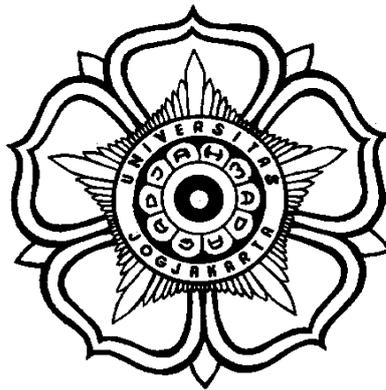


**MINERALOGI, GEOKIMIA DAN SIFAT “LEACHING”
PADA ENDAPAN LATERIT NIKEL SOROAKO,
SULAWESI SELATAN, INDONESIA**

RINGKASAN



Oleh

Sufriadin

08/274833/STK/00196

**Program Pascasarjana Teknik Geologi
Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Yogyakarta**

2013

DAFTAR ISI

1. Pendahuluan	1
2. Metode	3
3. Hasil	4
3.1 Petrologi dan Geokimia Batuan Ultramafik.....	4
3.2 Mineralogi dan Geokimia Endapan Laterit Nikel.....	6
3.2.1 Profil pelapukan.....	6
3.2.2 Perhitungan indeks pelapukan dan kesetimbangan massa.....	9
3.2.3 Mineralogi dan kimia “garnierit”	11
3.3 Sifat “Leaching” Bijih Ni Saprolit Nikel.....	13
3.3.1 Dissolusi mineral dalam bijih.....	13
3.3.2 Laju pelindian logam.....	15
4. Pembahasan	17
4.1 Sifat-sifat batuan ultramafik di Soroako: hubungannya dengan pembentukan laterit nikel.....	17
4.2 Evolusi mineral pada profil laterit.....	19
4.3 Perilaku unsur-unsur selama pelapukan.....	22
4.4 Siklus Ni pada profil.....	25
4.4 Mula jadi bijih Ni-Mg hidrous silikat (garnierite).....	28
4.5 Perbandingan dengan endapan laterit Ni lainnya.....	32
4.6 Implikasinya terhadap pengolahan metalurgi bijih.....	32
5. Kesimpulan dan Harapan Selanjutnya	35
5.1 Kesimpulan.....	35
5.2 Harapan selanjutnya.....	37
Daftar Pustaka	38
Daftar Riwayat Hidup	42

1. Pendahuluan

Sekitar 70 % sumberdaya Ni dunia terkandung dalam bijih laterit. Akan tetapi hanya sekitar 40 % produksi nikel secara global berasal dari laterit. Indonesia merupakan penghasil Ni terbesar kedua dunia (232 kt pertahun) setelah Rusia. Endapan laterit Soroako merupakan sumber logam nikel paling penting di Indonesia dan telah ditambang oleh PT. Vale Indonesia untuk memproduksi nikel matte (rerata 78 % Ni plus 22 % S). Dua tipe bijih yang telah ditambang pada endapan laterit nikel Soroako berdasarkan tingkat serpentinisasi batuan asalnya. Secara umum, bijih tipe barat dicirikan oleh kadar Ni, olivin dan rasio silika-magnesia (S/M) lebih tinggi dibandingkan dengan bijih tipe timur. Agar operasi peleburan lebih efisien, maka bijih tersebut harus memenuhi batasan tertentu seperti rasio S/M (1,95 – 2,15), kadar Fe (20 – 23 %), olivin (<22%), dan Ni (> 1,50 %). Produksi tambang bijih tipe timur yang terus meningkat menyebabkan pengurangan cadangan bijih yang terus menerus. Dengan demikian, sebuah area tambang baru untuk memperoleh bijih tipe timur telah dikembangkan yang terletak pada blok Petea.

Ada kecenderungan di industri untuk mengolah bijih laterit dengan teknologi pelindian asam (Gupta, 2003) akibat tingginya kebutuhan energi pada proses peleburan. Kelebihan proses pelindian adalah karena bekerja pada suhu rendah dan unsur-unsur seperti Ni, Co, Fe, dan Mg dapat diperoleh secara simultan (Liu et al, 2009). PT. Vale Indonesia telah melakukan studi secara intensif untuk mengambil Ni dan Co dari bijih laterit melalui proses pelindian asam bertekanan tinggi (HPAL). Akan tetapi, hingga kini tidak ada publikasi mengenai uji leaching terhadap bijih tersebut telah dilaporkan.

Berbagai studi telah dilakukan terhadap endapan laterit nikel Soroako. Golightly (1979a; 1979b) melakukan deskripsi endapan laterit dengan fokus pada perbedaan karakteristik bijih yang terbentuk dari batuan ultramafik dengan tingkat serpentinisasi yang berbeda. Selanjutnya, Golightly (1981) mengatakan bahwa garnierit cenderung terbentuk lebih intensif pada batuan ultramafik tak terserpentinakan dibandingkan dengan protolit terserpentinakan. Akan tetapi mekanisme pembentukan dan mineralogi garnierit belum dipahami dengan baik.

Meskipun beberapa studi telah dilakukan pada endapan Ni Soroako, akan tetapi studi yang memfokuskan pada hubungan antara sifat batuan dasar termasuk tingkat serpentinisasi, variasi mineralogi, dan kadar Ni pada endapan laterit nikel masih diperlukan untuk memperkuat pemahaman yang lebih baik mengenai evolusi mineral dan perilaku elemen yang berkaitan dengan siklus dan proses pengkayaan Ni. Analisis mineralogi dan kimia termasuk tekstur garnierit penting karena data tersebut sangat bermanfaat dalam melakukan pengkajian mengenai asal mula dan faktor-faktor yang mempengaruhi proses pembentukannya.

Studi leaching juga penting karena tren ke dapan untuk memperoleh Ni dan Co dari bijih laterit akan pada proses hidrometalurgi. Dengan demikian, uji pelindian sebaiknya dilakukan untuk memperoleh wawasan yang lebih baik mengenai sifat dissolusi mineral dan laju pelindian logam. Informasi ini penting dan mendasar dalam rencana pengolahan ke dapan jika teknologi pelindian sebagai pilihan utama. Oleh karena mineralogi dan kimia bijih laterit sensitif terhadap proses pelindian, maka diperkirakan bahwa genesa bijih laterit merupakan faktor utama dalam menghasilkan perbedaan karakter mineralogi dan kimia yang pada akhirnya memberikan respon yang berbeda terhadap sifat keterlindian. Pemahaman mengenai hubungan batuan dasar terhadap karakter mineralogy, tekstur, dan kadar endapan laterit nikel dapat berimplikasi pada proses hydrometalurgi.

Tujuan akhir dari studi ini adalah untuk mengkaji peran protolit terhadap perkembangan endapan laterit nikel yang dihasilkan oleh pelapukan kimia batuan ultramafik dengan tingkat serpentinisasi yang berberda. Tujuan khusus adalah: (1) mendeskripsi petrologi dan geokimia batuan ultramafik pada dua blok, (2) untuk menentukan distribusi mineral dan perilaku unsur-unsur pada penampang laterit selama proses pelapukan kimia, (3) untuk mengetahui siklus Ni pada penampang pelapukan terpilih dan hubungannya dengan proses pengkayaan Ni secara supergen, (4) untuk mengetahui asal mula bijih Ni-Mg hydrous silikat (garnierit) berdasarkan variasi tekstur, mineralogi dan kimia serta (5) untuk menyelidiki dampak komposisi mineralogi bijih nikel saprolit terhadap sifat dissolusi dan laju pelindian logam dengan menggunakan asam sulfat.

2. Metode

Sudi ini difokuskan pada aspek mineralogi dan geokimia endapan laterit nikel berikut pelindian bijih saprolit dari Soroako, Sulawesi Selatan. Sampel diambil dari dua blok yang meliputi batuan dasar, garnierit dan tanah lateritik. Kegiatan laboratorium terdiri dari analisis mineralogi dan kimia serta percobaan pelindian. Karakterisasi mineralogi sampel dilakukan dengan menggunakan mikroskopi optis, analisis difraksi sinar X (Rigaku RINT-2100). Beberapa sampel garnierit dan bijih saprolit juga dianalisis dengan metode analisis termal and spektroskopi inframerah (FTIR); sedangkan analisis geokimia meliputi spektroskopi fluoresensi sinar X (RIGAKU RIX-3100), dan SEM-EDX. Kegiatan ini dilakukan di Laboratorium Geologi Ekonomi, Department of Earth Resources Engineering dan The Centre for Advanced Instrumental Analysis, Faculty Engineering, Kyushu University, Japan.

Analisis kimia mineral beberapa sampel batuan dasar dan sampel garnierit dilakukan dengan menggunakan electron probe microanalysis (EPMA) setelah lokalisasi mineral target secara mikroskopis pada sayatan tipis-poles. Analisis ini menggunakan JEOL Superprobe JXA - 8800R Electron Microprobe Analyzer yang dilaksanakan di Department of Earth Science dan Technology, Akita University, Jepang.

Percobaan leaching sampel saprolit dengan menggunakan asam sulfat sebagai pelarut pada tekanan atmosfer dan suhu 90°C dilakukan secara “batch” menggunakan pengaduk magnetik model REXIM-RSH di Laboratorium Geologi Ekonomi, Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University. Waktu reaksi (30, 60, 90, 120, 150, and 180 menit) diset sebagai variabel percobaan. Pada akhir leaching, residu dipisahkan dari larutan dengan kertas saring (dia: 0.45 µm). Setelah pengeringan, padatan sisa dianalisis dengan XRD untuk identifikasi mineral. Satu padatan sisa dari tiap-tiap sampel juga dianalisa menggunakan FTIR dan SEM-EDX. Konsentrasi unsur dalam larutan terlindih ditentukan dengan metode “inductively coupled plasma optical emission spectrometry” (ICP-OES, VISTA-MPX, Seiko Instrument Inc.) di Laboratorium Pengolahan Mineral, Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University, Jepang.

3. Hasil

3.1 Petrologi dan Geokimia Batuan Ultramafik

Batuan ultramafik pada blok barat Soroako umumnya terdiri dari peridotit yang dicirikan oleh tingkat serpentinisasi sangat rendah hingga tak terserpentinakan. Komposisi mineralnya didominasi oleh olivin (75 – 95 % vol) dan sedikit ortopiroksin (<15 %) serta setempat klinopiroksin (<5 %) dan spinel (<4%). Hampir semua sampel yang dianalisa dikelompokkan sebagai harzburgit menurut klasifikasi Streckeisen (1976). Secara mikroskopis, olivin dicirikan oleh retakan tak teratur yang telah mengalami sedikit alterasi. Korosi juga ditunjukkan pada sisi kristal yang dikenal dengan “iddingsite”. Pembengkokan bidang belahan dan pemadaman bergelombang juga dijumpai pada mineral olivin. Ortopiroksin menunjukkan bentuk kristal anhedral sampai subhedral, sedangkan klinopiroksin pada semua sampel hadir dalam jumlah yang sangat sedikit dan umumnya terdapat sebagai “exsolution lamellae” pada ortopiroksin. Rekahan pada olivin dan ortopiroksin sebagian telah terisi oleh fasa mineral sekunder yang mungkin terbentuk pada awal pelapukan kimia. Spinel merupakan mineral tambahan yang umumnya hadir sebagai inklusi dalam olivin dan setempat pada ortopiroksin.

