

## UNSUR TANAH JARANG DALAM BATUAN ULTRAMAFIK: PROSPEK BAGI MASA DEPAN INDONESIA

BELA ISLAMADINA<sup>1</sup>, WIDYAWAN NUR MUHAMMAD<sup>1</sup>, HABIL ABDILLAH<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada (UGM), Jl. Grafika No.2, Sleman, DIY, Indonesia, Email: [belaislamadina@mail.ugm.ac.id](mailto:belaislamadina@mail.ugm.ac.id).

**Sari – Unsur Tanah Jarang (UTJ)** pada batuan ultramafik sangat jarang diteliti meskipun Indonesia memiliki kawasan batuan ultramafik yang luas, terutama di Indonesia Timur. Penelitian di bidang ini sangat penting karena banyak sumber daya UTJ yang belum dieksplorasi dan permintaan akan UTJ yang meningkat seiring dengan perkembangan industri teknologi tinggi seperti kendaraan elektrik dan pembangkit listrik tenaga angin. Metode penelitian ini adalah menelaah data sekunder yang didapatkan dari (*United States Geological Survey*) USGS serta beberapa karya ilmiah peneliti terdahulu untuk mendapatkan kesimpulan mengenai endapan yang mengandung UTJ dalam jumlah yang signifikan di Indonesia. Dapat disimpulkan bahwa UTJ pada batuan ultramafik di Indonesia cenderung terkumpul dalam endapan laterit. Sedangkan di belahan lain dunia, UTJ banyak ditemukan di batuan karbonatit dan lapukannya. Kadar UTJ pada batuan ultramafik sangat dipengaruhi oleh komposisi mineralogi. UTJ berafinitas dengan mineral-mineral ferromagnesian seperti piroksen dan amfibol. Batuan ultramafik (harzburgit) di Soroako, Sulawesi Selatan, mengandung kadar Skandium (Sc) sebanyak hampir 90 ppm. Alasan sedikitnya studi mengenai batuan ultramafik sebagai sumber UTJ di Indonesia adalah karena batuan granitik dianggap sebagai sumber utamanya. Maka dari itu, terdapat peluang yang lebar bagi eksplorasi batuan ultramafik sebagai sumber UTJ di Indonesia.

**Kata kunci:** Unsur Tanah Jarang (UTJ), batuan ultramafik, tipe ion-adsorpsi, Soroako, Indonesia Timur.

**Abstract** –Study of (*Rare Earth Elements*) REEs in ultramafic rocks are rare even though Indonesia has an exceptional vast area of ultramafic rocks cover, particularly in Eastern Indonesia. Studies on this field are crucial because there are numbers of unexplored resources and the demand of REE increases due to the development of high-tech industry such as electric vehicles and wind power generators. The method of this study is to examine secondary data from USGS about REE deposits around the world and a few papers from previous authors to obtain information related to the type of deposit that contain significant amounts of REEs in Indonesia. The compiled data show that REEs in Indonesian ultramafic rocks are concentrated in laterite, which are produced by weathering of ultramafic rocks. Meanwhile, in the other parts of the world, carbonatite and its weathering products contain high amounts of REE resources. REEs contents in ultramafic rocks are highly dependent on their mineral composition. Moreover, these rocks have an affinity for ferromagnesian minerals such as pyroxenes and amphiboles. Mesozoic ultramafic rock (harzburgite) of the Soroako, South Sulawesi, contains Scandium (Sc) in nearly 90 ppm. There are only few research concerning ultramafic rock as an REEs host, because the previous studies only focusing on granitic rock as the primary source of REE's in Indonesia. Therefore, study of ultramafic rock as REEs source is very important.

