์นุเคราะห์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

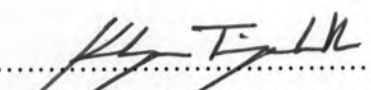
ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

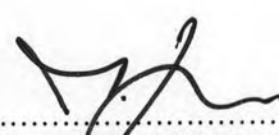
501079

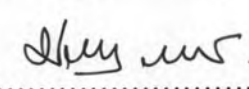
Thesis Title UTILIZATION OF EUCALYPTUS BARK WASTE FOR
RECOVERY OF COPPER AND LEAD
By Miss Phussadee Patnukao
Field of Study Environmental Management
Thesis Advisor Associate Professor Prasert Pavasant, Ph.D.

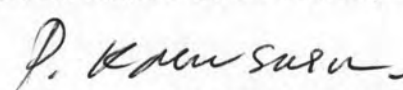
Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of
the Requirements for the Doctoral Degree

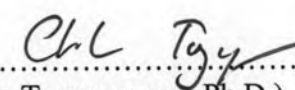

..... Dean of the Graduate School
(Assistant Professor M.R. Kalaya Tingsabadh, Ph.D.)

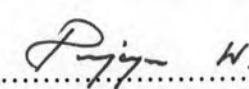
THESIS COMMITTEE

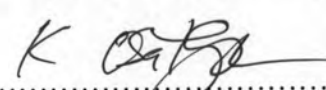

..... Chairman
(Manaskorn Rachakornkij, Ph.D.)


..... Thesis Advisor
(Associate Professor Prasert Pavasant, Ph.D.)


..... Member
(Assistant Professor Pairat Kaewsarn, Ph.D.)


..... Member
(Chantira Tongcumpou, Ph.D.)


..... Member
(Punjaporn Weschayanwiwat, Ph.D.)


..... Member
(Assistant Professor Khemarath Osathaphan, Ph.D.)

ผุสดี แพทย์นุเคราะห์ : การใช้เปลือกยูคาลิปตัสเหลือทิ้ง เพื่อคืนสภาพทองแดงและตะกั่ว.

(UTILIZATION OF EUCALYPTUS BARK WASTE FOR RECOVERY OF COPPER AND LEAD) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ประเสริฐ ภาสันต์, 166 หน้า.

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ การศึกษาคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกยูคาลิปตัสโดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้น และการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์ร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลายในการคืนสภาพโลหะทองแดงจากโลหะหนักผสมระหว่างทองแดงและตะกั่ว ในการศึกษาคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกยูคาลิปตัสโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ผลการศึกษาแสดงว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกมีค่า 500 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรของวัตถุติดต่อกับกรดฟอสฟอริก (อัตราการแช่) เท่ากับ 1 ต่อ 1 และระยะเวลากระตุ้น 1.5 ชั่วโมง ซึ่งจะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 1,226 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าเมทิลีนบลูนัมเบอร์เท่ากับ 425.5 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ยังให้ค่าพื้นที่ผิวแบบบีอีทีสูงสุด มีค่าเท่ากับ 1,457 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์มาใช้ในกระบวนการดูดซับทองแดงและตะกั่ว การทดลองแสดงว่า ความสามารถในการดูดซับสูงสุดในการดูดซับทองแดงและตะกั่ว จะเกิดที่ค่าความเป็นกรดค่าเท่ากับ 5 การดูดซับเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 45 นาทีตลอดทั้งความเข้มข้นของโลหะหนัก (0.1-10 มิลลิโมล) ข้อมูลทางจลศาสตร์ที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองทางจลศาสตร์ชนิด pseudo second-order โดยที่ ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล และค่าคงที่อัตราเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ค่าไอโซเทอมของการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองสมดุลการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich ในช่วงอุณหภูมิ 25-60 องศาเซลเซียส ของการทดลอง ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เกิดในช่วงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะให้ค่าในการดูดซับทองแดงและตะกั่วเท่ากับ 0.85 และ 0.89 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ ค่าเอนทัลปีของการดูดซับของทองแดงและตะกั่วมีค่าเท่ากับ 43.26 และ 58.77 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ ค่าความเป็นบวกของค่าเอนทัลปี บ่งบอกว่าการดูดซับดังกล่าวมีลักษณะของการดูดซับแบบดูดความร้อน การศึกษาการสกัดโลหะหนักด้วยกรดซิตริก กรดฟอสฟอริก และกรดซัลฟิวริก พบว่าระยะเวลาในการสกัดมีค่าน้อยกว่า 60 นาที ที่กรดซิตริกเข้มข้น 1 นอร์มอล โดยสภาวะนี้สามารถสกัดโลหะหนักหนึ่งองค์ประกอบได้เกือบ 100% แต่ในการแยกโลหะหนักระหว่างสององค์ประกอบให้ได้มากที่สุดนั้นควรใช้กรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1 นอร์มอล เนื่องจากสภาวะนี้จะสกัดเฉพาะทองแดงเท่านั้น และยังคงให้ตะกั่วคงค้างอยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ในการทดลองกับระบบการดูดซับแบบต่อเนื่อง พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดความยาวของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ หรือลดอัตราการไหลของน้ำ โดยแบบจำลอง BDST และ Thomas สามารถนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมของการดูดซับในหอดูดซับได้

สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต..... ผุสดี แพทย์นุเคราะห์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ประเสริฐ ภาสันต์

4789703020 : MAJOR ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

KEY WORD: ACTIVATED CARBON / ADSORPTION / HEAVY METAL / ISOTHERM
 PHUSSADEE PATNUKAO : UTILIZATION OF EUCALYPTUS BARK WASTE
 FOR RECOVERY OF COPPER AND LEAD. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
 PRASERT PAVASANT, Ph.D., 166 pp.

This dissertation comprised two main parts which are the characterization of activated carbon obtained from eucalyptus bark by phosphoric acid activation and the application of activated carbon along with solvent extraction in the recovery of copper from binary mixture between copper and lead. In the characterization part, the optimum temperature for the activation by phosphoric acid was 500°C at the weight by volume ratio of raw material and phosphoric acid (impregnation ratio) of 1:1 and activation time of 1.5 h. This condition gave the highest iodine number at 1,226 mg g⁻¹, methylene number at 425.5 mg g⁻¹ and also highest BET surface area of 1,457 m² g⁻¹. The activated carbon product was tested for its adsorption capacities for Cu(II) and Pb(II). Experiments demonstrated that both Cu(II) and Pb(II) were best adsorbed at pH 5 where the adsorption reached equilibrium within 45 minutes for the whole range of initial heavy metal concentrations investigated here (0.1-10 mM). The adsorption kinetics followed the pseudo second-order model where equilibrium adsorption capacities and adsorption rate constants increased with initial heavy metal concentrations. The adsorption isotherm followed Langmuir better than Freundlich models within the temperature range of 25-60°C. The highest maximum adsorption capacities (q_m) occurred at 60°C where q_m for Cu(II) and Pb(II) were 0.85 and 0.89 mmol g⁻¹, respectively. The enthalpies of adsorption of Cu(II) and Pb(II) were 43.26 and 58.77 kJ mol⁻¹, respectively. The positive enthalpy of adsorption indicated endothermic nature of adsorption. The desorption/extraction of metals from the activated carbon was investigated using a few common extraction agents, i.e. citric, phosphoric and sulfuric acids. The results illustrated that the extraction process was completed in 60 min where citric acid at 1N was the best desorbing agent with almost 100% extraction of the bound metals. Sulfuric acid (1N), on the other hand, was suitable for the recovery of Cu(II) and Pb(II) from binary system as sulfuric acid could only extract Cu(II) from the activated carbon while leaving Pb(II) on the carbon surface. This therefore allowed effective separation of Cu(II) and Pb(II) from the adsorption column. In fixed bed experiments, the sorption capacity increased with increasing bed depth of the column or decreasing wastewater flow rate. The BDST and Thomas models could well predict the performance of the adsorption column for both metals.