Sebaliknya, batuan dasar pada blok Petea umumnya terdiri dari batuan ultrabasa dengan tingkat serpentinisasi tinggi (>50 % volume). Proses ini telah merubah tekstur dan mineral asal. Tekstur serpentin dapat dibedakan menjadi dua tipe: yaitu tekstur pseudomorfik dan nir-pseudomorfik. Tekstur pseudomorfik terjadi ketika kristal olivin digantikan oleh serpentin membentuk tekstur jala (mesh); sedangkan penggantian piroksin oleh serpentin menghasilkan tekstur bastit dimana bentuk kristal asal masih jelas. Tekstur nir-pseudomorfik dicirikan oleh kehadiran urat-urat serpentin yang menerobos baik pada olivin atau piroksin yang telah terserpentinisasi. Spinel menunjukkan ubahan terutama di sepanjang retakan atau sisi kristal yang mungkin terjadi selama serpentinisasi

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa serpentinisasi pada olivin lebih kuat dari pada piroksin. Proses ini juga menyebabkan pembentukan magnetit butir halus yang dapat diamati pada urat serpentin serta pada belahan piroksin.

Hasil analisis kimia batuan ultramafik menunjukkan bahwa harsburgit dan dunit nir serpentinisasi pada blok barat mengandung SiO_2 (43,1 %) dan MgO (45,3 %) yang lebih tinggi dibandingkan dengan batuan terserpentinisasi pada blok Petea (40,9 % MgO) dan (37,5 % SiO_2). Pengurangan relatif unsur tersebut pada blok Petea disebabkan oleh hidrasi selama proses serpentinisasi. Kadar air rata-rata sampel dari blok Petea sekitar 12,1 wt% yang menunjukkan bahwa protolit ini telah terserpentinisasi kuat. Unsur-unsur seperti FeO , Cr , Ni , dan Co juga menunjukkan konsentrasi lebih tinggi pada sampel blok barat. Akan tetapi kadar Al_2O_3 dari sampel blok barat lebih rendah dibanding sampel blok Petea.

Plot biner MgO terhadap SiO_2 , Al_2O_3 dan CaO menunjukkan adanya korelasi pada sampel blok barat; sementara relasi MgO terhadap SiO_2 , Al_2O_3 dan CaO pada sampel blok Petea tidak menunjukkan adanya korelasi yang signifikan. Tingginya kadar Ni (rerata 0,36 %) pada sampel blok barat mencerminkan bahwa olivin didominasi oleh forsterit. Kecuali unsur Al dan Ti , secara umum unsur utama dan beberapa unsur minor telah mengalami pengurangan selama proses serpentinisasi batuan ultramafik.

Hasil analisis EPMA mineral olivin pada dunit dan harsburgit dari blok barat menunjukkan kadar NiO berkisar antara 0,3 hingga 0,5 % berat. Secara teoritis forsterit mempunyai kandungan Ni hingga 0,5 % berat (Otttenello, 1997). Ortopiroksin mengandung NiO rendah (0,04 – 0,15 wt%) dan klinopiroksin memiliki kadar NiO sangat rendah (<0,04 %). Hasil analisis mikroprob mineral serpentin dari blok Petea menunjukkan bahwa batuan serpentin cenderung memiliki kadar NiO tinggi (hingga 3 % berat). Sebaliknya, serpentin mesh, urat, and bastit yang berasal dari harsburgit terserpentinisasi menunjukkan konsentrasi NiO lebih rendah (<0,2 wt%). Spinel memperlihatkan perbedaan kadar NiO antara inti kristal (0,01 %) dan rim (0,21%). Juga terlihat bahwa serpentinisasi dunit menghasilkan serpentin yang diikuti oleh pengkayaan Ni . Hal ini sesuai dengan dengan tingginya kadar Ni pada olivin asal. Sebaliknya, serpentinisasi harsburgit menyebabkan kadar Ni sedikit menurun. Spinel menunjukkan indikasi pengkayaan Ni selama serpentinisasi, namun spinel hanya hadir sebagai mineral asesori pada protolit.

3.2 Mineralogi dan geokimia endapan laterit nikel

3.2.1 Profil pelapukan

Blok barat Soroako: Secara umum, profil laterit yang dianalisis pada blok barat menunjukkan variasi ketebalan dan dapat dibedakan menjadi beberapa zona dari bawah ke atas berdasarkan kenampakan fisik, tekstur, mineralogi dan kimia. Bagian paling bawah adalah batuan dasar yang disusun oleh peridotit dengan ciri-ciri abu-abu kehijauan, tekstur sedang-kasar dan kompak. Di atasnya terdiri fragmen-fragmen batuan peridotit yang mengalami korosi pada pinggir membentuk saprolit berbatu. Batas antara batuan dasar dan zona saprolit di atasnya sangat tidak teratur dan berangsur. Zona saprolit menunjukkan warna coklat kehijauan hingga kekuningan, tekstur halus hingga kasar dan berongga. Saprolit masih mengandung bongkah-bongkah peridotit atau batuan inti dengan ukuran bervariasi serta bentuknya membulat. Ke arah atas profil, setempat warna menjadi kehitaman dan material sangat lunak namun berangsur berubah menjadi kuning terang hingga coklat terang membentuk zona limonit. Pada bagian puncak profil, zona laterit menunjukkan warna relatif kemerahan hingga coklat kehitaman dan sebagian materi mengeras yang membentuk zona limonit merah.

Hasil analisis mineralogi dengan metode XRD menunjukkan bahwa batuan dasar didominasi oleh olivin dan sedikit enstatit. Diopsid dan spinel hadir dalam jumlah yang sangat kecil. Di atas batuan dasar, dimana pelapukan aktif, mineralogi disusun oleh saponit, talk dan setempat amfibol. Pada zona saprolit bawah, mineral primer secara progresif mengalami dekomposisi menjadi smektit, talk, serpentin sekunder, kuarsa dan goetit. Pada zona saprolit atas, komposisi mineraloginya masih terdiri dari goetit, kuarsa dengan sedikit talk, serpentin, dan jejak-jejak smektit. Subzona antara saprolit di bagian bawah dan limonit di bagian atas disusun oleh litioforit atau asbolan, suatu mineral yang kaya Mn dengan kristal buruk. Pada zona ini, smektit dan serpentin terurai namun talk masih bertahan. Kecuali talk, semua fasa mineral silikat pada zona limonit mengalami transformasi menjadi goetit, sehingga mendominasi mineral pada bagian atas profil. Talk masih muncul menyertai goetit hingga bagian atas horizon limonit,

namun pada puncak profil, talk juga terdekomposisi dan digantikan oleh goetit membentuk zona “red limonite”. Hematit mungkin hadir dalam jumlah kecil pada puncak profil. Difraktogram yang melebar pada contoh yang dianalisis mencerminkan bahwa goethit dan hematit adalah mineral dengan kristal buruk. Hematit tidak berdiri sendiri pada tanah laterit namun umumnya berasosiasi dengan goetit (Cornell and Schwertmann, 2003).

Diagram variasi litogeokimia unsur utama dan beberapa unsur jejak pada semua profil pelapukan yang dianalisis dari blok barat Soroako memperlihatkan bahwa MgO, SiO₂, dan CaO terdepleksi sangat kuat dari bawah ke arah puncak profil. Sebaliknya, FeO, Al₂O₃ dan TiO₂ meningkat tajam ke arah puncak profil. Sementara itu, kadar MnO yang rendah pada batuan dasar dan mencapai konsentrasi maksimum pada bagian bawah zona limonit dan sedikit menurun ke arah puncak profil. Konsentrasi Cr menunjukkan peningkatan dari batuan dasar ke arah atas; sedangkan Co cenderung memiliki sifat sama dengan MnO yang mencapai nilai maksimum pada zona batas antara saprolit dan limonit. Vanadium mempunyai kadar rendah pada batuan dasar and meningkat secara tetap ke atas profil. Kadar nikel pada protolit (0,27 -0,34 %) meningkat secara dramatis pada zona saprolit hingga mencapai 4,2 %, namun menurun lagi ke arah puncak profil.

Blok Petea: Sekuen pelapukan pada profil blok Petea berkembang pada batuan dasar peridotit terserpentinisasi. Pada umumnya, zonasi laterit juga dapat dibedakan berdasarkan kenampakan fisik dari bawah ke atas adalah batuan dasar yang diikuti oleh zona saprolit di bagian tengah dan zona limonit di bagian atas profil. Batas antara zona-zona tersebut relatif lebih mudah dibedakan, akan tetapi juga memperlihatkan batas yang tidak teratur. Batuan dasar dicirikan oleh tekstur halus –sedang, warna abu-abu terang – gelap atau hijau kekuningan, tergantung derajat serpentinisasi dan tipe mineral serpentin penyusunnya. Zona saprolit yang menutupi batuan dasar memperlihatkan tekstur halus, warna kuning kehijauan – coklat, berongga dan bersifat lunak, sangat sedikit mengandung bongkah. Saprolit memperlihatkan massa yang relatif homogen. Proses pelapukan kimia yang sangat kuat menyebabkan saprolit berubah menjadi materi yang berwarna coklat kekuningan membentuk zona limonit di bagian atas. Ketebalan horizon limonit

umumnya lebih bervariasi namun cenderung lebih tipis dibanding dengan zona saprolit di bawahnya. Zona limonit pada bagian atas menunjukkan warna coklat sedang hingga gelap, lunak namun setempat terdapat material yang keras.

Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa serpentin primer, kemungkinan lizardit, adalah mineral yang dominan pada batuan dasar. Mineral ini berasosiasi dengan sedikit enstatit dan jejak diopsid serta magnetit. Amfibol dan klorit juga terdeteksi pada batuan dasar. Proses pelapukan kimia secara progresif menyebabkan alterasi mineral primer (enstatit) menjadi mineral sekunder seperti smektit dan oksida besi. Sebaliknya, serpentin pada zona pelapukan relatif resisten sehingga mendominasi pada zona saprolit. Pada zona limonit, serpentin dan smektit terdekomposisi ketika proses pelapukan sempurna yang kemudian berubah menjadi goetit sehingga mendominasi zona limonit. Kuarsa terdeteksi pada zona limonit dan keterdapatannya ditafsirkan sebagai material sisa atau hasil presipitasi dari airtanah yang jenuh silika akibat penguapan (Taylor and Eggleton, 2001). Pada puncak profil, maghemit tetap bertahan dan sebagian goetit digantikan oleh maghemit.