**Keywords:** Rare Earth Elements (REEs), ultramafic rock, ion-adsorption type, Soroako, Eastern Indonesia.

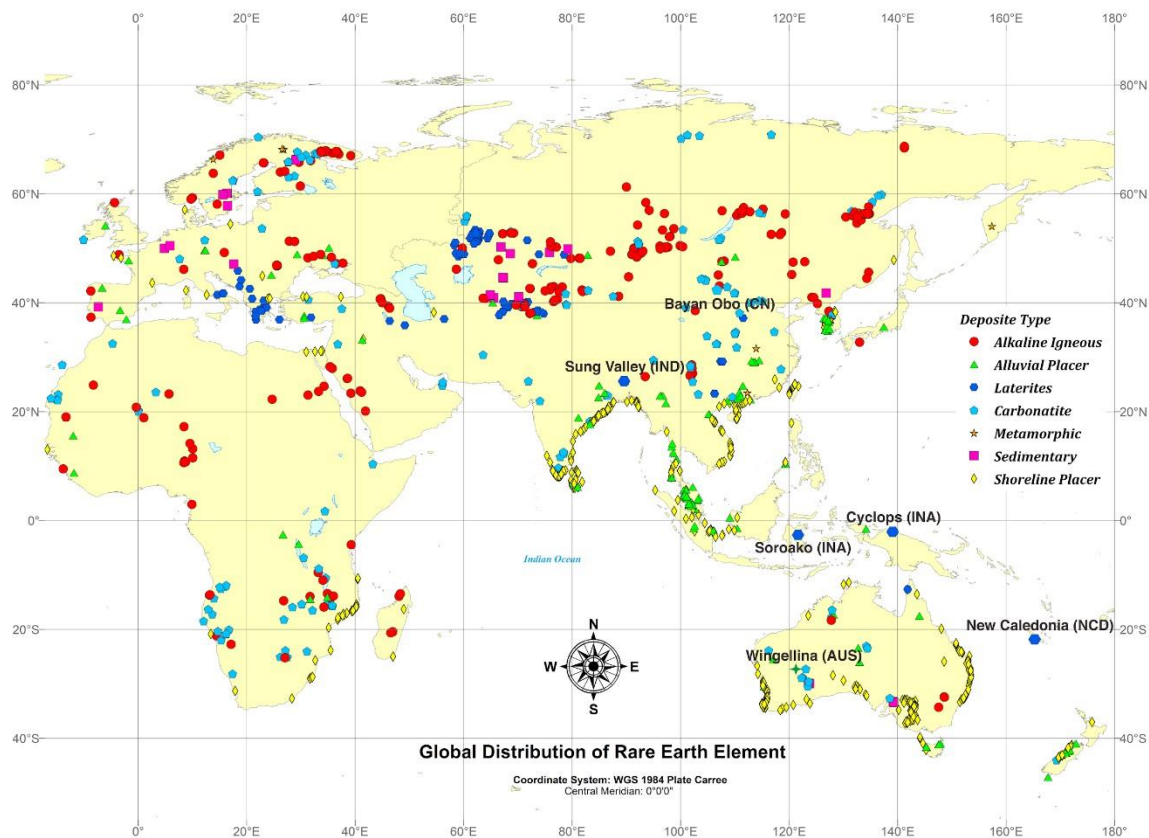
### 1. PENDAHULUAN

The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) mendefinisikan UTJ sebagai sebuah kelompok unsur yang terdiri atas golongan lantanida ditambah dengan unsur Skandium dan Itrium (Balaram, 2019). Sejak pertama kali ditemukan pada tahun 1787 di Swedia, saat ini telah teridentifikasi lebih dari 250 mineral pembawa UTJ (Batapola dkk., 2020). UTJ dapat dikelompokkan berdasarkan struktur kulit elektronnya menjadi Unsur Tanah Jarang Ringan (UTJR) dan Unsur Tanah

Jarang Berat (UTJB). Unsur Lanthanum (La) sampai Samarium (Sm) dalam deret lantanida dikelompokkan ke dalam UTJR, sedangkan unsur Europium sampai dengan unsur Lutetium (Lu) dan Itrium (Y) dikelompokkan dalam RTJB, pengecualian untuk Skandium dan Promethium. Skandium tidak dimasukkan ke dalam UTJB maupun UTJR karena tidak diekstraksi dari endapan yang sama dengan unsur lain, demikian pula Promethium merupakan unsur yang tidak terbentuk secara alami di alam (Van Gosen dkk., 2014). Kedua

unsur ini juga merupakan unsur yang masuk ke dalam kelompok *Critical Raw Materials* (CRM) bersama dengan

hidrotermal) dan proses geologi sekunder (proses pelapukan dan erosi dari endapan primer) (Goodenough dkk., 2016). Beberapa



**Gambar 1.** Peta persebaran endapan unsur tanah jarang di dunia (Orris dan Grauch, 2002).

Lokasi yang didiskusikan dalam *paper* ini dilabeli tulisan hitam.

*Platinum Group Mineral* (PGM): In, W, Ge, Co, Nb, Ta, Ga, Sb, Bi, Tl, dan Mg (Hayes dan McCullough, 2018).

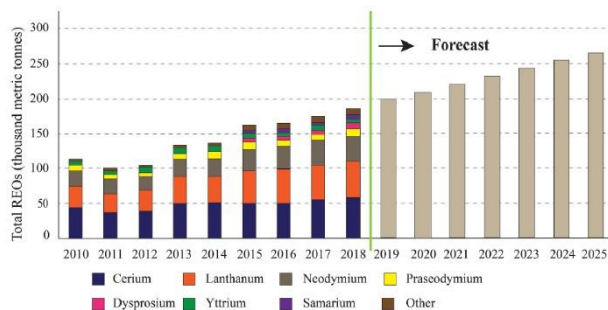
UTJ merupakan unsur *lithophile* yang artinya unsur ini terkayakan di dalam kerak bumi dan diperkirakan memiliki kelimpahan yang cukup besar di kerak bumi, yakni sebesar 220 ppm. UTJ tidaklah benar-benar “jarang” seperti namanya. UTJ yang paling banyak ditemukan dalam kerak bumi adalah Cerium yang memiliki kelimpahan 63 ppm, lebih banyak dari unsur Cu (28 ppm). Sedangkan Tm dan Lu yang merupakan UTJ paling “jarang” memiliki kelimpahan 0.30 ppm dan 0.31 ppm, masih lebih tinggi kadarnya dibandingkan Au, 0.0015 ppm (Gupta dan Krishnamurthy, 2005).

