

KARAKTERISASI KONSENTRAT TEMBAGA INDONESIA UNTUK DIKLAT PENINGKATAN NILAI TAMBAH TEMBAGA

Characterization of Indonesian Copper Concentrate for Training of Copper Value-Added Enhancement

Imelda Hutabarat

Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Geologi, Mineral dan Batubara

Jl. Jend. Sudirman no 623 Bandung 40211

Telp: (022) 6076756 ext 139

Fax: (022) 6035506

Email: Imelda.hutabarat@esdm.go.id

Abstrak

Indonesia memiliki cadangan tembaga yang cukup banyak yang berada di jalur cincin api daerah seismik paling aktif di dunia yang terbentang dari barat Sumatera hingga timur Papua. Saat ini, keterdapatan cadangan tembaga ditambang besar-besaran di Batu Hijau, Nusa Tenggara Barat dan Erzsberg dan Grasberg Papua [1,2].

Tujuan dari penulisan ini adalah untuk menyajikan hasil karakterisasi konsentrat tembaga Indonesia untuk kepentingan pendidikan dan penelitian lebih lanjut untuk penentuan proses alir ekstraksi logam-logam pada konsentrat tembaga Indonesia.

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah konsentrat tembaga yang diproses melalui jalur kominusi dan flotasi. Konsentrat tembaga ini memiliki komposisi mineralogi kalkopirit dan pirit, yang mengandung berbagai logam berharga lainnya seperti emas, perak, platina, palladium, selenium, telurium dan lain sebagainya.

Metode karakterisasi yang dilakukan adalah analisis kimia melalui XRF untuk logam-logam dasar dan *inductively coupled plasma mass spectrometry* (ICP-MS) khusus untuk logam-logam berharga yang kuantitasnya lebih sedikit. Untuk fase mineraloginya dilakukan investigasi menggunakan *x-ray diffraction* (XRD). Selanjutnya visualisasi elemen pada sampel dikarakterisasi menggunakan *scanning electron microscopy* dengan *energy dispersive X-ray spectrometer* (SEM-EDX) untuk melihat kondisi elemen pada sampel setelah mengalami perlakuan pada temperatur tertentu.

Kata Kunci: konsentrat tembaga Indonesia, karakterisasi, temperatur, XRF, ICP-MS, XRD, SEM-EDX

Abstract

Indonesia many copper reserves which are spread in certain locations along the 'ring of fire', the most active seismic region in the world which is started from the west of Sumatera up to east of Papua. Nowadays, the reserves have been mined extensively in Batu Hijau, Nusa Tenggara Barat and Erzberg and Grasberg Papua.

The goal of this paper is to present the results of Indonesian copper concentrate characterization for further education and research purposes. This characterization is considered important in determining metal extraction flow process for Indonesian copper concentrate.

Materials that are used in this study are copper concentrates after flotation process. These copper concentrates, with mineralogical composition of chalcopyrite and pyrite, contain various precious metals, such as gold, silver, platinum, palladium, selenium, tellurium, and some other metals in several oxidation states.

The characterization method includes chemical analysis using X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) for basic metals and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) special for precious metals. While, X-ray diffraction (XRD) is used for the mineralogical phases. Subsequently, the element visualization in element sample was characterized by scanning microscopic with energy dispersive X-ray spectrometer (SEM-EDX) to analyse the condition of elements after treatments in certain temperatures.

Keywords: copper concentrates, characterization, temperature, XRF, ICP-MS, XRD, SEM-EDX

PENDAHULUAN

Penelitian ini dilakukan di beberapa laboratorium, yaitu laboratorium XRD Material Centre Leoben, laboratorium kimia Jurusan *General and Analytical Chemistry*, dan laboratorium SEM-EDX *Non Ferrous Metallurgy University of Leoben*, Austria sebagai bagian dari program doktoral yang dilakukan pada kurun waktu 2012-2016 di bawah bimbingan Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Helmut Antrekowitsch. Sebagian hasil penelitian ini telah dipresentasikan pada *European Metallurgical Conference 2015* di Dusseldorf, Jerman [3] dan keseluruhan hasil penelitian ini telah dibukukan dalam Disertasi yang berjudul *“Development of a New Hydrometallurgical Process for Indonesia Copper Sulphide”*[4].