Diagram variasi kimia terhadap kedalaman dari unsur utama dan jejak pada profil yang dipelajari dari blok Petea menunjukkan bahwa MgO berkurang ke arah atas profil. SiO₂ berperilaku sama dengan MgO, namun silika bisa hadir di bagian atas menyebabkan peningkatan SiO₂ dibandingkan dengan profil blok barat. Konsentrasi FeO meningkat secara tajam ke arah atas yang berlawanan dengan SiO₂ mencerminkan immobilitas besi selama proses pelapukan. Diagram Al₂O₃ juga menunjukkan pola yang sama dengan FeO yang meningkat ke arah zone limonit. MnO dan Cr meningkat dari batuan dasar dan mencapai maksimum pada zona limonit. Co juga menunjukkan konsentrasi maksimum pada zona limonit dibandingkan dengan protolit. Kadar Ni mencapai nilai maksimum sekitar 2,4 % pada saprolit dibandingkan dengan batuan dasar (0,2 %). Ke arah zona limonit, Ni menurun secara gradual (~1 %) pada zona limonit. Konsentrasi V pada sampel sangat rendah (dalam level ppm) namun juga menunjukkan peningkatan ke arah atas profil. Perbedaan faktor konsentrasi antara Ni dan Co pada profil menunjukkan bahwa sebenarnya unsur Ni dan Co memiliki perbedaan mobilitas selama pelapukan batuan ultramafik.

3.2.2 Perhitungan indeks pelapukan dan ketetapan massa

Hasil perhitungan indeks pelapukan menunjukkan bahwa nilai Ruxton Ratio (RU) sampel batuan dasar pada profil blok barat (SL) lebih tinggi dibanding dengan batuan dasar pada blok Petea (PL). Hal ini akibat kadar silika lebih rendah dan alumina lebih tinggi pada batuan dasar profil PL yang kemungkinan disebabkan oleh proses serpentinisasi sebelum pelapukan. RPI dan JE memperlihatkan nilai yang relatif sama pada batuan dasar kedua profil. Pelapukan kimia intensif menyebabkan mobilisasi silika dan mempertahankan alumina sebagai komponen nir mobil. Secara umum dapat dilihat bahwa indeks pelapukan pada profil PL memiliki nilai yang lebih tinggi dibanding dengan profil SL terutama pada material lapuk yang menunjukkan perilaku mobil dari silika lebih ekstrim pada profil blok barat (SL). Grafik RPI pada bagian atas profil PL menunjukkan pola zigzag yang dapat diartikan sebagai retensi silika pada zona pelapukan profil PL akibat laju disolusi mineral serpentin yang lebih lambat. Selama pelapukan progressif, SiO_2 yang dianggap sebagai unsur mobil terlindungi lebih cepat pada profil SL dibandingkan dengan profil PL. Kemungkinan lainnya adalah besi (II) lebih mobil selama proses serpentinisasi, menyebabkan besi total sedikit berkurang pada sampel batuan dasar profil PL. Semua indeks pelapukan yang ditinjau pada studi ini menunjukkan tren negatif ke arah zona limonit yang mengindikasikan sifat immobilitas relatif Al_2O_3 pada profil pelapukan dan kehilangan elemen mobil secara signifikan. Juga dapat dilihat bahwa nilai densitas mengecil ke arah zona limonit namun meningkat pada puncak profil. Hal ini berarti bahwa profil telah mengalami kolap.

Pelapukan yang terjadi secara intensif pada batuan ultramafik menyebabkan hilangnya unsur mobil seperti Si dan meninggalkan komponen non mobil seperti Al, Fe, dan Ti. Olivin dan piroksin yang mengandung Si pada protolit blok barat terlindungi lebih cepat dibanding serpentin pada batuan dasar blok Petea. Pada profil pelapukan yang berkembang di atas batuan ultramafik, Al_2O_3 yang dihasilkan dari proses pelapukan silikat primer (piroksin), serpentin dan spinel bersifat non mobil, lalu terendapkan sebagai fasa sekunder seperti lempung atau tergabung dalam struktur goetit. Sama halnya dengan besi yang dianggap sebagai komponen non

mobil akibat retensi Fe pada fasa sekunder terutama goetit (Price and Velbel, 2003). Pada kenyataannya, perbedaan derajat serpentinisasi batuan protolit mempengaruhi laju pelapukan batuan ultramafik pada kedua blok. Secara umum, peningkatan nilai indeks pelapukan dan bulk densitas terhadap kedalaman mengindikasikan bahwa penerapan rasio oksida mobil – non mobil merupakan kandidat terbaik dalam mengkarakterisasi profil pelapukan seperti yang disarankan oleh Duzgoren-Aydin dkk (2002). Namun demikian, aplikasi indeks pelapukan yang melibatkan alumina dan titania dalam studi pelapukan batuan ultramafik memiliki kelemahan karena rendahnya kadar kedua unsur ini pada batuan ultramafik.

Hasil perhitungan kesetimbangan massa pada profil SL blok barat menunjukkan bahwa Si, Mg dan Ca mengalami deplesi kuat pada zona saprolit (rata-rata masing-masing 80 %, 90% dan 74%) yang setara dengan perpindahan massa dengan rata-rata -456 kg Si, -726 kg Mg, and -8 kg Ca per meter kubik batuan. Hal ini diikuti oleh adanya peningkatan massa sekira 100 % Fe, 114% Mn, dan 61% Co (yaitu +186 kg Fe, +3 kg Mn, and +0.2 kg Co per m³). Pengkayaan absolut terhadap Ni sebesar 467 % (+36 kg) terjadi pada zona saprolit bagian bawah. Pada zona limonit, pengurangan rata-rata sebesar 97% Si (-560 kg) dan 98% Mg (-760 kg). Hampir semua Si (100 %) dan Mg (100 %) telah terlindih dari top profil yang setara dengan kehilangan sekitar 576 kg Si dan 774 kg Mg. Faktor pengkayaan Mn meningkat ke arah atas profil yaitu pada zona limonit sebesar 646% (+19 kg/m³) dan sekitar 865% (+3 kg/m³) untuk Co.

Dalam kasus profil PL, transformasi 1 m³ batuan dasar menjadi saprolit menyebabkan pengurangan rata-rata 62% Si, dan 90% Mg yang setara dengan eliminasi sekitar 270 kg Si dan 518 kg Mg. Kehilangan ini dikompensasi oleh adanya pengayaan sekitar 208 % Fe (+ 244 kg), 125% Cr (+9 kg), dan 288% Ni (+16 kg). Pada zona limonit, deplesi terjadi pada unsur Si sebesar 71 % (-315 kg), 99 % Mg (-575 kg) dan 93 % Ca (-1 kg). Sebaliknya terjadi penambahan Fe sekitar 266 % (+313 kg), Al 139 % (+18 kg), Cr 147 % (10 kg) dan Ni 98 % (6 kg) selama proses limonitisasi. Pengkayaan maksimum unsur Mn dan Co terjadi pada zona limonit bagian bawah dengan faktor masing-masing sebesar 892 % dan 609 % yang setara dengan perolehan sebesar +17 kg Mn dan +1.3 kg Co.

3.2.3 Mineralogi dan kimia “garnierit”

Garnierit di Soroako umumnya dijumpai pada bagian bawah profil laterit dan cenderung lebih berkembang pada batuan peridotit non serpentinisasi. Sebaliknya, keterdapatannya garnierit pada blok Petea jarang ditemukan dan hanya dijumpai setempat-setempat dimana batuan didominasi oleh peridotit terserpentinisasi. Berdasarkan kenampakan lapangan dan bentuk keterdapatannya, maka garnierit pada endapan laterit Soroako dapat dibedakan dalam tiga grup: (i) lapisan tipis (~1 mm hingga <0.5 cm) garnierit pada kekar/rekahan atau sebagai gores patahan yang umumnya berkembang pada blok barat dan jarang terjadi pada Petea blok dimana protolitnya terserpentinisasi, (ii) urat pengisi rekahan dapat dijumpai pada peridotit tak terserpentinisasi dan juga pada batuan peridotit terserpentinisasi yang secara setempat berasosiasi dengan kuarsa atau silika, (iii) matriks dan/atau klas sebagai komponen pada konglomerat atau breksi peridotit yang tersemankan oleh oksida besi.

Hasil analisis mikroskopis memperlihatkan variasi tekstur sampel garnierit yang terdiri dari pertumbuhan pita konsentrik dengan tekstur koloform lamella, banding segitiga dan relatif sejajar. Tekstur khas lainnya adalah material agregat serabut yang umumnya berkembang pada mineral sepiolit dan kadang-kadang silika. Komposisi mineralogi garnierit dari blok barat Soroako yang ditentukan dengan metoda XRD umumnya memperlihatkan percampuran antara *talc-like mineral* dan *serpentine-like mineral* dengan komponen utama berupa seri kerolit-pimelit. Komponen lainnya seperti seri talk- willemsit dan Ni-smektit juga hadir dalam jumlah yang kecil. Sementara itu, sampel garnierit dari blok Petea menunjukkan dominasi seri sepiolit-falkondoit dengan jejak silika. Hanya beberapa sampel yang menunjukkan percampuran antara seri kerolit-pimelit dan Ni-serpentin dengan sejumlah kecil kuarsa.

Ada kecendrungan terjadinya pengkayaan NiO pada pita-pita yang lebih terang dibandingkan dengan pita yang lebih gelap seperti yang ditunjukkan oleh data SEM/EDX. Akan tetapi, variasi NiO tidak selalu terjadi akibat adanya zonasi, akan tetapi dapat berkaitan dengan pengendapan dari larutan yang jenuh Ni (Tauler *et al.*, 2009).

Hasil analisis SEM/EDX menunjukkan bahwa variasi unsur-unsur terjadi pada tiga konsentrasi yaitu SiO₂, MgO, dan NiO. Konsentrasi Al₂O₃ hadir dalam jumlah yang sangat kecil (< 0,1 % berat); sedangkan kadar FeO bervariasi. Oksida utama lainnya seperti TiO₂ dan CaO serta unsur jejak seperti Cr dan Co mempunyai konsentrasi di bawah limit deteksi.

