

Studi Permodelan Transport PHREEQC Pada Proses *Leaching* Besi (Fe), Timbal (Pb) dan Tembaga(Cu) Terhadap Lindi TPA Muara Fajar Pekanbaru

Yelmiza*¹, Fikratul Ikhsan², Anggrenia Diova Ritonga³, Yoan De Nanda Herru⁴, Hazra Yuwendius⁵
^{1,3,4}Program Studi Kimia, Fakultas Kehutanan dan Sains, Universitas Lancang Kuning
²Program Studi Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lancang Kuning
⁵Program Studi Teknik Mekatronika, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning
*e-mail: yelmiza@unilak.ac.id

Abstract

The process of chemical transfer of Fe, Pb and Cu contaminants in soil can be evaluated using geochemical experiments and modeling. The modeling using the PHREEQC program purpose to determine the mechanism of transport of heavy metals. At the Muara Fajar Pekanbaru landfill, there is an accumulation of waste volume from year after year. This results in leachate which will pollute the environment. In this study, several Fe, Pb and Cu contaminant concentrations were subjected to a leaching process using PHREEQC geochemical modeling. This model describes change in the concentration of Fe, Pb and Cu metals by controlling the deposition of pure metals in the formation of the mineral calcite (CaCO₃). In this Fe species, the highest percentage is Fe²⁺ 67%, while FeCO₃ 2%. This result shows that there is little carbonate deposition. In this Pb species, the highest percentage is Pb²⁺ 3%, while PbCO₃ 85%. These results show that there are a lot of carbonate deposits. In this Cu species, the highest percentage is Cu²⁺ 8%, while CuCO₃ 61%. These results show that there are a lot of carbonate deposits. Leaching the metals Fe, Pb and Cu using mineralogical phases model, the graph shows a decrease in the concentration of Fe and Cu to close to 0 mmol/L, while the concentration of Fe increases to 1.2×10^{-2} mmol/L until it stabilizes.

Keywords: PHREEQC, leaching, leachate

Abstrak

Proses perpindahan secara kimia kontaminan Fe, Pb, dan Cu pada tanah dapat dievaluasi dengan eksperimen dan permodelan geokimia. Adanya permodelan menggunakan program PHREEQC bertujuan untuk mengetahui mekanisme perpindahan logam-logam berat. Di TPA Muara Fajar Pekanbaru terjadi penumpukan volume sampah dari tahun ke tahun. Sehingga mengakibatkan air lindi yang akan mencemari lingkungan. Pada studi ini sejumlah konsentrasi kontaminan Fe, Pb dan Cu dilakukan proses leaching menggunakan permodelan geokimia PHREEQC. Permodelan ini menggambarkan terjadi perubahan konsentrasi logam Fe, Pb dan Cu dengan pengendapan logam murni dalam pembentukan mineral kalsit (CaCO₃). Pada spesi Fe persentase tertinggi adalah spesi Fe²⁺ yaitu sebesar 67 %, sedangkan FeCO₃ adalah sebesar 2 %. Hasil ini menunjukkan endapan karbonat sedikit. Pada spesi Pb ini persentase yang tertinggi adalah spesi Pb²⁺ yaitu sebesar 3 %, sedangkan PbCO₃ adalah sebesar 85 %. Hasil ini menunjukkan endapan karbonatnya lebih banyak. Pada spesi Cu ini persentase yang tertinggi adalah spesi Cu²⁺ yaitu sebesar 8 %, sedangkan CuCO₃ adalah sebesar 61 %. Hasil ini menunjukkan endapan karbonatnya lebih banyak. Leaching logam Fe, Pb dan Cu menggunakan model fase mineralogi, dari grafik digambarkan terjadinya penurunan konsentrasi Fe dan Cu menjadi mendekati 0 mmol/L, sedangkan konsentrasi Fe meningkat menjadi $1,2 \times 10^{-2}$ mmol/L hingga stabil.

Kata Kunci: PHREEQC, leaching, lindi

1. PENDAHULUAN

Tempat pembuangan akhir (TPA) sampah menjadi pilihan dalam mengatasi limbah domestik dan non domestik. Namun hal ini menjadi suatu dilema jika penumpukan volume makin bertambah dari tahun ke tahun tanpa ada pengolahan secara langsung. Minimnya pengolahan sampah akibatnya tumpukan volume sampah akan mengganggu lingkungan sekitar. Tumpukan volume sampah akan menghasilkan lindi berupa air hitam yang nantinya dapat merusak struktur tanah. Air lindi ini mengandung logam-logam berat berbahaya yang dapat merusak lingkungan.