Sumber daya UTJ berada pada daerah di mana UTJ terkonsentrasi secara signifikan di atas rata-rata kelimpahannya di kerak bumi melalui proses geologi primer (proses magmatik dan

zona metamorfisme kontak, pegmatit, intrusi alkalin, urat kuarsa, dan urat fluorit (Gupta and Krishnamurthy, 2005). Monazit menjadi mineral sumber *Rare Earth Oxide* (REO) kedua terbanyak di dunia setelah Bastnaesite. Mineral ini umumnya hadir dalam konsentrasi tinggi pada endapan hasil pelapukan granit, gneis dan batuan beku serta malihan lainnya (Wall, 2014). Monazit mengandung 70% UTJ dalam setiap struktur molekulnya (Thompson dkk., 2012). Walaupun kaya akan UTJ, ekstraksi UTJ dari mineral tersebut tidaklah mudah karena keterdapatannya unsur radioaktif di dalamnya (Voncken, 2016; Xaba dkk., 2018). Mineral lainnya yang menjadi sumber utama UTJ adalah xenotime dan apatit.

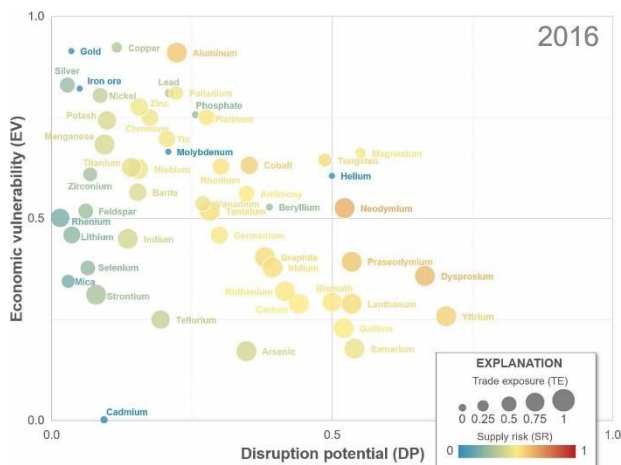
UTJ memiliki sifat kimia, fisika, magnetik, dan luminesensi yang unik akibat struktur dan kondisi atomnya (Dushyantha dkk., 2020). Sifat ini mendukung UTJ untuk digunakan sebagai bagian dari komponen teknologi

lanjutan yang hemat energi, efisien, kompak, cepat, tahan lama, dengan suhu yang stabil, sehingga UTJ umumnya digunakan dalam peralatan seperti baterai isi ulang, konverter autokatalis, magnet super, lampu LED, dan panel surya (Balaram, 2019).



**Gambar 2.** Data produksi oksida UTJ total dunia tahun 2018. Diperkirakan jumlah produksi akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya permintaan (Terry, 2019).

Peningkatan konsumsi UTJ telah terjadi selama 20 tahun terakhir sebagai akibat permintaan pasar untuk teknologi tinggi dan diperkirakan akan terus meningkat 7–8% per tahunnya (Kingsnorth, 2016; Mancheri dkk., 2019).



**Gambar 3.** Kerentanan ekonomi dari komoditas logam. Semakin ke kiri atas semakin stabil, semakin kiri bawah semakin rentan. Diagram diambil dari Nassar dkk. (2020).

Sumber daya UTJ global dalam bentuk REO diperkirakan berjumlah 478 juta ton. Produksi

global diperkirakan telah meningkat 100–200 ribu ton selama periode 2010–2018, dan diperkirakan akan meningkat sampai 250 ribu ton pada tahun 2025 (**Gambar 2**). Cadangan UTJ saat ini diperkirakan tidak dapat memenuhi produksi UTJ global dengan laju produksi seperti saat ini selama 100 tahun ke depan (Mancheri dkk., 2019).

Melihat kondisi permintaan pasar, produksi global, dan sumber daya UTJ saat ini, akibat risiko penyediaan (*supply risk*) UTJ yang sangat tinggi (**Gambar 3**), adalah sebuah keharusan bagi pengembangan eksplorasi sumber alternatif dan baru dari UTJ (Nedal dkk., 2020). Dalam konteks ini, Indonesia tidak mencoba untuk tertinggal. Kondisi geologi Indonesia cukup mendukung untuk mendapatkan sumber daya UTJ yang ekonomis. Beberapa sumber daya UTJ baru di Indonesia telah ditemukan, di antaranya dalam bentuk endapan letakan dari batuan granitik di Bangka Belitung dan endapan laterit dari batuan ultramafik di Sulawesi, Maluku, dan Pegunungan Cyclops, namun belum mencapai pada level sumber daya ekonomis (Handoko dan Sanjaya, 2018; Maulana dkk., 2019; Farrokhpay dkk., 2019; Monnier dkk., 1999. Penelitian ini mencoba untuk melakukan ulasan kritis terhadap potensi UTJ di Indonesia pada endapan laterit dari batuan ultramafik sebagai alternatif dan sumber baru bagi kebutuhan UTJ dunia yang akan menjadikan Indonesia sebagai *new emerging country* produsen UTJ di dunia. Penelitian ini juga mencoba membandingkan kehadiran sumber daya UTJ dunia dengan kehadiran sumber UTJ dari batuan ultramafik di Indonesia untuk lebih memahami potensi pengembangan eksplorasi UTJ di masa depan.

