

STUDI PUSTAKA POTENSI EKSTRAKSI LOGAM DARI LIMBAH ELEKTRONIK DENGAN BIOLEACHING

¹Riria Zendy Mirahati

¹Program Studi Teknik Metalurgi – Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral,
Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta
Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Yogyakarta 55283 Indonesia

¹ririarendymirahati@upnyk.ac.id

ABSTRACT

*Electronic waste is usually processed using pyrometallurgy and hydrometallurgical methods. However, solutions for economically and ecologically more efficient metal recovery to be pursued. Biohydrometallurgy can be a technology that makes new hope for metal recovery from industrial waste. Bioleaching is one of the methods applied in this technology and is concern to the center of scientific studies. This paper presents the results of laboratory bioleaching metal tests from electronic waste, processes and factors that influence chemical reactions. This paper also present of a preliminary study on copper bioleaching from electronic waste using *Acidithiobacillus ferrooxidans*.*

Keywords: Electronic waste, bioleaching, recovery, Acidithiobacillus ferrooxidans.

ABSTRAK

Limbah elektronik biasanya diproses menggunakan metode pirometalurgi dan hidrometalurgi. Namun, solusi baru untuk *recovery* logam yang lebih efisien secara ekonomis dan ekologis terus dilakukan pencarian. Biohidrometalurgi dapat menjadi teknologi yang menjadikan harapan baru untuk *recovery* logam dari limbah industri. *Bioleaching* salah satu metode yang diterapkan dalam teknologi ini dan menjadi perhatian oleh pusat studi ilmiah. Pada tulisan ini menyajikan hasil uji laboratorium *bioleaching* logam dari limbah elektronik, proses dan faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi kimia. Pada tulisan ini juga menyajikan hasil studi awal pada *bioleaching* tembaga dari limbah elektronik dengan menggunakan bakteri *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Kata kunci. Limbah elektronik, *bioleaching*, *recovery*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

1. PENDAHULUAN

Selama beberapa dekade terakhir, bioteknologi pada dunia industri menjadi salah satu bidang yang mengalami pertumbuhan paling cepat dalam ilmu bioteknologi. Enzim, mikroorganisme, sel hewan atau tumbuhan sekarang banyak digunakan dalam pembuatan dan pengolahan bahan kimia, material maupun energi. Proses mikrobiologis berhasil digunakan dalam penambangan dan *recovery* logam secara biohidrometalurgi dari bijih berkadar rendah (misalnya *bioleaching* tembaga dari kalkopirit).

Bioleaching memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme untuk mengubah logam yang ada pada limbah dalam bentuk padat (dalam matriks padat) menjadi bentuk terlarut. Terlepas dari kemungkinan *bioleaching* logam dalam lingkungan alkali (melibatkan bakteri *cyanogenic*), mikroorganisme *acidophilus* dan melakukan proses *bioleaching* (pelindihan) pada lingkungan asam memiliki peran penting dalam teknologi biohidrometalurgi. Diantara kelompok-kelompok besar bakteri, yang paling umum digunakan adalah *acidophilus* dan konsorsium mikroba *chemolithotrophic*: *Acidithiobacillus ferrooxidans*; *Acidithiobacillus thiooxidans*; *Leptospirillum*

ferrooxidans dan heterotrof, misalnya *Sulfolobus* sp. Selain itu, jamur *Penicillium* sp. dan *Aspergillus niger* adalah contoh beberapa mikroorganisme eukariotik yang digunakan dalam *bioleaching* selama *recovery* logam dari limbah industri. Proses *bioleaching* lebih murah dan lebih mudah dilakukan dibandingkan dengan teknik konvensional. Keuntungannya adalah fleksibilitas mikroorganisme mudah beradaptasi dan hidup pada kondisi yang berubah secara drastis dan ekstrim.

Proses biohidrometalurgi dari limbah padat mirip dengan siklus logam biogeokimia alami dan mengurangi sumber daya, seperti bijih, energi, dan ruang TPA (Tempat Pembuangan Akhir). Teknologi ini ramah lingkungan (dibandingkan dengan metode kimia) dan dianggap sebagai *green technology* (menghasilkan sedikit limbah). Ini mengakibatkan semakin banyak para peneliti tertarik pada biohidrometalurgi, teknologi yang dapat memberikan alternatif yang menarik untuk metode fisik dan kimia yang saat ini digunakan untuk *recovery* logam berharga dari limbah.