Field of study Environmental Management

Student's signature.....

พรชัย นพคุณปกรณ์ น.
 Prachai Nopkornon N.

Academic year 2007

Advisor's signature.....

Prasert Pavasant

ACKNOWLEDGEMENTS

This thesis will never have been completed without the help and support of many people and organizers who are gratefully acknowledged here. Firstly, I would like to express my sincere gratitude to Associate Professor Prasert Pavasant, my advisor, for his suggestions, guidance, warm encouragement and generous supervision throughout my doctoral program. In addition, I desire to thank Dr. Manaskorn Rachakornkij, Assistant Professor Pairat Kaewsarn, Dr. Chantra Tongcumpou, Dr. Punjaporn Weschayanwivat, and Assistant Professor Khemarath Osathaphan for participating as my dissertation committee.

The authors would like to acknowledge the financial support from the 90th Anniversary of Chulalongkorn University fund (Ratchadphiseksomphot Endowment Fund). The eucalyptus bark was kindly provided by Advance Ago Co., Ltd., Prachinburi province, Thailand. In addition, I would like to gratefully thank the National Center of Excellence for Environmental and Hazardous Waste Management that helped about the laboratory.

Moreover, special thanks should be made for all members in the Environmental and Biochemical Engineering Laboratories for their pleasantness and encouragement. Especially I am obliged to Mrs. Khanidtha Meevasana who gives suggestion me.

Of course, I would like to express me sincere my sincere indebtedness to my family for their worth supports throughout my study.

CONTENTS

	Page
ABSTRACT IN THAI.....	iv
ABSTRACT IN ENGLISH.....	v
ACKNOWLEDGEMENTS.....	vi
CONTENTS.....	vii
LIST OF TABLES.....	xi
LIST OF FIGURES.....	xiv
ABBREVIATIONS.....	xvii
CHAPTER 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Motivations	1
1.2 Objectives	2
1.3 Scopes of the research.....	3
CHAPTER 2 THEORY AND LITERATURE REVIEWS.....	5
2.1 Activated carbon.....	5
2.2 Raw materials for the production of activated carbon.....	5
2.3 Production of activated carbon	6
2.3.1 Physical activation	6
2.3.1.1 Carbonization	6
2.3.1.2 Activation.....	7
2.3.2 Chemical activation	7
2.4 Activated carbon from eucalyptus	8
2.5 Phosphoric acid activation	8
2.6 Adsorption theory.....	9
2.6.1 Mechanism of adsorption onto the porous adsorbent	9
2.6.2 Type of adsorption.....	9
2.6.2.1 Physical adsorption	9
2.6.2.2 Chemical adsorption.....	10
2.6.3 Adsorption equation	10
2.6.3.1 Langmuir equation	10

2.6.3.2 Freundlich equation	11
2.7 Adsorption of heavy metals	11
2.7.1 pH.....	12
2.7.2 Adsorption kinetics	12
2.7.3 Adsorption isotherm	13
2.8 Adsorption in column experiment.....	13
2.8.1 Data analysis.....	14
2.9 Desorption study.....	14
CHAPTER 3 RESEARCH METHODOLOGY.....	35
3.1 Material.....	35
3.1.1 Equipments	35
3.1.2 Glassware	36
3.1.3 Chemical reagents	36
3.2 Preparation of activated carbon.....	37
3.2.1 Eucalyptus bark collection and preparation	37
3.2.2 Analysis of activated carbon properties	38
3.3 Sorption studies.....	40
3.3.1 Preparation of synthetic wastewater	40
3.3.2 Effect of pH for adsorption	41
3.3.3 Determination of adsorption kinetics and adsorption isotherm of single component	41
3.3.4 Adsorption of single component in column experiment	42
3.3.5 Adsorption of binary components in column experiment	42
3.4 Desorption studies	42
3.4.1 Type of solvent for desorption	42
3.4.2 Effect of solvent concentration	42
3.4.3 Effect of contact time	43
3.4.4 Effect of temperature	43
CHAPTER 4 SYNTHESIS OF ACTIVATED CARBON.....	46
4.1 Raw materials.....	46
4.2 Experimental.....	46

