

**PROFIL ENDAPAN LATERIT NIKEL DI POMALAA, KABUPATEN KOLAKA,
PROVINSI SULAWESI TENGGARA**

**PROFILE OF NICKEL LATERITS IN POMALAA, KOLAKA REGENCY,
SOUTHEAST SULAWESI PROVINCE**

**Hashari Kamaruddin¹, Riko Ardiansyah I.K.¹,
Mega F. Rosana², Nana Sulaksana², dan Euis Tintin Y.²**

¹PT. Aneka Tambang Tbk., Pasca Sarjana Teknik Geologi Universitas Padjajaran

²Pasca Sarjana Teknik Geologi Universitas Padjajaran
hashari.kamaruddin@antam.com

ABSTRAK

Geologi daerah Pomalaa merupakan bagian dari batuan ultramafik Ophiolit Sulawesi Timur di lengan tenggara Sulawesi. Di daerah tersebut endapan laterit nikel Pomalaa terbentuk dari pelapukan batuan asal ultramafik yang didominasi oleh harzburgit terserpentinisasi dan memiliki karakteristik tipe endapan laterit nikel *hydrous Mg silicate*. Lateritisasi terbentuk pada morfologi perbukitan bergelombang rendah dengan sudut kelerengan berkisar 10° sampai dengan 25°. Proses lateritisasi berlangsung dengan baik terutama pada topografi yang cenderung lebih landai yaitu 10° sampai dengan 15°, yang memungkinkan terbentuknya lateritisasi yang cukup dalam dengan zona saprolit yang tebal.

Zonasi profil laterit daerah Pomalaa secara spasial dapat dibagi menjadi tiga blok yaitu: Blok Utara, Blok Tengah dan Blok Selatan. Perbedaan profil di ketiga blok tersebut turut dipengaruhi oleh proses pengayaan (*enrichment*) Ni yang dialami. Di Blok Utara pengayaan Ni terjadi tepat di bawah batas tengah muka air tanah, sedangkan di Blok Tengah dan Blok Selatan pengayaan Ni terbentuk antara 2 meter sampai dengan 3 meter di bawah garis tersebut atau mendekati batas terbawah muka air tanah. Penciri utama yang membedakan Blok Selatan dengan Blok Utara dan Blok Tengah, adalah kelimpahan *boulder-boulder* batuan ultramafik, yaitu batuan serpentinit dan harzburgit dengan ukuran diameter mencapai lebih dari 2 meter pada zona saprolit.

Kata kunci: Pomalaa, Laterit, Nikel, Profil, Zonasi

ABSTRACT

The geology of Pomalaa is a part of the ultramafic rocks of East Sulawesi Ophiolite in southeast arm of Sulawesi. The deposit was developed by weathering of ultramafic rocks which is dominated by serpentinized harzburgite as the source rock and exhibit the characteristics of hydrous Mg silicate nickel laterite deposit type. Lateritization is found on the morphology of undulation hills with a slope angle 10° - 25°. The laterite formation are takes place on gentle topographic rather than the steep one, the gentle slope allows the formation of deep laterite profile that likely will develop thicker saprolite zones.

The laterite profile of Pomalaa area classified into three blocks, namely: North Block, Central Block and South Block. It was influenced by the differential enrichment process of Ni in each block. In North Block the Ni enrichment formed just below the middle boundary of the groundwater level while in the Central and South Blocks the Ni enrichment were formed 2 - 3 meters below the line or near the bottom of the groundwater level. The main identifier that distinguishes the South Block with the North and Central Pomalaa Blocks, is the boulders abundance of more than 2 meters in the Saprolite Zone.

Keywords: Pomalaa, Laterite, Nickel, Profile, Zonation

PENDAHULUAN

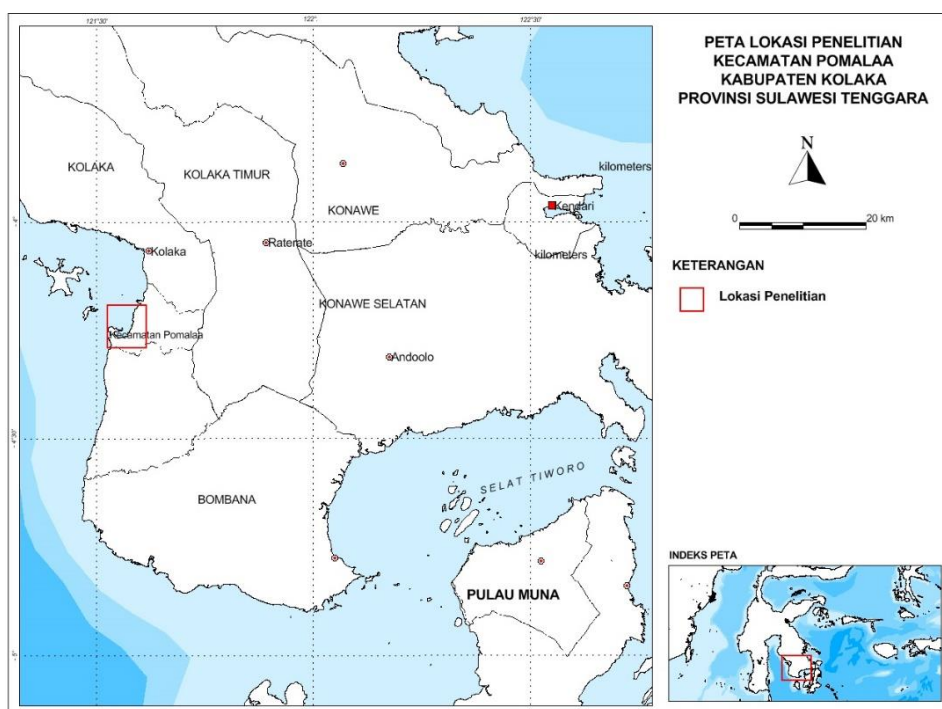
Publikasi ilmiah tentang endapan laterit nikel di Sulawesi didominasi oleh hasil penelitian endapan nikel di daerah Soroako sejak akhir tahun 1970 (Golightly and Arancibia 1979) hingga kini (Sufriadin *dkk.*, 2011; Ilyas *dkk.*, 2012). Penelitian yang telah dilakukan, secara berurutan menguraikan tentang profil laterit nikel Soroako, karakterisasi distribusi Ni berdasarkan analisis geostatistik, topografi dan air tanah-purba, serta pemodelan distribusi kadar bijih nikel, terutama mengacu kepada karakterisasi geomorfologi, mineralogi dan kimiawi bijih saprolit dan implikasinya terhadap pengolahan bijih.

Meskipun merupakan salah satu endapan laterit nikel yang telah lama diketahui keberadaannya, namun endapan laterit nikel Pomalaa belum pernah diteliti dan dipublikasikan secara menyeluruh terkait zonasi dan profilnya. Penelitian endapan laterit nikel Pomalaa telah berlangsung di wilayah IUP PT. ANTAM, Tbk.

Lokasi penelitian secara geografis terletak di dekat garis khatulistiwa pada kisaran

koordinat 4°11'30" - 4°17'30" Lintang Selatan dan 121°31'30" - 121°37' Bujur Timur. Secara administratif daerah Pomalaa termasuk ke dalam wilayah Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara (Gambar 1).

Daerah tersebut secara geologi termasuk ke dalam Kompleks Ofiolit di lengan tenggara Sulawesi yang merupakan bagian dari Ofiolit Sulawesi Timur (OST). Ofiolit sendiri berasal dari bahasa Yunani, merupakan terminologi yang telah lama digunakan pada batuan ultramafik. Pada awalnya ofiolit (*ophi* = ular) digunakan untuk batuan serpentinit yang menunjukkan kilap menyerupai sisik kulit ular. Kemudian secara lebih spesifik digunakan untuk batuan ultramafik terserpentinisasi sebelum akhirnya digunakan sebagai terminologi asosiasi kerabat batuan mafik, ultramafik dan sedimen laut dalam (*pelagic sediments*) yang didominasi ultramafik dengan dominasi utama selalu berupa peridotit (serpentin) bersama subordinat gabro, diabas atau norit maupun batuan-batuan yang berhubungan lainnya (Ahmad 2008; Van Leeuwen and Pieters 2011; Martosuwito 2012; Suroño 2013).



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian

Penelitian mengenai pembentukan endapan nikel laterit telah banyak dilakukan diantaranya oleh (Golightly, 1981; Brand, Butt dan Elias, 1998; Freyssinet dkk., 2005; Ahmad, 2008; Thorne, Roberts dan Herrington, 2012; Butt dan Cluzel, 2013). Endapan nikel laterit didefinisikan sebagai sisa tanah/residu dari hasil proses pelapukan panjang, melalui proses pelapukan kimiawi dan pengayaan supergen, utamanya dari batuan ultramafik di bawah kondisi suhu yang cukup panas dan curah hujan yang cukup tinggi dan dikontrol oleh pergerakan fluktuatif muka air tanah pada saat pembentukannya. Pencucian unsur bergerak (*mobile*) dalam batuan ultramafik seperti silika dan magnesium menyebabkan konsentrasi sisa/residu pada unsur tidak bergerak (*immobile*) seperti besi, nikel dan kobalt.

Tujuan penelitian ini untuk mengetahui profil dan zonasi endapan laterit nikel Pomalaa baik secara lateral maupun vertikal, sehingga dapat menjadi acuan dalam mengembangkan penelitian dan pemanfaatan endapan laterit nikel di Pomalaa khususnya dan lengan tenggara Sulawesi umumnya.

METODOLOGI

Penelitian dilakukan dengan melakukan pemetaan dan pengamatan singkapan laterit, analisis petrografi dan analisis mineragrafi serta analisis geokimia.

Pemetaan dengan menggunakan GPS bertujuan untuk memetakan sebaran zonasi laterit dan batuan dasar. Pemetaan disertai pemercontaan singkapan untuk analisis petrografi dan analisis mineragrafi serta analisis geokimia. Hasil pemetaan kemudian dikompilasi dengan data pengeboran untuk mengetahui kemenerusan zonasi laterit secara vertikal.

Analisis petrografi dan analisis mineragrafi menggunakan mikroskop optik dilakukan untuk mengidentifikasi komposisi mineral penyusun serta ubahan yang dialami oleh

batuan dasar di Pomalaa akibat lateritisasi. Analisis dilakukan di Laboratorium Fisik Unit Geomin ANTAM, menggunakan mikroskop polarisasi Nikon tipe ECLIPSE LV.100.POL. Analisis geokimia data pengeboran menggunakan data hasil eksplorasi ANTAM yang dilakukan dengan metode XRF dan ICP-OES.