## 2. DATA DAN METODOLOGI

Data yang digunakan adalah data sekunder yang dirangkum dari beberapa publikasi yang berhubungan dengan topik penelitian. Metode utama adalah studi pustaka dari beberapa publikasi yang kemudian disitir dan dirangkum untuk memenuhi tujuan penulisan penelitian ini. Penelaahan studi kasus oleh beberapa penulis juga dilakukan untuk memperkuat hasil studi pustaka.



### 3. HASIL DAN ANALISIS

Terdapat 6 lokasi keterdapatan unsur tanah jarang yang mewakili kondisi geologi tertentu, yaitu batuan karbonatit, batuan ultramafik, dan horizon laterit hasil diagenesis batuan ultramafik. Dua lokasi terletak di Indonesia, sedangkan empat lainnya berada di luar Indonesia.

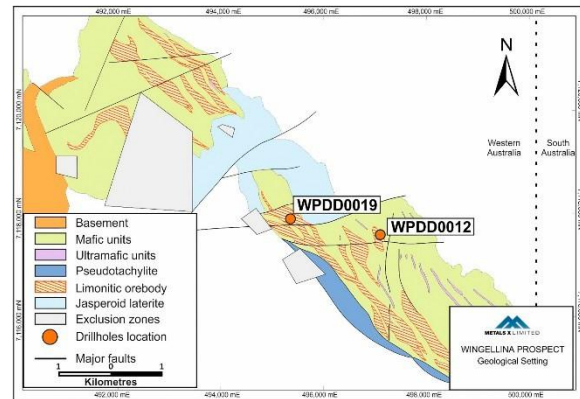
#### 3.1. Bayan Obo, Tiongkok

Endapan bijih Bayan Obo di Mongolia Dalam, Tiongkok, terletak di batas utara kraton Tiongkok Utara dan berdekatan dengan Sabuk Orogen Asia Tengah. Batuan alas Bayan Obo adalah Kelompok Wutai yang berumur Arkean, terdiri dari gneis dan migmatit. Batuan sedimen diendapkan di atas batuan dasar berumur Proterozoikum. Batuan sedimen yang tersingkap di daerah Bayan Obo adalah kuarsit, kuarsit arkosik, batupasir, batusabak karbonan, batusabak, dan batugamping. Endapan mineral Bayan Obo terdiri dari 3 tubuh bijih yang semuanya berada pada batuan dolomit yang diintrusi oleh karbonatit. Batuan intrusi karbonatit memiliki tren NW-SE dan NE-SW, berukuran panjang 6–200m dan lebar 0.5–4m (Tao dkk., 1998). Mineral penyusun utama intrusi karbonatit adalah kalsit dan dolomit, ditambah mineral minor seperti monazit, magnetit, apatit, bastnasit, dan barit. Batuan karbonatit tersebut memiliki kadar UTJ sebesar 0.02–20.00 wt% (Tao dkk., 1998). Data kadar UTJ pada karbonatit diambil dari penelitian Ni dkk. (2020) dan Tao dkk. (1998), selanjutnya data kadar ini diplot pada diagram laba-laba.

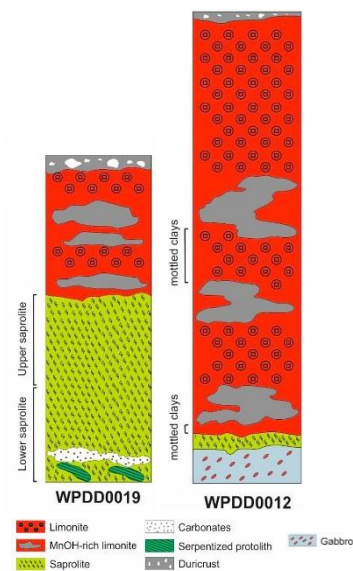
#### 3.2. Wingellina, Australia

Endapan laterit Ni-Co Wingellina ditemui pada Provinsi Musgrave yang merupakan sabuk orogen berumur Proterozoikum. Laterit yang ditemui pada kompleks ini berasal dari pelapukan intrusi berlapis batuan ultramafik-mafik yang menembus batuan metamorf fasies granulit (**Gambar 4**). Menurut Pillans dkk. (2005), Benua Australia mengalami perubahan iklim berselang-seling antara iklim kering dan iklim lembab, sehingga mendukung terbentuknya suatu profil laterit. Batuan ultramafik pada kompleks Wingellina adalah ortopiroksenit, klinopiroksenit, dan peridotit, serta batuan mafik seperti gabro dan gabrorit. Horizon pelapukan yang terbentuk

adalah *duricrust* karbonat di bagian paling atas, kemudian limonit dan saprolit, yang dialasi oleh batuan induk. Data konsentrasi UTJ horizon laterit diambil dari Putzolu dkk. (2019; **Gambar 5**) yang selanjutnya diplot pada diagram laba-laba.