Pembentukan koloid sebagai senyawa kompleks organik dan anorganik berperan aktif dari semua jenis logam berat pada lindi TPA. Adanya kandungan logam-logam berat dalam lindi menjadikan toksisitasnya tinggi dan dapat bermigrasi dalam lapisan air tanah. Jumlah timbulan sampah harian kota Pekanbaru dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data timbulan sampah di kota Pekanbaru provinsi Riau

Tahun	Timbulan Sampah Harian (ton)	Timbulan Sampah Tahunan (ton)
2022	976,72	356.503,31
2021	967,49	353.133,89
2020	1.097,15	400.461,54
2019	1.036,51	378.324,91

Dari tabel 1 menunjukkan bahwa timbulan sampah harian kota Pekanbaru tahun 2022 sebesar 976,72 ton/hari dan 356.503, 31 ton/tahun. Berdasarkan Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) sumber komposisi sampah ini adalah: sisa makanan 59%, kertas/karton 12%, plastik 10%, kayu/ranting 3%, logam 2%, karet/kulit 1%, kaca 1%, lainnya 11%. Dimana logam memiliki nilai persentase cukup besar.

Studi kualitas lindi di TPA Muara Fajar menghasilkan kandungan logam besi (Fe) 9,83 mg/L, timbal (Pb) 0,06 mg/L dan tembaga (Cu) 0,08 mg/L (Darmayanti, Yusa, & Esther, 2011). Dengan menggunakan permodelan PHREEQC *Interactive* versi 3.0.6.7757 dipelajari transport logam-logam Fe, Pb dan Cu dari lindi tumpukan sampah berpindah ke lingkungan, konsentrasi logam Cu meningkat signifikan tahun ke-10 sampai tahun ke-50 dengan konsentrasi Cu 1,4 mg/L; Pb meningkat dari tahun ke-20 sampai tahun ke-60 dan stabil pada konsentrasi 0,25 mg/L dan konsentrasi Fe meningkat pada tahun ke-15 sebesar 0,175 mg/L (Yuvendius, Zondra, & Sari, 2022). Tanpa adanya pengelolaan terhadap limbah logam yang tepat maka akan menimbulkan permasalahan pencemaran lingkungan

Permasalahan yang terjadi terhadap limbah anorganik khususnya, menjadi fokus dalam permasalahan penelitian. Dimana air lindi yang dihasilkan dari tumpukan sampah mengandung logam-logam berat yang mencemari air tanah dan ekosistem tanah. Sejumlah konsentrasi logam Fe, Pb dan Cu dilakukan proses *leaching* menggunakan permodelan geokimia PHREEQC. Permodelan ini diprediksikan pengamatan penurunan konsentrasi logam Fe, Pb dan Cu dengan mengontrol pengendapan logam murni dalam pembentukan mineral kalsit (CaCO_3).

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan proses *leaching* terhadap logam Fe, Pb dan Cu menggunakan menggunakan permodelan PHREEQC *Interactive* dan akan diperoleh penurunan konsentrasi logam Besi (Fe), Timbal (Pb) dan Tembaga (Cu) dalam lindi pada TPA Muara Fajar Pekanbaru.

Permodelan transport logam dengan PHREEQC *Interactive*

Program PHREEQC digunakan untuk mensimulasikan reaksi-reaksi kimia, spesi logam dan transport spesi kimia di tanah dan perairan alami serta tercemar (Parkhurst & Appelo, 1999). Program ini mampu menghitung spesi-spesi kimia dalam larutan air, indeks saturasi mineral, penyerapan dan endapan, transport zat terlarut reaktif serta reaksi-reaksi kimia. Memberi solusi dalam bidang geokimia yang membutuhkan pemodelan gabungan seperti migrasi isotop radioaktif, mobilitas logam-logam bagian terkontamisi, sumber air tanah dan aliran perairan.

Spesiasi logam-logam terhadap lindi *landfill* melalui fraksinasi fisika dan kimia serta model termodinamika *computer based* diperoleh ion logam bebas < 30% dari total konsentrasi logam (Baun & Christensen, 2004). Banyak aplikasi yang dapat dihasilkan dari penggunaan program PHREEQC ini. Diantaranya penghilangan logam selama perioda presipitasi hujan rendah, dimana

air *landfill* mengandung alkalinitas yang tinggi dan konsentrasi logam berat yang tinggi (Ettler et al., 2006). Tampilan uji *leaching* pada transfer senyawa kompleks dan terjadinya proses transfer massa tergantung pada (i) reaksi kinetik, (ii) difusi fluks antar lindi, (iii) transport dengan konveksi aliran liquid, (iv) proses multi-inter-fasa (seperti transfer liquid/gas) (Tiruta-Barna, 2008).