GEOLOGI

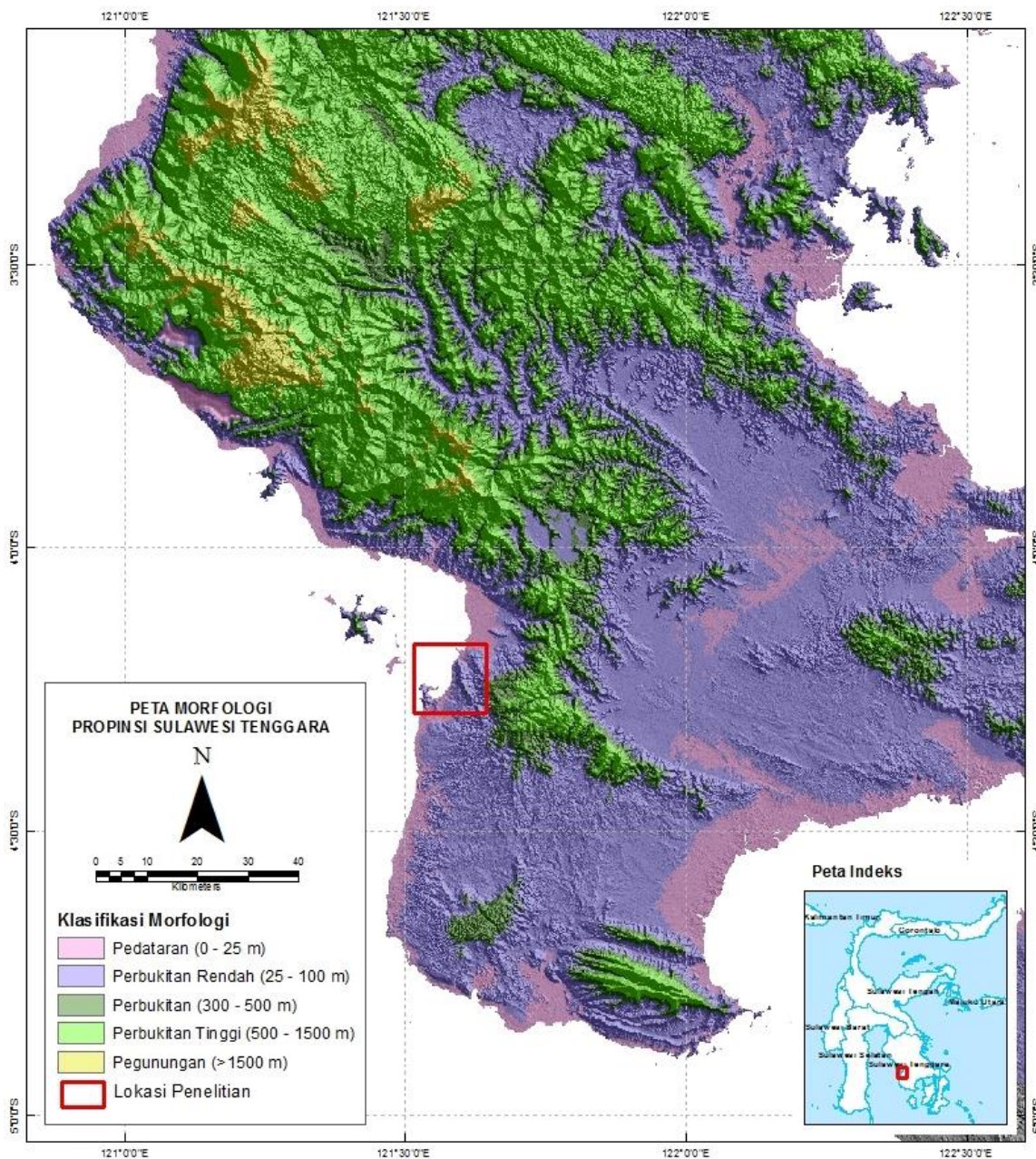
Fisiografi

Pulau Sulawesi terdiri dari empat semenanjung sempit yang terdiri atas lengan-lengan, leher dan batang yang dikelilingi oleh teluk dalam dan tepian cekungan laut marginal. Lengan-lengan tersebut terdiri dari lengan selatan, lengan utara, lengan timur dan lengan tenggara. Pada bagian leher dan batang merupakan kemenerusan dari lengan utara yang membelok tajam $\sim 90^\circ$ ke arah selatan (leher) melewati bagian tengah (batang) yang menghubungkan dan menjadi titik pertemuan ketiga lengan lainnya. Sebagian besar wilayah Sulawesi merupakan pegunungan dengan ketinggian di atas 500 meter di atas permukaan laut (dpl), bahkan 20% dari luas total yang memiliki ketinggian 1000 meter terutama di Sulawesi Tengah dan bagian utara lengan selatan. Puncak tertinggi terdapat pada gunung non-vulkanik Gunung Latimojong yang memiliki ketinggian 3450 meter di atas permukaan laut (dpl). Daerah dataran rendah terdapat di bagian tengah lengan selatan-barat, dekat Teluk Bone dan bagian selatan lengan tenggara. Paling tidak terdapat tujuh belas gunung berapi dijumpai di lengan utara serta satu gunung berapi lainnya di Teluk Tomini. Daerah Pomalaa terletak di lengan tenggara Pulau Sulawesi yang memiliki fisiografi dataran rendah. Simandjuntak dkk, 1993 selanjutnya membagi morfologi lengan tenggara Sulawesi ke dalam lima satuan morfologi, yaitu morfologi pegunungan, morfologi perbukitan tinggi, morfologi perbukitan rendah, morfologi pedataran dan morfologi karst (Gambar 2).

a. Morfologi Pegunungan.

Satuan morfologi pegunungan menempati bagian terluas di kawasan ini, terdiri atas rangkaian pegunungan yang mempunyai ketinggian tertinggi hingga 2790 meter dpl di Gunung Mekongga. Satuan morfologi ini mempunyai topografi yang kasar dengan kemiringan lereng tinggi dan mempunyai pola yang hampir sejajar berarah barat-laut-tenggara sejajar dengan pola struktur sesar regional di kawasan ini sebagai cerminan bentuk morfologi erat hubungannya dengan sesar regional. Satuan morfologi

pegunungan terutama disusun oleh batuan malihan dan setempat oleh batuan ofiolit. Morfologi yang disusun oleh batuan malihan, memiliki rangkaian punggung gunung rendah yang seolah terputus tidak menerus dengan lereng yang tidak rata walaupun bersudut tajam. Sementara itu, morfologi yang disusun oleh batuan ofiolit mempunyai punggung gunung yang panjang dan lurus dengan lereng relatif lebih rata, serta kemiringan yang tajam.



Gambar 2. Klasifikasi morfologi lengan tenggara Sulawesi

b. Morfologi Perbukitan Rendah

Morfologi perbukitan rendah melampar luas di utara Kendari dan ujung selatan lengan tenggara Sulawesi. Satuan ini terdiri atas bukit kecil dan rendah dengan morfologi yang bergelombang. Batuan penyusun satuan ini terutama batuan sedimen klastika Mesozoikum dan Tersier disertai batuan ultramafik.

c. Morfologi Pedataran

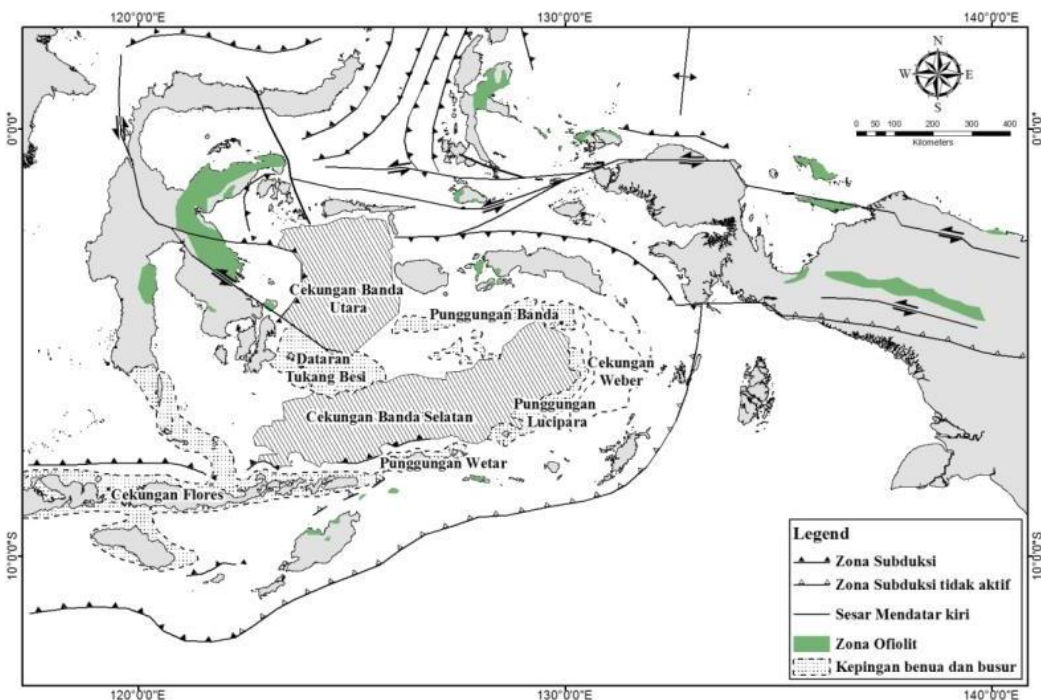
Morfologi dataran rendah dijumpai di bagian tengah ujung selatan lengan tenggara Sulawesi. Tepi selatan Dataran Wawotobi dan Dataran Sampara berbatasan langsung dengan morfologi pegunungan. Penyebaran morfologi ini tampak sangat dipengaruhi oleh sesar geser mengiri (Sesar Kolaka dan Sistem Sesar Konawe).

Terletak relatif di bagian utara sebelah barat dari lengan tenggara, daerah Pomalaa termasuk ke dalam satuan wilayah fisiografi perbukitan rendah.

Tektonik dan Geologi Regional

Pertemuan antara tiga lempeng Indo-Australia, Pasifik dan Asia menghasilkan kumpulan kompleks kepulauan, cekungan marjinal, fragmen benua dan ofiolit yang tercampur oleh pengaturan batas lempeng yang berulang di Indonesia bagian timur (Gambar 3). Konvergensi Lempeng Indo-Australia dari baratdaya sebagian besar telah diserap sepanjang sistem parit Busur Sunda, sedangkan konvergensi Lempeng Pasifik dari timur telah berkembang oleh pergerakan sekuensial di sepanjang deretan zona subduksi dan pusat penyebaran yang berumur pendek membentuk kompleks pertemuan antar lempeng di wilayah ini.

Sulawesi memiliki bentuk yang khas menyerupai huruf “K” terdiri atas empat semenanjung yang disebut “lengan-lengan” yang terpisahkan oleh teluk yang dalam dan bergabung di bagian tengah Sulawesi. Bentuk menyerupai huruf-K tersebut diyakini merupakan bentukan hasil tumbukan dan akresi mikroblok yang berasal dari timur dengan tepi Eurasian yang mengikutinya.

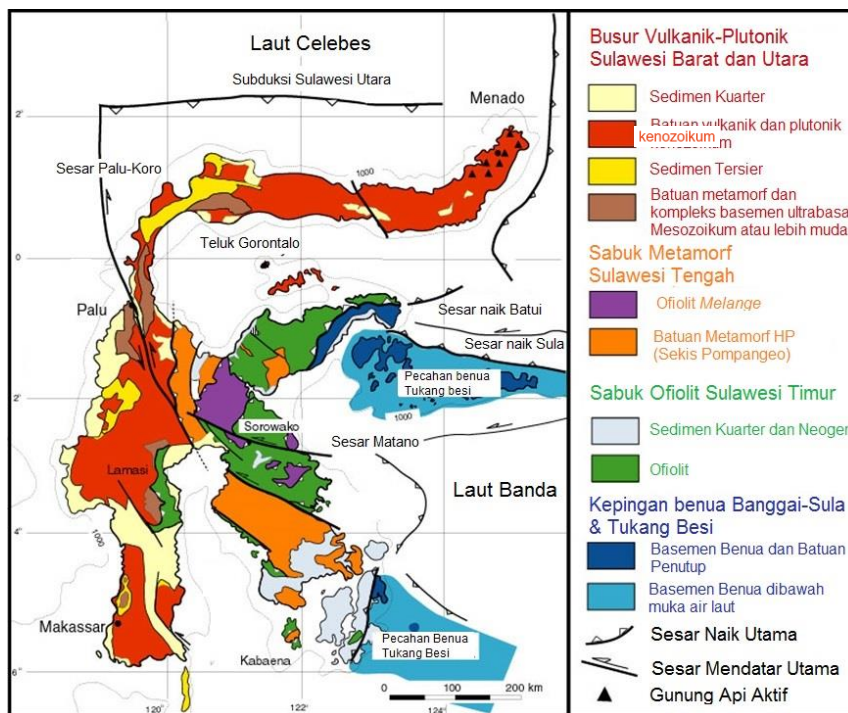


Gambar 3. Peta tektonik wilayah Indonesia bagian timur yang dipengaruhi oleh tumbukan lempeng Indo-Australia, Pasifik dan Asia (dimodifikasi oleh Harris, 2003 dari Hamilton, 1979)

Penelitian tentang latar tektonik dan kaitannya dengan pembentukan sabuk ofiolit di Pulau Sulawesi telah banyak dilakukan oleh sejumlah peneliti diantaranya (Kadarusman et al. 2004; Van Leeuwen and Pieters 2011; Martosuwito 2012; Monnier, C., Girardeau, J., Maury, R. C., & Cotten 1995; Parkinson 1998; Silver et al. 1983). Secara umum Pulau Sulawesi dapat dibagi menjadi empat provinsi geologi dan metalogeni, yaitu (i) Sulawesi Bagian Utara, (ii) Sulawesi Bagian Barat dan (iii) Sulawesi Bagian Timur serta (iv) Banggai Sula. Provinsi Bagian Utara dan Bagian Barat Sulawesi dianggap sebagai sebuah unit stratigrafi-tektonik atau lithotektonik yang disebut Busur Vulkanik-Plutonik Sulawesi Barat, sedangkan Provinsi Sulawesi Bagian Timur umumnya dibagi dua menjadi Sabuk Metamorfik Sulawesi Tengah dan Sabuk Ofiolit Sulawesi bagian Timur; dan Provinsi Banggai-Sula yang juga meliputi Tukang Besi dan Buton juga dikenal sebagai *allochthonous continental terranes* yang tidak diklasifikasikan sebagai sebuah stratigrafi-lithotektonik sehingga Pulau Sulawesi dari tinjauan stratigrafi-tektonik terbagi menjadi 3 litotektonik (Gambar 4).

