

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



E47291

คุณสมบัติของตะกอนตกน้ำจากเหมืองทองคำกับการขจัดตะกอนและการเคลื่อนที่ของ
โลหะหนักในดินอุทกวัฏ

นายศรีเลิศ ไบดิพันธ์รัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๐๐๑๒ ๕ ๔๒๕๗

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



E47291

คุณลักษณะตะกอนกากแร่จากเหมืองทองกับการชะละลายและการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินลูกรัง



นายศรีเลิศ โชติพันธ์รัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



4 7 8 9 7 1 0 4 2 0

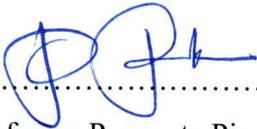
CHARACTERIZATION OF GOLD MINE TAILINGS AND HEAVY METALS LEACHING
AND TRANSPORT IN LATERITIC SOIL

Mr. Srilert Chotpantararat

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 2008
Copyright of Chulalongkorn University

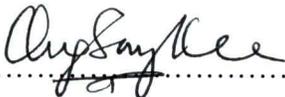
Thesis Title Characterization of Gold Mine Tailings and Heavy Metals Leaching
and Transport in Lateritic Soil
By Mr. Srilert Chotpantararat
Field of Study Environmental Management
Thesis Principal Advisor Professor Say Kee Ong, Ph.D.
Thesis Co-advisor Assistant Professor Chakkaphan Sutthirat, Ph.D.

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

 Dean of the Graduate School
(Associate Professor Pornpote Piumsomboon, Ph.D.)

THESIS COMMITTEE

 Chairman
(Chantra Tongcumpou, Ph.D.)

 Thesis Principal Advisor
(Professor Say Kee Ong, Ph.D.)

 Thesis Co-advisor
(Assistant Professor Chakkaphan Sutthirat, Ph.D.)

 External Member
(Associate Professor Kriengsak Srisuk, Ph.D.)

 Member
(Associate Professor Jin Anotai, Ph.D.)

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

ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ : คุณลักษณะตะกอนกากแร่จากเหมืองทองกับการชะละลายและการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินลูกรัง (Characterization of Gold Mine Tailings and Heavy Metals Leaching and Transport in Lateritic Soil) อ. ที่ปริกษานิพนธ์
 หลัก: ศ.ดร. Say Kee Ong, อ.ที่ปริกษาาร่วม: ผศ.ดร. จักรพันธ์ สุทธิรัตน์, 172 หน้า

การศึกษานี้ได้ประเมินการชะละลายของโลหะหนักของตะกอนกากแร่ที่เกิดจากการทำเหมืองและศึกษาการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในดินลูกรังภายใต้สภาวะพีเอชและความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ค่าความเข้มข้นของโลหะในตะกอนกากแร่ไม่เกินค่ามาตรฐานดินเพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมยกเว้นแมงกานีส อย่างไรก็ตามผลจากการชะละลายของโลหะหนักจากตะกอนกากแร่ภายใต้สภาวะพีเอช 5-6 พบตะกั่วที่ความเข้มข้นประมาณ 18 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐานของตะกั่วในน้ำดื่ม ในการศึกษาการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในคอลัมน์ดินลูกรังพบว่าตะกั่วมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุดทั้งในสภาวะพีเอช 4 และ 5 ค่าความหน่วงของการเคลื่อนตัวและความสามารถในการดูดซับของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี นิกเกิล และแมงกานีสที่พีเอช 5 มีค่าสูงกว่าที่พีเอช 4 ค่าความหน่วงในการเคลื่อนตัวเรียงลำดับจากค่าสูงสุดไปค่าต่ำสุดดังนี้ค่าความหน่วงของการเคลื่อนที่ของตะกั่วมากกว่าสังกะสี แมงกานีส และนิกเกิลตามลำดับที่พีเอช 4 และค่าความหน่วงของการเคลื่อนตัวของตะกั่วมากกว่าสังกะสี นิกเกิล และ แมงกานีส ตามลำดับที่พีเอช 5 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวของโลหะหนักมีรูปร่างไม่สมมาตรและส่วนท้ายของกราฟที่มีลักษณะยาวซึ่งแสดงให้เห็นพฤติกรรมความไม่สมดุลงในการดูดซับที่เกิดขึ้น ผลจากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง 2-site ใน HYDRUS-1D สามารถอธิบายลักษณะดังกล่าวได้ดีกว่าแบบจำลองแบบสมดุลงทั้งไอโซเทอมแบบเชิงเส้น และไอโซเทอมของแลงมัวร์ นอกจากนี้พื้นที่ในการดูดซับแบบสมดุลงมีค่าอยู่ในช่วง 30-58 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในระบบที่มีโลหะหนักอื่นๆ ได้แก่ สังกะสี นิกเกิล และ แมงกานีส อยู่ร่วมกับตะกั่ว จะส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับของตะกั่วมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดอื่นมีค่าสูงขึ้น การประยุกต์ใช้แบบจำลองแบบสมดุลงทั้งไอโซเทอมแบบเชิงเส้น และไอโซเทอมของแลงมัวร์ไม่สามารถอธิบายกราฟการเคลื่อนตัวของโลหะหนักในคอลัมน์ดินลูกรังทั้งด้านขาขึ้นและขาลงของกราฟในระบบที่มีโลหะหนัก 2 ชนิดและ 4 ชนิด สำหรับแบบจำลอง 2-site สามารถอธิบายกราฟการเคลื่อนตัวของโลหะหนักทั้งด้านขาขึ้นและส่วนเริ่มต้นของขาลงได้ดี แต่ไม่สามารถอธิบายในส่วนท้ายของกราฟดังกล่าวได้

สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต..... *ศ.ดร. Say Kee Ong*
 ปีการศึกษา 2551 ลายมือชื่ออ.ที่ปริกษานิพนธ์หลัก..... *Sy Kee Ong*
 ลายมือชื่ออ.ที่ปริกษานิพนธ์ร่วม.....

4789710420 : MAJOR ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

KEY WORDS: LATERITIC SOIL / MINE TAILINGS / HEAVY METALS / CHEMICAL NONEQUILIBRIUM / SORPTION/ TRANSPORT MODELING

SRI LERT CHOTPANTARAT: CHARACTERIZATION OF GOLD MINE TAILINGS AND HEAVY METALS LEACHING AND TRANSPORT IN LATERITIC SOIL THESIS PRINCIPAL ADVISOR: PROF. SAY KEE ONG, PH.D., THESIS CO-ADVISOR: ASST. PROF. CHAKKAPHAN SUTTHIRAT, 172 pp.

E 47291

This study evaluated the leaching/desorption of metals from mine tailings and investigated the movement of these heavy metals in mine lateritic soils under different pH and concentration conditions. Except for Mn^{2+} , the concentrations of metals in the tailings were found to be within the concentration of the Thailand Soil Standards for Habitat and Agriculture. However, leaching of metals from the tailings at pH 5-6 showed that Pb^{2+} (18 mg L^{-1}) exceeded the drinking water standard for Pb^{2+} . Using soil column studies, Pb^{2+} had the higher sorption capacity and retardation factors than those of Mn, Ni and Zn at pH 4 and 5. Retardation factors and sorption capacity of these heavy metals (i.e., Pb, Mn, Ni and Zn) at pH 5 were higher than at pH 4. The retardation factors from largest to smallest were: $Pb^{2+} > Zn^{2+} > Mn^{2+} > Ni^{2+}$ for pH 4 and $Pb^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+} > Mn^{2+}$ for pH 5. The breakthrough curves of the heavy metals showed asymmetrical shapes with long tailing, indicating the presence of chemical nonequilibrium process. The two-site nonequilibrium model of HYDRUS-1D described the experimental data better than the local equilibrium convection-dispersion model using linear and Langmuir sorption isotherms. The fractions of instantaneous sites were found to range from 30-58 %. In the presence of other metals, competition for sorption sites were observed as seen by the lower maximum sorption capacities of Pb^{2+} for increasing concentration of the secondary metals (Zn^{2+} , Ni^{2+} , and Mn^{2+}). Use of local equilibrium convection-dispersion model with linear and Langmuir isotherm did not describe the rising and declining limbs of metal concentration in binary and multi-metal systems. The two-site model (TSM) described the rising limb and initial declining limb well but could not explain the extended tailing phenomenon.