4.3 Optimal activation temperature	46
4.3.1 Yield and bulk density	46
4.3.2 Ash content	47
4.3.3 Specific surface area	47
4.3.4 Pore structure	48
4.3.5 Iodine and methylene blue numbers	49
4.4 Optimal weight by volume ratio of eucalyptus bark and phosphoric acid (impregnation ratio)	49
4.4.1 Yield and bulk density	50
4.4.2 Ash content	50
4.4.3 Specific surface area	50
4.4.4 Pore structure	51
4.4.5 Iodine and methylene blue numbers	52
4.5 Optimal activation time.....	52
4.5.1 Yield and bulk density.....	53
4.5.2 Ash content	53
4.5.3 Specific surface area.....	53
4.5.4 Pore structure	54
4.5.5 Iodine and methylene blue numbers.....	54
4.5 Concluding remarks.....	54

CHAPTER 5 METAL ION ADSORPTION AND DESORPTION IN

BATCH EXPERIMENTS.....	73
5.1 Adsorption studies.....	73
5.1.1 Effect of pH for adsorption.....	73
5.1.2 Adsorption kinetics.....	74
5.1.3 Adsorption isotherm.....	75
5.1.4 Effect of temperature on metal uptake.....	76
5.1.5 Enthalpy of adsorption.....	77
5.1.6 Relationship between functional groups and heavy metals adsorption.....	78
5.2 Desorption studies.....	79
5.2.1 Type of solvent for desorption	79

5.2.2 Effect of solvent concentration	82
5.2.3 Effect of contact time	83
5.2.4 Effect of temperature.....	85
5.3 Properties of activated carbon after desorption.....	85
5.3.1 Fourier Transform Infrared (FT-IR).....	85
5.3.2 X-ray fluorescence (XRF).....	86
5.3.2 Iodine and methylene blue numbers.....	87
5.3.3 Specific surface area.....	87
5.4 Concluding remarks.....	87
CHAPTER 6 METAL ION ADSORPTION IN COLUMN	
EXPERIMENT.....	119
6.1 Single-species metal ion adsorption in column experiment.....	119
6.1.1 Effect of bed depth.....	119
6.1.2 Effect of flow rate.....	120
6.1.3 Experiment VS Thomas model.....	121
6.1.4 Experiment VS the bed depth-service-time model (DBST).....	122
6.2 Binary-species metal ion adsorption in column experiment.....	124
6.3 Concluding remarks.....	125
CHAPTER 7 CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS.....	137
7.1 Conclusions.....	137
7.2 Contributions.....	138
7.3 Recommendations / Future works.....	138
REFERENCES.....	140
APPENDICES.....	150
BIOGRAPHY.....	166

LIST OF TABLES

		Page
Table 2.1	Porous structure of activated carbon.....	19
Table 2.2	Source materials for activated carbon	20
Table 2.3	Characteristics of various conventional raw materials used for making activated carbon	21
Table 2.4	Advantages and disadvantages of physical and chemical activations.....	22
Table 2.5	Summary of recent works on the conversion of agricultural based- raw materials to activated carbon	23
Table 2.6	Eucalyptus-based activated carbon obtained from other reports....	26
Table 2.7	Phosphoric acid-derived activated carbon obtained from other reports	27
Table 2.8	Distinction between physical adsorption and chemical adsorption.	28
Table 2.9	Effects of pH on various adsorption systems	29
Table 2.10	Literature reviews on the kinetic model of various adsorption systems.....	30
Table 2.11	Reviews on the adsorption isotherm of various adsorption systems.....	31
Table 3.1	Determination of impregnation ratio of activated carbon.....	44
Table 4.1	Analysis of eucalyptus bark.....	56
Table 4.2	Characteristics of activated carbon form eucalyptus bark at various activation temperatures.....	57
Table 4.3	Properties of activated carbon prepared at various impregnation ratios.....	58
Table 4.4	Properties of activated carbon prepared at various activation times.....	59
Table 4.5	Comparison of eucalyptus-derived activated carbons obtained from this work and other reports.....	60
Table 4.6	Comparison of phosphoric acid-derived activated carbon obtained from this work and other reports.....	61

