

ELUSI LOGAM TEMBAGA DAN KROM ABU LAYANG PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

Dhian Juwitasari^{a,*}

^aPoliteknik Industri Furnitur dan Pengolahan Kayu

Jalan Wanamarta Raya No. 20, Kawasan Industri Kendal Wonorejo, Kaliwungu, Kendal Jawa Tengah

*E-mail: dhian.juwitasari@poltek-furnitur.ac.id

Masuk Tanggal : 31 Maret , revisi tanggal: 19 Juni, diterima untuk diterbitkan tanggal : xx

Abstrak

Penelitian elusi logam berat tembaga dan krom dari sampel abu layang pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) Cirebon. Variabel dalam penelitian elusi logam tembaga dan krom dari abu layang PLTU adalah jenis eluen, konsentrasi eluen, pH eluen, dan elusi berkelanjutan. Kadar logam tembaga dan krom diukur menggunakan metode spektroskopi serapan atom (SSA). Sampel yang dielusi yang lolos ayakan ukuran 200 mesh. Kadar air dihilangkan dengan cara sampel abu layang di oven pada 105 °C selama 24 jam. Penelitian ini menggunakan paralon dalam pembuatan kolom. Proses elusi dilakukan dengan memasukkan abu layang di dalam kolom kemudian mengalirkan eluen ke dalam kolom. Eluen yang digunakan HCl, HNO₃, dan H₂SO₄. Variasi konsentrasi eluen HNO₃ dan HCl dari 0,5 M sampai 2 M sedangkan untuk H₂SO₄ 0,1 M sampai 1,5 M. Variasi pH eluen dari 1 sampai 14. Elusi berkelanjutan menggunakan eluen HNO₃ 1,75 M untuk Cu dan HNO₃ 1,5 M untuk Cr. Hasil penelitian menunjukkan bahwa HNO₃ eluen yang baik untuk mengelusi logam berat Cu dan Cr. Konsentrasi eluen yang paling baik adalah eluen HNO₃ 1,75 M untuk mengelusi logam berat Cu dari abu layang PLTU dengan konsentrasi 0,56 ppm sedangkan untuk logam berat Cr adalah eluen HNO₃ 1,5 M dengan konsentrasi 2,03 ppm. Logam Cr yang dapat terelusi secara berkelanjutan dengan eluen HNO₃ 1,5 M adalah 8,70% dan logam Cu dengan eluen HNO₃ 1,75 M adalah 9,16 %.

Kata Kunci: Elusi, Abu layang, Tembaga, Krom

Abstract

Elution experiment of copper and chromium leaching from power plant coal fly was conducted. Variables in this experiment of copper and chromium metal eluen were eluent, eluent concentration, pH and continued elution of heavy metals Cu and Cr from power plant coal fly ash. This research was conducted by atomic absorption spectroscopic (AAS). Fly ash samples derived from power plant and pass 200 mesh sieves. Fly ash was dried at 105 °C for 24 hours by oven to eliminate the water content. Leaching process carried out by the eluent into the PVC column. Eluent which used were HNO₃, HCl and H₂SO₄. Eluent concentration variation of HNO₃ and HCl were from 0.5 M to 2 M while for H₂SO₄ were from 0.1 M to 1.5 M. Variations of pH eluent were from 1 to 14. The continued elution of Cu and Cr were using 1.75 M HNO₃ and 1.5 M HNO₃, respectively. The results showed that the best eluent for leached Cu and Cr was eluted by HNO₃. The optimum concentration eluent to elute heavy metals from fly ash was 1.75 M HNO₃ for Cu with concentration 0.56 ppm, while for heavy metal Cr was 1.5 M HNO₃ with concentration 2.03 ppm. Cu showed a cationic leaching pattern and its solubility is very high at a very acidic pH. At high pH, the concentration of metals in the eluate decreased. The Cr metal showed an amphoteric leaching pattern and its solubility is high in extremely acidic conditions or very alkaline. The Cr can be eluted in continued elution is 8.7% by 1.5 M HNO₃ while Cu is 9.16% by 1.75 M HNO₃.

Keywords: Leaching, Fly ash, Copper, Chromium

1. PENDAHULUAN

Indonesia sedang menghadapi permasalahan dalam penyediaan energi sebagai akibat dari

kebutuhan energi nasional yang meningkat setiap tahunnya. Kebutuhan energi listrik yang meningkat menyebabkan kebutuhan bahan bakar

untuk pembangkit listrik juga semakin meningkat. Sementara itu, cadangan minyak bumi dan produksi bahan bakar minyak Indonesia semakin terbatas, sehingga beberapa tahun terakhir ini impor minyak bumi Indonesia semakin meningkat [1]. Pemanfaatan batu bara sebagai bahan bakar pembangkit listrik dijadikan suatu pilihan utama karena Indonesia memiliki jumlah sumber daya batu bara yang sangat besar.

Penggunaan batu bara sebagai sumber energi menghasilkan hasil samping berupa limbah berupa abu layang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*). Jumlah abu dasar 10-15 % dan jumlah abu layang 85-90 % dari total abu yang dihasilkan dari pembakaran batu bara [2]. Abu layang batu bara adalah limbah industri yang dihasilkan dari pembakaran batu bara dan terdiri dari partikel halus. Komponen utama adalah oksida logam SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , dan K_2O . Abu layang juga mengandung banyak logam berat, beberapa diantaranya menjadi perhatian lingkungan. Umumnya, unsur-unsur seperti Cr, Pb, Ni, Ba, Sr, V dan Zn yang ada dalam jumlah yang signifikan [3]. Abu layang batu bara dimanfaatkan, antara lain dalam produksi bahan bangunan, dalam pembuatan semen, beton, keramik, dasar jalan, mineral *filler* dalam campuran aspal, di tanggul dan reklamasi tanah [4].