Tujuan dari penulisan ini adalah untuk menyajikan hasil karakterisasi konsentrat tembaga untuk kepentingan pendidikan dan penelitian lebih lanjut untuk penentuan proses alir ekstraksi logam-logam pada konsentrat tembaga Indonesia.

METODOLOGI

Metode yang digunakan pada penelitian ini dimulai dengan analisis kimia menggunakan uji XRF untuk logam-logam dasar yang cukup signifikan jumlahnya (%). Selanjutnya analisis kimia dilakukan dengan menggunakan ICP-MS untuk mengetahui jumlah persentase logam-logam berharga yang jumlahnya sangat kecil (ppm).

Kemudian fase mineral diinvestigasi dengan XRD dan visualisasi mineral dan elemen dengan SEM-EDX. Elemen-elemen tertentu dikarakterisasi untuk mengetahui kondisi yang terjadi akibat perlakuan yang diberikan, yaitu kenaikan temperatur pada sampel.

Konsentrat tembaga Indonesia berasal dari hasil akhir proses flotasi dari tambang Batu Hijau Nusa Tenggara Barat dan Grasberg Papua. Kedua sampel dibagi menjadi 2 (dua) sampel yang diberi kode S dan P.

HASIL

Analisis Kimia dengan XRF

Hasil penelitian dilakukan pada konsentrat tembaga sampel S dan P dengan XRF yang dilengkapi dengan UniQuant™ software spectrometer untuk menentukan elemen-elemen yang ditemukan beserta kuantitasnya.

Hasil komposisi kimia terhadap sampel S dan P disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1: Analisis XRF dengan elemen yang memiliki kuantitas yang signifikan pada sampel S and P [3].

Elemen	Cu	Fe	Al	Zn	Mo	Ti	Mn	Co	Pb	Se
S1-1	24.240	25.990	2.810	0.600	0.424	0.219	0.050	0.032	0.037	0.018
S1-2	32.490	27.340	0.195	0.547	0.367	0.198	0.387	0.015	0.047	0.024
Average	28.365	26.665	1.503	0.574	0.396	0.209	0.219	0.024	0.042	0.021
P1-1	22.770	24.770	2.560	0.453	0.127	0.092	0.046	0.029	0.099	0.014
P1-2	31.620	27.060	0.123	0.570	0.078	0.090	0.054	0.015	0.117	0.017
Average	27.195	25.915	1.342	0.512	0.103	0.091	0.050	0.022	0.108	0.016

Satuan dibuat dalam %

Dari Tabel 1, dapat terlihat bahwa sampel S memiliki rata-rata lebih besar kandungan tembaga (28.4%) dan besi (26.7%). Logam penting lainnya adakah molibdenum (0.4%), titanium (0.2%), timah hitam (0.042%) dan selenium (0.021%), yang potensial untuk diekstraksi. Hasil dari data XRF juga mendeteksi 25.3% S dan 6% Si pada sampel ini. Pada sampel P logam yang dominan adalah tembaga (27.2%) dan besi (25.9%). Logam penting lainnya pada konsentrat ini adalah molibdenum (0.1%), titanium (0.09%), timah hitam (0.1%) dan selenium (0.016%), yang potensial untuk diperoleh. Data XRF juga mendeteksi 24.7% S dan 7% Si pada sampel ini.

Analisis Kimia dengan ICP-MS

Investigasi selanjutnya dilakukan dengan analisis ICP-MS untuk mendapatkan data lebih banyak tentang elemen-elemen penting yang tidak dapat dideteksi dengan XRF.

Hasil analisis ICP-MS mendeteksi hampir keseluruhan logam berharga yang terdapat dalam konsentrat tembaga ini seperti emas (Au), perak (Ag), platina (Pt), paladium (Pd), rhodium (Rh) dan ruthenium (Ru). Selain itu, terdeteksi pula kadmium (Cd), bismut (Bi) dan telurium (Te). Logam berharga dan *platinum grup metal* (PGM) biasanya ditemukan dalam konsentrasi yang sangat kecil pada deposit logam sulfida. Penentuan konsentrasi dari logam-logam ini akan lebih akurat menggunakan ICP-MS, dengan teknik untuk beragam elemen dari beberapa tipe sampel [5].