Ketiga litotektonik hadir di Pulau Sulawesi berupa:

- (i). Busur Vulkanik-Plutonik Sulawesi Barat merupakan material akresi pra-Kapur di bagian barat Sulawesi yang kemudian berkembang menjadi busur vulkanik Neogen; Busur vulkanik terdiri atas kompleks batuan-dasar mid-Mesozoik, busur vulkanik Kapur Akhir- Eosen Tengah, sekuen non-vulkanik batuan karbonat Eosen Atas - Miosen Bawah dan busur vulkanik Miosen - Kuartar. Fase Neogen vulkanik tersebar di bagian barat Sulawesi.
- (ii). Sabuk Metamorfik Sulawesi Tengah merupakan sabuk batuan metamorfik yang berkembang di Sulawesi bagian tengah dan bagian lengan tenggara. Sabuk metamorfik tersebut terdiri atas kumpulan facies metamorfik sekis hijau dan sekis biru, dengan sekis biru meningkat kelimpahannya ke arah barat. Tepi bagian barat sabuk ini merupakan tempat kumpulan batuan tekanan tinggi terpisahkan dari batuan-batuan sekis temperatur-tinggi, gneis dan granitik.



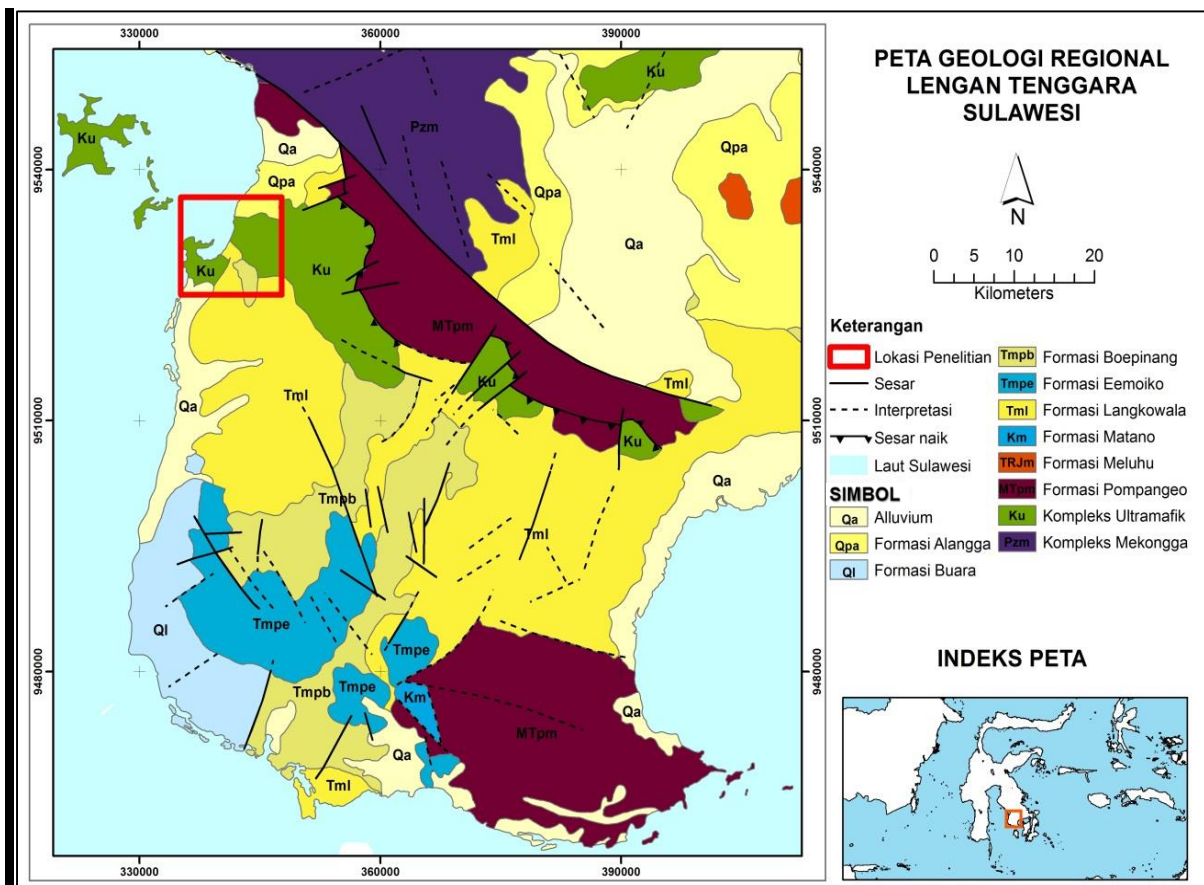
Gambar 4. Geologi Regional Pulau Sulawesi yang menunjukkan sebaran Ofiolit Sulawesi Timur (Kadarusman dkk., 2004)

(iii). Kompleks batuan ofiolit yang dikenal sebagai Ofiolit Sulawesi bagian Timur (OST) berkembang di lengan bagian timur dan menerus hingga lengan bagian tenggara Sulawesi. Kompleks tersebut didominasi oleh ofiolit bertubuh besar yang telah terganggu dan mengalami peristiwa tektonik. OST terpisahkan secara geografis ke segmen bagian utara dan selatan. Segmen bagian utara muncul di lengan bagian timur Sulawesi dan mengandung ofiolit yang cukup lengkap meskipun telah mengalami peristiwa tektonik. Pada segmen bagian selatan hanya dijumpai pada kontak sesar dengan batuan kristalin utamanya terdiri atas harzburgit dan harzburgit terserpentinisasi.

Singkatan batuan ultramafik pada kelompok lengan timur dan tenggara

Sulawesi hadir dalam tiga bentuk (Van Leeuwen dan Pieters, 2011), yaitu:

- (i). Sebagai sebuah tubuh besar dengan bentuk tidak beraturan yang mencapai ratusan kilometer. Yang terbesar adalah daerah-daerah danau masif yang menutupi beberapa ratus kilometer persegi daerah ultramafik.
- (ii). Sebagai lapisan-lapisan terimbikasi mengikuti pola-pola umum struktur zona melange subduksi.
- (iii). Berupa tubuh-tubuh kecil ultramafik tidak beraturan dan terisolir yang umumnya muncul secara terbatas yang memanjang mengikuti kemenerusan regional berarah timurlaut seperti di Sua-sua, Pao-pao dan Pomalaa (Gambar 5).



Gambar 5. Geologi regional lengan tenggara Sulawesi yang menunjukkan tubuh-tubuh kecil ultramafik tidak beraturan dan terisolir yang muncul secara terbatas secara memanjang mengikuti kemenerusan regional berarah timurlaut (Simandjuntak dkk, 1993)

Batuan ultramafik di kompleks ofiolit tersebut didominasi oleh harzburgit, dunit, werlit, lherzolit, websterit, serpentinit dan piroksenit. Batuan ultramafik pada ofiolit tersebut merupakan sumber yang baik untuk pembentukan laterit sebagaimana yang dijumpai di Pomalaa. Batuan ultramafik di daerah Pomalaa didominasi oleh peridotit yang umumnya berupa harzburgit dan dunit yang sebagian telah mengalami serpentinisasi. Komposisi mineral penyusun batuan peridotit didominasi oleh olivin, klinopiroksen, orthopiroksen, kadang-kadang disertai oleh kromit. Kandungan olivin pada harzburgit yang terserpentinisasi tersebut merupakan sumber yang baik untuk terbentuknya endapan laterit nikel. Hampir seluruh litologi di daerah ini telah mengalami lateritisasi dengan morfologi bergelombang yang ikut dikontrol oleh struktur-struktur geologi dengan struktur utama berupa sesar geser kiri berarah umum N 305° E yang merupakan bagian dari Sesar Kolaka. Secara umum disampaikan kondisi geologi secara regional atau geologi lokasi penelitian yang berkaitan dengan topik tulisan (termasuk peta yang berkaitan).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Geomorfologi

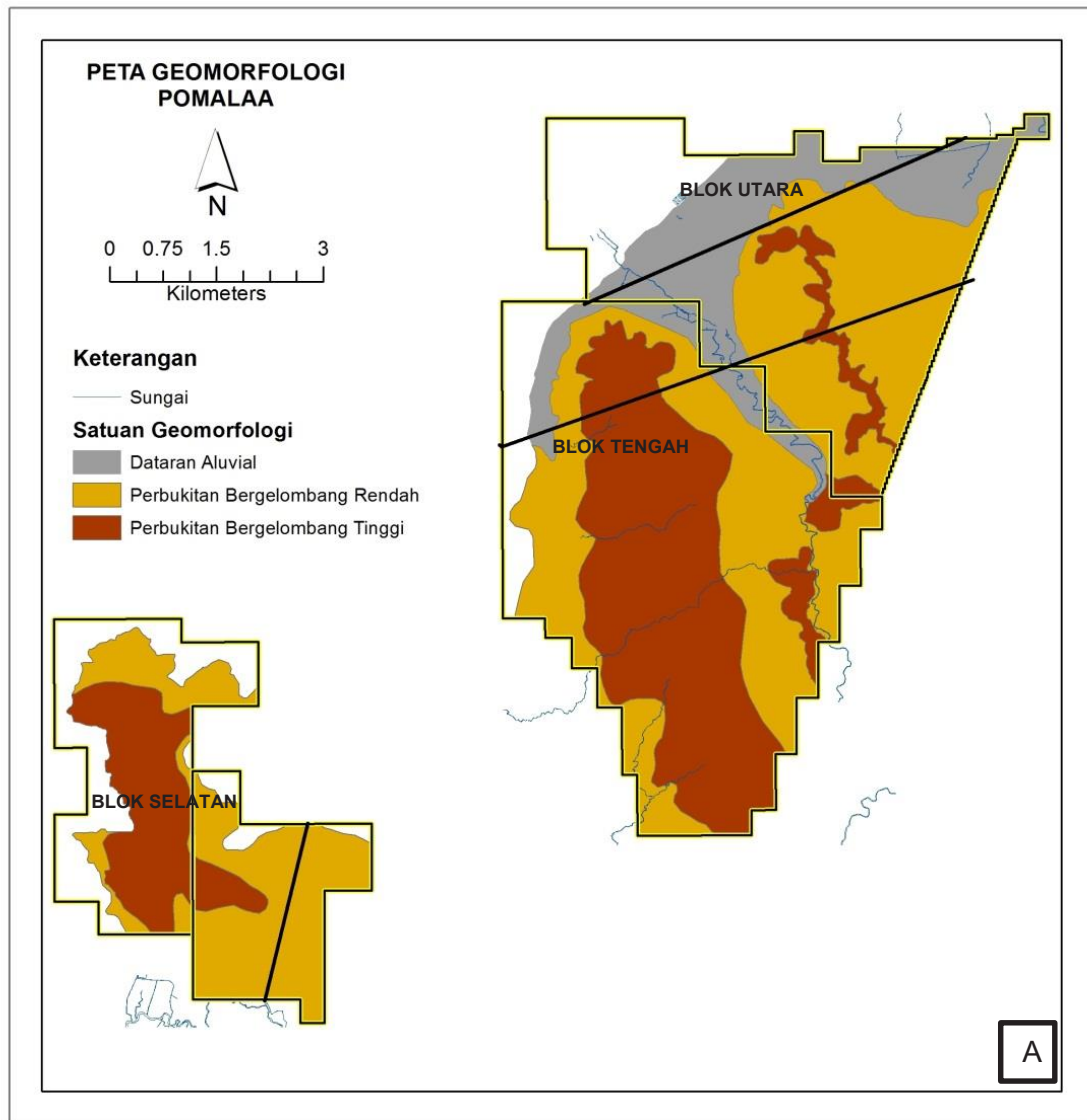
Geomorfologi pada daerah penelitian dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu: (i) Dataran Aluvial; (ii) Perbukitan Bergelombang Rendah; (iii) Perbukitan Bergelombang Tinggi.