Table 5.1	Kinetic parameters of pseudo first and second-order models for single component adsorptions of Cu(II) and Pb(II) at 25 ⁰ C.....	89
Table 5.2	Langmuir and Freundlich isotherm parameters.....	90
Table 5.3	Kinetic parameters of second-order models for single component adsorptions of Cu(II) and Pb(II) at various temperatures.....	90
Table 5.4	FT-IR results from metal laden activated carbon.....	91
Table 5.5	Desorption of Cu(II) and Pb(II) (single component, solvent concentration = 1 N, T = 75 ⁰ C, and shaking rate = 200 rpm).....	92
Table 5.6	Desorption efficiency of Cu and Pb from Cu-Pb binary component (solvent concentration = 1 N, T = 75 ⁰ C and shaking rate = 200 rpm).....	92
Table 5.7	Desorption of single and binary component at various temperatures (with 1 N citric acid and shaking rate = 200 rpm).....	93
Table 5.8	FT-IR results from original activated carbon, Cu(II)-adsorption and Cu(II)-desorption.....	94
Table 5.9	FT-IR results from original activated carbon, Pb(II)-adsorption and Pb(II)-desorption.....	95
Table 5.10	FT-IR results from original activated carbon, binary-adsorption and binary-desorption.....	96
Table 5.11	Cu(II) and Pb(II) adsorption capacities of various agricultural-based adsorbents.....	97
Table 6.1	Effects of flow rate and bed depth on the total uptake quantity (m_{total}), equilibrium uptake (q_{column}) and the total removal percentage.....	126
Table 6.2	Length of mass transfer zone (Z) at various column lengths and flow rates.....	127
Table 6.3	Parameters predicted from Thomas model at different flow rates and bed depths.....	128
Table 6.4	BDST model parameters for sorption of Cu and Pb ions at different bed depths and flow rates.....	129
Table 6.5	Adsorption of Cu(Cu-Pb) and Pb(Cu-Pb) for the adsorption at flow rates of 2.5 ml min ⁻¹ at influent concentration of 0.15 mmol l ⁻¹ and bed depth of 4.5 cm.....	130

Table 6.6	Comparison between adsorption from single and binary adsorption.....	131
-----------	---	-----