Penelitian tentang kemungkinan penggunaan metode biologis untuk ekstraksi logam dari bahan limbah juga dilakukan pada limbah peralatan listrik dan elektronik. Diperkirakan bahwa limbah

peralatan listrik dan elektronik sekarang merupakan salah satu limbah yang tumbuh paling cepat di dunia. Menurut perkiraan dari *United Nations Environment Programme* (UNEP), sekitar 50 juta ton limbah elektronik diproduksi setiap tahun di seluruh dunia, dimana hanya 10% yang didaur ulang. Proses pengolahan limbah sangat dianjurkan, tidak hanya karena dampaknya terhadap lingkungan jika penanganannya tidak terkontrol, tetapi juga terkait dengan keuntungan yang dihasilkan kemungkinan *recovery* komponen-komponen berharga. Tidak diragukan lagi, komposisi kuantitatif limbah peralatan elektronik membuat jenis limbah ini menarik dalam melakukan *recovery* logam. Khususnya bahan-bahan yang kaya akan logam adalah *printed circuit board* (PCBs), merupakan bagian dari perangkat elektronik, diantaranya komponen yang dominan, yaitu tembaga. Makalah ini menyajikan hasil laboratorium yang dilakukan pada *recovery* logam dari *e-waste* (limbah elektronik) dengan metode bihidrometalurgi dengan batasan tembaga. Mekanisme proses dan faktor-faktor yang mempengaruhi arah dan kinetika *bioleaching* dijelaskan dalam makalah ini. Selain hasil percobaan *bioleaching* logam dasar (misal; Al, Zn, Ni), perhatian juga diberikan pada kemungkinan mengekstraksi logam mulia dari limbah elektronik. Makalah ini juga menyajikan hasil awal *bioleaching* tembaga dari PCBs, yang diperoleh dari ponsel bekas, dengan bakteri *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

II. BIOLEACHING DARI LIMBAH ELEKTRONIK

Studi tentang ekstraksi logam dari bahan limbah dilakukan dengan menggunakan berbagai mikroorganisme tergantung pada jenis limbah (Tabel. 1), yang mengandung logam dasar, logam mulia, dan berbahaya. Sampah elektronik adalah jenis limbah yang menarik, yang merupakan campuran dari berbagai logam (terutama Cu, Al, Fe, Ni) dan paduannya, dan komponen yang diganti dengan plastik dan keramik.

Printed electronic circuit boards adalah sumber utama logam berharga dalam limbah. Misalnya, kandungan logam dalam unsur-unsur ponsel adalah 28%, termasuk 10-20% tembaga, 1-5% timah, 1-3% nikel, kandungan logam mulia (Ag, Pt, Au) sekitar 0,3-0,4%, dan sisanya: gelas dan keramik. Terlepas dari metode konvensional proses skrap elektronik (metode piro dan hidrometalurgi), penggunaan mikroorganisme ini telah digunakan untuk *recovery* logam dari limbah elektronik. Eksperimental dilakukan dengan *leaching/* pelindian menggunakan bakteri untuk ekstraksi tembaga, seng, timbal, nikel, timah, aluminium dari limbah elektronik. *Bioleaching* logam mulia (Ag, Au) limbah elektronik dilakukan dengan bakteri *sianogenik* (misal: *Chromobacterium violaceum*, *Pseudomonas fluorescens*). Bakteri ini memiliki kemampuan untuk menghasilkan asam hidrosianat (HCN) yang dapat melarutkan emas. Informasi terperinci tentang mikroorganisme dan tingkatan berbagai logam yang terlepas dari skrap elektronik diberikan di Tabel. 2.1

Tabel 2.1.
Contoh limbah industri yang diolah dengan *bioleaching*

Limbah	Logam yang dileaching	Mikroorganisme
Baterai lithium	Li, Co	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>
<i>Fly ash</i>	Zn, Al, Cd, Cu, Ni, Cr, Pb, Mn, Fe	<i>Thiobacillus thiooxidans</i> + <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> , <i>Aspergillus niger</i>
Penyamakan kulit	Cr	<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>
Limbah lumpur	Cu, Ni, Zn, Cr	<i>Iron oxidizing bacteria</i>
<i>Used cracking catalysts, hydro-processing catalysts</i>	Al, Ni, Mo, V, Sb	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>
<i>Slag BOF</i> pembuatan baja, slag produksi tembaga	Zn, Fe, Cu, Ni	<i>Acidithiobacillus spp.</i> , <i>Leptospirillum spp.</i>