Suatu permodelan untuk simulasi *leaching* sejumlah unsur logam dan logam berat Pb dari tidak terkarbonasi dan terkarbonasi pada semen Portland menunjukkan penurunan Pb dengan proses *leaching* dan hasil permodelan juga menunjukkan reaksi kompleksasi permukaan pada kontrol *leaching* Pb (Martens, Tom. et.al 2008). Pada studi dari limbah semen juga digambarkan kapasitas PHREEQC memiliki tampilan yang baik terhadap *leaching* Pb, Cd, As dan Cr (Halim, Short, Scott, Amal, & Low, 2005).

Prilaku dari dampak debu terhadap lingkungan pada musim hujan di Copperbelt dimana kandungan logam pada tanah sangat tinggi dapat menjadi kontaminan melalui debu yang dihasilkan (Vítková, Ettler. et.all 2011). Pada tanah yang terkontaminasi sisa tambang, penghilangan Pb setelah penambahan H_3PO_4 dapat menghasilkan pengendapan *chloropyromorphite* berupa jenis fase mineral yang stabil (Navarro, Cardellach, & Corbella, 2011). Perlakuan *leaching* terhadap Cu dan Pb dengan simulasi PHREEQC diamati kandungan Cu dan Pb menurun saat fraksi kandungan logam bergabung fraksi karbonat (Islam, Jo, & Park, 2016). Perlakuan melalui pengendapan kalsit ($CaCO_3$) yang diamati pada 25 sampel polutan pada lindi *landfill* terhadap unsur Fe, Sr, Ba, Mn menghasilkan konsentrasi unsur dalam larutan menurun secara signifikan (Ettler et al., 2006).

Unsur-unsur logam

Unsur-unsur logam

Besi (Fe), besi merupakan unsur kimia yang disimbolkan Fe (*Ferrum*) dan yang memiliki nomor atom 26. Besi memiliki tingkat oksidasi paling banyak adalah +2 dan +3. Timbal (Pb), timbal merupakan unsur kimia dengan simbol Pb (*Plumbum*) dan yang memiliki nomor atom 82. Timbal memiliki tingkat bilangan oksidasi +2. Tembaga (Cu), tembaga merupakan unsur kimia dengan simbol Cu (*Cuprum*) dan memiliki nomor atom 29. Tembaga memiliki tingkat bilangan oksidasi +1, +2, +3 dan +4. Penentuan pilihan logam-logam ini berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan studi sebelumnya terhadap konsentrasi logam-logam Fe, Pb dan Cu yang terkandung dalam lindi tempat pembuangan akhir (TPA) Muara Fajar.

Pada penelitian ini bertujuan untuk melakukan permodelan menggunakan program PHREEQC untuk mengetahui mekanisme perpindahan logam-logam berat. Logam-logam berat ini akan menumpuk pada lindi sebanding dengan kenaikan volume sampah dari tahun ke tahun sehingga mengakibatkan air lindi akan mencemari lingkungan. Dari penelitian sebelumnya telah diperoleh konsentrasi logam-logam berbahaya pada lindi di TPA Muara Fajar dimana kandungan logam besi (Fe) 9,83 mg/L, timbal (Pb) 0,06 mg/L dan tembaga (Cu) 0,08 mg/L (Darmayanti et al., 2011). Juga dari penelitian yang telah dilakukan menggunakan permodelan PHREEQC *Interactive* versi 3.0.6.7757 dipelajari transport logam-logam Fe, Pb dan Cu dari lindi tumpukan sampah berpindah ke lingkungan, konsentrasi logam Fe, Pb dan Cu signifikan meningkat hingga puluhan tahun (Yuvendius et al., 2022). Adapun manfaat penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengolahan limbah cair khususnya memisahkan polutan logam-logam berbahaya. Recovery material, khususnya dalam bentuk Siderite dan Azurite untuk menjaga stabilitas mineral karbonat di alam. Setelah didapatkan variasi optimum dan endapan karbonat, baru akan dilanjutkan dengan studi selanjutnya pengujian di laboratorium untuk menentukan pengaruh pH dalam pembentukan karbonat.

2. METODE

2.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Pada penelitian ini sampel yang digunakan adalah lindi yang terdapat pada tempat pembuangan akhir (TPA) Muara Fajar, Pekanbaru. Metode yang digunakan adalah permodelan transport logam dengan PHREEQC *Interactive* yang dilakukan pada bulan Februari s/d November 2023.