Field of study: Environmental Management

Academic year: 2008

Student's signature..... *Sri lert Chotpantarat*

Principal Advisor's signature..... *Say Kee Ong*

Co-advisor's signature..... *Chakkaphan Sutthirat*

ACKNOWLEDGEMENTS

My great respect and heartfelt appreciation go to my advisor, Prof. Dr. Say Kee Ong. I could not have completed this research without the expertise and inspirational support he provided through his invaluable comments and fruitful suggestions. I would also like to express my sincere gratitude to my co-advisor, Asst. Prof. Dr. Chakkaphan Sutthirat for his encouragement, kindness and continuous support throughout this research. I gratefully acknowledge the suggestions and valuable comments of Asst. Prof. Dr. Khemmarath Osathaphan on the tailing phenomenon and soil column packing. Furthermore, I gratefully acknowledge the valuable discussions and comments of the Committee Chairman, Dr. Chantra Tongcumpou, and the committee members, Assoc. Prof. Dr. Kriangsak Srisuk and Assoc. Prof. Dr. Jin Anotai. I would like to extend my gratitude to Dr. Manaskorn Rachakornkij, the Program Director, who encouraged me and reviewed my progress. In addition, I wish to thank the National Center of Excellence for Environmental and Hazardous Waste Management (NCE-EHWM), Chulalongkorn University, for the wonderful experiences and financial support during my study. I especially appreciate the assistance of the staff of the Center. Also, I would like to thank the Geology Department, Faculty of Science, Chulalongkorn University for providing funding throughout my study. I would like to thank my friends who helped me while I was conducting my column studies.

Finally, my most heartfelt thanks go to my parents, brother and sister for their understanding, love and encouragement. Above all, I thank the Almighty God for granting me the strength, patience, energy and perseverance to bring my research to fruition.

CONTENTS

Page

ABSTRACT (THAI).....	iv
ABSTRACT (ENGLISH).....	v
ACKNOWLEDGEMENTS.....	vi
CONTENTS.....	vii
LIST OF TABLES.....	xii
LIST OF FIGURES.....	xiv
ABBREVIATIONS.....	xviii
CHAPTER I INTRODUCTION.....	1
1.1 Rationale	1
1.2 Objectives of the Study.....	3
1.3 Hypothesis.....	3
1.4 Methodology.....	4
1.5 Organization of Dissertation.....	6
CHAPTER II BACKGROUND AND LITERATURE REVIEW.....	7
2.1 Introduction.....	7
2.2 Examples of Contaminated Mining Sites.....	7
2.3 Sorption of Heavy Metals onto Soil.....	9
2.3.1 Sorption isotherm.....	9
2.3.2 Factors affecting metal sorption.....	11
2.3.2.1 Properties of soils.....	11

	Page
2.3.2.2 Properties of aqueous solutions.....	12
2.3.3 Sorption of single heavy metals onto soils.....	14
2.3.4 Sorption of binary or multiple heavy metals onto soils.....	16
2.4 Transport of Heavy Metals in Soils	17
2.4.1 Physical processes.....	18
2.4.2 Chemical and biological processes.....	19
2.4.2.1 Chemical process.....	19
2.4.2.2 Biological processes.....	20
2.4.3 Contaminant transport equation.....	20
2.4.4 Nonequilibrium processes.....	21
2.4.5 Transport of heavy metals in soil.....	23
2.4.6 Equilibrium/nonequilibrium modeling.....	26
2.4.7 HYDRUS-1D modeling.....	27
2.5 Summary.....	28

CHAPTER III HEAVY METALS CONTAMINATION OF GROUNDWATER AND SURROUNDING SOILS BY TAILING LEACHATES

FROM A GOLD MINE IN THAILAND.....	29
Abstract	29
3.1 Introduction and Background	30
3.2 Heavy Metals in Mill Tailings.....	32
3.3 Batch Desorption Experiments.....	35