Limbah	Logam yang dileaching	Mikroorganisme
Limbah perhiasan, konverter katalitik mobil, skrap elektronik	Ag, Au, Pt	<i>Chromobacterium violaceum</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Pseudomonas. plecoglossicida</i>
Scrap elektronik	Cu, Ni, Al, Zn	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> + <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>

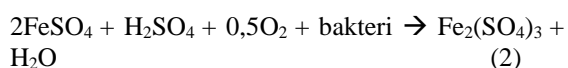
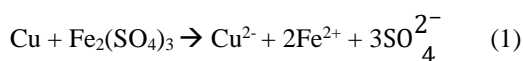
Tabel 2.2.

Tingkatan berbagai Pelarutan Logam Menggunakan *Bioleaching* pada Scrap Elektronik

Spies Mikroorganisme	Tingkat Logam yang Terlarut
<i>A. ferrooxidans</i> + <i>A. thiooxidans</i>	Cu; Ni; Al; Zn >90%
<i>A. ferrooxidans</i>	Cu 99%
<i>A. ferrooxidans</i> <i>A. thiooxidans</i> <i>A. ferrooxidans</i> + <i>A. thiooxidans</i>	Cu 99%; Cu 74.9%; Cu 99.9%
<i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>	Ni 81%; Cu 89%; Al 79%; Zn 83%
<i>Chromobacterium violaceum</i>	Au 68.5%
<i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium simplicissimum</i>	Cu; Sn 65%; Al, Ni, Pb, Zn >95%
<i>Thermosulfidooxidans sulfobacillus</i> + <i>Thermoplasma acidophilum</i>	Cu 86%; Zn 80%; Al 64%; Ni74%

2.1 Mekanisme Proses dan Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Tingkat Reaksi

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa proses *bioleaching* logam dari limbah elektronik adalah proses yang kompleks, ditentukan banyak faktor, termasuk: jenis mikroorganisme, pH, konsentrasi Fe^{2+} dalam sistem, kualitatif dan komposisi kuantitatif limbah, toksisitas bahan dan kehalusan material. Suhu dan waktu juga memainkan peran penting dalam reaksi. Kita dapat mengasumsikan, bahwa mekanisme *bioleaching* logam dan skrap elektronik yang melibatkan bakteri, adalah sama, seperti dalam kasus *leaching* atau pelindian logam sulfida. Dalam kasus ini $Cu: Fe_2(SO_4)_3$ bersama *Acidithiobacillus ferrooxidans* mengoksidasi unsur tembaga yang terkandung dalam limbah menjadi tembaga dalam bentuk ion, menurut reaksi:



Konsentrasi ion Fe^{3+} , pH dan jumlah mikroorganisme yang digunakan memiliki peran penting dalam proses *leaching* logam dari keadaan padat ke larutan. *A. ferrooxidans* dimasukkan dengan dosis yang lebih tinggi, ion besi Fe^{2+} ke dalam sistem dan memastikan pH pada kisaran 1,5 hingga 2,0 (H_2SO_4 yang disesuaikan) untuk meningkatkan efisiensi ekstraksi tembaga dari

Heterogenitas material dari limbah, khususnya keberadaan komponen partikulat alkali dari fase padat dapat menghambat proses *bioleaching* dan memperlambat dinamika. Fenomena ini diamati oleh beberapa peneliti, yang melakukan *leaching* mikrobiologi logam dari limbah elektronik menggunakan campuran kultur bakteri dari *Acidithiobacillus ferrooxidans* dan *Acidithiobacillus thiooxidans*. Meskipun bakteri genus *Acidithiobacillus* dicirikan memiliki kemampuan adaptasi yang baik pada kondisi ekstrim (misal konsentrasi logam yang tinggi), pengaruh racun dari limbah pada mikroorganisme dapat diamati. Diyakini bahwa konsentrasi Al yang tinggi dan karakter basa dari komponen non-logam di lingkungan menghambat pertumbuhan bakteri. Adaptasi bakteri secara bertahap terhadap lingkungan dan penambahan zat pengasam dapat meningkatkan efisiensi proses. Dalam kondisi seperti itu nikel, aluminium, seng dan tembaga dilarutkan dalam larutan dengan efektivitas mendekati 90%.

limbah. *Bioleaching* dapat disertai dengan presipitasi kimia logam dalam bentuk lumpur, yang diamati Pb dan Sn (presipitasi mungkin dalam bentuk $PbSO_4$ dan SnO). Oleh karena itu proses tersebut harus dilakukan dalam kondisi yang terkendali, dengan memasukkan ion besi yang tepat dan penambahan zat pengompleks, memastikan

kondisi optimum untuk pH yang sesuai dengan pertumbuhan bakteri.