Secara umum dapat ditunjukkan bahwa komposisi kimia garnierit didominasi oleh Si, Mg, dan Ni. Analisis spot yang memotong urat kerolit memperlihatkan bahwa perubahan kimia terjadi antara Mg dan Ni. Konsentrasi Si relatif konstan sementara Mg menunjukkan pengurangan relatif ke arah inti/bagian tengah urat dibandingkan dengan bagian tepi. Sebaliknya, Ni meningkat dari sisi luar ke arah pusat/inti urat. Pengkayaan nikel terhadap magnesium ke arah inti mencerminkan adanya perubahan kimia larutan selama presipitasi dari seri kerolit – pimellit (Wells *et al.*, 2009).

Hasil analisis kimia sampel garnierit dengan metode SEM/EDX dan EPMA menunjukkan adanya kisaran komposisi antara seri kerolit-pimellit, talk-wilemseit, lizardit-nepouit (Ni-serpentin) dan sepiolit-falkondoit dalam seri larutan padat. Variasi komposisi kimia pada sampel garnierit tersebut memberi kesan adanya mekanisme disolusi-presipitasi mineral yang kompleks dan mungkin dipengaruhi oleh kondisi kimia larutan (Tauler *et al.*, 2009).

Perlu diketahui bahwa hasil perhitungan rumus struktur menunjukkan adanya penyimpangan dari rumus ideal untuk serpentin: Mg₃Si₂O₅(OH)₄, talk: Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂, dan sepiolit: Mg₈Si₁₂O₃₀(OH)₄(OH₂)₄.8(H₂O). Penyimpangan dari rumus struktur ideal tersebut kemungkinan disebabkan oleh kontaminasi dari analisis spot yang dilaporkan untuk serpentin oleh kerolit/talk dan sebaliknya untuk analisis kimia yang dilaporkan untuk kerolit oleh serpentin. Demikian pula dalam kasus sepiolit-falkondoit, jumlah kation tetrahedral mestinya sama dengan 12 atau kurang, sehingga kelebihan Si dapat disebabkan oleh kehadiran silika amorf yang saling tumbuh dengan Ni-sepiolit. Kelebihan Si pada Ni-serpentin menunjukkan adanya kontaminasi kuarsa atau silika amorf yang berasosiasi dengan mineral serpentin. Oleh sebab itu terjadi kelebihan estimasi jumlah atom Si melebihi nilai dua.

3.3 Sifat leaching bijih nikel saprolit

Hasil karakterisasi mineral pada dua contoh bijih saprolit yang digunakan pada studi pelindian ini menunjukkan bahwa sampel WO terutama disusun oleh olivin, kuarsa, *talca-like phases* (garnierit) dan sedikit serpentin, piroksin dan goetit. Sementara itu, komposisi mineralogi sampel EO didominasi oleh lizardit-1M $[(\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$, suatu anggota kelompok mineral serpentin serta sedikit klorit $[(\text{Fe,Al})_{12}(\text{SiAl})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}]$, enstatit, amfibol, maghemit $[\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3]$ dan kuarsa.

Komposisi kimia memperlihatkan bahwa sampel WO mengandung konsentrasi SiO_2 (49,2 %) dan MgO (23,2 %) lebih tinggi dibanding dengan sampel EO (38,9 % SiO_2 dan 15,5 % MgO). Nilai ini sesuai dengan tingginya kandungan mineral kuarsa dan olivin pada sampel WO. Kehadiran kuarsa dalam jumlah signifikan juga ditandai oleh spektrum inframerah (FTIR) pada pita serapan 887 cm^{-1} dan 791 cm^{-1} . Sebaliknya, Fe_2O_3 dan Al_2O_3 menunjukkan nilai yang tinggi pada sampel EO dibandingkan dengan sampel WO. Diasumsikan bahwa besi pada sampel EO tidak hanya hadir sebagai maghemit melainkan juga terikat dalam mineral serpentin dan klorit. Demikian pula Al dapat hadir sebagai unsur pengganti Fe dalam goetit dan struktur serpentin. Konsentrasi Mn dan Co relatif sama untuk kedua sampel, sedangkan Cr lebih tinggi pada sampel EO dari sampel WO. Kromium terutama terdapat dalam spinel, goetit dan sejumlah kecil dalam piroksin. Kadar Ni lebih tinggi pada sampel WO terutama berasosiasi dengan garnierit; sedangkan serpentin residual sebagai mineral utama pembawa Ni pada sampel EO.

3.3.1 Disolusi mineral pada bijih

Hasil percobaan leaching menunjukkan bahwa olivin pada sampel WO terdisolusi secara sempurna yang diikuti oleh serpentin sekunder. Oksida besi, enstatit, dan talk sulit terdisolusi sementara kuarsa tidak mengalami pelarutan. Untuk sampel EO, serpentin primer residual mudah mengalami disolusi dengan larutan asam yang diikuti oleh klorit; sedangkan maghemit, enstatit, amfibol, dan kuarsa sulit mengalami disolusi.

Disolusi olivin yang cepat pada sampel WO menunjukkan pelepasan magnesium dan sedikit besi ke dalam larutan. Reaksi silikon diduga terjadi dan juga memasuki larutan, sementara disolusi goetit membebaskan besi, aluminium dan mungkin juga unsur jejak seperti Ni, Co dan Mn. Serpentin sekunder yang berasosiasi dengan mineral talk juga melepaskan magnesium and nikel. Untuk sampel bijih EO, disolusi serpentin residual menunjukkan reaksi inkongruen dimana kation logam dilepaskan ke dalam larutan dan meninggalkan padatan sisa berupa silika. Disolusi klorit juga melepaskan besi dan aluminium ke dalam larutan. Reaksi silikon mungkin terjadi dan juga memasuki larutan, sementara maghemit melepaskan besi. Diprediksikan bahwa baik besi dan aluminium yang terlindih selanjutnya mengalami hidrolisa yang dapat menyebabkan presipitasi besi/alumina. Leaching serpentin residual tidak hanya melepaskan Ni dalam jumlah signifikan tetapi juga dapat menghasilkan padatan sisa yang kaya silikon.

Laju disolusi mineral silikat dapat dipengaruhi oleh struktur kristalnya, tergantung tingkat polimerisasi Si-O. Berdasarkan studi leaching dan kaitannya dengan struktur silikat, maka diduga bahwa laju disolusi mineral-mineral primer diurutkan dari cepat ke lambat adalah: forsterit > enstatit > amfibol > kuarsa. Untuk silikat melapis, dapat dilihat bahwa laju disolusi yang lebih tinggi pada serpentin (Mg/Si=3/2) dibanding dengan talk (Mg/Si=3/4) akibat akses asam lebih mudah pada struktur serpentin dari pada talk. Fakta ini menunjukkan bahwa talk lebih resisten terhadap serangan asam dan laju disolusinya lebih lambat dibanding dengan mineral silikat melapis lainnya termasuk serpentin (Jurinski and Rimstidt, 2001; Okada *et al.*, 2003).

Faktor lain yang dapat mempengaruhi laju disolusi mineral silikat adalah sifat-sifat kation logam dalam struktur silikat (Terry, 1983). Secara umum diketahui bahwa ikatan oksigen-silikon lebih kuat dibanding dengan ikatan kation logam-oksigen lainnya. Dengan demikian, ikatan logam-oksigen terutama yang bervalensi dua lebih mudah diserang oleh asam. Derajat ikatan hidroksil dengan kation logam dalam mineral filosilikat dapat meningkatkan laju disolusi akibat kuat ikatannya lebih lemah. Hal tersebut menunjukkan bahwa tingginya laju disolusi serpentin atas talk juga dapat dipengaruhi oleh tingginya air kristal pada serpentin (nilai ideal 12,9 % H₂O) dibanding talk (4,8 wt% H₂O).

Stabilitas relatif mineral silikat terhadap asam juga berkaitan dengan kemampuan polarisasi kation logam yang dipresentasikan sebagai potensial ion (rasio muatan ion/jari-jari ion). Mineral-mineral yang memiliki potensial ion tinggi relatif tidak bereaksi dengan asam; sedangkan kation silikat dengan potensial ion rendah lebih mudah larut dalam asam (Terry, 1983). Laju reaksi kimia mineral dengan asam juga dapat dipengaruhi oleh kristalinitas, pengotor, ukuran butir, dislokasi dan porositas (Terry, 1983). Mineral-mineral kristal buruk lebih reaktif dibanding dengan mineral kristal sempurna. Dalam hal mineral serpentin, proses pelapukan menyebabkan substitusi logam seperti Fe, Al, dan Ni terhadap Mg. Efek substitusi ini dapat menyebabkan penyusutan oktahedron dan ekspansi tetrahedron (Liu et al., 2009). Deformasi ini akan memperlemah stabilitas kristal sehingga serangan asam lebih mudah berlangsung (Lander and Gilkes, 2007). Dengan demikian, laju disolusi lebih cepat terjadi pada serpentin residual yang mempunyai kandungan besi tinggi serta kristalinitas buruk.

3.3.2 Laju pelindian logam

Analisis SEM/EDX pada padatan sisa menunjukkan bahwa konsentrasi MgO dan NiO berkurang selama dua jam leaching terhadap sampel WO awal. Kadar besi juga mengalami penurunan namun SiO₂ bertambah secara signifikan. Peningkatan konsentrasi SiO₂ pada solid residu sesuai dengan kehadiran kuarsa dan/atau silika tak larut yang ditunjukkan oleh pola difraksi sinar X. Kebanyakan Mg dan Ni pada padatan sisa mungkin terikat dengan garnierit karena mineral ini sulit larut. Besi mungkin hadir sebagai magnetit/goetit atau kemungkinan lain terikat pada struktur enstatit.

Dalam kasus sampel EO dari blok Petea, penurunan konsentrasi MgO pada solid residu serta tidak terdeteksinya NiO dari hasil analisis EDX memperlihatkan bahwa laju disolusi serpentin residual berlangsung dengan cepat sebagai komponen utama dalam sampel bijih EO. Demikian pula, reduksi FeO terjadi secara signifikan pada solid residu yang mengindikasikan bahwa Fe berasosiasi dengan serpentin. Sebaliknya peningkatan kandungan SiO₂ pada solid residu berkaitan dengan kehadiran kuarsa yang tidak reaktif dan silika amorf.

Grafik distribusi laju pelindian logam memperlihatkan bahwa terdapat sedikit variasi ekstraksi logam pada interval waktu percobaan. Kondisi ini mungkin disebabkan oleh kompleksitas mineral pada kedua bijih. Laju pelindian Ni dan Mg sedikit lebih tinggi pada sampel EO (58% dan 74%) yang dicapai selama 120 menit reaksi jika dibandingkan dengan sampel WO (masing-masing 47% dan 59%). Relatif tingginya ekstraksi Ni dan Mg dari sampel EO dapat dikaitkan dengan disolusi cepat serpentin residual sebagai komponen utama. Protonasi relatif lebih mudah terjadi pada struktur serpentin dibanding dengan struktur talk.