Dataran Aluvial berkembang terutama di sekitar Sungai Komoro yang mengalir ke arah barat laut dengan topografi yang relatif datar menempati sekitar 10% daerah

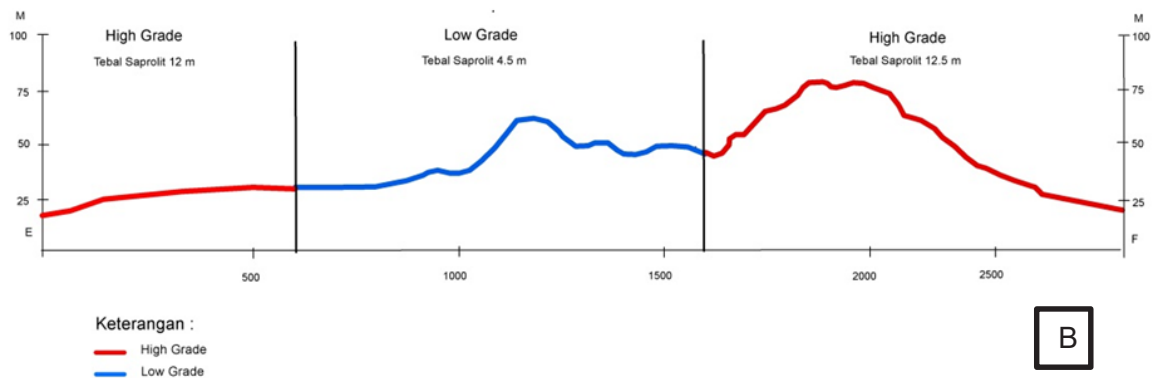
penelitian. Sedangkan morfologi Perbukitan Bergelombang Rendah menempati sebagian besar daerah penelitian (~ 70%) berupa perbukitan kecil dengan kelerengan landai 10° sampai dengan 25°. Morfologi ini memanjang timurlaut-baratdaya dan dipotong oleh dataran aluvial di sekitar Sungai Komoro pada bagian tengah, serta mengelilingi Perbukitan Bergelombang Tinggi yang mengelompok di bagian tengah daerah penelitian. Perbukitan Bergelombang Tinggi tersebut menempati hampir 20% daerah penelitian memiliki kelerengan yang terjal hingga 70° di beberapa tempat.

Bentukan morfologi daerah Pomalaa turut mempengaruhi ketebalan dari zona laterit yang terbentuk (Gambar 6a).

Pada dataran aluvial laterit tidak berkembang, hanya dijumpai erosi laterit yang tertransportasi ke daerah tersebut. Pada bagian lereng bukit morfologi perbukitan bergelombang dengan kelerengan >20° umumnya keterdapatan zona lateritnya relatif tipis, akan tetapi pada bagian perbukitan bergelombang relatif datar dengan kelerengan berkisar 10° sampai dengan 15° zona laterit berkembang lebih baik (Gambar 6b). Pada Zona Perbukitan Bergelombang Tinggi lateritisasi juga tidak dapat berkembang dengan baik. Bahkan di beberapa tempat dapat dijumpai singkapan batuan dasar yang muncul ke permukaan. Namun demikian, di dataran yang relatif landai pada Zona Perbukitan Bergelombang Tinggi tersebut masih dapat dijumpai lateritisasi berkembang secara terbatas sebagaimana terlihat di bagian tengah daerah Pomalaa.



**Penampang Morfologi Blok Selatan Endapan Nikel Laterit Pomalaa
H : V = 1 : 5**



**Gambar 6. (A) Peta Geomorfologi Pomalaa
(B) Penampang Morfologi Daerah Pomalaa ditumpangsusunkan dengan kuantitas tebal zona saprolit.**

Lateritisasi Nikel Pomalaa

Endapan laterit nikel Pomalaa secara keseluruhan memiliki lima zonasi perlapisan. Dari atas ke bawah zonasi tersebut terbagi menjadi: pedolit/tanah tutupan (*top soil*), limonit, transisi, saprolit dan batuan dasar. Namun zona transisi hanya berkembang di bagian utara Pomalaa berupa *yellow limonite* yang terdapat diantara zona limonit (*red limonite*) dan zona saprolit.

Tanah Penutup

Disusun oleh material lepas berukuran pasir-lempung yang umumnya berwarna coklat dengan kandungan organik yang tinggi dan oksida besi berupa nodul-nodul Fe maupun tanah. Ketebalan tanah tutupan berkisar 1 meter sampai dengan 2 meter dan umumnya tidak mengandung nikel yang berarti. Variasi ketebalan laterit di endapan laterit nikel Pomalaa relatif dikendalikan oleh bentuk geomorfik area setempat yang pada kondisi lereng dengan gradien >25%, tanah laterit dijumpai relatif tipis, dengan kehadiran *bedrock* dipermukaan, sebaliknya pada morfologi bergelombang landai, perkembangan laterit berkembang dengan baik.

Zona Limonit

Merupakan zona yang mengandung pengayaan besi residual pada profil laterit yang utamanya disusun oleh oksida besi terhidrasi (Gambar 7). Materialnya sangat lunak dan didominasi oleh mineral

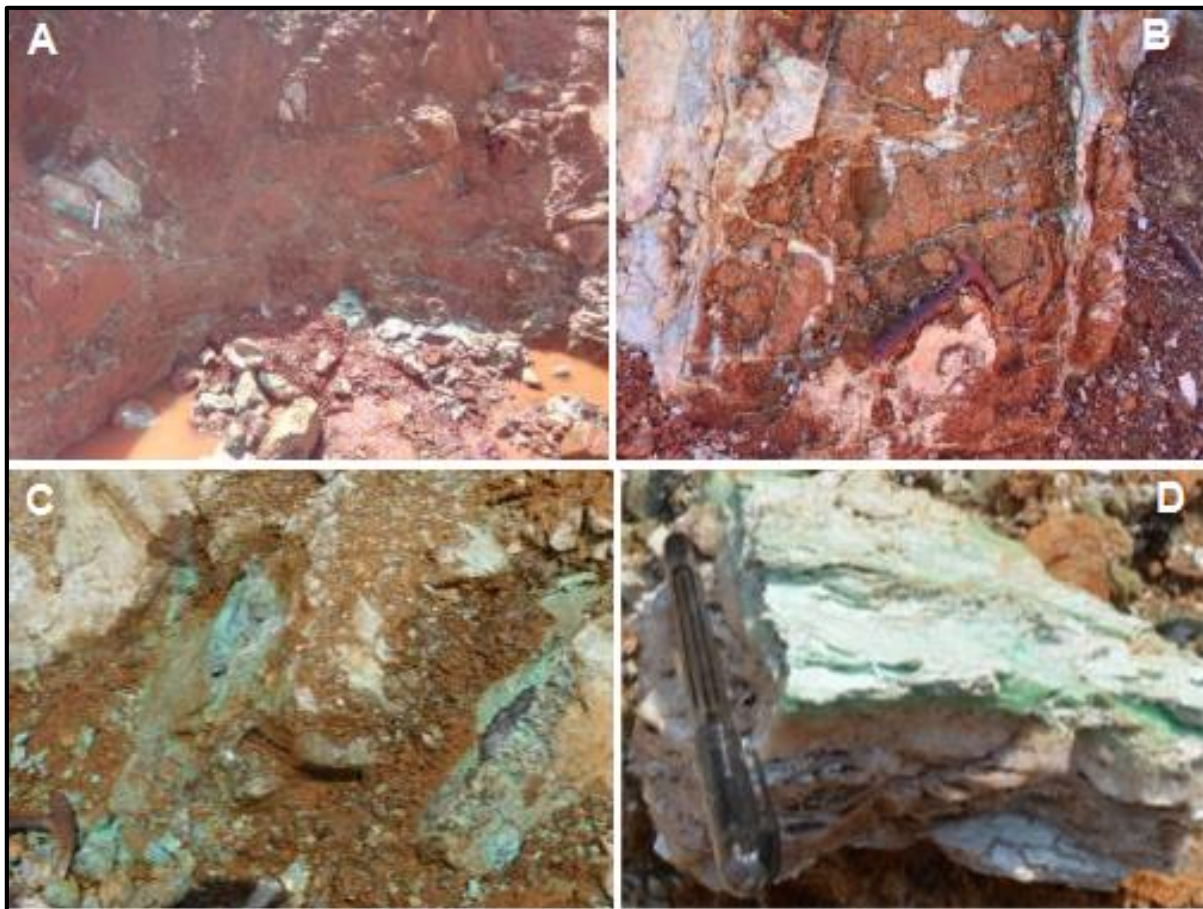
lempung. Bagian atas umumnya berwarna kehitaman dan mengandung hematit. Nikel dapat terikat pada struktur *goethite* bersama sejumlah unsur seperti aluminium, mangan dan kromium. Hasil analisis geokimia menunjukkan zona ini memiliki kadar nikel pada kisaran 0,4% sampai dengan 1,2% Ni dengan ketebalan 3 meter sampai dengan 7 meter, namun pada beberapa tempat ketebalannya mencapai ~ 24 meter. Ketebalan zona limonit berkisar antara 2 meter sampai dengan 7 meter di blok utara dan tengah sedangkan di blok selatan dapat mencapai 25 meter.

Zona Transisi

Dijumpai secara setempat pada profil laterit di bagian utara endapan nikel laterit Pomalaa berupa *yellow limonite*. Pada bagian atas zona transisi terdapat zona *red limonite*, sedangkan di bagian bawahnya terdapat zona saprolit. Secara megaskopis zona transisi didominasi oleh limonit berwarna kuning kemerahan yang mengandung mineral-mineral smektit, hematit dan silika. Relik tekstur batuan asal masih tersimpan secara setempat pada bagian yang belum runtuh. Ketebalan zona transisi berkisar antara 1 meter sampai dengan 2 meter. Hasil analisis geokimia menunjukkan kandungan nikel zona transisi berkisar antara 1,5% sampai dengan 2% Ni, lebih tinggi dibandingkan zona *red limonite* di atasnya.