**Gambar 4.** Peta geologi regional daerah prospek Wingellina, Australia (Putzolu, 2019).

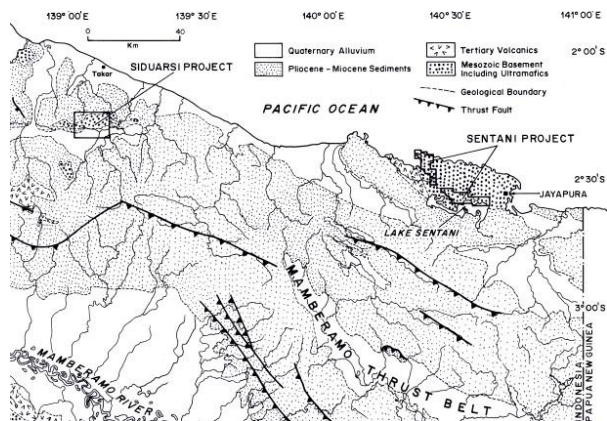


**Gambar 5.** Profil laterit daerah prospek Wingellina (Putzolu, 2019).

#### 3.3. Pegunungan Cyclops, Indonesia

Pegunungan Cyclops diinterpretasikan sebagai hasil dari proses obduksi yang membawa batuan ofiolit ke permukaan, lalu mengalami proses retrograde metamorfisme sebelum mengalami ekshumasi 20 juta tahun lalu (Dow dkk. (1984); Monnier dkk. (1998); **Gambar 6**). Batuan yang dominan menyusun Pegunungan Cyclops adalah batuan metamorfik fasies sekis hijau-amfibolit serta batuan dari sekuen ofiolit. Sekuen ofiolit yang ditemui di Pegunungan

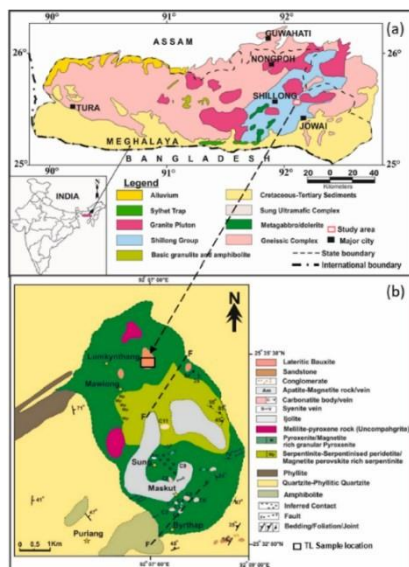
Cyclops terdiri dari websterit, wehrlit, dunit dan harzburgit setebal 10 km, serta gabro, diabas dan lava basaltik setebal 5 km. Data geokimia yang didapatkan dari batuan segar diambil dari tulisan Monnier dkk. (1998).



**Gambar 6.** Peta geologi regional Pegunungan Cyclops dan sekitarnya (Monnier dkk., 1998).

### 3.4. Lembah Sung, India

Kompleks Lembah Sung yang terdiri dari batuan peridotit terserpentinisasi, piroksenit, melilitolit, ijolit, syenit nefelin, karbonatit, dan urat apatit-magnetit adalah suatu kompleks magmatisme yang sudah tidak aktif, secara geologi berkaitan dengan aktivitas magmatisme *plume* Kerguelen.



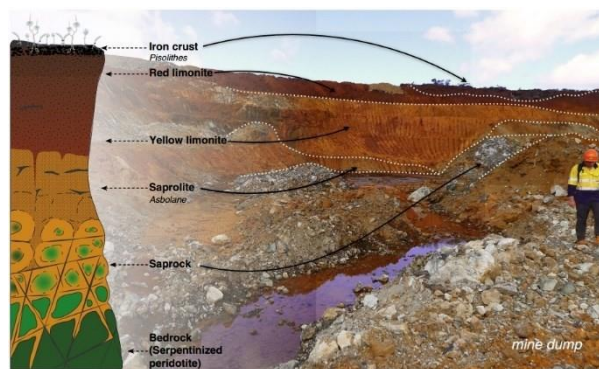
**Gambar 7.** Peta geologi regional Lembah Sung dan sekitarnya (Sadiq dan Umrao, 2020).

Terdapat endapan laterit yang berasal dari pelapukan piroksenit dan serpentin,

membentuk suatu horizon laterit yang terdiri dari horizon limonit merah, limonit kuning, saprolit, dan batuan dasar (Sadiq dan Umrao, 2020; **Gambar 7**). Data kadar UTJ pada lapisan *titaniferous laterite* diambil dari penelitian Sadiq dan Umrao (2020) yang selanjutnya diplot pada diagram laba-laba..

### 3.5. Tiebaghi, Kaledonia Baru

Pulau Kaledonia Baru adalah bagian dari mikrokontinen Norfolk Ridge. Pulau ini terdiri dari dua *terrane* yang berumur Karbon–Kapur, dan Kapur Awal–Paleosen. Proses bergabungnya kedua *terrane* tersebut menyebabkan terangkatnya sekuen ofiolit pada Oligosen, yang tersingkap dan menyusun sepertiga bagian dari Pulau Kaledonia Baru. Batuan penyusun ofiolit didominasi oleh harzburgit, lherzolit, piroksenit, wehrlit, dunit, serta gabro (Secchiari dkk., 2016). Pelapukan yang intensif menyebabkan terbentuknya profil laterit yang cukup tebal. Horizon laterit yang umum ditemui tersusun atas batuan induk, saprolit, laterit kuning, laterit merah, dan *ferricrete* (Ulrich dkk., 2019; lihat **Gambar 8**). Data kadar UTJ di horizon limonit (laterit kuning) diambil dari riset oleh Ulrich dkk. (2019).