2.2. Alat dan Bahan

Laptop dan Software PHREEQC *Interactive*

2.3. Metode

Dimulai dari tahap persiapan, melakukan penentuan terhadap kontaminan logam-logam berat yang ada dalam lindi. Pada studi ini tahapan *leaching* menggunakan model fase mineralogi pada Fe, Pb dan Cu (Martens, Jacques, Van Gerven, Wang, & Mallants, 2008). Kemudian mengumpulkan dan melakukan kajian studi pustaka serta mempersiapkan software PHREEQC *Interactive*. Selanjutnya dilakukan input data sampel Fe, Pb dan Cu (Yuvendius et al., 2022) dan *solution 0* (larutan awal) dan *solution 1 – 20* maka program siap dijalankan. Adapun pengolahan data program PHREEQC, dapat diperoleh grafik yang menampilkan unsur-unsur logam dengan satuan konsentrasinya. Program menghasilkan *file excel*: sehingga dapat dibentuk grafik yang menerangkan perubahan konsentrasi dari tiap logamnya.

Metoda yang di kenal dengan permodelan PHREEQC ini adalah satu aplikasi yang dapat digunakan untuk melakukan permodelan geokimia yang berhubungan dengan reaksi kimia maupun proses transport. Metoda ini dikembangkan oleh Parkhurst & Appelo dari *United States Geological Survey* (USGS). Permodelan PHREEQC ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan kesetimbangan kimia larutan dalam bentuk fase cair yang berinteraksi dengan mineral, gas, padatan dan sorpsi permukaan. Serta untuk melakukan permodelan kinetika reaksi dan transport polutan. Adapun langkah-langkah kerjanya adalah sebagai berikut :

2.3.1. *Forward Geochemical Modelling*

Pada tahapan pertama ini dapat dilakukan *input* kondisi awal (initial) dengan mengisi tabel informasi spesifik dari mineral dan kondisi air. Pada model ini dapat dihitung perubahan reaksi kimia di dalam air dan mineral yang larut atau yang terendapkan.

2.3.2. *Inverse Geochemical Modelling*

Pada bagian ini digunakan dengan memanfaatkan informasi karakteristik air, mineralogi, kondisi hidrologi dan dapat mengetahui kemungkinan reaksi geokimia yang terjadi dari suatu karakteristik air.

2.3.3. **Input data sampel**

Selanjutnya dilakukan input data sampel Fe, Pb dan Cu (Yuvendius et al., 2022) pada *solution 1 – 20* maka program siap dijalankan. Adapun pengolahan data program PHREEQC, dapat diperoleh grafik yang menampilkan unsur-unsur logam dengan satuan konsentrasinya.

2.3.4. **Analisis data**

Setelah program dijalankan maka dari data yang diperoleh dapat dianalisis sesuai dengan grafik yang dihasilkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan permodelan pada PHREEQC, maka diperoleh data berupa *file excel* dan dapat dibentuk grafik yang menerangkan perubahan dari tiap logamnya. Dengan PHREEQC kita dapat mengetahui spesiasi larutan awal, penentuan komposisi kumpulan pertukaran dalam kesetimbangan dengan komposisi larutan tetap, penentuan komposisi larutan bervolume tetap.

Fasa gas dalam kesetimbangan dengan komposisi larutan tetap, penghitungan komposisi kimia akibat reaksi *batch*, transport advectif-reaktif, dan transport advectif-dispersif-reaktif melalui serangkaian sel. Program ini dapat menghitung jumlah dari: pH, Pe, konsentrasi total unsur, jumlah mineral (atau fase lainnya) yang berpindah ke dalam atau keluar dari fase air, distribusi spesies air, keadaan saturasi fasa air terhadap fasa mineral tertentu.

Data input pada larutan awal (larutan 0) dan larutan 1 – 20 menggunakan model fase mineralogi pada *leaching* Fe, Pb dan Cu