Gambar 7. Zona limonit endapan laterit Pomalaa yang tersingkap di permukaan dicirikan oleh dominasi oksida besi terhidrasi yang memberikan ciri warna coklat kemerahan hingga kehitaman



Gambar 8 (A) Zona saprolit yang menunjukkan *relict* batuan dasarnya (*rocky saprolit*) dengan zonasi rekahan yang telah terisi oleh garnierit dan silika; (B) urat-urat silika membentuk tekstur *boxwork* mengisi rekahan-rekahan struktur batuan asalnya pada zona saprolit yang dijumpai di bagian tengah laterit Pomalaa, (C) zona saprolit dengan *relict* batuan asal dan rekahan-rekahan yang terisi oleh krisopras dan garnierit; (D) Kenampakan silika (pada singkapan saling berpotongan membentuk tekstur *boxwork*) yang ke arah luar seringkali berangsur berubah menjadi krisopras

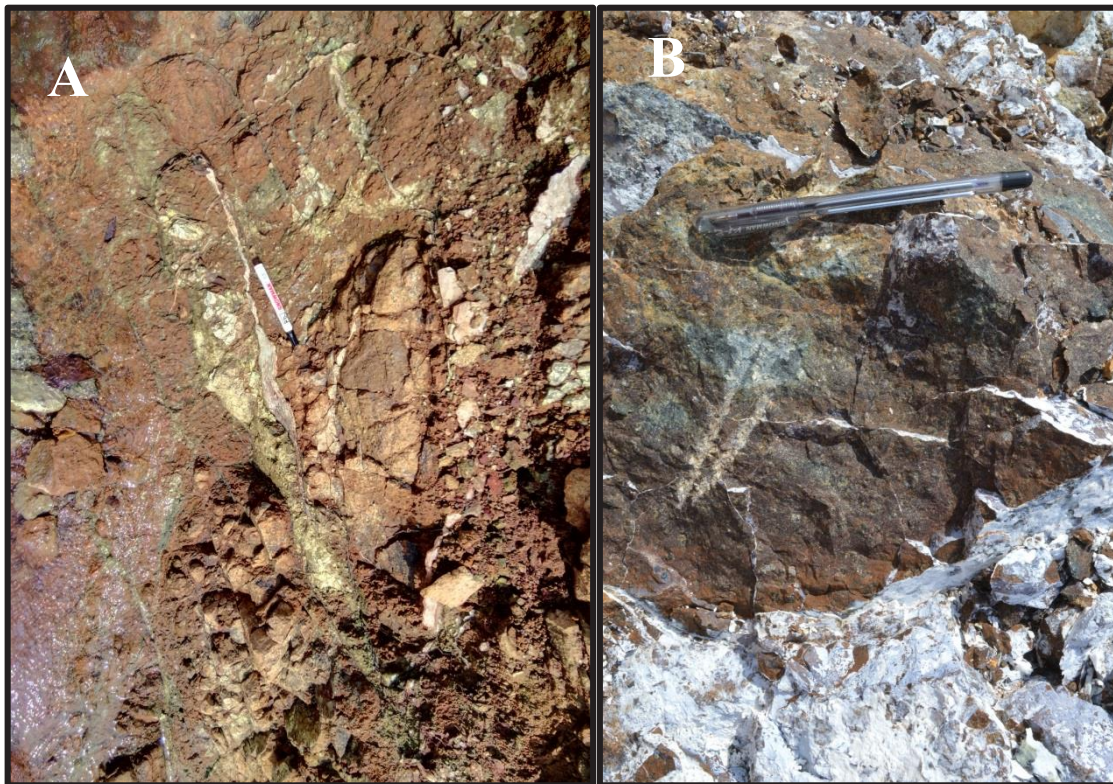
Zona Batuan Dasar

Secara umum zona ini menunjukkan intensitas rekahan yang tinggi. Berwarna abu-abu kecoklatan, dengan tekstur batuan yang cenderung kasar disusun oleh olivin-piroksen dan serpentin (Gambar 9).

Bagian atas terdapat *boulder* peridotit yang telah mengalami pelapukan pada bagian tepi. Rekahan-rekahan berbentuk tidak teratur dan sebagian terisi berupa urat oleh silika dan garnierit. Dari inti bor diketahui kedalaman batuan dasar dari permukaan berkisar 30 meter. Secara umum batuan

dasar memperlihatkan intensitas rekahan sangat tinggi berwarna abu kehijauan agak kusam, tekstur kasar-sedang, kompak, tersusun oleh mineral olivin, piroksen serta layer halus mineral serpentin. Urat silika dan garnierit umumnya berkembang mengisi rekahan pada zona ini.

Pengamatan mikroskopis menunjukkan bahwa harzburgit disusun oleh olivin disertai piroksen, baik kuno piroksen maupun orthopiroksen (Gambar 10 A-H) dan sejumlah mineral berat residual seperti kromit (Gambar 10 C & D).



Gambar 9. Batuan dasar yang tersingkap di bagian utara endapan laterit Pomalaa: (A) menunjukkan batuan telah mengalami pelapukan kuat meski masih menunjukkan komponen batuan asalnya dengan rekahan-rekahan yang terisi oleh silika; (B) menunjukkan batuan relatif tidak mengalami pelapukan dan masih menunjukkan komposisi asli peridotit namun terselubungi oleh silika

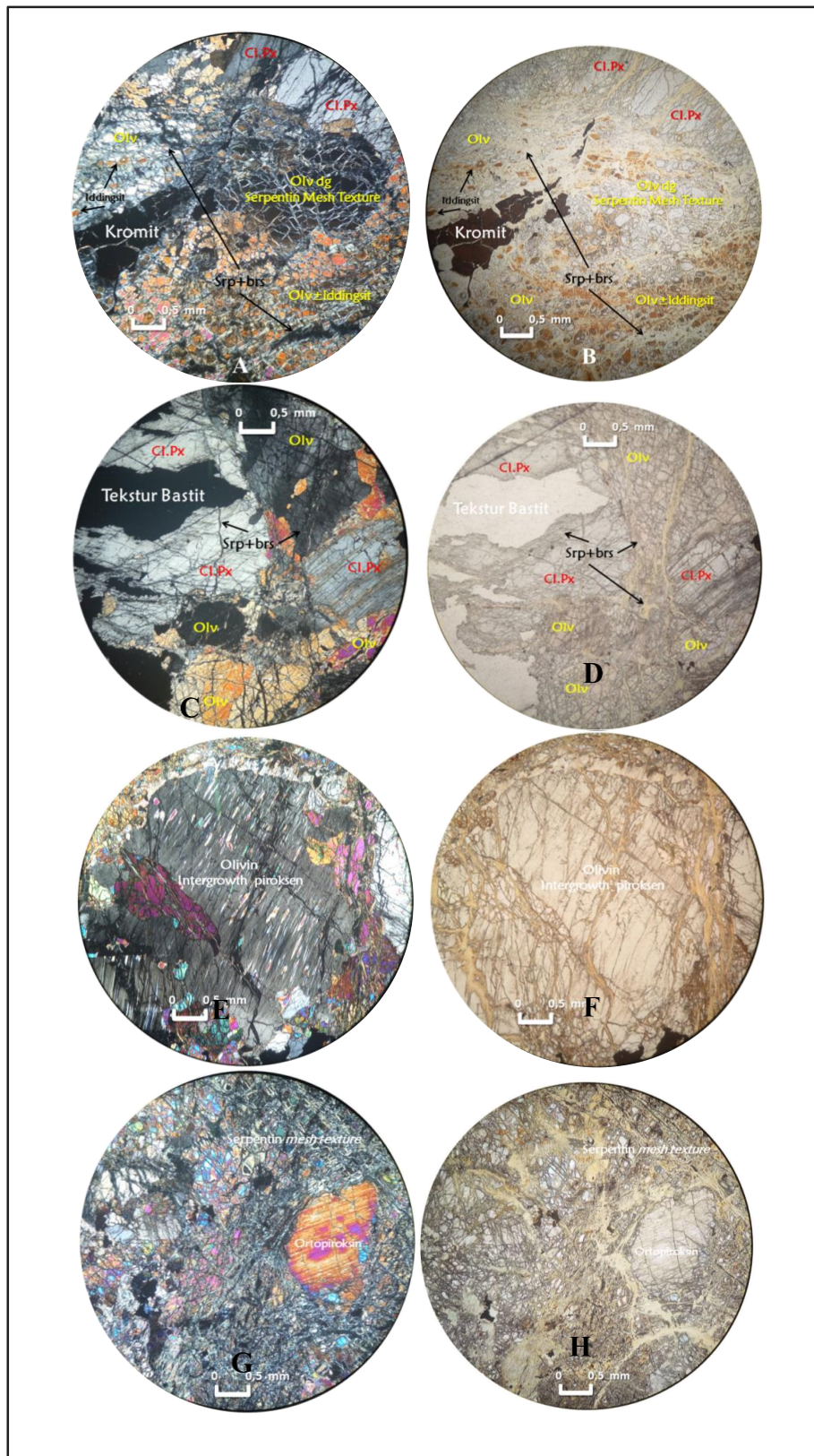
Harzburgit tersebut umumnya telah mengalami serpentinisasi dengan intensitas yang berbeda. Serpentinisasi umumnya dimulai dengan pengisian rekahan antar butir olivin dengan penggantian oleh serpentin sehingga membentuk tekstur *mesh*. Butiran olivin juga secara perlahan mengalami ubahan oleh serpentin berupa idingsit meskipun masih meninggalkan relik bentuk olivin. Pada klino-piroksen nampak belum mengalami serpentinisasi yang berarti (Gambar 10. A-B).

Lebih lanjut ubahan pada klinopiroksen juga diawali oleh penggantian pada rekahan bagian dalam yang sejajar. Serpentin dan brusit semakin intens mengisi rekahan. Tekstur bastit juga nampak terbentuk sebagai akibat dari

ubahan. Seiring peningkatan intensitas lateritisasi, magnetit pun mulai muncul mengisi rekahan-rekahan yang terputus (Gambar 10 C-D).

Pada *intergrowth* olivin dan piroksen proses serpentinisasi juga lebih dominan terjadi pada rekahan antar mineral yang terkadang memotong serpentin (Gambar 10. E-F).

Ortopiroksin yang muncul setempat, umumnya lebih stabil dibandingkan olivin. Meskipun olivin telah mengalami serpentinisasi pada rekahan antar butir yang telah meluas dan juga butiran olivin telah mengalami ubahan, namun terlihat ortopiroksin belum mengalami serpentinisasi (Gambar 10. G-H).



Gambar 10. Foto pengamatan mikroskop optik melintang (A-C-E-G) dan sejajar nikol (B-D-F-H) batuan harzburgit yang dijumpai di Pomalaa.

Profil Zonasi Laterit Pomalaa

Secara fisik, endapan nikel laterit yang berkembang pada Blok Tambang Utara, Blok Tambang Tengah dan Blok Tambang Selatan memperlihatkan ketebalan yang bervariasi, berdasarkan kenampakan fisik, warna, tekstur dan mineralnya.

Berdasarkan lokasi keterdapatan dan karakteristik zonasi lateritnya, profil laterit endapan Pomalaa selanjutnya dibagi menjadi tiga, yaitu: Blok Utara, Blok Tengah dan Blok Selatan.

Profil Laterit Blok Utara

Endapan laterit Pomalaa di bagian utara (Blok Utara), profil lateritnya memiliki kelima zona lateritisasi yaitu: zona tanah penutup, zona limonit (*red limonite*), zona transisi, zona saprolit dan batuan dasar (Gambar 11). Penciri utama Blok Utara adalah kehadiran zona transisi berupa *yellow limonite* yang tidak ditemukan pada profil laterit di blok lainnya.

Profil Laterit Blok Tengah

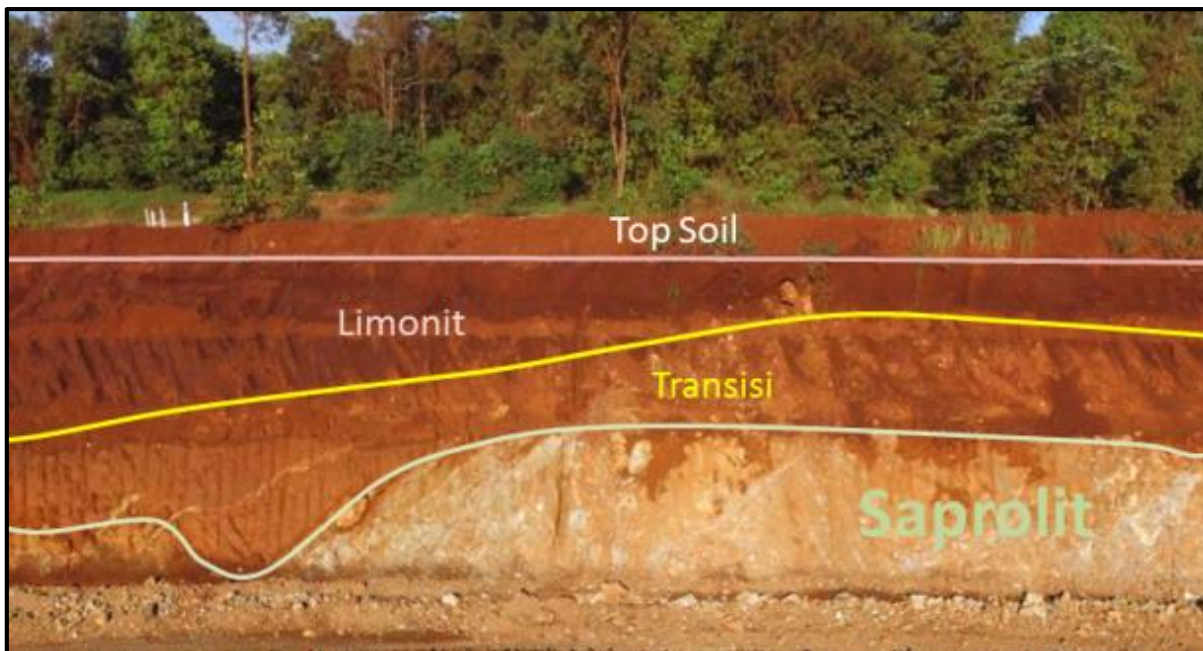
Profil laterit pada bagian tengah (Blok Tengah) terdapat empat zona laterisasi,

yaitu: zona tanah penutup, zona limonit, zona saprolit dan batuan dasar tanpa kehadiran zona transisi (Gambar 12). Penciri utama Blok Tengah adalah urat-urat silika dengan tekstur *boxwork* yang sangat mencolok berkembang dibandingkan Blok Utara maupun Blok Selatan.