Pembangkit listrik dan pabrik dalam proses produksinya menghasilkan abu layang yang jumlahnya semakin meningkat setiap tahunnya. Jumlah abu layang yang dimanfaatkan kembali relatif sedikit dibandingkan dengan jumlah abu layang yang dihasilkan [2]. Oleh karena itu, masalah pembuangan abu layang menjadi isu lingkungan dan ekonomi yang serius karena abu layang mengandung banyak logam berat. Abu layang yang dihasilkan sebagian tidak dimanfaatkan dan hanya ditimbun di *ash disposal area* atau ditumpuk begitu saja di area industri seperti pada sektor pembangkit listrik [5]. Abu layang yang disimpan atau ditimbun begitu saja dapat mengalami transformasi mineralogi dan kimia, baik unsur mayor, unsur minor atau unsur runtu. Selain transformasi mineralogi dan kimia juga mengalami perubahan sifat fisik. Saat proses transformasi kimia dan mineralogi, unsur dapat dilepaskan ke lingkungan dengan jumlah yang signifikan dari abu layang tersebut. Penumpukan abu layang berpotensi untuk menimbulkan masalah bagi lingkungan, pencemaran air dan tanah akibat pelindian logam berat, abu layang tertiuup angin sehingga mengganggu pernafasan. Penelitian mobilitas dan pelindian logam berat perlu dilakukan untuk menilai kemungkinan elemen ini bermigrasi ke lingkungan, sehingga

kita dapat mengetahui sejauh mana efek negatif dari penimbunan abu layang terhadap lingkungan.

Keberadaan logam berat pada abu layang berasal dari batu bara itu sendiri. Batubara mengandung logam berat dan pemanasan pada suhu tinggi menyebabkan kadar logam berat pada abu layang meningkat hingga sepuluh kali lipat dari kadar batu bara asal [4]. Logam berat biasanya menimbulkan efek-efek khusus pada organisme, misalnya logam berat Cr yang dapat menimbulkan efek racun bagi organisme. Logam Cr berada di lingkungan dan limbah dalam bentuk dua spesies oksidasi yaitu Cr(III) dan Cr(VI). Kedua bentuk Cr tersebut memiliki berbagai sifat dan aktivitas biologis pada organisme hidup. Cr(III) dianggap sebagai jejak unsur yang sangat penting untuk kelangsungan hidup organisme, karena dibutuhkan untuk metabolisme glukosa. Cr(VI) memiliki sifat beracun dan mutagenik. Kehadiran Cr(VI) yang berlebihan menyebabkan kerusakan sistem peredaran darah dan bersifat karsinogenik. Cr(VI) bersifat stabil dan terakumulasi dalam tubuh, sehingga lama-kelamaan dapat memicu sel-sel kanker (karsinogenik) [6]. Selain itu, bahaya logam Cr dapat menyebabkan anemia, depresi, kelelahan, lemahnya daya ingat, insomnia, sakit kepala, iritasi bahkan kematian.

Selain logam Cr, logam Cu juga terdapat di lingkungan dalam konsentrasi tinggi yang membahayakan lingkungan dan organisminya. Toksisitas yang dimiliki oleh tembaga baru akan bekerja dan memperlihatkan pengaruhnya bila logam ini telah masuk ke dalam tubuh organisme dalam jumlah melebihi nilai toleransi organisme terkait [7]. Logam Cu dalam konsentrasi tinggi dapat menyebabkan gejala ginjal, hati, muntaber, pusing, lemah, anemia, dan koma pada manusia.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Preparasi sampel dilakukan dengan tujuan homogenisasi sampel. Sampel abu layang yang diambil dari PLTU dikumpulkan menjadi satu dan dicampur. Sampel abu layang PLTU yang sudah dicampur merata kemudian diayak dengan ayakan ukuran 200 *mesh*. Sampel yang dianalisis adalah sampel yang lolos ayakan 200 *mesh*. Setelah diayak, sampel di oven pada suhu 105 °C selama 24 jam dengan tujuan untuk menghilangkan kadar air sehingga didapatkan berat yang konstan saat ditimbang [8]. Sampel abu layang PLTU ditimbang sebanyak 100 g dengan menggunakan neraca analitik.

Kolom dibuat dengan menggunakan paralon jenis PVC (*polyvinyl chloride*). Paralon yang digunakan sebagai kolom panjangnya 50 cm dan diameternya 1 inci. Paralon yang telah disiapkan

kemudian dirangkai dengan kran dengan ukuran 1 inci sehingga kolom yang dibuat dari paralon menyerupai buret. Untuk menghindari adanya kontaminasi dari kolom yang dapat mengganggu selama proses elusi, paralon diisi dengan asam yang akan digunakan sebagai eluen selama 3 jam dengan posisi kran tertutup. Setelah itu kran dibuka untuk mengeluarkan eluen dan kolom paralon dibilas menggunakan akuabides.

2.1. Konsentrasi Cu dan Cr abu layang terlarut

Konsentrasi Cu dan Cr abu layang terlarut diperoleh dengan mendestruksi padatan abu layang menggunakan larutan akuaregia dan HF. Campuran 10 mL larutan akuaregia, 15 mL larutan HF dan 25 g abu layang digojok selama 24 jam, kemudian disaring dengan kertas saring whatman 42. Filtratnya diencerkan dengan menambahkan akuabides hingga volume akhirnya 25 mL. Filtrat yang telah diencerkan tersebut dianalisis dengan spektroskopi serapan atom. Langkah di atas dilakukan pengulangan tiga kali.

2.2. Variasi Jenis Eluen

Proses elusi abu layang dilakukan dengan eluen yang bervariasi untuk mengetahui jenis eluen yang paling banyak mengelusi logam berat Cu dan Cr pada lindi abu layang PLTU ke dalam eluat. Eluen yang digunakan yaitu eluen HNO_3 , H_2SO_4 , dan HCl . Eluen yang digunakan untuk proses elusi abu layang mempunyai molaritas yang sama yaitu 1 M. Untuk mengetahui pengaruh jenis eluen massa abu layang yang dielusi sama yaitu 100 g, laju alir eluen saat elusi sama yaitu $\pm 1,3$ mL/menit.

2.3. Variasi Konsentrasi Eluen

Pengaruh konsentrasi eluen dapat diketahui dengan memvariasikan molaritas eluen. Proses elusi abu layang dilakukan dengan eluen HCl dan HNO_3 yang molaritasnya bervariasi yaitu 0,5 M, 1 M, 1,25 M, 1,5 M, 1,75 M, dan 2 M. Eluen H_2SO_4 dengan molaritas yaitu 0,1 M; 0,3 M; 0,5 M; 0,75 M; 1 M; 1,25 M; dan 1,5 M.