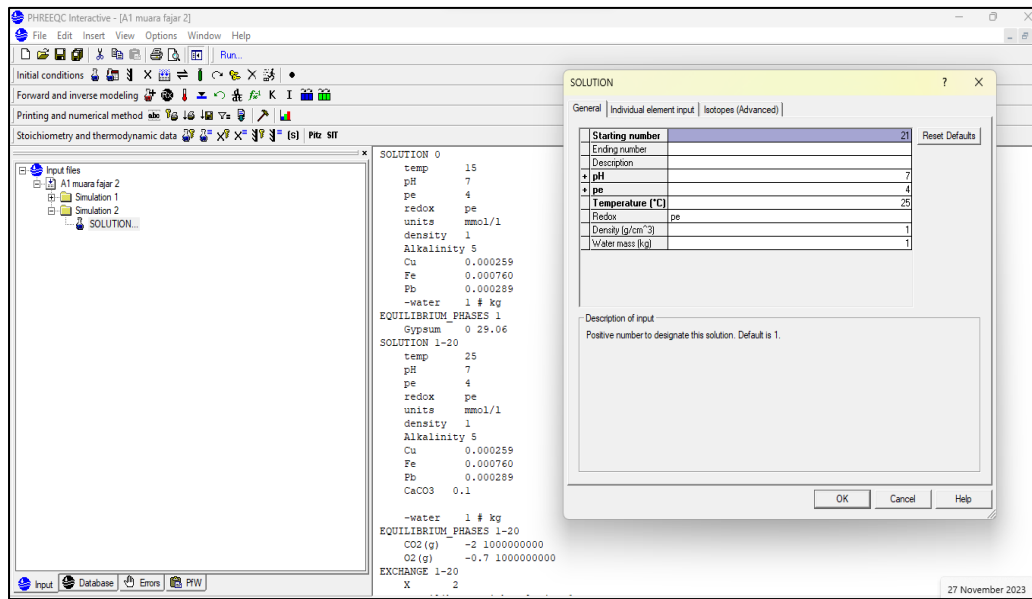
<pre> SOLUTION 0 temp 15 pH 7 pe 4 redox pe units mmol/l density 1 Alkalinity 5 Cu 0.000259 Fe 0.000760 Pb 0.000289 -water 1 # kg EQUILIBRIUM_PHASES 1 Gypsum 0 29.06 SOLUTION 1-20 temp 25 pH 7 pe 4 redox pe units mmol/l density 1 Alkalinity 5 Cu 0.000259 Fe 0.000760 Pb 0.000289 CaCO3 0.1 -water 1 # kg </pre>	<pre> EQUILIBRIUM_PHASES 1-20 CO2(g) -2 1000000000 O2(g) -0.7 1000000000 EXCHANGE 1-20 X 2 -equilibrate with solution 1 -pitzer_exchange_gammas true TRANSPORT -cells 20 -shifts 3000 -dispersivities 0.1 -print_cells 20 -print_frequency 300 -punch_cells 20 -punch_frequency 20 SELECTED_OUTPUT -file muara fajar 2.xls -totals Cu Fe Pb -molalities Ca+2 CO3-2 USER_PUNCH -headings volume des pores -start 10 Punch (STEP_NO)/20 -end END </pre>
--	--

Gambar 1. Data input PHREEQC

Berdasarkan gambar 1 adapun langkah-langkah penggunaan aplikasi PHREEQC adalah sebagai berikut :

1. Mula-mula, tampilan *workspace* kosong akan muncul saat setelah aplikasi dibuka, dan masukkan data
2. Berikan judul file dan jenis larutan yang digunakan
3. Untuk presipitasi, input data yang dibutuhkan berupa konsentrasi setiap spesi (mg/L)
4. Output model ini dapat dimulai dengan klik “RUN” dan lalu “START”.
5. Tombol “DISMIS” muncul Ketika kalkulasi selesai dan lengkap.
6. Folder input akan terbuka dan tersimpan sebagai *TITLE.pqi* dan output *TITLE.pqo*.

Tampilan layar awal (input) permodelan PHREEQC



Gambar 2. Tampilan permodelan PHREEQC

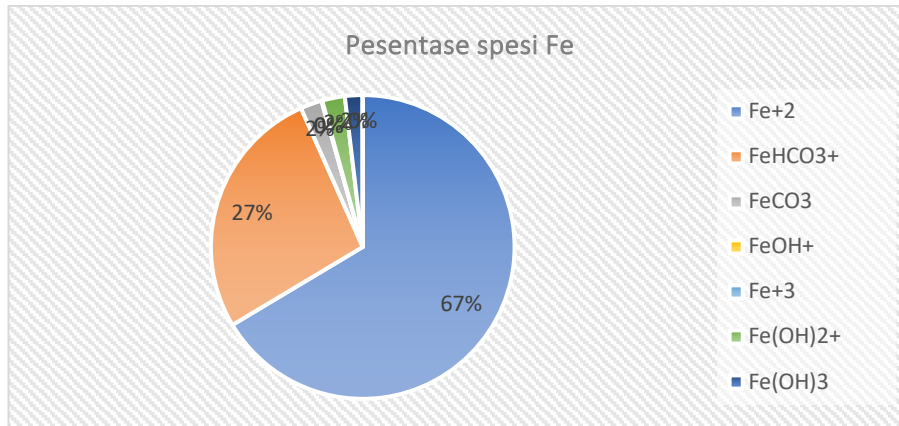
Gambar 2 menunjukkan workspace dari permodelan PHREEQC, yang mana terdiri dari solution 0, equilibrium phases 1, solution 1 – 20, equilibrium phases 1-20 dan exchange 1 – 20. Sedangkan nilai pH yang di-input ke aplikasi PHREEQC adalah pH 7. Permodelan PHREEQC terdiri dari TRANSPORT dari zona yang stagnan dan fungsi MIX untuk menggambarkan aliran difusi antar lindi, RATES dan KINETICS untuk pembatasan lindi pada penyerapan CO₂, SOLUTION dan EQUILIBRIUM_PHASES sebagai pori air dan lindi.