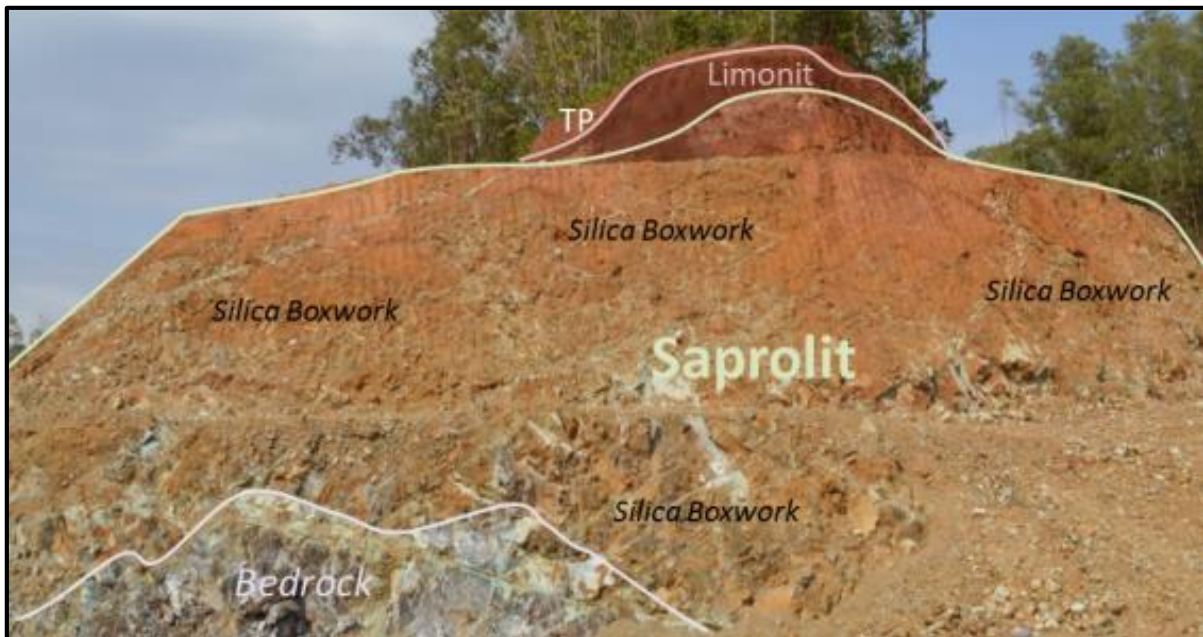
Profil Laterit Blok Selatan

Sebagaimana di Blok Tengah, profil laterit Pomalaa di bagian selatan (Blok Selatan) terdapat empat zona lateritisasi, yaitu: zona tanah penutup, zona limonit, zona saprolit dan batuan dasar tanpa kehadiran zona transisi (Gambar 13). Namun berbeda dengan Blok Tengah, silika *boxwork* tidak berkembang luas di Blok Selatan. Adapun penciri utama yang membedakan Blok Selatan dengan laterit Pomalaa Blok Utara dan Blok Tengah adalah kelimpahan boulder-boulder batuan ultramafik yaitu serpentinit dan harzburgit dengan ukuran diameter mencapai lebih dari 2 meter pada zona saprolitnya.

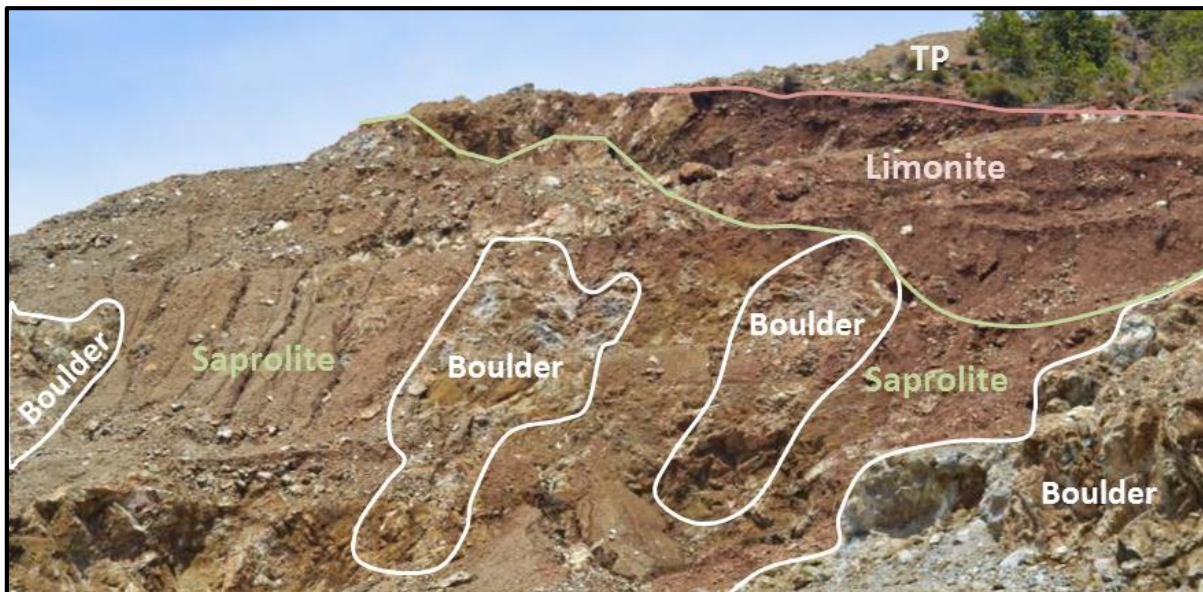
Hasil estimasi sumber daya dan cadangan nikel laterit daerah Pomalaa dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 (Indra Kusuma dkk., 2015).



Gambar 11. Profil zonasi laterit Blok Utara daerah Pomalaa



Gambar 12. Profil zonasi laterit Blok Tengah daerah Pomalaa



Gambar 13. Profil zonasi laterit Blok Selatan daerah Pomalaa

Tabel 1. Hasil Estimasi Sumberdaya daerah Pomalaa

Lokasi	Prospek	Klasifikasi	CoG	Juta Ton (wmt)	Juta Ton (dmt)	Ni (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)
Kolaka	Pomalaa	Terukur	Ni > 1, %	2,6	2,0	2,16	12,63	42,28	22,46
		Tertunjuk		1,1	0,9	2,00	11,70	42,80	23,40
		Tereka		1,0	1,0	2,00	11,70	43,20	22,70
Total Sumber Daya Saprolit				4,7	1,9	2,05	12,01	42,76	22,85

Tabel 2. Hasil Estimasi Cadangan daerah Pomalaa

Lokasi	Prospek	Klasifikasi	CoG	Juta Ton (wmt)	Juta Ton (dmt)	Ni (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)
Kolaka	Pomalaa	Terbukti	Ni >	3,1	2,3	2,13	16,31	39,61	18,94
		Terkira	1, %	1,0	1,0	2,00	14,20	40,60	20,90
Total Sumber Daya Saprolit				4,1	3,3	2,07	15,26	40,11	19,92

Profil Geokimia

Profil geokimia endapan laterit Pomalaa merupakan cerminan dari suatu kondisi bahwa perilaku/kecenderungan kimiawi unsur ke arah dalam yang dipengaruhi oleh proses lateritisasi. Perilaku tersebut dipengaruhi oleh mobilitas kimiawi unsur-unsur pada profil laterit nikel yang diketahui dari tingkat di mana unsur tertentu berpindah (*removed*) akibat aliran air.

Perilaku yang terjadi selama proses lateritisasi berlangsung meliputi: (i) pelindian (*leaching*) terutama terhadap MgO, SiO₂ dan Ca; (ii) proses pengayaan (*supergene*) terutama terhadap unsur Ni, Mn dan Co; (iii) serta residual unsur yang terutama dialami oleh Fe, Cr dan Al.

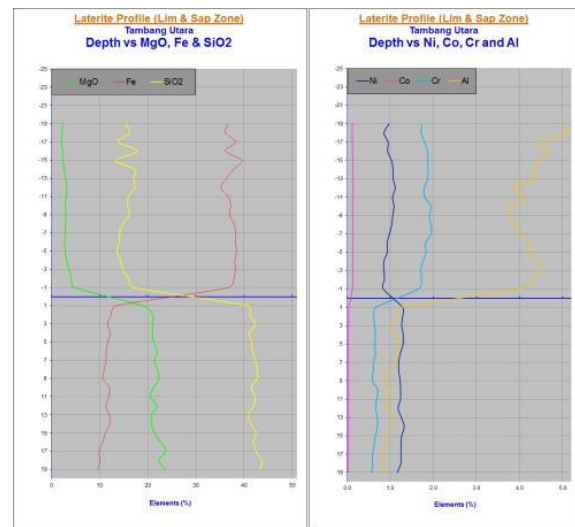
Untuk mengetahui profil geokimia Pomalaa maka digunakan kombinasi dari ketiga perilaku kimiawi baik pelindian (SiO₂ dan MgO), pengayaan (Ni dan Co) serta residual (Fe, Cr dan Al). Selanjutnya parameter kimiawi tersebut dibagi ke dalam 2 (dua) kelompok berdasarkan kelimpahan kehadirannya (prosentase) dalam komposisi laterit menjadi elemen mayor (SiO₂, MgO dan Fe) dan minor (Ni, Co, Cr & Al).

Adapun pembagian profil geokimia endapan laterit Pomalaa dibagi menjadi tiga mengikuti pembagian profil zonasi laterit yang telah dibagi menjadi Blok Utara, Blok Tengah dan Blok Selatan.

Profil Geokimia Blok Utara

Berdasarkan profil kimiawi batas zona limonit dan saprolit di Blok Utara ditunjukkan oleh prosentase MgO yang meningkat tajam dari nilai rata-rata 2%

sampai dengan 4% MgO pada zona limonit menjadi 7% sampai dengan 8% kemudian stabil pada kisaran 20% sampai dengan 24% MgO di zona saprolit (Gambar 14). Komposisi SiO₂ di bagian atas menunjukkan fluktuasi kadar rata-rata yang relatif stabil pada kisaran 14% sampai dengan 18% SiO₂ pada zona limonit, lalu meningkat tajam menuju 42% dan kemudian nampak berfluktuasi relatif stabil pada kisaran 41% sampai dengan 44% di zona saprolit. Sedangkan komposisi Fe di bagian atas laterit pada zona limonit memiliki prosentase kadar rata-rata yang cenderung lebih tinggi yaitu pada kisaran 35% sampai dengan 40% Fe, lalu menurun drastis saat memasuki zona saprolit dengan nilai rata-rata 25% sampai dengan 26% Fe, kemudian akhirnya berfluktuasi stabil pada kisaran 9% sampai dengan 12% Fe di zona saprolit tersebut. Jelas terlihat bahwa profil SiO₂ berbanding lurus dengan MgO; dan profil SiO₂ dan MgO berbanding terbalik dengan Fe.