LIST OF FIGURES

	Page
Figure 2.1 Structure of activated carbon.....	33
Figure 2.2 Flow diagrams for activated carbon production	33
Figure 2.3 Adsorption operations with solid-particle sorbents	34
Figure 2.4 Langmuir adsorption isotherm	34
Figure 2.5 Freundlich adsorption isotherm	34
Figure 3.1 Column configurations.....	45
Figure 3.2 Experimental setup for adsorption.....	45
Figure 4.1 (a) eucalyptus bark (b) activated carbon from eucalyptus bark...	62
Figure 4.2 SEM photomicrographs of activated carbon products at various activation temperatures: (a) 350°C (b) 400°C (c) 450°C (d) 500°C (e) 550°C and (f)600°C.....	63
Figure 4.3 XRD patterns of activated carbon products at various activation temperatures: (a) 350°C (b) 400°C (c) 450°C (d) 500°C (e) 550°C and (f) 600°C.....	64
Figure 4.4 Adsorption isotherms of N ₂ at -196°C on activated carbon prepared at various activation temperatures.....	65
Figure 4.5 Effect of activation temperature on iodine number	66
Figure 4.6 SEM photomicrographs of activated carbon products at impregnation ratios of: (a) 1:0.3 (b) 1:0.5 (c) 1:0.8 (d) 1:1.0 (e) 1:2.0 and (f) 1:3.0	67
Figure 4.7 XRD patterns of activated carbon products at impregnation ratios of: (a) 1:0.3 (b) 1:0.5 (c) 1:0.8 (d) 1:1.0 (e) 1:2.0 and (f) 1:3.0.....	68
Figure 4.8 Adsorption isotherms of N ₂ at -196°C on activated carbon prepared at various impregnation ratios.....	69
Figure 4.9 SEM photomicrographs of activated carbon products at various activation times: (a) 0.5 h (b) 1.0 h (c) 1.5 h (d) 2.0 h (e) 2.5 h and (d) 3.0 h.....	70
Figure 4.10 XRD patterns of activated carbon products at various activation times: (a) 0.5 h (b) 1.0 h (c) 1.5 h (d) 2.0 h (e) 2.5 h and (d) 3.0 h..	71
Figure 4.11 Adsorption isotherms of N ₂ at -196°C on activated carbon prepared at various activation times.....	72

Figure 5.1	Effect of pH for adsorption (Initial concentration = 0.3 mmol L ⁻¹ , shaking rate = 200 rpm, 25°C).....	98
Figure 5.2	Relationship between surface charge of activated carbon and pH..	99
Figure 5.3	Adsorption kinetics (shaking rate = 200 rpm, 25°C) (a) Cu(II) (b) Pb(II)....	100
Figure 5.4	Langmuir isotherm plots for the adsorption of Cu(II) and Pb(II) onto activated carbon(shaking rate = 200 rpm, 25°C).....	101
Figure 5.5	Adsorption isotherm (a) Cu(II) (b) Pb(II).....	102
Figure 5.6	Plot of $\ln b$ versus $1/T$ for (a) Cu(II) (b) Pb(II) for the determination of adsorption enthalpy.....	103
Figure 5.7	Plots $\ln k_2$ vs. $1/T$ of (a) Cu(II) (b) Pb(II) for the determination of activation energy for adsorption.....	104
Figure 5.8	FT-IR transmission spectra (a) original activated carbon (b) Cu(II) laden activated carbon (c) Pb(II) laden activated carbon.....	105
Figure 5.9	Effect of the type of solvent for desorption Cu(II) and Pb(II) (single component, solvent concentration = 1 N, T= 75 °C and shaking rate = 200 rpm).....	106
Figure 5.10	Effect of the type of solvent for desorption Cu(Cu-Pb) and Pb(Cu-Pb) (binary component, solvent concentration = 1 N, T= 75 °C and shaking rate = 200 rpm).....	107
Figure 5.11	Effect of solvent concentration for desorption Cu(II) and Pb(II) at various concentration (single component, citric acid, 75°C and shaking rate = 200 rpm).....	108
Figure 5.12	Effect of solvent concentration for desorption Cu(Cu-Pb) and Pb(Cu-Pb) at various concentration (binary component, citric acid, 75°C and shaking rate = 200 rpm).....	109
Figure 5.13	Effect of temperature for desorption (a) Cu(II) and (b) Pb(II) (single component, 1 N citric acid, shaking rate = 200 rpm).....	110
Figure 5.14	Extraction kinetics of (a) Cu(II) and (b) Pb(II)) (single component, 1 N citric acid, shaking rate = 200 rpm).....	111
Figure 5.15	Effect of temperature for desorption Cu(Cu-Pb) (binary component, 1 N citric acid, shaking rate = 200 rpm).....	112