Suhu merupakan parameter penting yang menjamin aktivitas mikroorganisme. Suhu optimal genus *Acidithiobacillus* adalah 28-35^o C. Untuk limbah elektronik, percobaan *bioleaching* dilakukan pada suhu 30^o. Efektivitas proses pada 22-25^o C juga diperiksa. Faktor yang mempengaruhi dinamika pelarutan/ disolusi adalah ukuran partikel dari *bioleaching* dan rasio padat terhadap fase cair. Karena itu, penting untuk menyiapkan limbah elektronik dengan tepat dan mengidentifikasi komposisi materialnya. Hasil percobaan menunjukkan, bahwa tingkat *leaching* tembaga, timah dan seng dari fase padat meningkat dengan semakin kecil fraksi ayakan sampel limbah yang dihancurkan. Menjaga persen padatan pada tingkat konstan 7,8 g/dm³, tembaga dilarutkan dalam 99,0%; 74,4%; 99,9% untuk fraksi 0,5-1,0 mm masing-masing dengan *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans* dan campuran bakteri.

Dalam percobaan *bioleaching* logam dari limbah elektronik dilakukan secara berkala. Percobaan *bioleaching* logam dari scrap elektronik dengan metode kolom kontinu dinamis dilakukan. Strain bakteri yang digunakan dari *acidophilus thermophiles* adalah *Thermosulfidooxidans sulfobacillus* dan heterotrophic acidophilus-*Thermoplasma acidophilum*. Kultur bakteri ini pada campuran (Ag⁺, Al³⁺, Cu²⁺, Fe³⁺, Ni²⁺, Pb²⁺, Zn²⁺ dan Sn²⁺) secara efektif ditingkatkan dengan adaptasi bakteri dengan lingkungan setelah 2 tahun, dari 12 g/dm³ hingga 20 g/dm³. Limbah memiliki sifat basa sehingga, *bioleaching* didahului dengan *leaching* awal, untuk menstabilkan pH agar bernilai 2. Selama *bioleaching* selama 280 hari, 80% Zn; 64% Al; 86% Cu; 74% Ni dilarutkan.

2.2. Bioleaching Logam Berharga

Terlepas dari logam dasar dan logam yang terkait (misalnya Cu, Fe, Ni, Al, Sn, Zn, Pb) yang terkandung dalam limbah bahan elektronik, logam mulia (Ag, Au, Pt) juga dipertimbangkan. Keberadaan logam-logam ini memiliki pengaruh yang menentukan nilai scrap elektronik dan biaya selama proses berlangsung. Beberapa percobaan tentang kemungkinan mengekstraksi emas dari

printed electronic circuits dengan *bioleaching* dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Pada percobaan ini digunakan potongan *printed circuit boards* (5mm x 10mm). Bersama dengan emas dan *Chromobacterium violaceum* secara mikrobiologis dilarutkan ke dalam bentuk *dicyanoaurate* [Au(CN)₂⁻]. Konsentrasi maksimum *dicyanoaurate* sesuai dengan pelarutan emas yang awalnya ditambahkan 14,9%.

Selain menggunakan *C. violaceum*, *bioleaching* Au dari scrap elektronik yang dihancurkan dan dengan penambahan mikroorganisme *Pseudomonas fluorescens* juga dilakukan evaluasi. *C. violaceum* terbukti lebih efisien dalam *bioleaching* emas dan memungkinkan untuk mencapai konsentrasi *dicyanoaurate* yang lebih tinggi. Konsentrasi maksimum *dicyanoaurate* untuk pelarutan sampai 68,5% dari total emas yang ditambahkan. Dalam kasus *P. fluorescens*, [Au(CN)₂⁻] tidak stabil dalam larutan. Ini mungkin karena proses penyerapan yang terjadi pada biomassa atau biodegradasi karena sianida logam dapat digunakan sebagai sumber karbon atau nitrogen. Kehadiran sianida tembaga kompleks juga diamati. Selain *dicyanoaurate*, sianida tembaga kompleks terdeteksi selama perlakuan dari scrap elektronik. Kemungkinan tembaga yang tinggi dari scrap dan reaksi cepat dengan sianida. Peneliti sebelumnya merekomendasikan penggunaan sebagai tahap pertama *recovery* emas, *bioleaching eletro-waste* oleh bakteri *A. ferrooxidans*. Ini memungkinkan mengasilkan lebih dari 80% tembaga dari limbah dan secara signifikan meningkatkan *recovery* Au, terutama dengan *C. violaceum*.