	Page
3.4 Column Desorption Experiments.....	38
3.5 Discussion and Conclusion.....	40
CHAPTER IV EFFECT OF pH CONDITIONS ON SORPTION AND TRANSPORT OF Pb ²⁺ , Mn ²⁺ , Zn ²⁺ , and Ni ²⁺ THROUGH LATERITIC SOIL: COLUMN EXPERIMENTS AND MODELING APPROACHES.....	45
Abstract.....	45
4.1 Introduction.....	46
4.2 Materials and Methods.....	47
4.2.1 Soil samples and reagents.....	47
4.2.2 Tracer and heavy metals transport experiments	48
4.2.3 Area method.....	50
4.2.4 Transport models.....	50
4.2.5 Parameter estimation.....	53
4.3 Results and Discussion.....	54
4.3.1 Bromide breakthrough curves.....	54
4.3.2 Metal transport- experimental results.....	56
4.3.2.1 Effect of pH on retention of heavy metals... 56	
4.3.3 Heavy metal transport- HYDRUS-1D Modeling results.....	61
4.3.3.1 Prediction of BTCs using batch sorption data.....	61

	Page
4.3.3.2 Application of Linear and Langmuir isotherm using HYDRUS-1D with local equilibrium assumption.....	62
4.3.3.3 Application of chemical nonequilibrium model or two-site model (TSM).....	66
4.4 Conclusion	71
CHAPTER V SORPTION AND TRANSPORT OF Pb^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} , AND Zn^{2+} UNDER BINARY AND MULTI-METAL SYSTEMS THROUGH THE LATERITIC SOIL: COLUMN EXPERIMENTS AND MODELING	72
Abstract.....	72
5.1 Introduction.....	73
5.2 Materials and Methods.....	75
5.2.1 Soil samples and reagents.....	75
5.2.2 Tracer and heavy metals transport experiments	75
5.2.3 Transport model.....	76
5.2.4 Parameter estimation.....	78
5.3 Results and Discussion.....	79
5.3.1 Bromide breakthrough curves.....	79
5.3.2 Heavy metal transport –experimental results.....	79
5.3.3 Heavy metal transport –modeling results	85
5.3.3.1 Equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}).....	97

	Page
5.3.3.2 Chemical nonequilibrium model (Two-site model, TSM).....	99
5.4 Conclusion.....	105
 CHAPTER VI APPLICATION IN THE FIELD CONDITION.....	 106
Abstract.....	107
6.1 Introduction	107
6.2 Study area.....	107
6.3 Forecast of Long Term Impact	108
6.4 Conclusions.....	112
 CHAPTER VII CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS.....	 113
7.1 Conclusion	113
7.2 Recommendation.....	115
REFERENCES.....	117
APPENDICES.....	129
APPENDIX A.....	130
APPENDIX B.....	133
APPENDIX C.....	146
APPENDIX D.....	169
BIOGRAPHY	172

	Page
3.1	Chemical analysis of tailing solid samples at the Akara Mine..... 34
4.1	Physico-chemical properties of the Akara lateritic soil..... 48
4.2	Column transport studies for single metals for different pH..... 50
4.3	Equilibrium convection-dispersion (CD_{eq}) and physical nonequilibrium (two-region model, TRM) parameter values estimated from the bromide data..... 56
4.4	Summary of parameters of the lateritic column studies at pH 4 and 5..... 60
4.5	Percentage increase in sorption capacity and retardation factor values of heavy metals with increasing pH condition..... 61
4.6	The batch sorption parameters at pH 4 from previous study 62
4.7	Estimated transport parameters for heavy metals (Pb^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , and Mn^{2+}) breakthrough curve from equilibrium convection-dispersion and non-equilibrium approaches (2-site model) generated by HYDRUS 1D..... 70
5.1	Column transport studies for binary metal and multi-metal systems..... 76
5.2	Summary of parameters of the lateritic column studies with binary and multi-metal systems at 5. C_0 initial concentration, L column length, ρ bulk density, η porosity, q flow rate, v average pore-water velocity, R retardation factor, PV pore volume of the soil column..... 81
5.3	Estimated transport parameters for heavy metal breakthrough curves using linear and Langmuir isotherm from equilibrium convection-dispersion approaches generated by HYDRUS-1D..... 102
5.4	Estimated transport parameters for heavy metal breakthrough curves

	using linear and Langmuir isotherm from nonequilibrium convection- dispersion approaches (two-site model, TSM) generated by HYDRUS-1D.....	103
6.1	Input parameters for heavy metal transport for HYDRUS-2D simulations	109
6.2	Arrival times at well nos.1 to 4 of concentrations exceeding the drinking water standards of Pb^{2+} and Mn^{2+} for single metal and multi-metal systems.....	111