2.4. Elusi berkelanjutan

Proses elusi berkelanjutan dilakukan dengan mengalirkan eluen sebanyak 10 kali dengan larutan HNO_3 1,5 M untuk Cu dan 1,75 M untuk logam Cr, masing-masing eluat yang telah melewati kolom ditampung pada wadah yang berbeda. kemudian dianalisis dengan SSA.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

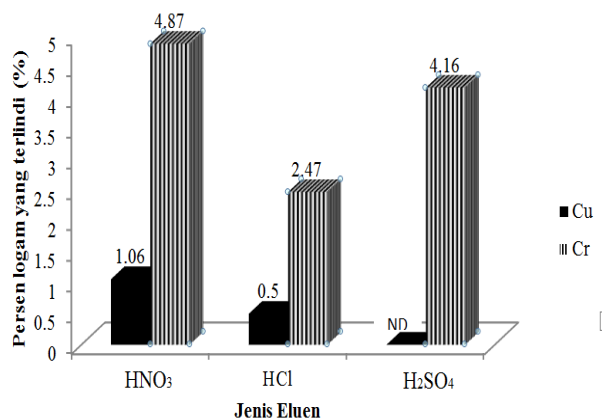
Abu layang yang digunakan sebagai sampel berasal dari hasil pembakaran batu bara PLTU di Cirebon.

3.1. Konsentrasi Cu dan Cr dalam Abu Layang yang terlarut

Konsentrasi logam yang didapatkan dari destruksi abu layang batu bara PLTU yaitu konsentrasi Cu yang dapat terlarut yaitu 24,66 mg/kg sedangkan untuk konsentrasi Cr yang dapat terlarut yaitu 27,39 mg/kg. Logam Cr mempunyai konsentrasi lebih tinggi dibandingkan konsentrasi logam Cu. Menurut penelitian [8], [9], logam Cr pada abu layang terdapat pada bagian permukaan padatan abu layang, ini mungkin yang menyebabkan logam Cr terlarut lebih banyak. Logam yang terletak pada permukaan partikel lebih mudah terlarut ke dalam pelarut selama abu layang berinteraksi dengan pelarut pada proses destruksi logam dari abu layang. Kemudahan suatu unsur untuk terlarut erat hubungannya dengan bagaimana unsur tersebut berasosiasi dengan senyawa lain dalam padatan. Logam Cr terletak di permukaan abu layang sehingga kontak dengan pelarut lebih mudah yang berakibat meningkatnya laju pelarutan logam Cr ke dalam larutan.

3.2. Variasi Jenis Eluen

Prinsip elusi adalah adanya senyawa dalam suatu matriks yang kompleks dari suatu padatan, yang dapat terelusi oleh suatu eluen tertentu. Suatu materi padat dapat mengalami difusi ke dalam eluen hingga ada unsur atau senyawa yang terelusi ke eluat. Dua langkah utama dalam proses elusi kontak antara padatan dengan eluen serta pemisahan eluen dari padatan inert. Eluen yang digunakan dalam proses elusi mempengaruhi kecepatan elusi [10]. Begitu juga diasumsikan bahwa logam berat yang terperangkap dalam matriks padatan abu layang akan mengalami kesetimbangan distribusi dengan spesies eluen yaitu HNO_3 , HCl , dan H_2SO_4 . Logam Cu dan Cr dari abu layang dapat terelusi secara berbeda dengan variasi jenis eluen. Hasil ini didasarkan serapan eluat terhadap sumber garis resonansi menggunakan spektroskopi serapan atom setelah proses elusi.



Gambar 1. Persen logam Cu dan Cr yang terelusi oleh variasi jenis eluen

Jenis eluen merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi proses elusi. Berdasarkan Gambar 1 terlihat bahwa pengaruh perlakuan dengan variasi jenis eluen pada proses elusi logam berat Cu dan Cr dari abu layang menunjukkan hasil yang berbeda untuk setiap jenis eluen. Logam berat Cu dan Cr keduanya terelusi paling banyak dengan menggunakan eluen HNO₃. Sampel yang dielusi kandungan unsur-unsurnya dengan pemakaian asam yang berbeda akan memberikan hasil yang berbeda pula untuk setiap logam. Hal ini diduga akibat pengaruh kemampuan mendestruksi dari eluen yang digunakan.

Persen terlindi logam berat Cu yang dapat terelusi oleh eluen HNO₃ adalah 1,06 %, sedangkan persen terlindi logam berat Cr yang dapat terelusi adalah 4,87 %. Konsentrasi tersebut merupakan konsentrasi logam Cu dan Cr yang paling banyak terelusi ke eluat. Logam Cu dan Cr yang dapat terelusi ke eluat paling banyak dengan menggunakan eluen HNO₃. Eluen HNO₃ paling efektif dalam mengelusi logam berat Cu dan Cr yang ada dalam abu layang karena eluen HNO₃ dapat melarutkan hampir semua logam. Kemampuan mendestruksi logam berat eluen HNO₃ sangat baik oleh karena itu eluen HNO₃ dapat melarutkan logam berat yang ada dalam mineral abu layang dengan baik.

Persen terlindi logam berat Cu yang dapat terelusi oleh eluen HCl sebesar 0,5 %, dan untuk logam berat Cr persen terlindi sebesar 2,47 %. Proses elusi menggunakan eluen H₂SO₄ logam berat Cr yang dapat terelusi ke eluat sebesar 4,16 %, sedangkan logam Cu tidak dapat terelusi dengan menggunakan eluen tersebut. Proses elusi dengan eluen HCl dan H₂SO₄ memberikan konsentrasi yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan eluen HNO₃, hal ini karena kemampuan eluen HCl dan H₂SO₄ mendestruksi logam dari padatan abu layang batu bara PLTU tidak sebaik eluen HNO₃. Kemampuan mendestruksi logam

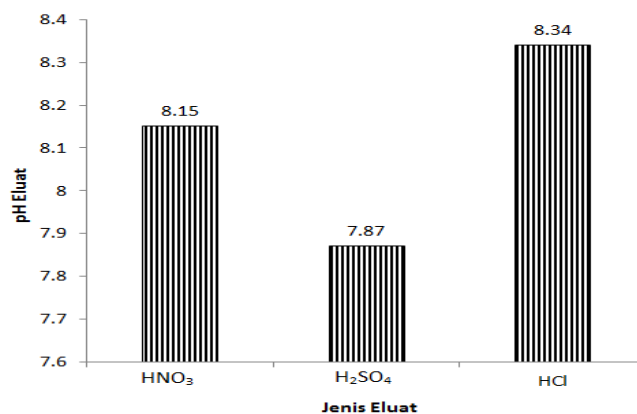
berat dari mineral yang terdapat dalam abu layang kurang baik karena tidak semua logam dapat dilarutkan oleh eluen tersebut. Konsentrasi logam berat yang dapat terelusi oleh eluen HCl dan H₂SO₄ tidak sebanyak jika menggunakan eluen HNO₃, hal ini juga dimungkinkan karena setelah terjadi proses elusi logam berat terbentuk padatan sekunder. Padatan sekunder dapat terbentuk karena asosiasi logam yang terdapat dalam abu layang dengan komponen dari eluen [8].