2.3. Percobaan

Percobaan yang dilakukan mencakup *bioleaching* dari limbah elektronik yang melibatkan bakteri dari genus *Acidithiobacillus*. Berbagai dosis kultur bakteri dalam larutan *leaching* digunakan dalam percobaan.

Bahan limbah. Limbah elektronik dalam bentuk *printed circuit boards* (PCB) dari telepon selular yang dilakukan pengujian. Limbah dihancurkan/ *crushing* sampai fraksi ukuran partikel kurang dari 0,5 mm. Komposisinya ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kandungan logam dasar dalam limbah elektronik yang dianalisis

Metal	Cu	Fe	Zn	Pb
Kandungan, %	35,9074	0,6293	0,2074	0,6763

Mikroorganisme yang digunakan. Bakteri dari spesies *Acidithiobacillus ferrooxidans*, strain diisolasi dari air mineral *ferruginous* digunakan dalam penelitian ini. Untuk meningkatkan aktivitas sel sebelum inokulum sampel limbah, kultur dipindahkan beberapa kali dengan medium

Silverman/ Lundgren (9K) segar, yang mengandung ion Fe (II) (9g/dm³) dengan pH awal 2,5. Untuk memberikan kondisi yang sesuai bagi mikroorganisme, pH sampel dikoreksi menggunakan H₂SO₄.

Bioleaching. Percobaan *bioleaching* dilakukan di dalam labu Erlenmeyer berkapasitas 300 cm³, dengan menggunakan *rotary shaker* (130 rpm) pada temperatur 20-22° C. Media 9K digunakan pada semua percobaan dalam larutan *leaching* menggunakan bakteri. Sampel yang digunakan memiliki volume 100 cm³. Bakteri *A. ferrooxidans* diinokulasi ke dalam media 9K dengan dosis 10%;

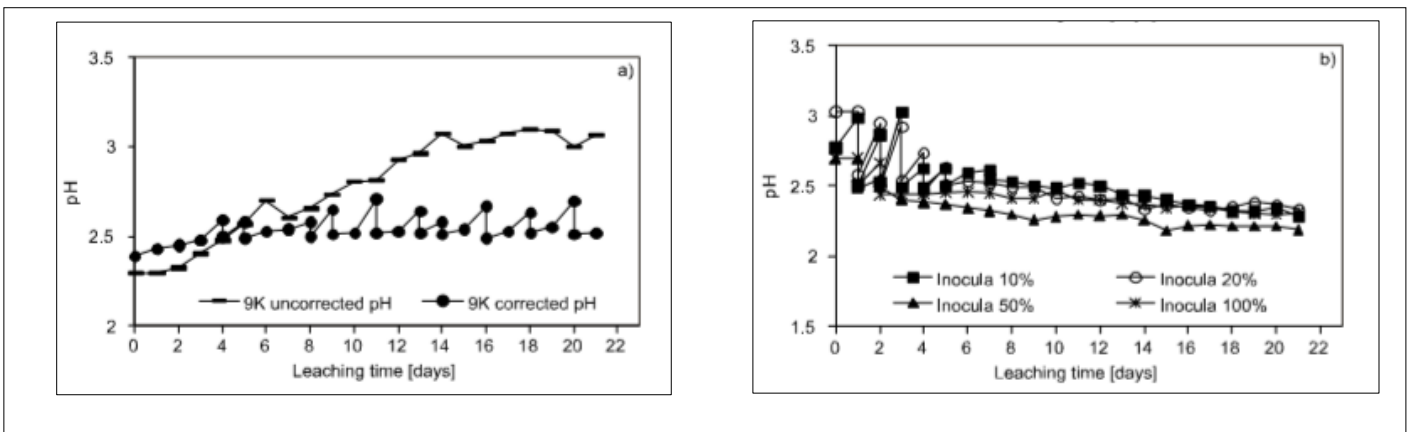
III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Pengaruh Penambahan Bakteri Dalam Larutan Leaching Dengan Ph Dan Potensial Oksidasi - Reduksi (Orp)