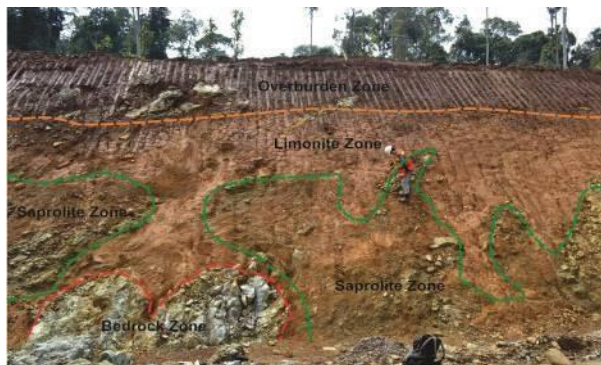


**Gambar 8.** Profil laterit daerah prospek Tiebaghi (Ulrich dkk., 2019).

### 3.6. Soroako, Sulawesi Selatan

Soroako tersusun atas batuan-batuan ultramafik yang telah lapuk sehingga membentuk profil laterit. Studi yang dilakukan oleh Maulana dkk. (2019) mengindikasikan bahwa unsur skandium (Sc) cenderung terkayakan pada horizon limonit (**Gambar 9**). Selain itu, Sc adalah unsur yang kompatibel pada mineral piroksen, namun tidak kompatibel di dalam struktur mineral olivin.

Meskipun demikian, di dalam karya Maulana dkk. (2019) tidak dicantumkan daftar kadar UTJ.



**Gambar 9.** Foto singkapan yang menunjukkan profil laterit di Soroako (Maulana dkk, 2019).

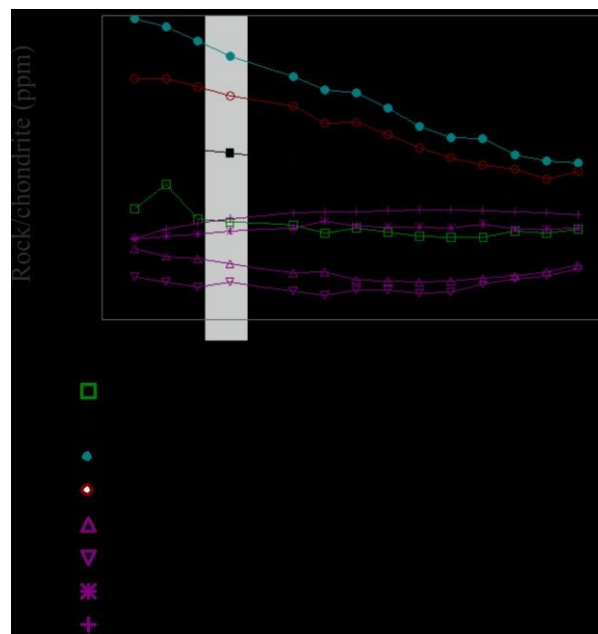
#### 4. DISKUSI

Diagram laba-laba dari konsentrasi UTJ yang dikumpulkan dari lima lokasi (tidak termasuk laterit Soroako) menunjukkan data endapan laterit yang mayoritas diambil dari horizon limonit (Wingellina, Lembah Sung, dan Kaledonia Baru). Data UTJ ini dinormalisasikan terhadap *chondrite* menurut Sun dan McDonough (1985).

Berdasarkan diagram laba-laba UTJ yang memuat data UTJ dari kelima lokasi tersebut (**Gambar 10**), dapat terlihat bahwa sampel-sampel dari Bayan Obo secara keseluruhan memiliki konsentrasi UTJ paling tinggi. Selain itu, pola UTJ menurun, jika dilihat dari unsur La–Lu.

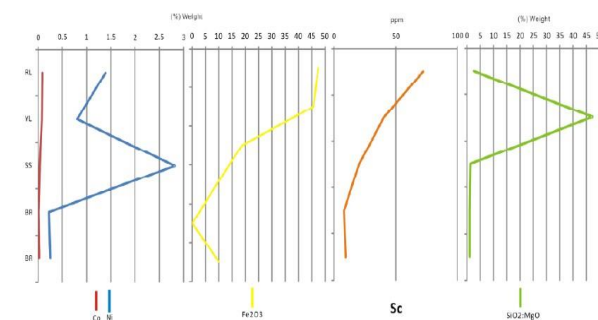
Sementara itu, sampel dari limonit Wingellina, Kaledonia Baru, dan Lembah Sung (Meghalaya) sama-sama memiliki anomali Eu negatif. Anomali Eu positif biasanya ditemukan pada bijih endapan hidrotermal. Sedangkan sampel dari Pegunungan Cyclops secara umum memiliki kadar UTJ yang lebih rendah dibandingkan sampel lainnya. Hal ini kemungkinan disebabkan karena sampel yang dianalisis oleh Monnier dkk. (1999) merupakan batuan segar, bukan batuan yang telah mengalami lateritisasi. Namun demikian, pada batuan wehrlit Cyclops terlihat kadar UTJ yang lebih tinggi daripada batuan harzburgit, dunit, dan websterit. Pola UTJ yang terlihat

pada wehrlite cenderung terkayakan.