Semua logam ketika berasosiasi dengan anion nitrat tidak terbentuk endapan, sehingga ketika proses elusi logam berat dengan menggunakan eluen HNO₃ tidak terbentuk padatan sekunder. Padatan sekunder tidak terbentuk sehingga tidak ada logam yang terelusi oleh eluen yang membentuk padatan kembali, sehingga konsentrasi logam yang ada pada eluat paling tinggi menggunakan eluen HNO₃. Proses elusi menggunakan eluen HCl ada beberapa logam yang ketika berasosiasi dengan anion klorida dapat membentuk padatan sekunder. Kation yang dapat membentuk padatan dengan anion klorida adalah Ag⁺, Hg⁺, Pb²⁺, dan Cu⁺. Proses elusi menggunakan eluen H₂SO₄ ada beberapa logam yang ketika berasosiasi dengan anion sulfat dapat membentuk padatan sekunder. Kation yang dapat membentuk padatan dengan anion sulfat adalah Ca²⁺, Ba²⁺, Sr²⁺, dan Pb²⁺. Jayaranjan [11] menyatakan bahwa dalam abu layang batu bara terdapat logam As, B, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, Zn, V, U, dan Ti. Logam-logam yang dapat membentuk endapan ketika berasosiasi dengan anion Cl⁻ dan SO₄²⁻ terdapat di dalam abu layang batu bara, sehingga ada kemungkinan terbentuk padatan sekunder. Akar [6] menyatakan padatan sekunder yang terbentuk dapat mengadsorpsi kembali logam yang terlindi sehingga dapat menurunkan kadar logam yang terlindi, dalam penelitian tersebut tidak menjelaskan bagaimana mekanisme dan interaksi yang terjadi selama adsorpsi kembali oleh padatan sekunder. Secara hipotetis pelindian dengan eluen HCl dan H₂SO₄ terbentuk padatan sekunder sedangkan dengan eluen HNO₃ tidak terbentuk padatan sekunder, sehingga hasil elusi logam berat dengan eluen HCl dan H₂SO₄ lebih rendah jika dibandingkan dengan eluen HNO₃.

Dalam proses lindi, ion H⁺ mempunyai tanggung jawab secara khusus dari reaksi perombakan oksida logam. Anion seperti NO₃⁻, SO₄²⁻, dan Cl⁻ bersifat tidak efektif jika diasumsikan ion H⁺ yang berperan dalam proses lindi tersebut. Sebagai catatan eluen HCl, HNO₃, dan H₂SO₄ diencerkan dengan akuabides dan mempunyai molaritas yang sama. Pada kondisi ini HCl dan HNO₃ mempunyai jumlah ion H⁺ yang

sama, seharusnya HCl dan HNO₃ mempunyai kemampuan yang sama untuk perombakan logam dari abu layang namun pada kenyataannya berbeda. Eluen H₂SO₄ menghasilkan jumlah ion H⁺ dua kali lebih banyak jika dibandingkan dengan HNO₃ dan HCl, akan tetapi eluen H₂SO₄ justru kemampuan mendestruksi lebih rendah jika dibandingkan dengan HCl dan HNO₃ dalam mendestruksi logam Cu dari abu layang. Kemampuan mendestruksi eluen H₂SO₄ untuk logam Cr lebih rendah jika dibandingkan dengan eluen HNO₃, akan tetapi kemampuan mendestruksi eluen H₂SO₄ lebih baik dibandingkan dengan HCl. Hasil ini menunjukkan bahwa proses lindi logam dari abu layang bukanlah proses yang sederhana dan anion mungkin memainkan peranan penting dalam perombakan logam yang ada pada abu layang.

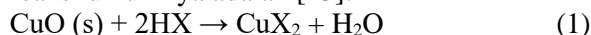
Eluen sebelum dielusikan dikolom pH-nya 0. Berdasarkan Gambar 2 kurva hubungan antara pH eluat dengan jenis eluen, pH eluat naik dari 0 menjadi berkisar antara 7,8 sampai 8,4. pH cenderung naik selama proses elusi, berarti selama proses elusi terjadi pengurangan jumlah ion H⁺ atau terjadi kenaikan jumlah ion OH⁻. Dari sini dapat diasumsikan terjadi pelepasan senyawa atau unsur lain yang menyebabkan sifat basa pada eluat. Abu layang batu bara mengandung logam Ca dalam jumlah yang cukup banyak yang juga dapat terelusi ke eluat dan membentuk Ca(OH)₂ yang berperan menyebabkan eluat bersifat basa [8]. Pengurangan jumlah ion H⁺ dari eluen awal ke eluat dapat diasumsikan terjadinya pertukaran ion pada permukaan padatan abu layang. Ion H⁺ dari eluen asam teradsorpsi di permukaan abu layang sedangkan logam yang ada di permukaan abu layang terelusi ke eluat. Jika reaksi yang terjadi pertukaran ion, seharusnya jumlah H⁺ yang ada di eluat paling sedikit dimiliki oleh eluen HNO₃ karena HNO₃ dapat melindi logam dengan konsentrasi paling banyak. Dengan kata lain semakin banyak ion H⁺ dari HNO₃ yang menempel di abu layang sehingga pH dari eluat HNO₃ seharusnya paling tinggi, namun pada kenyataannya berbeda. Dari sini dapat diasumsikan bahwa reaksi yang mungkin terjadi antara abu layang dan eluen asam tidak sekedar pertukaran ion melainkan ada reaksi lain yang mungkin dipengaruhi anion dari asam.