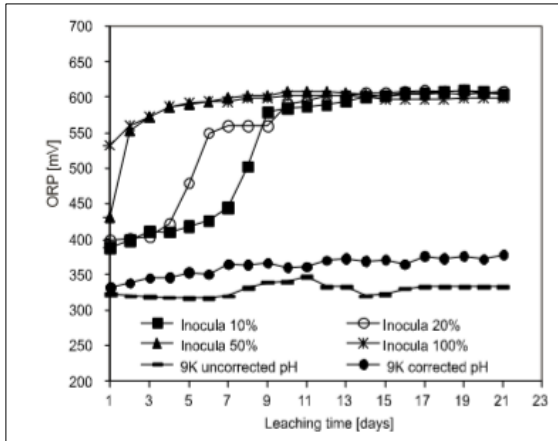
Perubahan pH yang diamati selama *bioleaching* disajikan pada Gambar 1. Semua sampel biologi menunjukkan tren bertahap untuk mengurangi parameter ini (efek produksi asam sulfat). Dihadapkan dengan bakteri, nilai pH awal 2,7-3,0 menurun menjadi 2,2 setelah 21 hari. Limbah elektronik memiliki sifat basa apa yang telah diamati oleh peneliti sebelumnya. Peningkatan pH diamati untuk uji kontrol (Gambar 1a) dan untuk semua sampel biologis pada fase awal proses (Gambar 1b). Sampel diinokulasi dengan dosis bakteri yang lebih rendah (10% dan 20%) mencapai pH sekitar 3,0 setelah 24 jam *bioleaching* menunjukkan pH tertinggi. Peningkatan nilai pH dari sampel-sampel ini disesuaikan beberapa kali dengan nilai 2,5 memberikan kondisi optimum untuk pertumbuhan bakteri. pH otimum bakteri *Acidithiobacillus ferrooxidans* adalah 1,8-2,5. Melebihi batas atas pH secara signifikan mengurangi aktivitas mikroorganisme ini, dan dengan demikian memperlambat kinetika *bioleaching*. Dalam larutan steril (9K), untuk sampel dengan dan tanpa penyesuaian pH diamati peningkatan pH yang berkelanjutan (Gambar 1a). Dalam sampel tanpa penyesuaian keasaman dalam

20%; 50%; dan 100% (v/v) volume. Berat limbah konstan sebesar 1 g. Perubahan konsentrasi tembaga dalam larutan, potensi oksidasi-reduksi (ORP) dan pH dianalisis. Eksperimen dilakukan selama 21 hari, dalam dua kali pengukuran. Tes kontrol dalam kondisi steril menggunakan larutan 9K dilakukan tanpa menyesuaikan keasaman dan dengan penyesuaian pH hingga 2,5. waktu 21 hari pH *bioleaching* meningkat secara sistematis dari awal 2,3 menjadi 3,0 pada tahap akhir proses. Sistem dengan pH yang terkontrol membutuhkan penyesuaian konstan terhadap pH 2,5.

Gambar 2 merangkum perubahan dalam ORP (potensi reduksi oksidasi). Pada hari ketiga *bioleaching*, pH sampel yang mengandung inokulum 50% dan 100% adalah 2,4 dan selama hari-hari berikutnya terus menurun. Penurunan pH (pada hari ke-3) disertai dengan peningkatan ORP yang terlihat pada Gambar 2 yang membuktikan pertumbuhan aktivitas mikroorganisme. Hal ini menunjukkan bahwa *bioleaching* berlangsung secara biologis dan terdapat oksidasi dan regenerasi bakteri Fe²⁺ menjadi Fe³⁺ [9,27]. Situasi ORP yang sedikit berbeda terlihat untuk sampel yang diinokulasi dengan 10% dan 20% bakteri. Dalam hal ini, pada fase awal proses (masing-masing hingga hari ke-6 dan ke-4) tampaknya merupakan proses kimia yang dominan (pertumbuhan ORP lebih lambat). Fase kedua dari *bioleaching* dengan peningkatan yang terlihat dalam ORP (dan nilai tinggi dari parameter ini 602-610 mV selama hari-hari berikutnya) menunjukkan intensifikasi proses biologis. Peningkatan konsentrasi mikroorganisme menghasilkan nilai awal parameter ORP yang lebih tinggi, berkontribusi pada intensifikasi reaksi *bioleaching* tembaga (Gambar 3).