Kandungan emas (Au), perak (Ag), bismut (Bi) dan telurium (Te) ditemukan lebih tinggi pada sampel P dibandingkan sampel S. Akan tetapi sampel S memiliki kandungan kadmium (Cd) dan paladium (Pd) lebih dibandingkan sampel P.

Hasil analisis dari ICP-MS dapat dilihat pada Tabel 2.

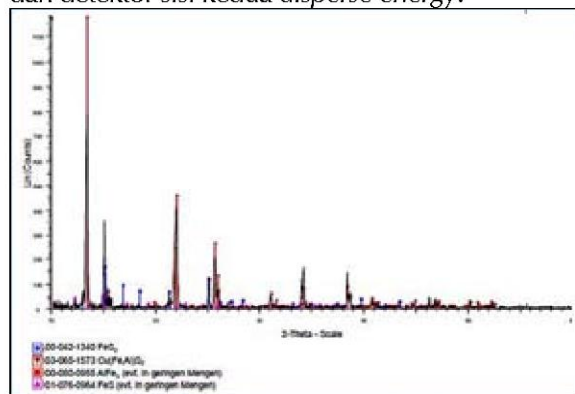
Tabel 2: Komposisi logam berharga dan elemen lainnya yang terdeteksi dengan ICP-MS [3].

Elemen	Au	Ag	Pt	Pd	Cd	Bi	Te	Rh	Ru
S1-1	1.4	24	0.5	3.0	22	4.6	3.6	0.5	0.4
S1-2	3.5	27	0.5	2.8	26	4.4	3.6	0.4	0.4
Average	2.45	25.5	0.5	2.9	24	4.5	3.6	0.45	0.4
P1-1	12.7	48	0.7	1.7	13	51.8	13.00	0.5	0.4
P1-2	10.9	49	0.6	1.7	13	55.2	14.80	0.5	0.5
Average	11.8	48.5	0.65	1.7	13	53.5	13.9	0.5	0.45

Satuan dalam gram/ton (ppm)

Analisis Fase Mineral dengan XRD dan SEM-EDX

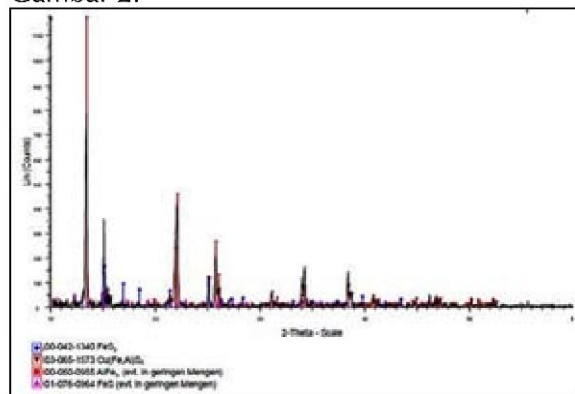
Fase kristal mineral diidentifikasi menggunakan XRD pada temperatur ruang menggunakan *Bruker D8 discover system* dengan radiasi sisi utama molibdenum dan detektor sisi kedua *disperse energy*.



Gambar 1: Visualisasi hasil analisis XRD untuk sampel S [3]

(Sol-X) dengan 2θ pada selang temperatur 10° - 60° dan 0.03° per 3 detik. Hasil dari x-ray difraksi ini menyajikan informasi terkait struktur kristal pada sampel konsentrat tembaga. Fase utama pada konsentrat ini yang tampak adalah kalkopirit (CuFeS_2) dan pirit (FeS_2). Ada kemungkinan mineral lain dalam jumlah yang sangat kecil seperti senyawa besi-aluminium (AlFe_3) dan ferrous sulfida (FeS). Hasil analisis XRD untuk sampel S dapat dilihat pada Gambar 1.

Hasil XRD pada sampel P dapat dilihat pada Gambar 2.



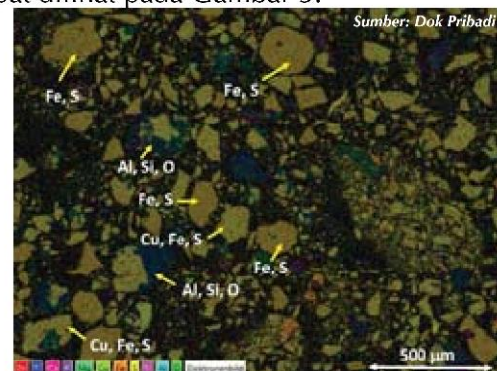
Gambar 2: Visualisasi hasil analisis XRD untuk sampel P [3]

Pada sampel P juga nampak bahwa mineral utama yang ditemukan adalah kalkopirit (CuFeS_2) dan pirit (FeS_2).