Sebaliknya, laju ekstraksi Fe (61%) lebih tinggi pada sampel WO yang dapat dicapai pada waktu reaksi lebih lama (150 menit). Selain goetit, diyakini bahwa Fe pada sampel WO kemungkinan besar hadir sebagai Fe valensi 2 yang terdapat sebagai solid solution dalam mineral olivin; sedangkan Fe valensi 3 kemungkinan lebih dominan pada sampel EO yang terutama terdapat pada serpentin dan maghemit. Solubilitas besi valensi 3 jauh lebih rendah dibanding besi valensi 2 (Cornell and Schwertmann, 2003). Laju pelindian Co (70%) dan Mn (65%) dari sampel WO lebih tinggi dibanding dengan sampel EO (49 % dan 58%). Diperkirakan bahwa terdapat fasa mineral mangan pembawa Co yang berasosiasi dengan oksida besi (goetit) terutama pada sampel WO. Sebagian Co dan Mn juga diperkirakan terdapat sebagai solid solution dengan logam-logam divalent lainnya dalam struktur kristal mineral silikat. Kobal dan Mn memiliki disolusi kinetik yang sama dalam larutan asam, meskipun Georgiou dan Papangelakis (2009) menemukan bahwa Co dapat dibebaskan lebih cepat dibanding Mn.

Baik Al maupun Cr menunjukkan laju leaching lebih rendah dengan perolehan maksimum 12 % untuk Al dan 19 % untuk Cr dari sampel WO. Laju pelindian Al dan Cr sebesar 22 % dan 12% yang dapat dicapai dari sampel EO dengan waktu reaksi 120 menit. Rendahnya laju pelindian kedua logam ini sebagian disebabkan oleh bentuk keterdapatannya dalam bijih saprolit. Kromium terdapat dalam kelompok spinel (spinel, kromit atau magnetit). Fasa ini relatif resisten terhadap asam, bahkan setelah reaksi dalam waktu lama (McDonald dan Whittington, 2008). Aluminium kemungkinan terdapat dalam spinel atau mensubstitusi silikon dalam koordinasi tetrahedron atau kemungkinan lainnya mengganti Fe dalam struktur goetit.

4. Pembahasan

4.1 Sifat batuan ultramafik Soroako: hubungannya dengan pembentukan endapan laterit nikel

Soroako Blok Barat: Protolit ultramafik unsertentized pada blok barat Soroako terutama terdiri dari harzburgit, meskipun setempat juga dijumpai dunit. Batuan ini terutama berkomposisi olivin serta sedikit ortopiroksin dengan jejak-jejak klinopiroksin dan spinel. Olivin dicirikan oleh Mg# (0,91 – 0,94) dan NiO (0,30 – 0,50 wt%) yang lebih tinggi. Dalam kaitannya dengan pembentukan endapan laterit nikel, nampak bahwa kadar Ni yang tinggi (0,27 – 0,36 wt%) pada batuan ultramafik dari blok barat Soroako paling sesuai sebagai sumber Ni untuk menghasilkan kadar bijih yang tinggi melalui proses pengkayaan supergen pada profil pelapukan. Deposit di blok barat memiliki keunikan karena terbentuk dari pelapukan protolit peridotit tak terserpentitan yang menghasilkan type bijih silikat. Olivin forsteritik yang kaya Ni, mendominasi komposisi mineral pada peridotit blok Barat Soroako, berperan penting untuk mensuplai Ni dalam perkembangan endapan laterit. Adanya pembengkokan bidang belahan, pemadaman bergelombang dan rekristalisasi kristal olivin dapat mendorong laju disolusi selama proses pelapukan. Rekahan mikro yang berkembang baik pada olivin dan piroksin dapat memberikan jalan bagi larutan yang pada akhirnya akan meningkatkan reaksi kimia karena adanya penambahan luas permukaan efektif dari kristal (Eggleton, 1986). Bukti-bukti ini diperlihatkan oleh adanya lingkaran pelapukan yang disebut “iddingsite” dan mulai munculnya fasa sekunder yang terbentuk pada rekahan kedua mineral ini.

Blok Petea: Batuan ultramafik di blok Petea dicirikan oleh tingkat serpentinisasi sedang sampai tinggi. Serpentinisasi melibatkan perubahan fisik dan kimia akibat hidrasi. Proses ini menyebabkan peningkatan volume batuan yang ditandai oleh perkembangan tekstur pseudomorfik seperti mesh dan bastit (Mével, 2003; Lambiv Dzemua and Gleeson, 2012). Kehadiran magnetit yang menyertai proses serpentinisasi menunjukkan tingginya fugasitas oksigen pada sistem. Alterasi ortopiroksin menjadi serpentin menghasilkan SiO₂ dalam jumlah yang

signifikan. Silika ini bereaksi dengan MgO yang dilepaskan oleh serpentinisasi olivin dan membentuk tambahan serpentin. Ketidak hadirannya brunit [Mg(OH)₂] pada sampel yang dianalisis dari blok Petea mungkin karena dihambat oleh pembentukan serpentin melalui reaksi SiO₂ – MgO (Shervais *et al.*, 2005; Frost and Beard, 2007).

Hasil analisis EPMA memperlihatkan bahwa serpentin pada batuan serpentin (protolit dunit) mengandung konsentrasi NiO yang lebih tinggi dibanding dengan batuan peridotit terserpentinisasi sebagian (protolit harzburgit). Hal ini konsisten dengan tingginya kadar Ni pada olivin asal (hingga 0,5 % NiO) dibandingkan dengan ortopiroksin asal (0,1 % NiO). Dapat dikemukakan bahwa serpentinisasi pada mineral olivin dan piroksin dalam beberapa tingkatan menyebabkan redistribusi Ni dan unsur mobil lainnya. Karena Ni memiliki mobilitas sedang, maka sebagian diserap kembali oleh serpentin berbutir halus yang mengganti olivin sebelumnya. Nikel terlarut juga bergabung dengan serpentin mesh dan juga urat-urat serpentin. Jelas bahwa Mg sangat berkurang pada semua komponen dalam serpentin yang menunjukkan bahwa mobilitas Mg lebih tinggi daripada Ni. Besi juga mengalami kehilangan selama hidrasi olivin yang dipicu oleh tingginya rasio air/batuan (Gahlan *et al.*, 2006). Secara umum konsentrasi nikel menurun dari: olivin sisa – serpentin mesh – urat serpentin.

Dalam kaitannya dengan harzburgit terserpentinisasi, konsentrasi Ni pada bastit, mesh, dan vein bervariasi tergantung pada mineral asalnya serta tekstur. Idealnya, serpentin bastit memiliki kandungan Ni lebih rendah daripada serpentin mesh. Namun demikian, kadar Ni pada bastit yang dianalisis sedikit lebih tinggi pada sampel dari blok Petea. Kemungkinan suplai Ni ini berasal dari olivin yang berada di dekatnya. Bastit piroksin mengandung Ni lebih rendah dibanding piroksin asal. Serpentin mesh dan serpentin vein dari harzburgit berubah juga mengandung Ni lebih rendah dari mineral asalnya yang mengindikasikan bahwa Ni sedikit mengalami kehilangan selama serpentinisasi. Hal ini dipertegas oleh Golightly (2010) yang mengatakan bahwa alterasi olivin menjadi serpentin ± brunit menyebabkan penurunan kadar Ni dari ~0,30 % dalam olivin menjadi ~0,25 % pada serpentin.

4.2 Evolusi mineral pada profil laterit

Profil blok barat Soroako: Selama tahap awal pelapukan, olivin pertama kali lapuk diikuti oleh enstatit dan kemudian diopsid (Colin *et al.*, 1990). Disolusi secara inkongruen menyebabkan transformasi epitaksial olivin menjadi filosilikat terutama smektit trioktahedral (saponit) dan besi oxi-hidroksida (goetit atau ferrihydrite) pada kondisi pelapukan di daerah tropis (Nahon *et al.*, 1982; Eggleton, 1986). Pelapukan olivin juga dapat menghasilkan goetit tanpa pembentukan filosilikat dan meninggalkan silika bebas.

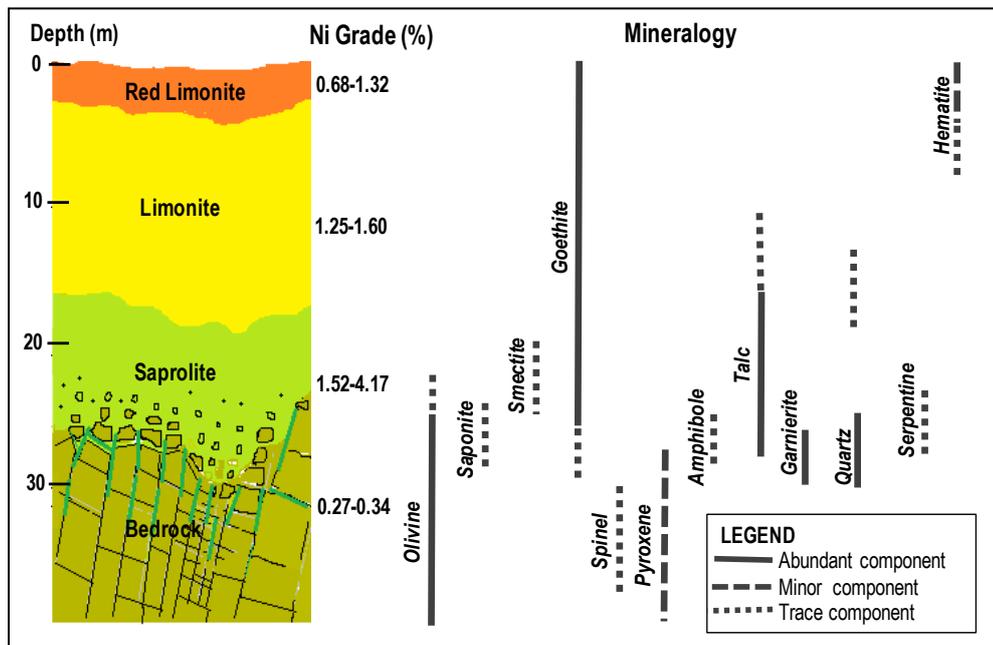
Laju pelapukan ortopiroksin dan klinopiroksin juga berbeda dimana enstatit lapuk dua kali lebih cepat dibanding diopsid (Colin *et al.*, 1990). Pelapukan enstatit dapat menghasilkan talk atau serpentin (Eggleton, 1982; Wang *et al.*, 2009) serta amfibol, mungkin sebagai aktinolit or tremolit yang disebut “uralite” menurut Tardy (1997). Spinel adalah mineral asesori pada peridotit. Meskipun relatif resisten terhadap proses pelapukan, akan tetapi pada kondisi oksidasi, spinel menunjukkan disolusi di sepanjang rekahan atau pinggir kristal menyebabkan kehilangan Cr dan Mg (Traore *et al.*, 2008). Hidrolisa dari kromium spinel awalnya terjadi pada zone saprolit, menghasilkan $\text{Cr}(\text{OH})_3$ yang terbentuk pada kondisi basa dan sedikit reduksi untuk mempertahankan ion Fe^{2+} dalam larutan. Situasi ini dapat terjadi pada zona bagian tengah profil atau pada zona saprolit. $\text{Cr}(\text{OH})_3$ yang dihasilkan dapat diserap oleh permukaan kristal Fe-oxihidroksida atau Mn-oxihidroksida (Fendorf, 1995; Cooper, 2002).