Spesiasi dari Fe, Cu dan Pb

Tabel.1 Spesiasi Fe

Speciation	Molality (mmol/L)	Percentage (%)
Fe ⁺²	5.049e-07	67 %
FeHCO ³⁺	2.046e-07	27 %
FeCO ₃	1.732e-08	2 %
FeOH ⁺	6.298e-10	2 %
Fe ⁺³	3.487e-16	2 %
Fe(OH) ²⁺	1.835e-08	2 %
Fe(OH) ₃	1.427e-08	2 %
Fe(OH) ₄	9.057e-11	0 %

Pada spesi Fe ini persentasi yang tertinggi adalah spesi Fe²⁺ yaitu sebesar 67 %, sedangkan FeCO₃ adalah sebesar 2 %. Hasil ini menunjukkan endapan karbonatnya sedikit. Hal ini juga teridentifikasi pada pH 7 endapan FeCO₃ tidak terbentuk sempurna dan efektifitas transportnya tidak maksimal.



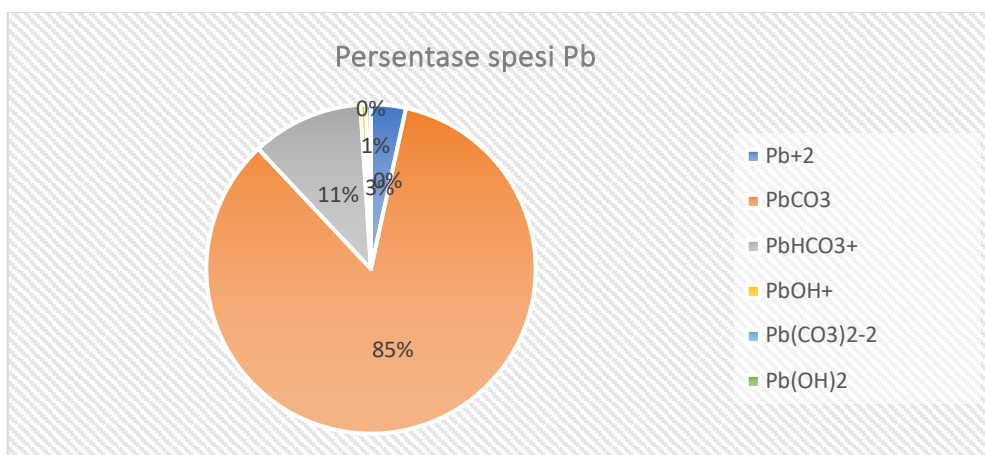
Gambar 3. Presentase spesi Fe

Dari gambar 3 menunjukkan karakter dari endapan besi yang bisa berupa endapan logam yang bergabung dengan mineral logam lainnya. Salah satu endapan besi yang ditemukan yang memiliki nilai ekonomis yaitu Siderite ($FeCO_3$) memiliki jumlah spesi 2 %.

Tabel.2 Spesiasi Pb

Speciation	Molality (mmol/L)	Percentage (%)
Pb^{+2}	9.899e-09	3 %
$PbCO_3$	2.445e-07	85 %
$PbHCO_3^{+}$	3.166e-08	11 %
$PbOH^{+}$	1.640e-09	0 %
$Pb(CO_3)_2^{-2}$	1.348e-09	3 %
$Pb(OH)_2$	6.041e-12	1 %

Pada spesi Pb ini persentasi yang tertinggi adalah spesi Pb^{2+} yaitu sebesar 3 %, sedangkan $PbCO_3$ adalah sebesar 85 %. Hasil ini menunjukkan endapan karbonatnya lebih banyak. Fase padatnya yang berupa senyawa utama dapat diidentifikasi dan dapat diukur kelarutannya dalam lindi sebagai fungsi pH lindi. $Pb(OH)_2$ sangat mungkin terjadi karena terbentuk dengan adanya kontak material dengan air. Dimana $Pb(OH)_2$ memiliki nilai molalitasnya $6,041 \times 10^{-12}$ mmol/L.