Figure 5.16	Extraction kinetics of Cu(Cu-Pb) (binary component, 1 N citric acid, shaking rate = 200 rpm).....	112
Figure 5.17	FT-IR transmission spectra (a) Original activated carbon (b) Cu-adsorption (c) Cu-desorption	113
Figure 5.18	FT-IR transmission spectra (a) Original activated carbon (b) Pb-adsorption (c) Pb-desorption	114
Figure 5.19	FT-IR transmission spectra (a) Original activated carbon (b) Binary-adsorption (c) Binary-desorption	115
Figure 5.20	XRF patterns for (a) Cu-adsorption (b) Cu-desorption	116
Figure 5.21	XRF patterns for (a) Pb-adsorption (b) Pb-desorption	117
Figure 5.22	XRF patterns for (a) Binary-adsorption (b) Binary-desorption	118
Figure 6.1	Breakthrough curves of (a) Cu(II) and (b) Pb(II) for the adsorption at different bed depths at influent concentration of 0.3 mmol l^{-1} and flow rate of 2.5 ml min^{-1}	132
Figure 6.2	Typical breakthrough curve for activated carbon showing the movement of the mass transfer zone according to the throughput volume.....	133
Figure 6.3	Breakthrough curves of (a) Cu(II) and (b) Pb(II) for the adsorption at different flow rates at influent concentration of 0.3 mmol l^{-1} and bed depth of 1.5 cm	134
Figure 6.4	BDST model plot for Cu(II) (a) and Pb(II) (b) at different flow rates at influent concentration of 0.3 mmol l^{-1}	135
Figure 6.5	Breakthrough curves of (a) Cu(Cu-Pb) and (b) Pb(Cu-Pb) for the adsorption at flow rates of 2.5 ml min^{-1} at influent concentration of 0.15 mmol l^{-1} and bed depth of 4.5 cm	136

ABBREVIATIONS

b	Langmuir constant ($l \text{ mmol}^{-1}$)
C	concentration of metal component (mmol l^{-1})
C_{ad}	adsorbed concentration (mmol l^{-1})
C_b	desired breakthrough concentration (mg l^{-1})
C_e	metal concentration in liquid phase at equilibrium (mmol l^{-1})
C_o	initial concentration (mmol l^{-1})
C_x	desired exhaust concentration (mmol l^{-1})
D	bed depth (cm)
D_{min}	minimum bed depth (cm)
ΔG	change in Gibbs free energy (kJ mol^{-1})
ΔH	change in enthalpy (kJ mol^{-1})
k_1	sorption rate constants for first order kinetic equation (min^{-1})
k_2	sorption rate constants for second order kinetic equation ($\text{g mmol}^{-1} \text{ min}^{-1}$)
K_F	Freundlich constant ($\text{mg}^{1-1/n} \text{ l}^{1/n} \text{ g}^{-1}$)
k_{Th}	Thomas rate constant ($\text{ml min}^{-1} \text{ mmol}^{-1}$)
$1/n$	Freundlich exponent (-)
MTZ	mass transfer zone
m_{total}	total amount of metal fed into column (mmol)
N_o	bed capacity from BDST model (mmol cm^{-3})
Q	volumetric flow rate (ml min^{-1})
q	sorbed metal per unit mass of sorbent (mmol g^{-1})
q_{column}	maximum capacity of column (mmol g^{-1})

q_e	equilibrium metal concentration per unit mass of sorbent (mmol g^{-1})
q_m	maximum amount of metal sorbed per unit mass of sorbent calculated from Langmiur plots (mmol g^{-1})
q_{Th}	the maximum solid phase concentration of the solute (mmol g^{-1})
q_{total}	total sorbed metal (mmol)
R	gas constant ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
R^2	linear regression coefficient (-)
T	absolute temperature (K)
t	time (min)
t_b	breakthrough time (min)
t_{total}	total flow time (min)
t_x	exhausted time (min)
V	volume of the metal (l)
V_{eff}	effluent volume (cm^3)
X	mass of activated carbon (g)