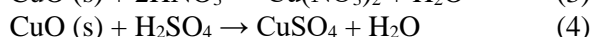
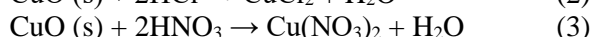
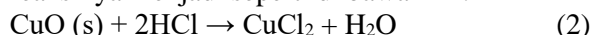
Gambar 2. pH eluat setelah proses elusi oleh variasi jenis eluen

Logam Cr terlepas lebih banyak dengan menggunakan eluen H₂SO₄ dibandingkan dengan pelarut HCl, sedangkan untuk logam Cu terelusi ke eluat lebih banyak dengan menggunakan eluen HCl dibandingkan dengan eluen H₂SO₄. H₂SO₄ merupakan asam yang kurang reaktif sebagai pengekstrak Cu dalam sampel padatan. HCl merupakan asam yang efektif digunakan untuk melarutkan kebanyakan oksida-oksida logam dan mineral-mineral.

Logam Cu di abu layang batu bara sebanyak 14 % dalam bentuk senyawa CuCl₂, 15 % Cu₂O, 27 % Cu(OH)₂ dan 44 % CuO sebagai fraksi yang paling dominan [12]. CuO adalah basa oksida sehingga dapat terlarut dengan asam mineral, reaksi umumnya adalah [13]:



Ketika asamnya adalah HCl, HNO₃, dan H₂SO₄ reaksinya menjadi seperti di bawah ini:



Berdasarkan data nilai kelarutan pada suhu 25 °C kelarutan Cu(NO₃)₂ 59,2; kelarutan 43,1; dan kelarutan CuSO₄ 18 [14]. Berdasarkan data tersebut kelarutan paling besar Cu(NO₃)₂, kemudian disusul kelarutan CuCl₂ dan yang mempunyai kelarutan paling kecil dimiliki oleh CuSO₄. Berdasar data kelarutan tersebut mendukung data penelitian bahwa logam Cu terelusi paling baik oleh eluen HNO₃ karena kelarutannya paling besar, dan logam Cu dari abu layang batu bara terelusi paling sedikit dengan eluen H₂SO₄ karena kelarutannya paling kecil. Sedangkan eluen asam yang paling berpengaruh terhadap kadar logam berat Cu hasil lindi abu layang batu bara secara kolom berturut-turut yaitu HNO₃ > HCl > H₂SO₄.

Berdasarkan data penelitian eluen H₂SO₄ lebih efektif digunakan untuk melindi logam Cr yang ada pada padatan abu layang PLTU dibandingkan

dengan eluen HCl. H_2SO_4 dapat berperan sebagai asam oksidator dengan logam Cr, sedangkan HCl hanya berperan sebagai asam kuat non oksidator. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa eluen asam yang paling berpengaruh terhadap konsentrasi logam berat Cr hasil lindi abu layang batu bara secara kolom berturut-turut yaitu $\text{HNO}_3 > \text{H}_2\text{SO}_4 > \text{HCl}$. Djerat [13] menyatakan bahwa tidak ada informasi yang rinci yang ditemukan di literatur tentang mekanisme pelarutan oksida logam dalam sulfat, lindi prosesnya rumit karena dipengaruhi beberapa parameter seperti aktivitas proton, kecenderungan anion untuk membentuk kompleks pada permukaan padatan dengan stabilitas yang berbeda dan temperatur yang simultan mempercepat proses lindi.

3.3. Variasi Konsentrasi Eluen

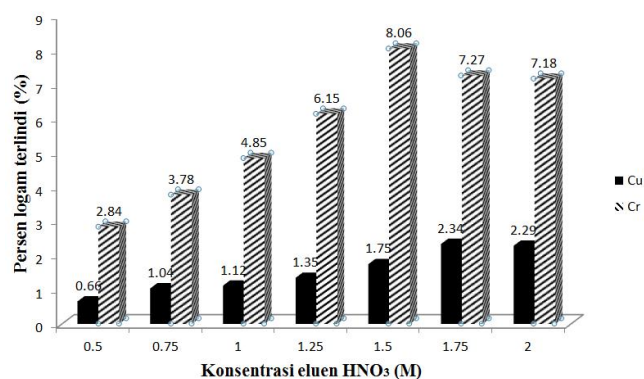
Eluen yang digunakan pada proses elusi ini adalah eluen HNO_3 , H_2SO_4 , dan HCl. Konsentrasi eluen dibuat bervariasi dengan tujuan untuk mengetahui konsentrasi paling maksimal dari masing-masing eluen untuk proses elusi abu layang batu bara PLTU. Konsentrasi eluen HNO_3 dan HCl yang digunakan sebagai eluen yaitu 0,5 M; 0,75 M; 1 M; 1,25 M; 1,5 M; 1,75 M; dan 2 M. Konsentrasi eluen H_2SO_4 yang digunakan sebagai eluen yaitu 0,1 M; 0,3 M; 0,5 M; 0,75 M; 1 M; 1,25 M; dan 1,5 M. Kurva standar yang dibuat dalam penelitian untuk masing-masing logam, pelarut yang digunakan dalam pembuatan larutan standar disesuaikan dengan variasi konsentrasi eluen yang digunakan dalam proses elusi logam berat abu layang batu bara PLTU.

Pelarut untuk pembuatan kurva standar disesuaikan dengan konsentrasi eluen dengan tujuan untuk mengurangi kesalahan karena matriks pada saat analisis. Penggunaan asam yang terlalu pekat dapat pula menyebabkan gangguan dalam analisis dengan spektroskopi serapan atom. Kepekatan yang terlalu asam akan menyebabkan nilai absorbansi menjadi lebih rendah dari pada yang semestinya dan akan mengakibatkan konsentrasi sampel (bahan) yang dianalisis akan berkurang nilai serapannya dari nilai yang sebenarnya.