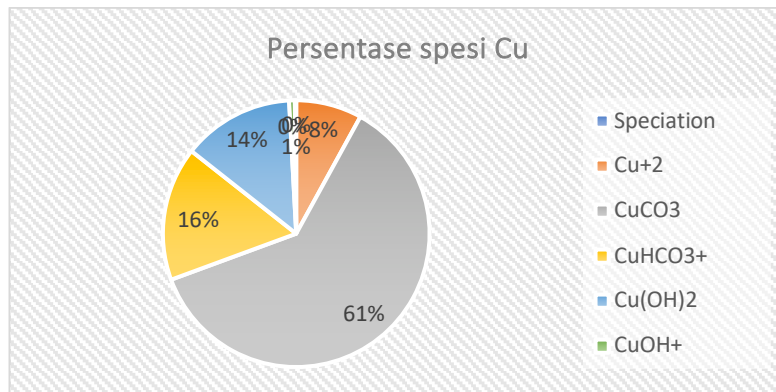
Gambar 4. Presentasi spesi Pb

PbCO₃, Timbal karbonat (Kerisit) memiliki spesi 85 %, terbentuk lebih dominan dibanding mineral yang lainnya. Kerisit berbentuk padatan putih dengan banyak kegunaannya. Tingginya nilai persentase kerisit menunjukkan adanya nilai pH 7 yang sesuai dengan reaksi presipitasi.

Tabel.3 Spesiasi Cu

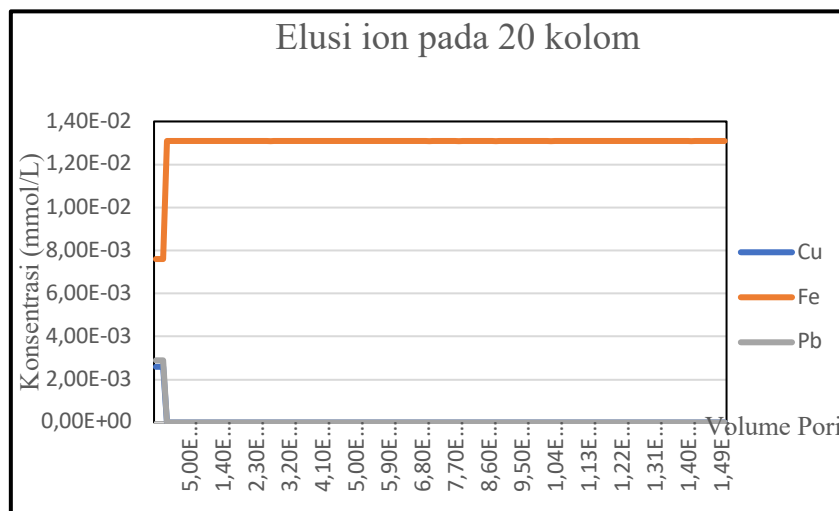
Speciation	Molality (mmol/L)	Percentage (%)
Cu ⁺²	2.064e-08	8 %
CuCO ₃	1.585e-07	61 %
CuHCO ³⁺	4.192e-08	16 %
Cu(OH) ₂	3.491e-08	14 %
CuOH ⁺	1.765e-09	1 %
Cu(CO ₃) ₂ ⁻²	4.382e-10	0 %

Pada spesi Cu ini persentasi yang tertinggi adalah spesi Cu²⁺ yaitu sebesar 8 %, sedangkan CuCO₃ adalah sebesar 61 %. Hasil ini menunjukkan endapan karbonatnya lebih banyak. Cu(OH)₂ sangat mungkin terjadi karena terbentuk dengan adanya kontak material dengan air. Dimana Cu(OH)₂ memiliki nilai molalitasnya 3,491 x 10⁻⁸ mmol/L.



Gambar 5. Presentasi spesi Cu

Azurite, Tembaga Karbonat (CuCO₃) berupa padatan warna biru memiliki nilai presentase spesi tertinggi yaitu 60 %. Tingginya nilai persentase kerisit menunjukkan adanya nilai pH 7 yang sesuai dengan reaksi presipitasi.



Gambar 6. Elusi ion pada 20 kolom

Leaching logam Fe, Pb dan Cu menggunakan model fase mineralogi, dari grafik digambarkan terjadinya penurunan konsentrasi Fe dan Cu menjadi mendekati 0 mmol/L, sedangkan konsentrasi Fe meningkat menjadi $1,2 \times 10^{-2}$ mmol/L hingga stabil. *Leaching* logam dari tempat pembuangan akhir sampah dapat menjadi solusi untuk mengurangi risiko logam berat pada lingkungan sekitar. Pengamatan konsentrasi logam dalam larutan selama proses *leaching* dan dapat membantu mengoptimalkan efisiensi *leaching*.