Pada saprolit bawah, diindikasikan bahwa saponit lebih lanjut ditransformasi menjadi smektit dioktahedral (mis. montmorillonit kaya Fe) karena kehilangan banyak Mg. Ketidak hadirannya nontronit dapat menunjukkan bahwa Si juga sebetulnya terlindih dan meninggalkan Fe sebagai material residu. Smektit tidak bertahan lebih lama pada kondisi lembab seperti pada wilayah beriklim tropis (Ahmad, 2008) dan selanjutnya berubah menjadi mineral Fe oxi-hidroksida terutama goetit. Pada zona saprolit ke arah atas, serpentin sekunder juga secara gradual larut menyebabkan kehilangan Mg dan meninggalkan silika. Sebaliknya, talk relatif tidak larut dan tetap bertahan hingga pada zona limonit bawah. Amfibol mulai terurai pada zona atas saprolit. Kehilangan silikat sekunder pada

bagian tengah profil menyebabkan peningkatan proporsi mineral goetit yang mempertahankan tekstur batuan asal (Barros de Oleivera *et al.*, 1992). Setempat, presipitasi silika sebagai produk amorf atau kristal buruk juga mungkin terjadi terutama dalam rongga-rongga yang diakibatkan oleh disolusi mineral primer (Colin *et al.*, 1990).

Jika semua unsur mobil telah terlindih, maka Ni juga pada lingkungan ini sedikit mobil dan sebagian bergerak ke arah bawah lalu terakumulasi pada bagian bawah profil membentuk “garnierit”. Hal ini memungkinkan karena pH larutan meningkat menjadi lebih alkalin terhadap kedalaman (Taylor and Eggleton, 2001). Sejumlah kecil nikel tertahan pada ferruginous saprolit yang merupakan bijih laterit oksida (Barros de Oleivera *et al.*, 1992).

Tahap akhir pelapukan pada bagian atas profil dicirikan oleh material yang berwarna kuning hingga coklat kemerahan membentuk zona limonit. Tekstur batuan asal tidak lagi terlihat. Semua silikat sekunder terdekomposisi total dan berubah menjadi goetit. Sejalan dengan waktu, pengeringan secara periodik mengakibatkan dehidrasi goetit yang sebagian berubah menjadi hematit pada top profil (Fig. 1).



Gambar 1 Skematik profil pelapukan yang menggambarkan horizon berbeda dan distribusi mineral yang berkembang pada protolit ultramafik tak terserpentinisasi di blok barat Soroako.

Profil pada blok Petea: Batuan dasar pada profil laterit blok Petea terutama disusun oleh serpentin primer dan sedikit piroksin (enstatit) dengan sejumlah kecil klorit dan magnetit. Selama tahap awal pelapukan kimia, enstatit pertama kali lapuk yang menghasilkan menghasilkan fasa sekunder menurut reaksi berikut (Noack *et al.*, 1993):

1. Enstatit \rightarrow talk + (kuarsa) + (klorit) \rightarrow goetit + Fe-hidroksida
2. Enstatit \rightarrow amorfous \rightarrow mineral lempung \rightarrow Fe-hidroksida

Tidak dijumpainya talk pada zona saprolit mengindikasikan bahwa pelapukan piroksin pada profil Petea cenderung menghasilkan material amorfous dan smektit ketimbang talk (pers. No.2). Akan tetapi, smektit juga tidak berkembang dengan baik pada zona saprolit yang mungkin dipengaruhi oleh iklim lokal. Harder (1977) mengemukakan bahwa selama musim hujan (basah), smektit tidak terbentuk karena konsentrasi silika dalam airtanah sangat rendah. Amfibol juga merupakan hasil transformasi piroksin atau sebagai residu dari amfibol pada batuan dasar.

Pelapukan kimia intensif mengakibatkan transformasi magnetit menjadi maghemit dan goetit. Hal ini memungkinkan karena Fe^{2+} yang terdapat pada magnetit dioksidasi menjadi Fe^{3+} (Cornell and Schwertmann, 2003). Sebaliknya, serpentin tetap tidak berubah selama alterasi supergen sehingga menjadi mineral yang dominan pada zona saprolit. Klorit nampaknya resistan sehingga masih tetap muncul pada horizon saprolit. Pelapukan secara progressif menyebabkan proporsi serpentin meningkat pada zona saprolit. Setempat, serpentin berubah menjadi smektit, akan tetapi tidak bertahan lama. Amfibol ditransformasi lebih lanjut menjadi goetit pada zona limonit. Ditunjukkan bahwa klorit lebih stabil dibandingkan dengan serpentin terutama pada zona limonit bagian bawah (Caillaud *et al.*, 2004).

Pada limonit atas/red limonit, mineral sheet silikat sekunder (misal. serpentin dan klorit) tidak stabil karena kondisi air tanah yang lebih asam. Pada zona limonit, hampir semua silikat sekunder berubah menjadi goetit. Sedangkan maghemit relatif tidak berubah. Dengan demikian zona paling atas didominasi oleh goetit serta sedikit maghemit. Skema yang menggambarkan evolusi mineral pada profil laterit blok Petea dapat dilihat pada Gambar 2.

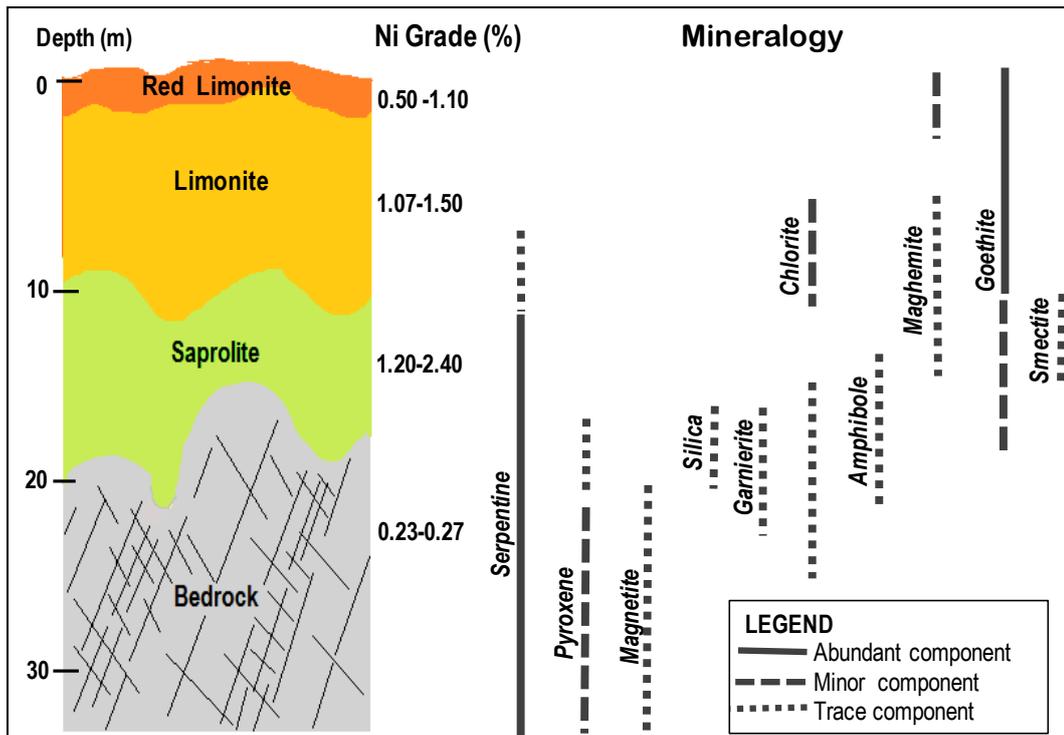


Figure 2 Skema yang menggambarkan distribusi mineral pada profil pelapukan yang berkembang di atas peridotit terserpentinisasi kuat pada blok Petea.

4.3 Perilaku unsur-unsur selama pelapukan

Profil blok barat: Terdapat korelasi positif yang kuat antara SiO_2 dan MgO ($r = 0,85$) pada profil pelapukan blok barat; sementara korelasi negatif ditunjukkan oleh SiO_2 dan FeO ($r = -0,98$) berarti bahwa besi tidak mobil pada profil pelapukan. Fe^{3+} hanya larut pada kondisi yang sangat asam, sehingga pada saat larutan dinetralkan, maka $\text{Fe}(\text{OH})_3$ terendapkan (Scott, 2008). Korelasi antara SiO_2 terhadap Al_2O_3 dan TiO_2 juga memperlihatkan tren negatif dengan koefisien korelasi masing-masing $r = -0,84$ dan $r = -0,79$; sementara relasi antara SiO_2 dan CaO adalah positif ($r = 0,62$). Hasil perhitungan indeks pelapukan dan keseimbangan massa menunjukkan bahwa SiO_2 terlindih secara kuat ke arah atas profil.

Aluminum memperlihatkan korelasi positif terhadap oksida utama lainnya seperti FeO , TiO_2 dan MnO . Meskipun konsentrasi Al_2O_3 mencapai 7 % berat pada zona limonit, jumlah Al tidak mencukupi untuk membentuk gipsit $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ dan Al cenderung bergabung dalam struktur goetit dimana ion Al^{3+} dapat

menggantikan hingga 33% Fe^{3+} pada kisi kristal goetit (Cornell & Schwertmann, 2003). Perhitungan indeks pelapukan menggunakan Al_2O_3 dan Fe-total sebagai komponen immobil menunjukkan bahwa profil telah mengalami kolaps akibat reduksi porositas dan penurunan zona profil bagian atas. Konsentrasi Ti rendah dengan nilai maksimum 0,2 % berat. Unsur Ti dibawah oleh spinel atau sebagai larutan padat dengan Si pada struktur tetrahedron mineral silikat. Pada profil pelapukan, ion Ti^{4+} (jari-jari 0,61 Å) dapat mensubstitusi Fe^{3+} (jari-jari 0,55Å) pada struktur goetit (Scott, 2008).