LIST OF FIGURES

xiv

	Page
1.1 Groundwater flow in the Akara mining site.....	5
2.1 Point of zero charge and the effect of pH on the surface charge of some common minerals.....	12
2.2 Solubilities of metal oxides and hydroxides.....	13
3.1 Akara mining site.....	32
3.2 Amounts of Mn desorbed from tailings under different pH conditions...	36
3.3 Amounts of Mn, Pb, Zn, and Ni desorbed from tailings under pH 4 conditions.....	37
3.4 Desorption Column experiment setup.....	38
3.5 Metal leaching from the column under various pH conditions.....	39
3.6 Cumulative amounts of Mn, Pb, Zn, and Ni versus time under the acidic condition.....	40
3.7 Monthly groundwater quality (Fe, Mn, SO ₄ ²⁻ , and TDS) of TSF and downstream (d/s) monitoring wells from February 2004 to December 2006.....	41
4.1 Schematic design of a column experiment.....	49
4.2 Experimental and CXTFIT-simulated concentration breakthrough curves of bromide.....	55
4.3 Experimental breakthrough curves of Pb ²⁺ , Zn ²⁺ , Ni ²⁺ , and Mn ²⁺ in lateritic soil at a) pH 4 and b) pH 5.....	58

	Page
4.4	Effect of pH on observed breakthrough curves for a) Pb^{2+} , b) Zn^{2+} , c) Ni^{2+} , and Mn^{2+} in lateritic soil 59
4.5	Heavy metal breakthrough data for lateritic soil at pH 4; a) for Pb^{2+} , b) for Zn^{2+} , c) for Mn^{2+} , d) for Ni^{2+} , and e) for duplicated column of Ni^{2+} 64
4.6	Heavy metal breakthrough data for lateritic soil at pH 5; a) for Pb^{2+} , b) for duplicated Pb^{2+} , c) for Zn^{2+} , d) for Mn^{2+} , and e) for Ni^{2+} 68
5.1	Effect of Zn^{2+} concentrations on Pb^{2+} retention onto lateritic soil at pH 5 80
5.2	Effect of Ni^{2+} concentrations on Pb^{2+} retention onto lateritic soil at pH 5 80
5.3	Effect of Mn^{2+} concentrations on Pb^{2+} retention onto lateritic soil at pH 5 80
5.4	Heavy metal breakthrough data in lateritic soil column for Pb^{2+} 5 mM and Pb^{2+} 5 mM- Ni^{2+} 3 mM at pH 5 and different fits with a) the equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}) with linear and Langmuir isotherm b) Two-site model (TSM)..... 86
5.5	Heavy metal breakthrough data in lateritic soil column for Pb^{2+} 5 mM and Pb^{2+} 5 mM- Ni^{2+} 3 mM (duplicated column) at pH 5 and different fits with a) the equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}) with linear and Langmuir isotherm b) Two-site model (TSM)..... 87
5.6	Heavy metal breakthrough data in lateritic soil column for Pb^{2+} 5 mM and Pb^{2+} 5 mM- Ni^{2+} 5 mM at pH 5 and different fits with a) the equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}) with linear and Langmuir isotherm b) Two-site model (TSM)..... 88
5.7	Heavy metal breakthrough data in lateritic soil column for Pb^{2+} 5 mM and Pb^{2+} 5 mM- Ni^{2+} 10 mM at pH 5 and different fits with a)