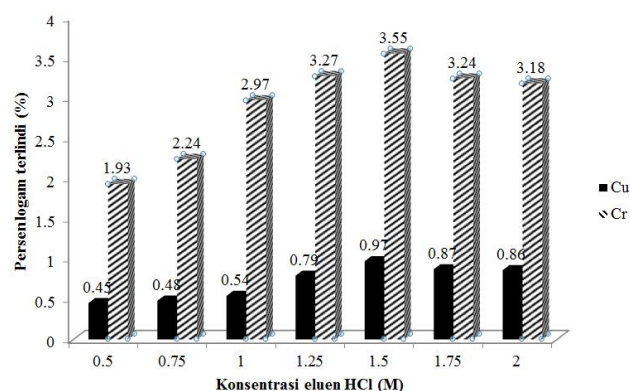
Berdasarkan Gambar 3 didapatkan konsentrasi maksimal eluen HNO_3 yang dapat melindi logam berat Cu dari abu layang adalah 1,75 M yaitu 2,34 % yang terlindi. Berdasarkan data tersebut didapatkan konsentrasi maksimal yang dapat melindi logam berat Cr dari abu layang adalah 1,5 M yaitu sebesar 8,06 % yang terlindi. Pada konsentrasi tersebut logam Cu dan Cr terelusi ke eluat secara maksimal, karena pada konsentrasi tersebut logam Cu dan Cr yang terelusi ke eluat sudah mencapai titik jenuh. Konsentrasi yang

didapat merupakan konsentrasi optimum, karena setelah konsentrasi tersebut hasil elusi logam Cu dan Cr cenderung turun atau tetap.

Berdasarkan Gambar 4 tersebut didapatkan konsentrasi maksimal eluen HCl yang dapat melindi logam berat Cu dan Cr dari abu layang adalah 1,5 M. Konsentrasi maksimal logam Cu yang terlindi ke eluat 0,97 % dan untuk logam Cr 3,55 %. Hal ini disebabkan karena di samping eluennya telah mencapai keadaan kesetimbangan jumlah logam yang terelusi ke eluat sudah jenuh. Konsentrasi yang semakin besar lagi tidak lagi meningkatkan konsentrasi logam yang terelusi, tetapi karena konsentrasi logam sudah jenuh kenaikan konsentrasi tidak lagi digunakan untuk merombak logam Cu atau Cr lagi melainkan untuk merombak logam-logam lain yang belum jenuh di eluat yang terkandung pada abu layang.



Gambar 3. Persen terlindi logam Cu dan Cr (%) dengan konsentrasi eluen HNO_3 (M)



Gambar 4. Persen terlindi logam Cu dan Cr (%) dengan konsentrasi eluen HCl (M)

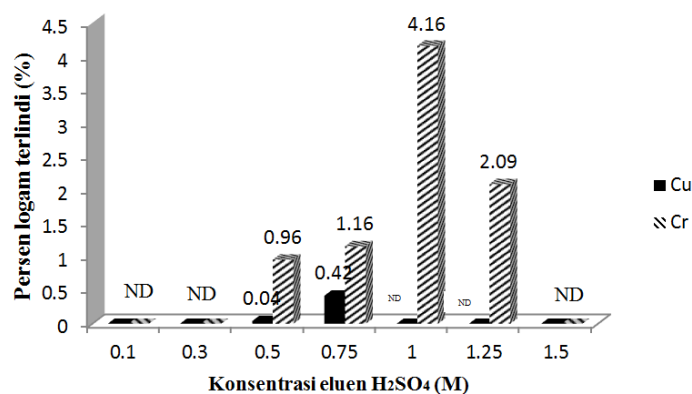
Variasi konsentrasi eluen H_2SO_4 berbeda dengan dua eluen yang lain, karena pada proses elusi menggunakan eluen H_2SO_4 semakin meningkatnya konsentrasi eluen H_2SO_4 ternyata abu layang di dalam kolom mengalami pengerasan sehingga eluen tidak bisa keluar dari kolom dan tertahan di dalam kolom, karena terjadi pengerasan abu layang di dalam kolom karena peningkatan konsentrasi maka konsentrasi eluen

divariasi dengan konsentrasi yang lebih rendah. Pada konsentrasi H_2SO_4 sebesar 1,5 M pengerasan terjadi eluen tertahan di dalam kolom sehingga tidak ada eluat yang dapat dianalisis. Saat abu layang batu bara dikontakkan dengan larutan asam sulfat terbentuk padatan padatan gypsum, untuk menghindari terbentuknya padatan maka saat mengontakkan abu layang dengan larutan asam sulfat harus dengan rasio L/S yang besar. Menurut Akar [8] kalsium yang tinggi yang terdapat di abu layang batu bara saat berinteraksi dengan asam sulfat menyebabkan pembentukan padatan sekunder dan mengurangi kelarutan dari beberapa logam. Saat abu layang berinteraksi dengan eluen, proses yang berefek pada proses adalah terlarutnya padatan primer dan pengendapan padatan sekunder sama seperti redok, penyerapan, dan hidrolisis. Tingginya konsentrasi dari kalsium mungkin menyebabkan reaksi pengendapan sekunder karena telah melampaui batas kelarutan dari beberapa logam. Konsentrasi terendah eluen H_2SO_4 yang masih dapat mengelusi logam Cu dan Cr adalah 0,5 M. Konsentrasi eluen H_2SO_4 0,5 M merupakan konsentrasi terendah yang bisa mengelusi logam Cu dan Cr, dibawah konsentrasi tersebut logam Cu dan Cr dalam abu layang tidak terelusi.

Gambar 5 menunjukkan logam Cu terelusi hanya pada konsentrasi 0,5 M dan 0,75 M hal ini dimungkinkan logam Cu yang terelusi konsentrasinya rendah diadsorp kembali ke permukaan padatan sekunder yang terbentuk selama proses elusi sehingga logam Cu tidak terdeteksi lagi ketika dianalisis dengan spektroskopi serapan atom. Logam Cr terelusi dengan eluen H_2SO_4 maksimum pada konsentrasi 1 M, pada konsentrasi lebih tinggi logam Cr yang terelusi turun hal ini juga mungkin karena ada logam Cr yang teradsorp kembali oleh padatan sekunder yang terbentuk. Padatan sekunder terbentuk oleh adanya asosiasi anion sulfat dan komponen yang terdapat di dalam abu layang PLTU.