Oksida mangan (MnO) berkorelasi negatif dengan SiO_2 namun trennya positif terhadap TiO_2 dan FeO . Konsentrasi mangan pada tiga profil blok barat menunjukkan nilai tinggi antara 1,9 dan 3,8 % berat pada zona batas saprolit-limonit. Perhitungan keseimbangan massa menunjukkan pengkayaan Mn mencapai 645% yang terjadi pada zone limonit. Mangan mungkin dilepaskan dari batuan dasar sebagai Mn^{2+} dan dioksidasi menjadi Mn^{4+} selama pelapukan. Mn dapat juga mengalami pelindian dari bagian atas zona limonit pada kondisi pH rendah dengan aktifitas CO_2 yang tinggi (Marker *et al.*, 1991). Ketika larutan pembawa Mn mencapai zona limonit bawah, pH meningkat akibat hidrolisa silikat yang menyebabkan presipitasi oksida Mn dari larutan koloid (Jenne, 1986; Marker *et al.* 1991).

Sifat Cr pada profil pelapukan blok barat memperlihatkan adanya korelasi secara positif dengan FeO ($r=0,86$) dan Al_2O_3 ($r=0,76$). Hal ini mengindikasikan imobilitas unsur- unsur tersebut pada profil pelapukan. Meskipun Cr umumnya terikat pada struktur spinel, namun jika tetap dalam valensi 3, maka Cr tidak dapat larut dan hingga 6500 ppm dan 3800 ppm dapat diakomodasi masing-masing pada struktur goetit dan hematit (Scoot, 2008).

Kobal menunjukkan korelasi yang sangat kuat dengan MnO ($r=0,90$) dan terkonsentrasi pada zona limonit bawah. Unsur ini berasosiasi dengan asbolan atau *manganese wad*. Hal ini telah dikonfirmasi dari hasil perhitungan keseimbangan massa yang menunjukkan faktor pengkayaan Mn hingga 865%. Kadar Co pada asbolan dari sampel laterit Soroako berkisar antara 0,3 sampai 3,1 % berat (Chen dkk., 2004).

Profil blok Petea: Distribusi unsur major pada profil laterit blok Petea menunjukkan bahwa MgO dan SiO₂ mengalami pelindian selama tahap awal pelapukan namun tingkat deplesinya lebih rendah dibanding dengan profil pada blok barat. Sebaliknya, FeO, Al₂O₃ dan MnO terkonsentrasi secara residual pada zona pelapukan ke arah atas. Rendahnya laju pelindian SiO₂ dan MgO kemungkinan disebabkan oleh serpentin yang terkandung pada batuan dasar memiliki laju pelindian yang relative lebih lebih lambat daripada olivin dan piroksin. Korelasi negatif yang kuat ditunjukkan oleh hubungan antara SiO₂ dan Al₂O₃ ($r = -0,96$), SiO₂ dan FeO ($r = -0,96$) serta SiO₂ dan MnO ($r = -0,75$). Hubungan yang sama dapat dijumpai antara SiO₂ dan unsur jejak lainnya (Cr, Co dan V) pada profil. Hal ini membuktikan adanya perbedaan mobilitas silika terhadap alumina, besi, mangan dan unsur jejak lainnya (Cr, Co, dan V). Sebaliknya, FeO berkorelasi secara positif dengan Al₂O₃, TiO₂, MnO dan unsur jejak lainnya (Ni, Cr, Co, Zn dan V). Secara keseluruhan, nilai koefisien korelasi untuk unsur-unsur jejak menunjukkan nilai positif yang menggambarkan adanya kesamaan sifat mobilitas pada profil pelapukan.

Pengkayaan Co terjadi pada zona peralihan antara saprolit-limonit dengan kadar Co mencapai 0,15 wt% dibandingkan dengan batuan dasar (0,01 %). Pada profil pelapukan, Co diserap oleh koloid Mn⁴⁺ dan/atau bergabung dengan mineral oksida Mn (Traore *et al.*, 2008; Manceu *et al.*, 1987) seperti litioforit atau asbolan. Presipitasi Co lebih efektif pada pH yang lebih tinggi, karena solubilitas produk Co(OH)₂ lebih rendah daripada Mn(OH)₂ dan Co yang diserap menjadi permanen terhadap waktu. Kondisi ini dapat dijelaskan oleh adanya pengkayaan absolut Co sebesar +609% dan faktor pengkayaan Mn mencapai +892%.

Keseluruhan profil yang dianalisis pada blok Petea menunjukkan bahwa konsentrasi unsur jejak (Cr dan Co) sedikit lebih rendah dibandingkan dengan profil blok barat. Hal ini mungkin disebabkan oleh perbedaan: (a) konsentrasi unsur pada protolit, (b) laju disolusi mineral pada protolit sebagai sumber unsur, (c) bentuk keterdapatan unsur-unsur tersebut dalam mineral pada masing-masing profil.

4.4 Siklus Ni pada profil

Blok barat Soroako: Skematik Ni ditransfer dan diakumulasikan pada profil pelapukan blok barat diilustrasikan pada Gambar 3. Nikel awalnya terdapat pada struktur olivin dan dilepaskan selama tahap awal pelapukan yang mengakibatkan peningkatan kelimpahan Ni secara absolut. Densitas rekahan dapat mengendikan pembentukan mineral-mineral sekunder yang kaya Ni pada zona saprolit. Sebagian larutan pembawa Ni yang berasal dari bagian atas saprolit bergerak ke bawah dan terendapkan sebagai material pengisi rekahan pada dasar profil membentuk “garnierit”. Sebagian Ni lainnya diserap oleh besi hidroksida dan sejumlah kecil terikat dengan smektit dan talk residual. Kombinasi dari material ini membentuk zona saprolit dengan kadar Ni total mencapai 4,2 % berat dan pengkayaan absolut mencapai 467 %.

Pelapukan secara progressif mengakibatkan ketidakstabilan fasa pembawa Ni sehingga terjadi remobilisasi Ni pada zona limonit. Sebagian Ni diendapkan kembali bersama dengan oksida Mn dalam bentuk asbolan dan litioforit menyebabkan pengkayaan Ni yang ekstrim. Akan tetapi, Ni tidak terikat secara permanen setelah diadsorpsi oleh oksida Mn, sejalan dengan waktu Ni dilepaskan kembali ke dalam larutan ketika pH menurun. Rekrystalisasi ferrihidrit menjadi goetit juga melepaskan Ni, sehingga kadar Ni pada zona limonit menurun.

Goetit mengandung Ni rendah pada limonit, namun mineral ini penting pada bijih oksida karena jumlahnya dominan. Chen *et al.* (2004) melaporkan bahwa kadar rata-rata goetit pada sampel Soroako sebesar 1,4 % berat. Relatif rendahnya unsur Ni yang dapat diikat oleh struktur goetit kemungkinan disebabkan oleh perbedaan valensi antara Ni^{2+} dan Fe^{3+} . Substitusi Ni menyebabkan distorsi goetit, sehingga untuk mencapai kestabilan, dibutuhkan kompensasi muatan dengan jalan mengakomodir unsur-unsur lain. Pada zona limonit merah, Ni menurun sangat drastis dengan kadar mencapai 0,5 % berat. Reduksi Ni berlanjut melalui proses disolusi dan rekrystalisasi goetit yang menyebabkan leaching Ni pada kondisi pH rendah seperti yang umum terjadi pada wilayah tropis. Lander dkk., (2009) menyimpulkan bahwa Ni dilepaskan dari hematit melalui transformasi termal mineral goetit.

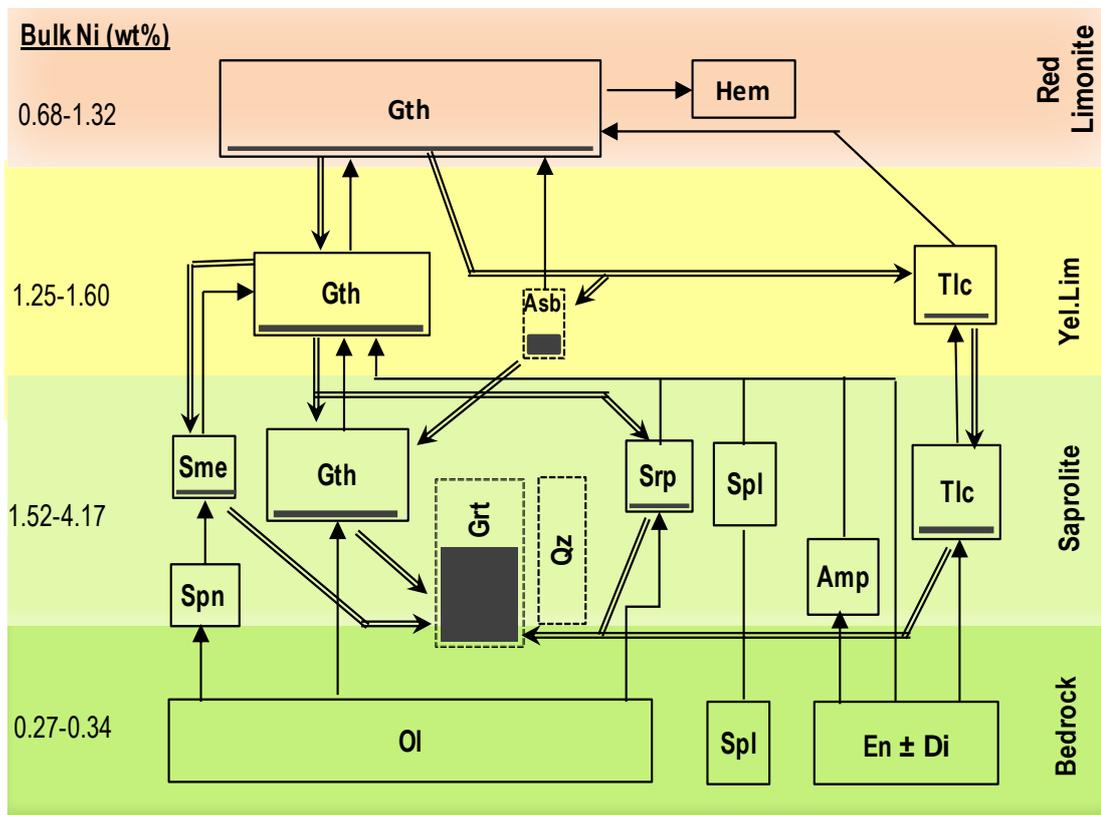
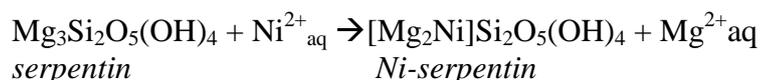


Figure 3 Skematis model yang menggambarkan siklus Ni pada profil pelapukan blok barat Soroako. Catatan: — = perkiraan kadar Ni pada mineral, → = transformasi mineral, ⇒ = transfer nikel.