- the equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}) with linear and Langmuir isotherm b) Two-site model (TSM)..... 89
- 5.8 Heavy metal breakthrough data in lateritic soil column for Pb^{2+} 5 mM and Pb^{2+} 5 mM- Mn^{2+} 3 mM at pH 5 and different fits the binary system with a) the equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}) with linear and Langmuir isotherm b) Two-site model (TSM)..... 90
- 5.9 Heavy metal breakthrough data in lateritic soil column for Pb^{2+} 5 mM and Pb^{2+} 5 mM- Mn^{2+} 5 mM at pH 5 and different fits with a) the equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}) with linear and Langmuir isotherm b) Two-site model (TSM)..... 91
- 5.10 Heavy metal breakthrough data in lateritic soil column for Pb^{2+} 5 mM and Pb^{2+} 5 mM- Mn^{2+} 10 mM at pH 5 and different fits with a) the equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}) with linear and Langmuir isotherm b) Two-site model (TSM)..... 92
- 5.11 Heavy metal breakthrough data in lateritic soil column for Pb^{2+} 5 mM and Pb^{2+} 5 mM- Zn^{2+} 3 mM at pH 5 and different fits with a) the equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}) with linear and Langmuir isotherm b) Two-site model (TSM)..... 93
- 5.12 Heavy metal breakthrough data in lateritic soil column for Pb^{2+} 5 mM, Zn^{2+} 5 mM and Pb^{2+} 5 mM- Zn^{2+} 5 mM at pH 5 and different fits with a) the equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}) with linear and Langmuir isotherm b) Two-site model (TSM)..... 94

5.13	Heavy metal breakthrough data in lateritic soil column for Pb^{2+} 5 mM and Pb^{2+} 5 mM- Zn^{2+} 10 mM at pH 5 and different fits with a) the equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}) with linear and Langmuir isotherm b) Two-site model (TSM).....	95
5.14	Heavy metal breakthrough data in lateritic soil column for Pb^{2+} 5 mM and Pb^{2+} 5 mM- Zn^{2+} 10 mM (Duplicated column) at pH 5 and different fits with a) the equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}) with linear and Langmuir isotherm b) Two-site model (TSM).....	96
5.15	Heavy metal breakthrough data in lateritic soil column for multi-metal system (Pb^{2+} 5 mM- Zn^{2+} 5 mM- Ni^{2+} mM- Mn^{2+} 5 Mm) at pH 5 and different fits with the equilibrium convection-dispersion model (CD_{eq}) with linear and Langmuir isotherm and Two-site model (TSM) were compared with observed data in single and binary system: a) Pb^{2+} , b) Zn^{2+} , c) Ni^{2+} , and d) Mn^{2+}	98
5.16	Maximum sorption capacity, Q_{max} , of Pb^{2+} with increasing initial concentration of 2 nd metal in binary and multiple metal systems.....	104
6.1	Schematic of the heavy metals transport leached from TSF through lateritic aquifer.....	108
6.2	Concentrations of Mn^{2+} and Pb^{2+} in the lateritic aquifer for single metal and multi-metal systems for four wells at various distances from the contaminant source (see Figure 6.1).....	110

b	The maximum amount of solute that can be adsorbed by the solid [mg g^{-1}]
ρ	Bulk density of aquifer [g cm^{-3}]
C^*	Amount of solute sorbed per unit weight of solid [mg g^{-1}]
C	Concentration of solute in liquid phase [mg L^{-1}]
C_{eq}	The equilibrium concentration in solution [mg L^{-1}]
CEC	Cation Exchange Capacity [$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$]
D_L	Longitudinal dispersion coefficient [$\text{cm}^2 \text{ hr}^{-1}$]
D_m	Effective molecular diffusion coefficient for the solute of interest in soil water [$\text{cm}^2 \text{ hr}^{-1}$]
D_T	Transverse dispersion [$\text{cm}^2 \text{ hr}^{-1}$]
f	The fraction of mobile region
K_d	Linear distribution coefficient [L mg^{-1}]
K_f	The distribution coefficient [L mg^{-1}]
N	Dimensionless constant typical with a value of $N < 1$
PV	Pore volume
Q_{max}	An adsorption constant related to the binding strength of the solute on the matrix surface [L mg^{-1}]
rxn	Subscript indicating a biological or chemical reaction of the solute (other than sorption) [$\text{mg L}^{-1} \text{ hr}$]
S_2	Solid phase concentration at site 2
V	Average velocity of groundwater flow [cm hr^{-1}]
v_x	Average linear groundwater velocity [cm hr^{-1}]
t	Time [hr]
α	First-order mass transfer coefficient [d^{-1}]
α_L	Longitudinal dynamic dispersivity [cm]
α_T	Transverse dynamic dispersivity [cm]
θ	Volumetric moisture content or porosity for saturated media [-]

β	Parameters used in CXTFIT and related to f
ω	Parameters used in CXTFIT and related to α