Selanjutnya, dengan menggunakan SEM-EDX dapat dianalisis komposisi mineral sampel ini dengan mengukur energi emisi X-ray dari sampel. Karakterisasi morfologi pada sampel dilakukan dengan menggunakan *scanning electron microscope* (JSM IT300L JEOL), yang dilengkapi dengan *energy dispersive X-ray spectrometer* (50 mm² Aztec 2.2 Oxford Instrument).

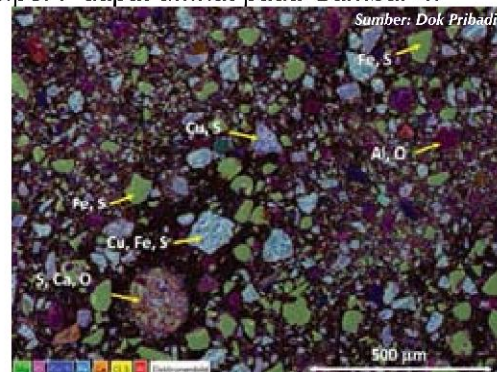
Elemen yang dapat diidentifikasi dengan SEM-EDX ini adalah tembaga (Cu), besi (Fe), silika (Si), seng (Zn), aluminium (Al) dan magnesium (Mg), dengan sulfur dominan terhadap oksigen.

Hasil dari analisis SEM-EDX untuk sampel S dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3: Foto SEM-EDX dari sampel S [3].

Sedangkan hasil analisis SEM-EDX terhadap sampel P dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4: Foto SEM-EDX dari sampel P [3].

Visualisasi Elemen dengan SEM-EDX

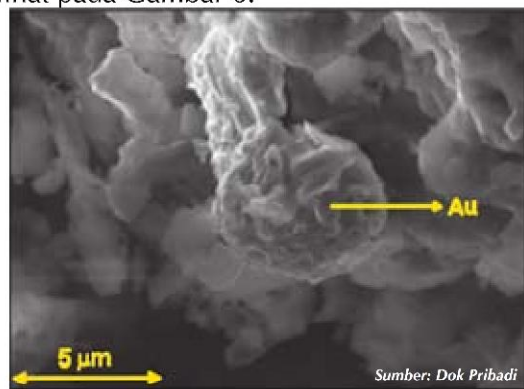
Preparasi sampel untuk pengujian elemen dengan SEM-EDX, sampel dipanggang pada temperatur 269°C , 500°C dan 600°C . Pemangangan dilakukan menggunakan fix bed furnace tipe Carbolite AAF 12/18 dengan jumlah 50 gram sampel.

Pemangangan pada temperatur 269°C , elemen Cu, Fe, Pb, Mo dan Au dapat terdeteksi. Seperti tampak pada Gambar 5 terlihat partikel molibdenum (Mo).



Gambar 5: Molybdenum sulphide dalam sampel S pada temperatur 269°C menggunakan SEM-EDX [4].

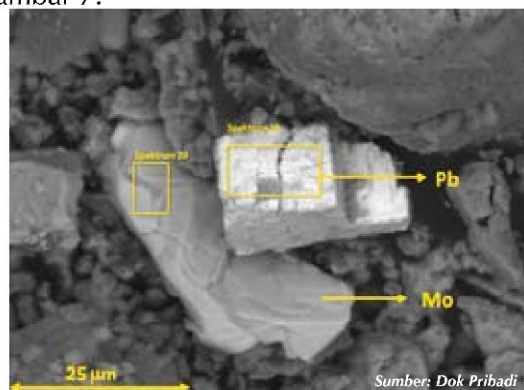
Partikel molibdenum tidak terikat pada matrik sulfida Cu-Fe-S. Sedangkan untuk emas dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6: Emas dalam sampel S pada temperatur 269°C menggunakan SEM-EDX [4].

Partikel emas tampak terikat pada matrik Cu-Fe-S (sesuai dengan pembacaan EDX) dengan ukuran maximum 5µm.