**Gambar 10.** Pola diagram laba-laba UTJ dari lima deposit UTJ di dunia.

Sementara itu, di dalam penelitian Maulana dkk. (2019), disebutkan bahwa kadar Sc pada horizon limonit merah mencapai 87 ppm pada sampel batuan dari Blok Barat Soroako (**Gambar 11**). Saat ini, Soroako dikenal sebagai penghasil nikel dari endapan laterit, yang terkayakan di horizon saprolit. Sementara itu, pada horizon limonit konsentrasi nikel cenderung berkurang. Temuan konsentrasi Sc yang cenderung melimpah di horizon limonit dapat memberi harapan baru bagi eksplorasi Sc dan mineral UTJ terkait, seperti Nd, Ta, Lu, dan Hf.



**Gambar 11.** Pola persebaran UTJ pada endapan Soroako menunjukkan adanya pengayaan unsur Sc (Maulana dkk., 2019)

Berdasarkan analog dengan endapan laterit di Soroako, telah diketahui keberadaan endapan



laterit Ni-Co Sentani dan Siduarsari di Pegunungan Cyclops. Di dalam tulisan Thirnbeck (2001), disebutkan bahwa kadar Ni di Siduarsari di horizon saprolit berkisar antara 1,04–1,25%. Melihat perbandingan ini, maka penelitian mengenai kandungan UTJ di Pegunungan Cyclops tentu menarik untuk diteliti karena pengayaan UTJ di daerah tersebut. Diperlukan studi ilmiah mengenai kadar UTJ di Pegunungan Cyclops, terutama di daerah yang terdapat lateritisasi seperti Sentani dan Siduarsari.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan diskusi terhadap data sekunder keterdapatan UTJ pada endapan-endapan di luar Indonesia (Wingellina, Lembah Sung, Kaledonia Baru, dan Bayan Obo) dan di Pegunungan Cyclops, dapat disimpulkan bahwa Indonesia memiliki potensi UTJ dengan batuan ultramafik sebagai *host rock* yang menunggu untuk dieksplorasi lebih lanjut. Analog dengan endapan nikel laterit di Soroako yang memiliki pengayaan unsur Sc di horizon limonit, endapan laterit Ni-Co di Pegunungan Cyclops, keterdapatan UTJ, terutama di horizon limonit, perlu diteliti lebih lanjut.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Fahmi Hakim, S.T, M.Sc.RWTH dan teman-teman yang telah memberikan dukungan baik secara substansi maupun moral untuk menyelesaikan tulisan ini.

## DAFTAR PUSTAKA

Batapola, N. M., Dushyantha, N. P., Premasiri, H. M. R., Abeyasinghe, A. M. K. B., Rohitha, L. P. S., Ratnayake, N. P. dan Dharmaratne, P. G. R., 2020, A comparison of global rare earth element (REE) resources and their mineralogy with REE prospects in Sri Lanka: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 200, p. 104475, doi: 10.1016/j.jseaes.2020.104475

Balaram, V., 2019, Rare earth elements : A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact: *Geoscience*

*Frontiers*, v. 10.4, p. 1285-1303, doi: 10.1016/j.gsf.2018.12.005

Dow, D.B. dan Sukanto, R., 1984, Western Irian Jaya: the end-product of oblique plate convergence in the late Tertiary: *Tectonophysics*, v. 106, p. 109–139, doi: 10.1016/0040-1951(84)90224-5

Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeyasinghe, B., Ratnayake, N. dan Dissanayake, K., 2020, The story of rare earth elements (REEs): occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production: *Ore Geology Reviews*, doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103521

Farrokhpay, S., Cathelineau, M., Blancher, S.B., Laugier, O., dan Filippov, L., 2019, Characterization of Weda Bay nickel laterite ore from Indonesia: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 196, p. 270–281, doi: 10.1016/j.gexplo.2018.11.002

Goodenough, K.M., Schilling, J., Jonsson, E., Kalvig, P., Charles, N., Tuduri, J., Deady, E.A., Sadeghi, M., Schiellerup, H. dan Müller, A., 2016, Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting: *Ore Geology Reviews*, v. 72, p. 838–856, doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.09.019

Gupta, C.K. dan Krishnamurthy, N., 2005, *Extractive Metallurgy of Rare Earths*: CRC Press. Boca Raton, Florida, v. 65, p. 70–75.

Handoko, A.D., dan Sanjaya, E., 2018, Characteristics and genesis of Rare Earth Element (REE) in western Indonesia, *in* *Global Colloquium on GeoSciences and Engineering 2017*, 18–19 October 2017, Bandung, Indonesia., v. 118, p. 12077.