Pada proses *leaching* terjadinya transfer senyawa kompleks dan transfer massa tergantung pada (i) reaksi kinetik, (ii) difusi fluks antar lindi, (iii) transport dengan konveksi aliran liquid, (iv) proses multi-inter-fasa (seperti transfer liquid/gas) (Tiruta-Barna, 2008)

4. KESIMPULAN

Permodelan ini menggambarkan terjadi perubahan konsentrasi logam Fe, Pb dan Cu dengan mengontrol pengendapan logam murni dalam pembentukan mineral kalsit (CaCO_3). Pada spesi Fe ini persentasi yang tertinggi adalah spesi Fe^{2+} yaitu sebesar 67 %, sedangkan FeCO_3 adalah sebesar 2 %. Hasil ini menunjukkan endapan karbonatnya sedikit. Pada spesi Pb ini persentasi yang tertinggi adalah spesi Pb^{2+} yaitu sebesar 3 %, sedangkan PbCO_3 adalah sebesar 85 %. Hasil ini menunjukkan endapan karbonatnya lebih banyak. Pada spesi Cu ini persentasi yang tertinggi adalah spesi Cu^{2+} yaitu sebesar 8 %, sedangkan CuCO_3 adalah sebesar 61 %. Hasil ini menunjukkan endapan karbonatnya lebih banyak. *Leaching* logam Fe, Pb dan Cu menggunakan model fase mineralogi, dari grafik digambarkan terjadinya penurunan konsentrasi Fe dan Cu menjadi mendekati 0 mmol/L, sedangkan konsentrasi Fe meningkat menjadi $1,2 \times 10^{-2}$ mmol/L hingga stabil.

DAFTAR PUSTAKA

- Baun, D. L., & Christensen, T. H. (2004). Speciation of heavy metals in landfill leachate: a review. *Waste management & research*, 22(1), 3-23.
- Darmayanti, L., Yusa, M., & Esther, R. (2011). Identifikasi tanah tercemar lindi tempat pembuangan akhir sampah muara fajar dengan metode geolistrik.
- Ettler, V., Zelená, O., Mihaljevič, M., Šebek, O., Strnad, L., Coufal, P., & Bezdička, P. (2006). Removal of trace elements from landfill leachate by calcite precipitation. *Journal of Geochemical Exploration*, 88(1-3), 28-31. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.010>
- Halim, C. E., Short, S. A., Scott, J. A., Amal, R., & Low, G. (2005). Modelling the leaching of Pb, Cd, As, and Cr from cementitious waste using PHREEQC. *Journal of hazardous materials*, 125(1-3), 45-61. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.05.046>
- Islam, M. N., Jo, Y.-T., & Park, J.-H. (2016). Leaching and redistribution of Cu and Pb due to simulated road runoff assessed by column leaching test, chemical analysis, and PHREEQC modeling. *Environmental Earth Sciences*, 75(12), 1041. doi:10.1007/s12665-016-5804-1. <http://doi.org/10.1007/s12665-016-5804-1>
- Martens, E., Jacques, D., Tom, V. G., Wang, L., & Mallants, D. (2008). PHREEQC modelling of leaching of major elements and heavy metals from cementitious waste forms. *MRS Online Proceedings Library*, 1107, 1-8. <http://doi.org/10.1557/PROC-1107-475>
- Martens, E., Jacques, D., Van Gerven, T., Wang, L., & Mallants, D. (2008). PHREEQC Modelling of Leaching of Major Elements and Heavy Metals From Cementitious Waste Forms. *Materials Research Society symposia proceedings. Materials Research Society*, 1107, 475-482. doi:10.1557/PROC-1107-475. <http://doi.org/10.1557/PROC-1107-475>
- Navarro, A., Cardellach, E., & Corbella, M. (2011). Immobilization of Cu, Pb and Zn in mine-contaminated soils using reactive materials. *Journal of hazardous materials*, 186(2-3), 1576-1585. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.039>

- Parkhurst, D. L., & Appelo, C. (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *Water-resources investigations report*, 99(4259), 312. <https://doi.org/10.3133/wri994259>
- Tiruta-Barna, L. (2008). Using PHREEQC for modelling and simulation of dynamic leaching tests and scenarios. *Journal of hazardous materials*, 157(2-3), 525-533.
- Vítková, M., Ettler, V., Hyks, J., Astrup, T., & Kříbek, B. (2011). Leaching of metals from copper smelter flue dust (Mifulira, Zambian Copperbelt). *Applied Geochemistry*, 26, S263-S266.
- Yuvendius, H., Zondra, E., & Sari, V. (2022). *Study of biogas utilization as waste-to-energy plant and transport modelling of iron (Fe), lead (Pb) and copper (CU) in leachate at Muara Fajar landfill Pekanbaru*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/1041/1/012056/meta>



Jurnal Karya Ilmiah Multidisiplin (Jurkim) is licensed under a [Creative Commons Attribution International \(CC BY-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)