Dari data yang diperoleh dari penelitian ini dapat diasumsikan jika abu layang terkena air hujan asam yang komponen penyusun dari air hujan asam adalah asam sulfat kemungkinan logam berat untuk terlepas ke lingkungan semakin kecil. Air hujan asam tersebut ketika kontak dengan abu layang, abu layang mengalami pengerasan sehingga logam berat tidak terlepas ke lingkungan. Namun lain halnya ketika abu layang kontak dengan air hujan asam dimana komponen asam penyusun air hujan asam adalah asam nitrat kemungkinan logam berat untuk terlepas ke lingkungan lebih besar. Dengan adanya hal ini maka perlu perhatian khusus dalam penanganan

abu layang abu layang batu bara agar tidak mencemari lingkungan. Berdasarkan Permenkes No. 492/MENKES/PER/IV/2010 tentang persyaratan air minum, batas maksimal untuk logam kromium adalah 0,05 ppm dan untuk logam tembaga 2 ppm. Berdasarkan data penelitian logam kromium yang dapat terelusi sudah melebihi ambang batas, sedangkan untuk logam tembaga masih belum melewati ambang batas.



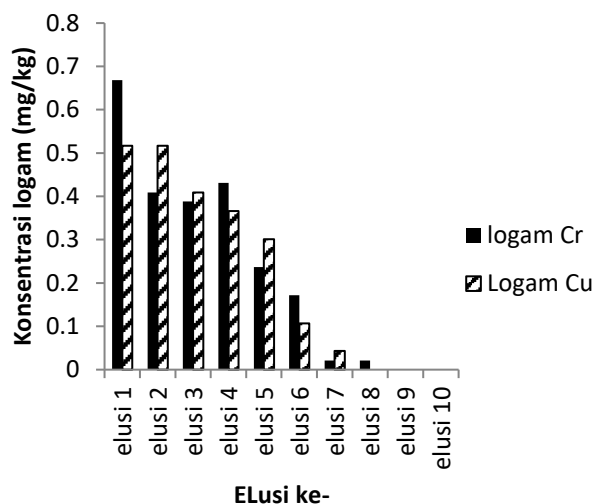
Gambar 5. Persen terelindi logam Cu dan Cr yang terelusi oleh variasi konsentrasi eluen H_2SO_4 (M)

Berdasarkan Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin besarnya konsentrasi eluen semakin banyak logam Cu dan Cr yang dapat terelusi, karena semakin besar konsentrasi eluen kekuatan dalam merombak logam berat dari mineral yang ada dalam abu layang PLTU semakin baik. Konsentrasi eluen yang semakin besar semakin banyak zat yang dapat berinteraksi dengan mineral dalam abu layang sehingga reaksinya dalam melarutkan logam-logam berat semakin efektif. Reaksi antara eluen yang semakin efektif dengan abu layang mengakibatkan semakin banyaknya logam berat Cu dan Cr yang dapat terelusi ke eluat. Konsentrasi logam yang ada dalam abu layang yang terelusi ke eluat sampai pada kondisi tertentu atau konsentrasi logam berat dalam eluat sudah jenuh, kenaikan konsentrasi tidak lagi meningkatkan banyaknya logam yang terelusi tetapi logam berat yang dapat terelusi jumlahnya tetap atau cenderung tetap. Setelah logam berat Cu dan Cr yang ada di dalam eluat jenuh, kenaikan konsentrasi eluen dimungkinkan digunakan untuk merombak logam-logam lain yang terkandung di dalam abu layang.

3.3. Elusi berkelanjutan

Elusi berkelanjutan untuk mengetahui logam total yang dapat terelusi oleh eluen HNO_3 . Logam Cu menggunakan eluen HNO_3 1,75 M yang merupakan eluen yang paling optimum mengelusi logam Cu dan eluen HNO_3 1,5 M untuk logam Cr

dari abu layang batu bara PLTU. Proses elusi berkelanjutan dilakukan dengan mengalirkan eluen di kolom diulang sampai 10 kali dengan tujuan untuk mengetahui konsentrasi maksimal logam yang dapat terlindi oleh eluen HNO_3 .



Gambar 6. Konsentrasi logam Cu dan Cr yang dielusi berkelanjutan dengan eluen HNO_3

Berdasarkan Gambar 6 logam total yang dapat terelusi berkelanjutan dengan eluen HNO_3 , logam Cr yaitu sebanyak 2,38 mg/kg, sedangkan logam Cu sebanyak 2,26 mg/kg. Konsentrasi dari logam Cu dan Cr yang terelusi menggunakan eluen HNO_3 secara kolom hasilnya lebih rendah jika dibanding dengan yang terlarut dengan pelarut akuaregia dan HF. Persentase logam Cu dari abu layang PLTU yang terelusi secara berkelanjutan dengan eluen HNO_3 sebesar 9,16 % dan 8,7 % untuk logam Cr terhadap konsentrasi terlarut logam dalam abu layang dengan pelarut akuaregia dan HF.

Pelarut akuaregia dan HF dapat melarutkan logam ke pelarut lebih banyak dibandingkan dengan menggunakan elusi berkelanjutan dengan eluen HNO_3 , karena kekuatan akuaregia yang lebih kuat dari pada HNO_3 dalam mendestruksi logam yang terdapat dalam abu layang batu bara dan pelarut HF dapat memutuskan ikatan antara logam dan silikat. Saat menggunakan eluen HNO_3 logam tidak terlarut secara sempurna dan tidak cukup efektif untuk melarutkan mineral silika yang terkandung dalam padatan [15].

Logam Cr yang dapat didestruksi dengan akuaregia dan HF konsentrasinya lebih tinggi dibandingkan dengan logam Cu, sedangkan saat elusi berkelanjutan dengan HNO_3 sebagai eluen persen terlindi logam Cu justru lebih besar jika dibandingkan dengan logam Cr. Hal ini dimungkinkan logam Cr dalam abu layang batu bara PLTU berasosiasi dengan silikat atau mineral

lain yang lebih sulit didestruksi dengan eluen HNO_3 , sedangkan logam Cu berasosiasi dengan senyawa yang lebih mudah didestruksi dengan HNO_3 . Asumsi tersebut didukung oleh penelitian mengenai ekstraksi bertahap abu layang batu bara oleh Chang [15] dengan hasil fraksi terbesar 66 % logam kromium berasosiasi dengan silikat dan alumino-silikat, 16 % kompleks organik dan sulfida, senyawa lain kurang dari 1 % ; untuk logam Cu sebanyak 55 % logam Cu berikatan dengan karbonat, 23 % kompleks organik dan sulfida, 11% dengan silikat dan alumino-silikat dan 10 % logam oksida.