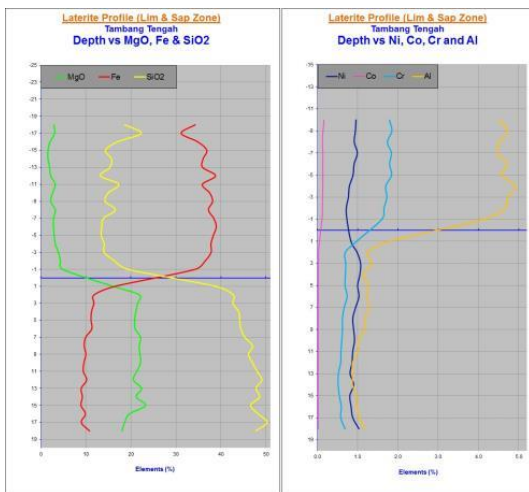


Gambar 14. Profil geokimia Blok Utara Pomalaa

Profil Geokimia Blok Tengah

Di Blok Tengah, perilaku MgO sebagaimana yang terjadi di Blok Utara kadar rata-ratanya berada pada kisaran 2% sampai dengan 4% lalu meningkat tajam menuju kisaran 20% sampai dengan 23% dengan perilaku penurunan lemah menuju 18% mendekati ke bagian bawah zona saprolit. Berbanding lurus dengan perilaku SiO₂ di bagian paling atas yang bergerak dari 18% sampai dengan 22% kemudian menurun tajam menuju 14% lalu berfluktuatif stabil kembali di antara 13% sampai dengan 18% kemudian kembali meningkat signifikan menjadi 43% dan selanjutnya bergerak naik perlahan pada kisaran 43% sampai dengan 50%.

Berbanding terbalik dengan MgO dan SiO₂ perilaku Fe di bagian paling atas kadar rata-ratanya bergerak perlahan dari 34% menjadi 31% kemudian kembali meningkat menjadi 36% sebelum berfluktuatif cukup stabil pada kisaran 36% sampai dengan 39%. Selanjutnya kadar Fe menurun drastis menjadi 12% lalu bergerak turun perlahan secara fluktuatif pada kisaran 9% sampai dengan 12% (Gambar 15).



Gambar 15. Profil geokimia Blok Tengah Pomalaa

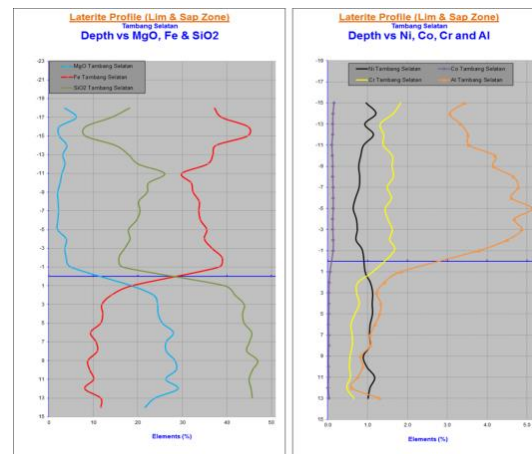
Profil Geokimia Blok Selatan

Di Blok Selatan perilaku MgO di bagian atas kadar rata-ratanya bergerak dari 4% menuju 6% kemudian perlahan turun menjadi 2% dan selanjutnya relatif stabil berfluktuasi pada kisaran 2% sampai

dengan 4%. Kemudian komposisi MgO pada laterit meningkat tajam menuju kisaran 24% dan berfluktuasi relatif stabil pada kisaran 24% sampai dengan 29% mendekati ke bagian bawah zona saprolit (Gambar 16).

Berbanding lurus dengan perilaku SiO₂ di bagian paling atas yang kadar rata-ratanya bergerak turun dari 18% menjadi 8% dan meningkat kembali menjadi 26% yang kemudian berfluktuasi turun menjadi 16%. Selanjutnya komposisi SiO₂ pada laterit meningkat tajam menjadi 41% dan selanjutnya bergerak naik perlahan pada kisaran 41% dan 46% SiO₂.

Berbanding terbalik Fe di bagian paling atas bergerak perlahan dari 38% menjadi 46% di bagian paling atas kemudian bergerak turun menjadi 30% sebelum berfluktuasi naik cukup stabil pada kisaran 30% dan 39%. Selanjutnya kadar Fe menurun drastis menjadi 12% lalu bergerak turun perlahan secara fluktuatif pada kisaran 8% dan 12% di bagian bawah profil laterit.



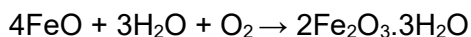
Gambar 16 Profil geokimia Blok Selatan Pomalaa

DISKUSI

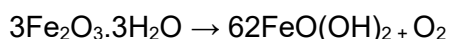
Topografi ikut mengontrol infiltrasi airtanah melalui rekahan batuan yang dibentuk melalui proses tektonik yang panjang yang mempengaruhi suatu daerah dan menghasilkan interaksi air tanah dengan lapisan pembawa nikel. Kontrol topografi

ikut meningkatkan pengisian (*recharge*), infiltrasi dan reaksi air tanah dalam proses lateritisasi. Lapisan menjadi lebih tebal sepanjang wilayah aliran air tanah-purba karena mengalami interaksi air-batuan dengan durasi terpanjang. Proses tektonik yang terjadi dalam waktu yang panjang tersebut menyebabkan perkembangan rekahan dan kekar yang memudahkan peningkatan pelapukan olivin yang tidak stabil pada kondisi pelapukan di dekat permukaan (Ahmad, 2008; Thorne dkk, 2009; Ilyas dkk, 2016). Di Pomalaa laterisasi terbentuk dengan baik pada daerah perbukitan bergelombang dengan kelerengan berkisar 10° dan 15°. Morfologi berbukit dengan kemiringan lereng relatif landai tersebut terbukti baik untuk terbentuknya pelapukan kimiawi dengan pengayaan supergen nikel yang tinggi.

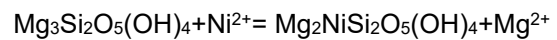
Topografinya memungkinkan aliran cepat (*run-off*) air hujan di permukaan tidak berlebihan serta memiliki aliran sub permukaan yang baik sehingga memungkinkan air tanah yang melarutkan nikel bergerak ke arah dalam. Dengan kemiringan yang landai, air hujan berpeluang untuk penetrasi ke dalam *soil*. Di bagian permukaan zona lateritisasi, yaitu pada zona limonit, umumnya didominasi oleh oksida-hidroksida besi. Konsentrasi residual Fe melibatkan pula pelindian komponen silikat nikel - serpentin dan akan membentuk lebih banyak gutit. Pada profil geokimia, hal ini ditunjukkan oleh prosentase Fe yang dominan tinggi dan cenderung stabil pada zona limonit. Hal ini disebabkan oleh perilaku Fe yang tidak terlarutkan oleh airtanah namun sangat mudah bereaksi dengan oksigen untuk membentuk oksida besi, melalui reaksi:



Proses hidrasi oksida besi tersebut dalam lingkungan reduksi akibat pelapukan umumnya akan menyebabkan pembentukan mineral gutit oleh reaksi kimiawi:



Seiring proses pelapukan yang terjadi, maka beberapa mineral utama terutama olivin, serpentin dan juga piroksen mengalami ketidakstabilan ikatan kimiawi yang tinggi dan mengalami dekomposisi. Di zona saprolit, dekomposisi tersebut terutama ditunjukkan oleh pelarutan silikat magnesias dan menyebabkan presipitasi Ni maupun penggantian ion Mg oleh Ni pada serpentin.



Hal ini dapat terjadi disebabkan sifat Mg yang cenderung lebih stabil pada air soil (*soil water*) sedangkan Ni lebih stabil pada serpentin dan didukung peningkatan pH ke arah dalam di zona laterit (Golightly, 1981; Freyssinet dkk., 2005; Ahmad, 2008; Butt dan Cluzel, 2013). Transisi antara zona saprolit dan zona limonit ditandai oleh peningkatan yang tajam pada kandungan MgO dari kisaran 0 meningkat hingga 20% wt (Myagkiy dkk., 2017). Berdasarkan hal tersebut, batas naik turunnya muka air tanah yang mengontrol endapan nikel pada saprolit dapat ditunjukkan oleh peningkatan tajam prosentase MgO sebagai cerminan titik batas tertinggi muka air tanah yang mengontrol proses laterisasi dan titik prosentase kestabilan baru dari prosentase kandungan MgO sebagai cerminan titik terendah muka air tanah tersebut. Titik tersebut menjadi acuan penarikan garis batas tertinggi muka air tanah yang di Blok Utara berada pada nilai MgO 5% dan batas terendah pada nilai MgO 20%. Sedangkan garis tengah muka air tanah dicerminkan oleh titik perpotongan garis profil SiO₂ dan Fe. Profil geokimia SiO₂ dan Fe sangat jelas menunjukkan cerminan bentuk yang bertolak belakang, dan titik perpotongan tersebut menjadi acuan penarikan garis tengah muka air tanah yang di Blok Utara berada pada nilai 11% MgO yang kemudian dijadikan titik nol.

Titik peningkatan tajam MgO yang menjadi acuan penarikan garis batas tertinggi muka air tanah di Blok Tengah berada pada nilai MgO 4% dan batas terendah pada nilai MgO 20%. Pada garis tengah muka air tanah di Blok Selatan berada sejajar

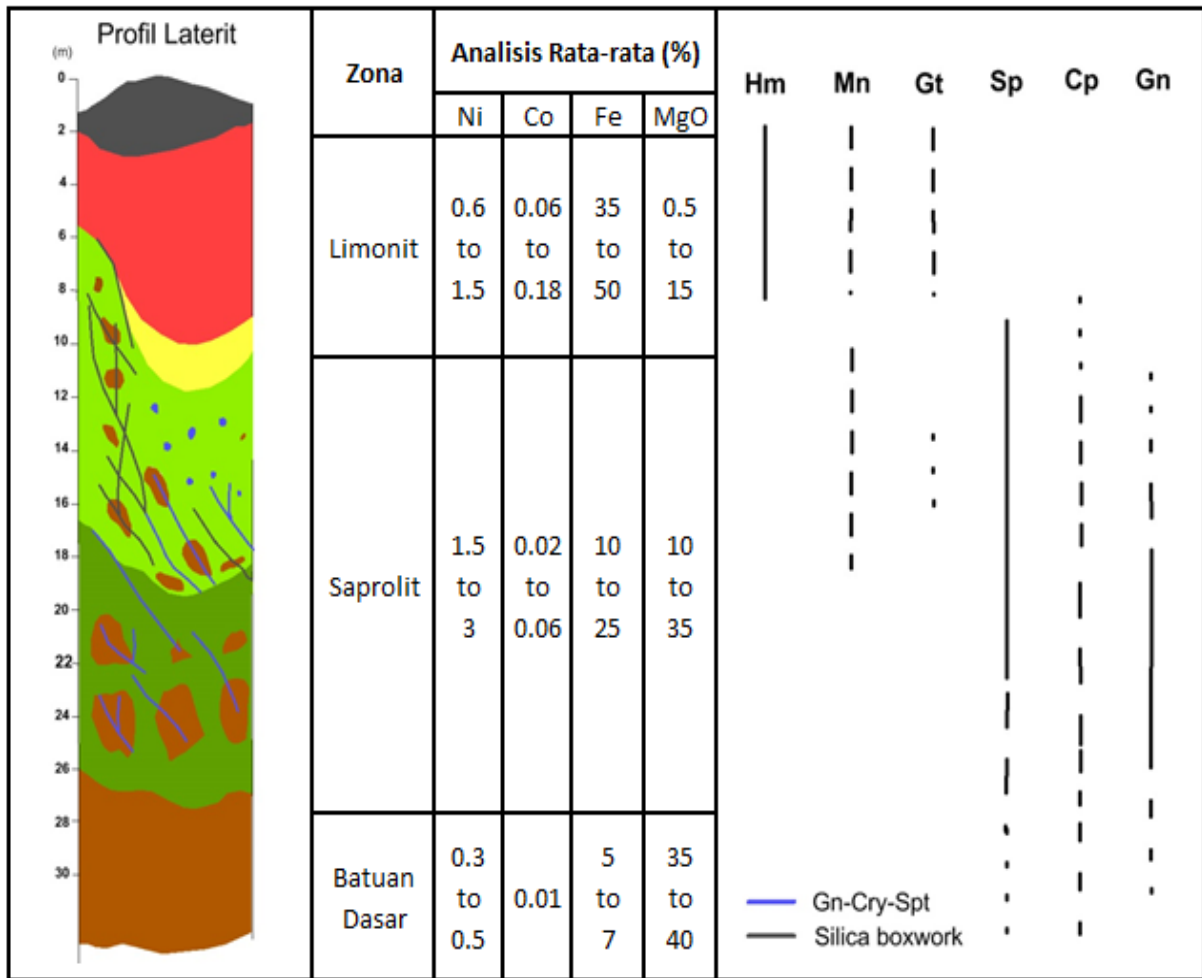
dengan titik perpotongan SiO₂ dan Fe sebagai titik nol dengan komposisi MgO 11%. Sementara titik peningkatan tajam MgO yang menjadi acuan penarikan garis batas tertinggi muka air tanah di Blok Selatan berada pada nilai MgO 4% dan batas terendah pada nilai MgO 24%. Sedangkan garis tengah muka air tanah di Blok Selatan berada sejajar dengan titik perpotongan SiO₂ dan Fe sebagai titik nol dengan komposisi MgO 12%.