Gambar 3.1. Hubungan waktu terhadap pH selama *bioleaching*: a). uji kontrol dengan dan tanpa penyesuaian pH, b). sampel biologis dengan berbagai dosis produksi asam bakteri

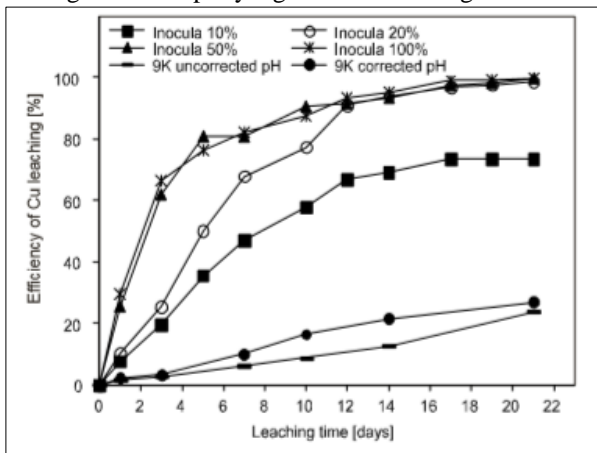


Gambar 3.2.
Nilai ORP Selama Proses *Bioleaching*

3.2 Pengaruh Dosis Bakteri Terhadap Efisiensi *Leaching* Tembaga

Efek dosis mikroorganisme pada *leaching* Cu ditunjukkan pada Gambar 3. Dosis kultur bakteri yang lebih tinggi mempercepat proses ekstraksi tembaga, yang menghasilkan konsentrasi ion Fe^{3+} yang lebih tinggi dalam larutan yang mengoksidasi unsur tembaga menjadi ion tembaga menurut reaksi (2).

Dalam tiga hal, lebih dari 60% (66,4% dan 61,8%) tembaga dari sampel yang diinokulasi dengan 50%



Gambar 3.3.
Hubungan waktu dari efisiensi *leaching* tembaga dari limbah elektronik dengan berbagai dosis *A. ferrooxidans* dan dalam uji kontrol

Hasil komparatif dari *leaching* kontrol yang dilakukan dalam kondisi steril tanpa koreksi dan dengan penyesuaian pH menjadi 2,5 menunjukkan bahwa ekstraksi Cu (sehubungan dengan sampel bakteri) jauh lebih lambat dalam 21 hari 23,8% dan 27,0% Cu masing-masing ditransfer ke dalam larutan.

dan 100% bakteri telah larut. Sedangkan dalam tes dengan konsentrasi bakteri yang rendah (sekitar 10% dan 20%), masing-masing 19,7% dan 25,4% Cu telah larut. Transfer penuh Cu dari larutan (99,3%) diamati setelah 17 hari proses (setelah 21 hari – 99,8%) dihadapkan 100% bakteri. Untuk sampel yang diinokulasi dengan dosis yang lebih rendah dari *A. ferrooxidans* (20%, 50%), tembaga larut didalamnya lebih dari 99% setelah 21 hari. Sampel yang mengandung 10% bakteri menunjukkan efisien terendah – 73,7% Cu. Efisien sebanding *bioleaching* Cu (98-99%) dicapai untuk sampel 20%, 50%, dan 100%. Ini menunjukkan kemungkinan proses yang efektif dengan adanya dosis awal mikroorganisme yang lebih rendah. Pengecualian adalah sampel yang diinokulasi dengan 10% dosis bakteri. Meskipun nilai ORP tinggi, tingkat *leaching* tembaga, dibandingkan dengan sampel lain, sedikit lebih rendah. Hal ini dapat disebabkan oleh pertumbuhan bakteri yang tertunda di lingkungan dan konsentrasi senyawa Fe (III) yang tidak mencukupi dalam larutan, yang memiliki pengaruh terhadap pelarutan Cu yang lambat. Namun, dengan mempertimbangkan kompleksitas material dari limbah elektronik yang larut, penjelasan tentang kecenderungan sulit dan memerlukan studi lebih lanjut.

IV. KESIMPULAN

Terlepas dari metode tradisional pengolahan limbah elektronik (metode piro dan hidrometalurgi), solusi baru untuk *recovery* logam yang efisien sedang dicari. Proses biohidrometalurgi dengan penggunaan mikroorganisme menjadi topik yang menarik dan dapat menjadi metode jangka panjang dan pengembangan untuk *recovery* logam.