Pada sampel P, molibdenum sulfida dan timah hitam sulfida (galena) juga ditemukan tidak terikat pada matrik Cu-Fe-S seperti nampak pada Gambar 7.



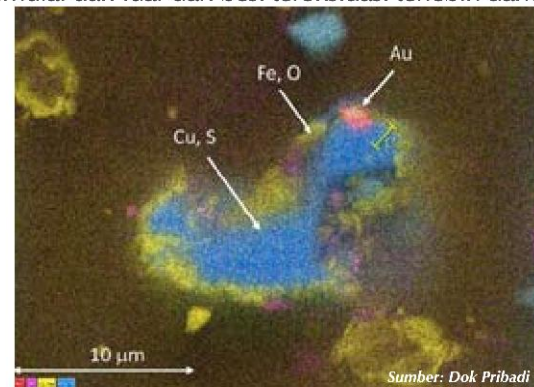
Gambar 7 Molibdenum (Mo) dan timah hitam (Pb) dalam sampel S pada temperatur 269° menggunakan SEM-EDX [4].

Pada temperatur 269° C ini, komposisi elemen sebelum dan sesudah proses pemanggangan dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Komposisi elemen pada sampel S sebelum dan sesudah panggang pada temperatur 269°C [4].

Persentase elemen (%)		
Elemen	Sebelum pemanggangan	T: 269°C
Fe	27.3	27.3
Cu	26.4	26.6
S	25.3	24.9
O	20.9	21.1

Untuk sampel S, proses pemanggangan dilanjutkan pada temperatur 500°C yang bertujuan untuk mengamati posisi dan kondisi partikel emas. Pada Gambar 8, tampak pada sampel yang telah dipanggang pada temperatur 500°C, sebuah lapisan dari besi oksida ditemukan pada permukaan partikel tembaga sulfida yang menunjukkan bahwa oksidasi dimulai dari luar dan besi teroksidasi terlebih dahulu.



Gambar 8: Partikel emas tampak menempel pada matrik besi oksida dalam bentuk serpih dengan ukuran 1-2 µm [4].

Pada temperatur 500°C ini, komposisi elemen sebelum dan sesudah proses pemanggangan dapat dilihat pada Tabel 4 sebagai berikut.

Tabel 4. Komposisi elemen pada sampel S sebelum dan sesudah dipanggang pada temperatur 500°C [4]

Persentase elemen (%)		
Elemen	Sebelum pemanggangan	T: 500°C
Fe	27.3	30.5
Cu	26.4	26.7
S	25.3	14.3
O	20.9	20.6

Selanjutnya proses pemanggangan dilakukan pada sampel dengan temperatur 600°C dimana analisis SEM-EDX menunjukkan kandungan sulfur turun signifikan dari 25.3% ke 10.9% (57%) dan pada sampel P dari 22.1% ke 11.8% (47%).

Tabel 5. Komposisi elemen pada sampel S sebelum dan sesudah panggang pada temperatur 600°C [4]

Persentase elemen (%)		
Elemen	Sebelum pemanggangan	T: 600°C
Fe	27.3	31.3
Cu	26.4	26.2
S	25.3	10.9
O	20.9	31.6

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis kandungan unsur dengan menggunakan XRF, nampak bahwa rata-rata persentase tembaga (Cu) lebih tinggi pada sampel S (28,365%) dibandingkan dengan sampel P (27,195%). Demikian halnya dengan kadar besi (Fe) pada sampel S (26,665%) lebih tinggi sedikit dari sampel P (25,915%).

Kandungan unsur yang cukup signifikan selain tembaga yang layak diekstrak adalah persentase molibdenum (Mo) pada sampel S (0,396%). Demikian pula dengan titanium (Ti) dan mangan (Mn). Kandungan Ti pada sampel S dan P berturut-turut adalah 0,209% dan 0,091%. Sedangkan kandungan mangan (Mn) pada sampel S (0,219%) lebih tinggi empat kali lipat dari sampel P (0,050%). Sebaliknya Pb pada sampel S (0,042%) lebih rendah 40% dari sampel P (0,108%). Khusus selenium (Se) hampir di kedua sampel cukup sama, baik pada sampel S (0,02%) dan sampel P (0,016%).