Hal ini menunjukkan adanya perbedaan proses pengayaan (*enrichment*) Ni di ketiga blok. Di Blok Utara pengayaan Ni terjadi tepat di bawah batas tengah muka air tanah sedangkan di Blok Tengah dan Blok Selatan pengayaan Ni terbentuk 2 meter sampai dengan 3 meter di bawah garis tersebut atau mendekati batas terbawah muka air tanah. Penciri utama yang membedakan laterit Pomalaa Blok Selatan dengan Blok Utara dan Blok Tengah, adalah kelimpahan *boulder-boulder* batuan ultramafik yaitu serpentin dan harzburgit dengan ukuran diameter mencapai lebih dari 2 meter pada zona saprolit. Secara lateral intensifikasi laterisasi diduga mengalami peningkatan dari arah Blok Selatan ke Blok Utara.

Kelimpahan *boulder* pada zona saprolit akan berpengaruh terhadap nilai kadar Si yang tinggi, nilai Fe rendah serta nilai Mg yang tinggi. Hal tersebut merupakan kriteria

nilai unsur yang ideal bagi proses di pengolahan selain kandungan kadar nikel >1,8%. Profil dan zonasi secara vertikal endapan laterit Pomalaa pada zona limonit didominasi oleh mineral hematit ± *manganese* oksida dan gutit. Pada zona saprolit dominan mineral serpentin – garnierit ± klinopiroksen, *manganese* oksida dan sedikit gutit. Sedangkan pada zona batuan dasar dijumpai mineral klinopiroksen dan serpentin. Silika *boxwork* dijumpai di bagian bawah zona limonit ke arah zona transisi hingga bagian atas zona saprolit. Sedangkan mineral garnierit dijumpai mengisi kekar-kekar ataupun bersama alterasi mineral serpentin dan talk. *Boulder – boulder* batuan dasar juga dijumpaiberada di zona limonit dan dominan pada zona saprolit bagian bawah yang berbatasan dengan batuan dasar (Gambar 17). Kadar pada zona limonit untuk Ni: 0,6 - 1,5%, Co: 0,06 – 0,18%, Fe: 35 - 50% dan MgO: 0,5 - 15%. Zona saprolit memiliki kadar Ni: 1,5 - 3%, Co: 0,02 - 0,06%, Fe: 10 - 25%, dan MgO: 10 - 35%. Zona batuan dasar memiliki kadar Ni : 0,3 - 0,5%, Co: 0,01%, Fe: 5 - 7%, dan MgO 35 - 40%.

Karakteristik endapan nikel laterit Pomalaa yang berasal dari batuan harzburgit terserpentinisasi dengan kehadiran mineral garnierit tersebut berdasarkan klasifikasi Butt dan Cluzel, 2013 merupakan penciri tipe deposit nikel laterit *hydrous Mg silicate*.



Gambar 17. Profil endapan laterit nikel Pomalaa

Berkaitan dengan kadar $Fe/Ni > 7$ di dalam proses pengolahan akan terjadi *klinker* yaitu penggumpalan besi di *kiln*, sehingga akan menyumbat proses di *kiln*. Jika $Si/Mg > 2,1$ maka akan mengikis bagian di *furnace* sehingga secara terus menerus akan mengakibatkan kebocoran pada dinding *furnace*. Kedua faktor tersebut jika terjadi maka akan menghambat proses pengolahan yang sedang berlangsung.

KESIMPULAN

Endapan laterit nikel Pomalaa terbentuk dari pelapukan batuan asal ultramafik yang didominasi oleh harzburgit yang umumnya telah mengalami serpentinisasi dengan tingkat yang berbeda. Proses lateritisasi berlangsung dengan baik terutama pada topografi yang cenderung lebih landai, yaitu 10° sampai dengan 15° , yang

memungkinkan terbentuknya lateritisasi yang cukup dalam dengan zona saprolit yang tebal.

Bentuk topografi tersebut mengontrol sebaran endapan laterit terutama secara lateral maupun vertikal.

Secara vertikal lateritisasi membentuk zonasi laterit yang lengkap yang terdiri atas (i) tanah penutup; (ii) zona *red* limonit; (iii) zona transisi (*yellow* limonit); (iv) zona saprolit; dan (v) batuan dasar. Zona mineralisasi pengayaan nikel supergen utamanya dijumpai pada zona saprolit dengan urat-urat garnierit dan *boxwork* silika. Zona ini memiliki kisaran ketebalan 2 meter sampai dengan 7 meter, setempat mencapai 10 meter dengan kisaran kadar 1,8% sampai dengan 2,2% Ni.

Berdasarkan karakteristik zonasinya, profil laterit di Pomalaa selanjutnya dapat dibagi menjadi tiga kelompok berdasarkan sebaran keterdapatannya, yaitu: Blok Utara, Blok Tengah dan Blok Selatan.

Dari profil geokimia masing-masing blok maka diduga pengayaan (*enrichment*) Ni di Blok Utara terjadi tepat di bawah batas tengah muka air tanah, sedangkan di Blok Tengah dan Blok Selatan pengayaan Ni terbentuk 2 meter sampai dengan 3 meter di bawah garis tersebut atau mendekati batas terbawah muka air tanah. Intensifikasi lateritisasi diduga meningkat dari blok selatan ke arah Blok Utara.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Aneka Tambang, Tbk. atas persetujuan yang diberikan untuk penulisan artikel ini.

Juga kepada personil Tim Eksplorasi Nikel Pomalaa: Dedi Sunjaya, Muhammad Hamdhani Astar, Muhammad El Zahir, Nadia Soraya dan Naafiakra Nouval Wibowo atas dukungan dan bantuannya yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, Waheed. 2008. *Nickel Laterites: Fundamental of Chemistry, Mineralogy, Weathering Processes, Formation, and Exploration*. Vale Inco – VITSL.

Brand, N. W., C. R. M. Butt, and M. Elias. 1998. "Nickel Laterites: Classification and Features." *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics* 17(4):81–88.

Butt, Charles R. M. and Dominique Cluzel. 2013. "Nickel Laterite Ore Deposits: Weathered Serpentinities." *Elements* 9(2):123–128.

Freyssinet, Ph, C. R. M. Butt, R. C. Morris, and P. Piantone. 2005. "Ore-Forming Processes Related to Lateritic Weathering." *Economic Geology 100th Anniversary* 1:681–722.

Golightly, J. Paul. 1981. "Nickeliferous Laterite Deposits." *Economic Geology 75th Anniversary* 710–35.

Golightly, J. Paul and O. N. Arancibia. 1979. "The Chemical Composition and Infrared Spectrum of Nickel-and Iron-Substituted Serpentine from a Nickeliferous Laterite Profile, Soroako, Indonesia." *The Canadian Mineralogist* 17 (4):719–28.

Hamilton, Warren. 1979. "Tectonics of the Indonesian Region." *Geological Society of Malaysia, Bulletin* 6:3–10.

Harris, R. O. N. 2003. "Geodynamic Patterns of Ophiolites and Marginal Basins in the Indonesian and New Guinea Regions, In: Y. Dilek and P.T. Robinson (Editors), Ophiolite in Earth History." *Geological Society Special Publication* 481–505.

Ilyas, Asran, Koki Kashiwaya, and Katsuaki Koike. 2016. "Ni Grade Distribution in Laterite Characterized from Geostatistics, Topography and the Paleo-Groundwater System in Sorowako, Indonesia." *Journal of Geochemical Exploration* 165:174–88.

Ilyas, Asran and Katsuaki Koike. 2012. "Geostatistical Modeling of Ore Grade Distribution from Geomorphic Characterization in a Laterite Nickel Deposit." *Natural Resources Research* 21(2):177–91.

Indra Kusuma, RA, H. Kamaruddin, R. Wibawa, and M. .. Kamil. 2015. *Geological Prospect, Resource and Ore Reserve Estimation in Pomalaa, Kolaka, Southeast Sulawesi*. Balikpapan: MGEI.

Kadarusman, Ade, Sumio Miyashita, Shigenori Maruyama, Christopher D. Parkinson, and Akira Ishikawa. 2004. "Petrology, Geochemistry and Paleogeographic Reconstruction of the East Sulawesi Ophiolite, Indonesia." *Tectonophysics* 392(1–4):55–83.

- Van Leeuwen, T. M. and P. E. Pieters. 2011. "Mineral Deposits of Sulawesi." *Proceedings of the Sulawesi Mineral Resources* (December):1–10.
- Martosuwito, Surono. 2012. "Tectonostratigraphy of the Eastern Part Of Sulawesi, Indonesia, in Relation to the Terrane Origins." *Geologi Dan Sumberdaya Mineral* 22(4):199–207.
- Monnier, C., Girardeau, J., Maury, R. C., & Cotten, J. 1995. "Back-Arc Basin Origin for the East Sulawesi Ophiolite (Eastern Indonesia)." *Geology* 23(9):851–54.
- Myagkiy, Andrey, Laurent Truche, Michel Cathelineau, and Fabrice Golfier. 2017. "Revealing the Conditions of Ni Mineralization in the Laterite Profiles of New Caledonia: Insights from Reactive Geochemical Transport Modelling." *Chemical Geology* 466:274–84.
- Parkinson, Chris. 1998. *Emplacement of the East Sulawesi Ophiolite: Evidence from Subophiolite Metamorphic Rocks*. Vol. 16.
- Silver, E. A., R. McCaffrey, Y. Joyodiwiryo, and S. Stevens. 1983. "Ophiolite Emplacement by Collision between the Sula Platform and the Sulawesi Island Arc, Indonesia." *Journal of Geophysical Research* 88(B11):9419–35.
- Simandjuntak T.O, Surono, Sukido. 1993. "Peta Geologi Lembar Kolaka, Sulawesi." Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Sufriadin, Arifudin Idrus, Subagyo Pramumijoyo, I. Wayan Warmada, and Akira Imai. 2011. "Study on Mineralogy and Chemistry of the Saprolitic Nickel Ores From Soroako , Sulawesi , Indonesia : Implication for the Lateritic Ore." *SE Asian Appl. Geol.* 3(1):23–33.
- Surono. 2013. *Geologi Lengan Tenggara Sulawesi*. Bandung, Indonesia: Badan Geologi Kementerian ESDM.
- Thorne, Robert, R. Herrington, and Stephen Roberts. 2009. *Composition and Origin of the Çaldağ Nickel Laterite, W. Turkey*. Vol. 44.
- Thorne, Robert, Stephen Roberts, and R. Herrington. 2012. *Climate Change and the Formation of Nickel Laterites*.

Diterima	: 11 Mei 2018
Direvisi	: 17 Mei 2018
Disetujui	: 28 Agustus 2018