Akar [8] menyatakan jumlah logam runtu yang terlindi dari abu layang ke larutan dan laju pelindian tergantung dalam 4 faktor yaitu, konsentrasi total unsur pada fasa padatan, distribusi unsur di dalam partikel abu layang, asosiasi logam dengan senyawa yang ada pada padatan dan penggabungan lagi unsur membentuk padatan sekunder. Berdasarkan penelitian sebelumnya, beberapa unsur seperti Ca, Cr, dan Mg dilaporkan terletak di permukaan partikel abu layang dan beberapa unsur terdistribusi di dalam partikel. Sebagian besar unsur kation termasuk Mg, Cu, Mn, dan Ni menunjukkan laju lindi yang rendah karena terdistribusi di dalam partikel. Partikel yang terletak pada permukaan partikel lebih mudah terelusi ke dalam eluat selama abu layang berinteraksi dengan eluen pada proses elusi. Kemudahan suatu unsur untuk terelusi selain dipengaruhi distribusinya di dalam partikel juga erat hubungannya dengan bagaimana unsur tersebut berasosiasi dan kondisi lingkungan pada saat proses elusi terjadi. Logam Cr terletak di permukaan abu layang namun Cr berasosiasi dengan senyawa yang sulit didestruksi oleh HNO_3 sehingga persen terlindi logam Cr rendah. Logam Cu pada abu layang yang berasosiasi dengan fase yang mudah larut akan terelusi lebih banyak ke larutan dengan laju yang besar sehingga persen terlindi logam Cu lebih besar.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dikemukakan, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Eluen terbaik untuk elusi logam Cu dan Cr dari abu layang PLTU adalah HNO_3 , urutan kereaktifan eluen untuk lindi logam Cu adalah $\text{HNO}_3 > \text{HCl} > \text{H}_2\text{SO}_4$ sedangkan untuk lindi logam Cr adalah $\text{HNO}_3 > \text{H}_2\text{SO}_4 > \text{HCl}$.
2. Konsentrasi eluen terbaik untuk elusi logam Cu adalah eluen HNO_3 1,75 M dengan logam Cu yang terelusi 0,56 ppm dan HNO_3 1,5 M dengan logam Cr yang terelusi 2,03 ppm.

3. Logam Cr yang dapat terelusi secara berkelanjutan adalah 8,70% dengan eluen HNO_3 1,5 M dan logam Cu adalah 9,16% dengan eluen HNO_3 1,75 M.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Cirebon yang sudah membantu dalam proses penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. H. Firmansyah, "PENGARUH EKSPOR MINYAK BUMI MENTAH DAN IMPOR PRODUK MINYAK BUMI OLAHAN TERHADAP PERTUMBUHAN EKONOMI INDONESIA," *E-Journal Ekonomi Pembangunan*, vol. 11, no. 6, pp. 2045–2480, 2022.
- [2] C. R. Ward, D. French, J. Jankowski, M. Dubikova, Z. Li, and K. W. Riley, "Element mobility from fresh and long-stored acidic fly ashes associated with an Australian power station," *Int J Coal Geol*, vol. 80, no. 3–4, pp. 224–236, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.coal.2009.09.001.
- [3] Z. T. Yao, X. S. Ji, P. K. Sarker, J. H. Tang, L. Q. Ge, M. S. Xia, and Y. Q. Xi, "A comprehensive review on the applications of coal fly ash," *Earth Sci Rev*, vol. 141, pp. 105–121, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.earscirev.2014.11.016.
- [4] B. Cetin and A. H. Aydilek, "pH and fly ash type effect on trace metal leaching from embankment soils," *Resour Conserv Recycl*, vol. 80, pp. 107–117, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.resconrec.2013.09.006.
- [5] M. Izquierdo and X. Querol, "Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview," *Int J Coal Geol*, vol. 94, pp. 54–66, May 2012, doi: 10.1016/j.coal.2011.10.006.
- [6] E. Sočo and J. Kalembkiewicz, "Investigations on Cr mobility from coal fly ash," *Fuel*, vol. 88, no. 8, pp. 1513–1519, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.fuel.2009.02.021.
- [7] H. Palar, *Pencemaran & Toksikologi logam berat*, 1st ed., vol. 1. Jakarta: Rineka Cipta, 2004.
- [8] G. Akar, M. Polat, G. Galecki, and U. Ipekoglu, "Leaching behavior of selected trace elements in coal fly ash samples from Yenikoy coal-fired power plants," *Fuel Processing Technology*, vol. 104, pp. 50–56, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.fuproc.2012.06.026.
- [9] G. Neupane and R. J. Donahoe, "Leachability of elements in alkaline and acidic coal fly ash samples during batch and column leaching tests," *Fuel*, vol. 104, pp. 758–770, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.06.013.
- [10] S. Bahri, "Ekstraksi Kulit Batang Nangka menggunakan Air untuk Pewarna Alami Tekstil," *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, vol. 8, no. 2, p. 73, Jul. 2020, doi: 10.29103/jtku.v8i2.2683.
- [11] M. L. D. Jayaranjan, E. D. van Hullebusch, and A. P. Annachhatre, "Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash," *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 13, no. 4, pp. 467–486, Dec. 2014, doi: 10.1007/s11157-014-9336-4.
- [12] M. C. Hsiao, H. P. Wang, and Y. W. Yang, "EXAFS and XANES Studies of Copper in a Solidified Fly Ash," *Environ Sci Technol*, vol. 35, no. 12, pp. 2532–2535, Jun. 2001, doi: 10.1021/es001374v.
- [13] N. Habbache, N. Alane, S. Djerad, and L. Tifouti, "Leaching of copper oxide with different acid solutions," *Chemical Engineering Journal*, vol. 152, no. 2–3, pp. 503–508, Oct. 2009.
- [14] H. Gr̈unewald, "Solubilities of Inorganic and Organic Compounds," *Angewandte Chemie*, vol. 76, no. 19, pp. 832–832, Oct. 1964.
- [15] C.-Y. Chang, C.-F. Wang, D. T. Mui, and H.-L. Chiang, "Application of methods (sequential extraction procedures and high-pressure digestion method) to fly ash particles to determine the element constituents: A case study for BCR 176," *J Hazard Mater*, vol. 163, no. 2–3, pp. 578–587, Apr. 2009.