Dengan menggunakan data ini, proses ekstraksi pada sampel S harus mempertimbangkan komposisi molibdenum (Mo) dan titanium (Ti). Sedangkan untuk sampel P, konsentrasi Pb sebagai *by-product* harus dipertimbangkan.

Investigasi menggunakan ICP khusus untuk logam-logam berharga menunjukkan bahwa konsentrasi emas (Au) pada sampel P (11,8 ppm) jauh lebih tinggi hampir lima kali lipat sampel S (2,45 ppm). Sebanding dengan konsentrasi perak (Ag) pada sampel P (48,5 ppm) lebih tinggi hampir dua kalinya dari sampel S (25,5 ppm).

Elemen platina (Pt) relatif sama, baik sampel S (0,5 ppm) maupun sampel P (0,65 ppm). Paladium (Pd) pada sampel S (2,9 ppm) lebih banyak 1,7 kali dari sampel P (1,7 ppm). Yang cukup signifikan perbedaannya adalah bismut (Bi). Pada sampel S kandungan Bi hanya 4,5 ppm sedangkan pada sampel P cukup tinggi hingga 53,5 ppm (12 kali

lipat). Sejalan dengan jumlah telurium (Te) pada sampel P (13,9 ppm) yang lebih tinggi empat kali lipat dari sampel S (3,6 ppm).

Hal yang menarik adalah kandungan rhodium (Rh) dan rutenium (Ru) yang cukup seimbang antara 0,4-0,5 ppm untuk kedua sampel.

Perbedaan kandungan logam-logam berharga dan penting ini akan menjadi panduan dalam memilih proses ekstraksi logam-logamnya.

Untuk fase mineral, baik sampel S maupun sampel P didominasi oleh kalkopirit (CuFeS_2) dan pirit (FeS_2). Sedikit mineral pengotor dan tidak terkonfirmasi karena jumlahnya sangat sedikit.

Keberadaan elemen-elemen, baik dalam kondisi tanpa perlakuan maupun dengan perlakuan pemanggangan pada temperatur tertentu menunjukkan bahwa emas terikat dalam matrik tembaga-besi-sulfida, sedangkan molibdenum (Mo) dan timbal hitam (Pb) tidak terikat pada matrik tersebut.

Oleh karena itu, proses pengambilan emas (Au) dapat dilakukan perlakuan pendahuluan (*pretreatment*) sebelum diekstrak atau diproses setelah pengambilan logam utama untuk memutuskan ikatan sulfida yang mengikat emas. Hingga temperatur 500°C masih dipastikan emas masih terikat pada matrik sulfidanya (Gambar 8).

Pada temperatur 500°C kandungan sulfur (S) masih tersisa 14,3% (turun 43% S). Sedangkan peningkatan temperatur pemanggangan hingga 600°C menyebabkan emas (Au) tidak terdeteksi lagi dengan penggunaan SEM-EDX. Hal ini disebabkan emas telah terlepas dari matrik sulfidanya sehingga tidak terlacak karena ukurannya yang terlalu kecil ($< 1\mu\text{m}$).

Karena itu, peningkatan temperatur hingga 600°C dapat dipakai untuk memutuskan ikatan sulfida di mana emas (Au) terikat dalam matrik sulfidanya. Pada temperatur 600°C ini juga penurunan sulfur juga sangat signifikan hingga 57%

KESIMPULAN

Konsentrat tembaga Indonesia terbentuk dari kompleks mineral sulfida sehingga tahapan oksidasi setiap mineral cukup kompleks.

Hasil karakterisasi konsentrat tembaga Indonesia dengan metode analisis unsur dengan XRF dan ICP, fase mineral dengan XRD dan visualisasi elemen dengan perlakuan pendahuluan pada temperatur 269°C, 500°C, dan 600°C dengan SEM-EDX memberikan gambaran kuantitas dan kualitas mineral dan elemen yang terdapat di

dalamnya yang sangat penting untuk pemilihan proses ekstraksi yang harus dilakukan

Hasil XRD mendeteksi bahwa mineral fase pada kedua sampel menunjukkan kalkopirit (CuFeS_2) dan pirit (FeS_2) yang dominan pada kedua sampel. Karena itu hasil karakterisasi pada sampel S dan P merujuk kepada kedua mineral tersebut.