Berdasarkan penelitian sebelumnya pada *bioleaching* limbah elektronik yang melibatkan bakteri dari genus *Acidithiobacillus*, ditemukan bahwa variabel dosis awal mikroorganisme (dalam kisaran 10-100% v/v) yang digunakan dalam percobaan tidak secara signifikan mempengaruhi efisiensi akhir dari transisi tembaga menjadi larutan. Jumlah bakteri yang lebih tinggi meningkatkan pelarutan tembaga hanya pada tahap awal. Dalam 21 hari, efisiensi tinggi pelarutan Cu yang sebanding (98-99%) baik pada yang lebih tinggi (100%), maupun pada dosis bakteri yang lebih rendah (20%) tercapai. Untuk sampel dengan jumlah bakteri terendah (10%), transisi yang lebih lambat dari Cu diamati. *Bioleaching* bahan elektronik dan ekstraksi tembaga dari limbah lebih tinggi daripada dalam tes kontrol. Tidak ada perbedaan signifikan dalam efektivitas pencucian kimia yang dilakukan dalam kondisi tanpa koreksi dan penyesuaian pH hingga 2,5. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan

bioleaching dari limbah elektronik tidak hanya tembaga tetapi juga logam bermanfaat lainnya.

V. DAFTAR ISTILAH

Biohidrometalurgi : proses hidrometalurgi yang memanfaatkan jasad renik untuk mengekstraksi logam yang meliputi pelarutan dan penyerapan logam.

Biomassa : jumlah massa atau berat dari semua organisme hidup pada populasi.

Biodegradasi : degradasi secara kimia disebabkan oleh reaksi biokimia, terutama dikatalis oleh enzim, faktor penting dalam leaching mineral oleh mikroorganisme.

Bioleaching : pelindian yang menggunakan jasad renik seperti bakteri, jamur, ragi dan ganggang.

Inokulasi : kegiatan pemindahan mikroorganisme baik berupa bakteri maupun jamur dari tempat atau sumber asalnya ke medium baru.

Recovery : Jumlah berat logam (mineral) yang diperoleh yang dibandingkan dengan umpan pada proses pengolahan mineral dan dinyatakan dalam % (persen).

VI. DAFTAR PUSTAKA

Anna Mražíkov; Renáta Marcinčákov; Jana Kadukov; Oksana Velgoso. 2014. *Nickel Recovery from Printed Circuit Boards Using Acidophilic Bacteria*. Journal of the Polish Mineral Engineering Society.

Arevik Vardanyan; Narine Vardanyan; Anna Khachatryan; Ruiyong Zhang; Wolfgang Sand. *Adhesion to Mineral Surfaces by Cells*

of Leptospirillum, Acidithiobacillus and Sulfobacillus from Armenian Sulfide Ores. 2019. www.Mdpi.com/journal/minerals.

Brandl, H; Bosshard, R; Wegmann, M. 2000. *Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi*. Hydrometallurgy 59 2001 319–326.

Jatindra Kumar Pradhan; Sudhir Kumar. 2012. *Metals Bioleaching from Electronic Waste by Chromobacterium Violaceum and Pseudomonads sp.* Waste Management & Research 0(0) 1–9

Mohammad Khoshkhoo; Mark Dopson; Åke Sandström. 2013. *Bioleaching and Electrochemical Leaching of a Pyritic Chalcopyrite Concentrate*. Advanced Materials Research Vol. 825 (2013) pp 254-257.

Renjie Liu; Jingying Li; Zhongying Ge. 2016. *Review on Chromobacterium Violaceum For Gold Bioleaching from E-Waste*. Procedia Environmental Sciences 31 (2016) 947 – 953.

Rosalba Argumedo-Delira; Mario J. Gómez-Martínez; Brenda Joan Soto. 2019. *Gold Bioleaching from Printed Circuit Boards of Mobile Phones by Aspergillus niger in a Culture without Agitation and with Glucose as a Carbon Source*.

Weijin Wu; Xiaocui Liu; Xu Zhang; Minglong Zhu; Wensong Tan. 2018. *Bioleaching of Copper from Waste Printed Circuit Boards by Bacteria-Free Cultural Supernatant of Iron–Sulfur-Oxidizing Bacteria*. Bioresources and Bioprocessing.

Willner, Joanna; Fornalczyk, Agnieszka. 2013. *Extraction of Metals from Electronic Waste By Bacterial Leaching*. Environment Protection Engineering.

_____ *Kamus Pertambangan*. Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara. 2011.