Hayes, S. M. dan McCullough, E. A., 2018, Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies: *Resources Policy*, v. 59, p. 192–199, doi: 10.1016/j.resourpol.2018.06.015

Kingsnorth, D.J., 2016, Rare earths: The China conundrum, *in* *12th International Rare Earths Conference*: Hong Kong, November. p. 8–10

Maulana, A., Sufriadin, Sanematsu, K. dan

- Sakakibara, M., 2019, Study on Sc-bearing Lateritic Ni deposits in Ultramafic Rock from Sulawesi: A New Paradigm in Indonesia Metal Mining Industry: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 676, n. 1, p. 012032.
- Mancheri, N.A., Sprecher, B., Bailey, G., Ge, J. dan Tukker, A., 2019, Conservation & Recycling Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience: Resources, Conservation, Recycling, v. 142, p. 101–112, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.11.017
- Monnier, C., Girardeau, J., Pubellier, M., Polvé, M., Permana, H. dan Bellon, H., 1998, Petrology and geochemistry of the Cyclops ophiolites (Irian Jaya, East Indonesia): Consequences for the Cenozoic evolution of the north Australian margin: Mineralogy and Petrology, v. 65, p. 1–28, doi: 10.1007/BF01161574
- Nassar, N. T., Brainard, J., Gulley, A., Manley, R., Matos, G., Lederer, G., dan Fortier, S. M. 2020, Evaluating the mineral commodity supply risk of the US manufacturing sector: Science Advances, v. 6, n. 8, p. eaay8647, doi: 10.1126/sciadv.aay8647
- Ni, P., Zhou, J., Chi, Z., Pan, J.Y., Li, S.N., Ding, J.Y. dan Han, L., 2020, Carbonatite dyke and related REE mineralization in the Bayan Obo REE ore field, North China: Evidence from geochemistry, C-O isotopes and Rb-Sr dating: Journal of Geochemical Exploration, v. 215. p. 106560, doi: 10.1016/j.gexplo.2020.106560
- Orris, G.J. dan Grauch, R.I., 2002, Rare earth element mines, deposits, and occurrences: USGS Open-File Report 02-189, 174p.
- Pillans, B., Anand, R.R. dan De Broekert, P., 2005, Geochronology of the Australian regolith: Regolith Landscape Evolution Across Australia: CRC LEME, p. 41–52.
- Putzolu, F., Boni, M., Mondillo, N., Maczurad, M. dan Pirajno, F., 2019, Ni-Co enrichment and High-Tech metals geochemistry in the Wingellina Ni-Co oxide-type laterite deposit (Western Australia): Journal of Geochemical Exploration, v. 196, p. 282–296, doi: 10.1016/j.gexplo.2018.11.004
- Sadiq, M. dan Umrao, R.K., 2020, Nb-Ta-rare earth element mineralization in titaniferous laterite cappings over Sung Valley ultramafic rocks in Meghalaya, India: Ore Geology Reviews, v. 120, p. 103439, doi: 10.1016/j.oregeorev.2020.103439
- Secchiari, A., Montanini, A., Bosch, D., Macera, P., Cluzel, D., 2016, Melt extraction and enrichment processes in the New Caledonia lherzolites: evidence from geochemical and Sr-Nd isotope data: Lithos 260, 28–43. doi: 10.1016/j.lithos.2016.04.030
- Sun, S.S., dan McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes: Geological Society Special Publication, v. 42, p. 313–345, doi:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Tao, K., Yang, Z., Zhang, P., Wang, W., 1998, Systematic geological investigation on carbonatite dykes in Bayan Obo, Inner Mongolia. China: Scientia Geologica Sinica, v. 33, p. 73–83.
- Terry, F., 2019. Rare Earths Rarely So Strategic: [https://www.semiconductor-digest.com/2019/07/10/2019-rare-earths-rarely-so-strategic/#:~:text=Global%20supply%20chains%20are%20being,%20Dearth%20elements%20\(REE\).&text=REE%20are%20heavy%20metals%20distributed%20in%20moderate%20quantities%20around%20the%20world.](https://www.semiconductor-digest.com/2019/07/10/2019-rare-earths-rarely-so-strategic/#:~:text=Global%20supply%20chains%20are%20being,%20Dearth%20elements%20(REE).&text=REE%20are%20heavy%20metals%20distributed%20in%20moderate%20quantities%20around%20the%20world.)
- Thirnbeck, M., 2001, The Sentani and Siduarsari Nickel-Cobalt Laterite Deposits, Northeast Irian Jaya, Indonesia, in PNG Geology Exploration and Mining Conference, Port Moresby, p. 245-254
- Thompson, W., Lombard, A., Santiago, E. dan Singh, A., 2012, Mineralogical studies in assisting beneficiation of rare earth element minerals from carbonatite deposits: Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM), Springer, p. 665–



- 672, doi:10.1007/978-3-642-27682-8\_80
- Ulrich, M., Cathelineau, M., Muñoz, M., Boiron, M.C., Teitler, Y. dan Karpoff, A.M., 2019, The relative distribution of critical (Sc, REE) and transition metals (Ni, Co, Cr, Mn, V) in some Ni-laterite deposits of New Caledonia: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 197, p. 93–113, doi:10.1016/j.gexplo.2018.11.017
- Van Gosen, B.S., Verplanck, P.L., Long, K.R. dan Gambogi, J., Seal II, R.R., 2014. The rare earth elements: vital to modern technologies and lifestyles: USGS Mineral Resources Program, Fact Sheet 2014-3078, doi: <https://doi.org/10.3133/fs20143078>
- Voncken, J.H.L., 2016. The rare earth elements: an introduction: Springer, 127 p.
- Wall, F., 2014, Rare earth elements, *in* Gunn, G. ed., *Critical Metals Handbook*: John Wiley & Sons, p. 312–339.
- Xaba, S.M., Nete, M. dan Purcell, W., 2018, Concentration of rare earth elements from monazite by selective precipitation: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, p. 12006