Beberapa perbedaan antara sampel S dan sampel P membuat alternatif proses ekstraksi baik pirometalurgi maupun hidrometalurgi atau kombinasi keduanya menjadi sangat penting untuk pemilihan proses alir untuk konsentrat tembaga Indonesia.

Analisis lebih lanjut dari karakterisasi ini dapat dikonfirmasi dengan analisis termalnya untuk melihat lebih jauh tahapan oksidasi dari setiap kenaikan temperaturnya.

Hasil dari karakterisasi ini dapat digunakan untuk menganalisis lebih lanjut dampak dari terputusnya ikatan logam berharga pada matriknya, dalam hal ini emas, terhadap kemampuan untuk dilindi (*leachability*).

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis ucapkan untuk pembimbing sekaligus promotor doktor Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Helmut Antrekowitsch. Penulis juga ucapkan terima kasih kepada Dipl.-Ing. Dr. mont. Holger Schnideritsch yang secara khusus membantu penulis dalam penggunaan alat-alat karakterisasi. Ucapan terima kasih juga untuk Jurusan *Non Ferrous Metallurgy University of Leoben*, Leoben Austria atas kerjasama dan kepercayaannya dalam pemanfaatan laboratorium dan mesin-mesin uji, khususnya untuk XRD dan SEM-EDX.

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Geologi Mineral dan Batubara (PPSDM GEOMINERBA) dan Pusdiklat Teknologi Mineral dan Batubara atas kesempatan dan dukungan yang diberikan untuk mengikuti tugas belajar program doktoral di *Non Ferrous Metallurgy Institute University of Leoben*, Austria.

Ucapan terimakasih sebesar-besarnya kepada Kepala Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia Energi dan Sumber Daya Mineral (BPSDM ESDM) Dr. Ir. Djadjang Sukarna atas bimbingan dan dukungannya serta penghargaan setinggi-tingginya kepada BPSDM ESDM Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral yang telah membiayai sepenuhnya penelitian ini termasuk keseluruhan program doktoral.

DAFTAR PUSTAKA

- Arif, J., Baker, T. (2004): *Gold Para-genesis and Chemistry at Batu Hijau, Indonesia: Implications for Gold-Rich Porphyry Copper Deposits - Mineralium Deposita*, 39, 523-535.
- Barefoot, R.R. (1998): *Determination of the Precious Metals in Geological Materials by Inductively Coupled Plasma Spectrometry - Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 13, 1077-1084.
- Cocić, M.B., Logar, M.M., Cocić, S. LJ., Dević, S. S., Manasijević, D. M. (2011): *Transformation of Chalcopyrite in the Panggang Process of Copper Concentrate in Fluidized Bed Reactor - JOM*, 63, 55-59.
- Hutabarat, I., Holger S., Alex P., Christina S., Antrekowitsch, H. (2015): *Characterization and Thermal Behaviour of Indonesian Copper Sulphide - Proceeding of European Metallurgical Conference*, Vol. 1, 171-175.
- Hutabarat, I. (2016): *Development of a New Hydrometallurgy Process for Indonesia Copper Sulphide - Dissertation*, Non Ferrous Metallurgy Institute University of Leoben Austria, 24-43.
- Mitovski, A., Štrbac, N., Manasijević, D., Sokič, M., Daković, A., Zivković, D., Balanović, LJ. (2015): *Thermal Analysis and Kinetics of the Chalcopyrite Concentrate Oxidation Process - Metalurgija*, 54, 311-314.
- Pollard, P.J., Taylor, R.G., Peters L. (2005): *Ages of intrusion, Alteration and Mineralization at the Grasberg Cu-Au deposit, Papua, Indonesia - Society of Economic Geologist, Inc. Economic Geology*, 100, 1005-1020.
- Sargsyan, L.E., Hovhannisyan, A.M. (2010): *Investigation of Chalcopyrite Cuprum Concentrate Panggang by Thermogravimetric and Differential Thermal Analysis - Metallurgical and Mining Industry*, 2, 225-229.
- Winkel, L., Wochele, J., Ludwig, C., Alxneit, I., Sturzenegger, M. (2008): *Decomposition of Copper Concentrates at High Temperatures: An Efficient Method to Remove Volatile Impurities - Mineral Engineering*, 21, 731-742.