Blok Petea: Skema transfer nikel diantara mineral-mineral pada profil blok Petea diperlihatkan pada Gambar 4. Nikel umumnya terdapat pada serpentin dan sejumlah kecil pada klorit dan piroksin. Pada awal pelapukan, serpentin tidak mengalami perubahan, namun proses pengkayaan supergen terjadi melalui reaksi pertukaran ion. Pada proses ini sebagian ion Mg^{2+} digantikan oleh Ni^{2+} (Golightly, 1981) pada struktur serpentin dengan reaksi sebagai berikut:



Sebagian Ni juga terikat dengan smektit, maghemit, dan besi hidroksida. Material ini secara kumulatif membentuk zona saprolit dengan kadar Ni total antara 1,2 – 2,4 % berat. Perhitungan keseimbangan massa dengan asumsi volume tetap menunjukkan pengkayaan absolut Ni mencapai 460 %.

Pelletier (1996) mengatakan bahwa serpentin residual dan besi hidroksida dapat mengikat Ni hingga 5 % berat pada zona saprolit tanpa adanya presipitasi garnierit. Rekrystalisasi limonit menjadi goetit akan melepaskan Ni ke larutan kemudian larutan yang jenuh Ni mengalir ke bawah dan mengalami saturasi. Jika mineral pada zona saprolit jenuh dengan Ni, maka garnierit dapat terbentuk. Akan tetapi, garnierit pada blok Petea tidak berkembang dengan baik seperti pada kasus blok barat. Hal ini dipengaruhi oleh sifat kimia-fisik serpentin residual seperti kristalinitas dan ukuran butir. Kristal lizardit dapat mengakomodasi Ni terutama jika kristalnya halus. Dengan demikian, serpentin pada zona pelapukan mempunyai peran penting sebagai perangkap Ni dan hal ini dapat menghambat pembentukan garnierit.

Mobilisasi Ni memerlukan suatu mekanisme dimana larutan bergerak dari pH rendah (asam) pada zona limonit ke pH tinggi pada zona saprolite (alkalin). Dengan berjalannya proses pelapukan di atas muka airtanah, serpentin yang kaya Ni mengalami leaching, pengendapan goetit dan setempat terjadi pembentukan oksida Mn. Material ini membentuk zona limonit yang didominasi oleh goetit. Sejumlah kecil Ni masih tertahan dalam goetit dan sebagian lainnya diserap oleh oksida Mn. Dengan demikian, kadar Ni total pada zona limonit lebih rendah dengan kisaran antara 1,0 dan 1,5 % berat.

Nikel terlarut selanjutnya meresap ke bawah dan sebagian lainnya terikat atau diserap oleh maghemit, klorit residual dan goetit kristal buruk yang terletak pada saprolit atas. Sebagian Ni mengendap kembali pada profil bagian bawah membentuk garnierit atau mensubstitusi Mg pada serpentin residual sehingga terjadi pengkayaan Ni yang ekstrim (Elias dkk, 1981).

Pada zona puncak profil laterit (limonit merah), konsentrasi Ni sangat menurun dengan kadar antara 0,5 – 1,0 % berat. Disolusi oksida besi pada limonit merah menyebabkan rekrystalisasi goetit yang diikuti oleh transformasi termal menjadi maghemit atau hematit. Pada zona ini, Ni larut dalam kondisi asam kemudian bergerak ke bawah dan terpresipitasi pada bagian bawah profil ketika lingkungan berubah menjadi agak basa (alkalin).

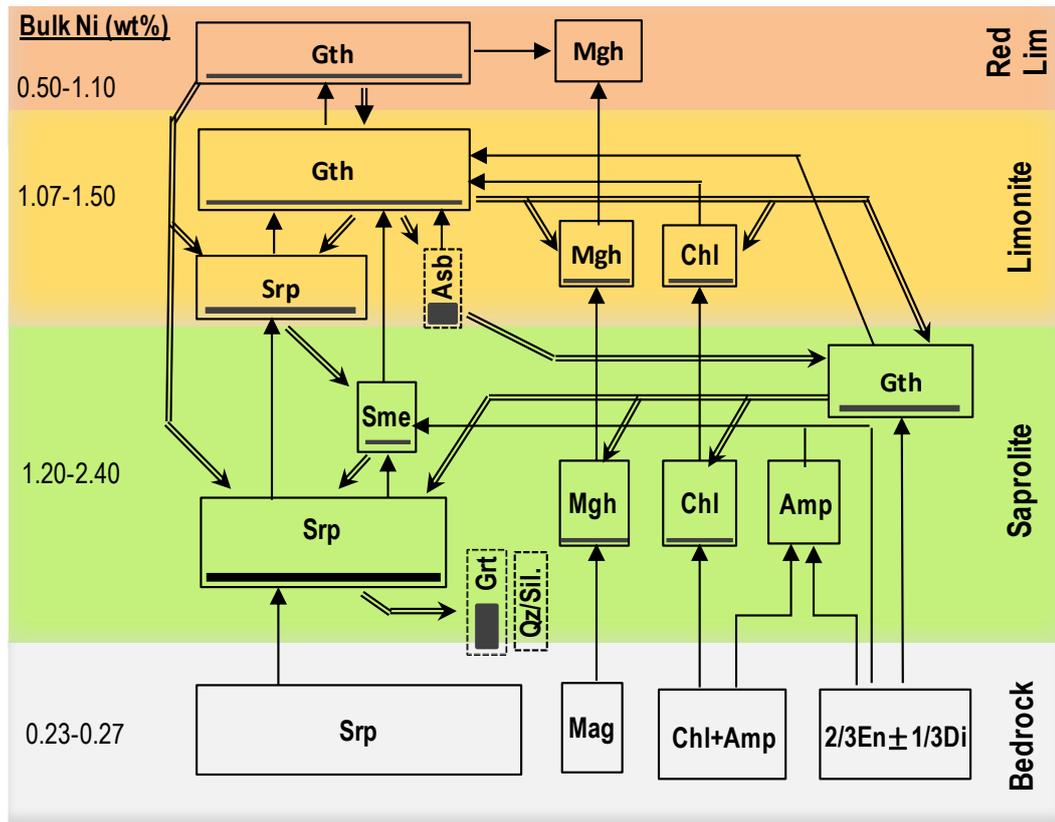


Figure 4 Skematik model yang menunjukkan siklus Ni pada profil pelapukan blok Petea. Catatan: — =estimasi proporsi Ni pada mineral, \Rightarrow =transfer nikel, \rightarrow =transformasi mineral.

4.5 Mula jadi bijih Ni-Mg silikat (garnierit)

Blok barat: Garnierit pada blok barat umumnya terdapat pada bagian bawah profil dalam bentuk urat pengisi rekahan, gores patahan, dan sebagai komponen matriks pada breksi peridotit. Warna material hijau sedang hingga pucat dan berkembang secara ekstensif pada peridotit tak terserpentinisasi dengan intensitas rekahan yang tinggi. Ditafsirkan bahwa garnierit pada blok barat terbentuk paling sedikit dalam dua generasi yaitu garnierit tahap awal dan garnierit tahap akhir.

Garnierit tahap awal meliputi vein-1 dan lapisan tipis pada rekahan. Ini berasal dari presipitasi larutan jenuh Ni yang dihasilkan oleh dissolusi mineral primer magmatis dan leaching mineral pembawa Ni lainnya dari bagian atas profil. Reaktivasi tektonik mungkin terjadi sehingga menyebabkan pergeseran rekahan dan membentuk gores patahan. Proses tektonik juga menimbulkan blok-blok

batuan dan membentuk zona breksiasi dengan fraksi bukaan yang tinggi sebagai tempat pengendapan garnierit (Golightly, 2010). Keterdapatannya matriks garnierit yang kaya Ni sebagai komponen pada breksi menunjukkan bahwa garnierit fase akhir berkaitan dengan breksiasi yang dipicu oleh *hydro-fracturing*. Suplai Ni bisa berasal dari disolusi garnierit fase awal ditambah dengan hasil pelindian Ni dari bagian atas profil. Urutan pengendapan adalah: *Vein-I + slickensided fault coating* → *Vein-II + matrices/clasts*.

Bukti tekstur yang diperoleh dari analisis mikroskopis dan SEM (contoh: colloform banding, fibrous aggregates) serta material kristal buruk seperti yang diindikasikan oleh difraktometri sinar X menunjukkan bahwa garnierit terendapkan dari suspensi koloid pada kondisi suhu rendah (Brindley *et al.*, 1977). Hasil analisis mineralogi menunjukkan bahwa garnierite pada blok barat Soroako terdiri dari percampuran antara seri kerolit-pimellit dan lizardit-nepouit dengan sedikit talk-willemsit dan smektit yang kaya Ni. Variasi mineralogy yang diamati memberikan indikasi adanya perubahan kimia larutan secara periodik terutama aktifitas Si, Mg, dan Al (Golightly, 1981). Silikat lapisan 2:1 (*talclike phases*) cenderung terpresipitasi atas silikat lapisan 1:1 (*serpentine-like phases*) jika aktifitas Si lebih tinggi daripada Mg namun aktifitas Al rendah (Birsoy, 2002). Kehadiran kristal-kristal magnetit yang berasosiasi dengan garnierit menunjukkan bahwa besi tidak diakomodasi dalam struktur mineral penyusun garnierite. Secara alternatif, ketidakhadiran besi dalam struktur garnierit karena besi tidak larut pada kondisi oksidasi. Garnierit dapat terpresipitasi pada suhu normal dari larutan pada kondisi fugasitas oksigen yang tinggi (Pelletier, 1996; Song *et al.*, 1995). Presipitasi garnierit memungkinkan terjadi pada bagian bawah profil akibat perubahan pH larutan. Pada zona atas profil, larutan bersifat agak asam ($\text{pH} < 7$). Namun pada bagian bawah profil, pH larutan menjadi lebih basa ($\text{pH} > 7$) akibat adanya interaksi air-batuan (Taylor and Eggleton, 2001).

Presipitasi dimulai dari pusat urat kemudian proses “crack-seal” berkembang pada dua sisi ke arah batuan samping membentuk urat *antitaxial* (Passchier and Trouw, 2000; van der Pluijm and Marshak (2004). Pertambahan retakan terjadi pada batas antara pita-pita atau serabut dan dinding urat akibat ikatan yang lemah. Material pengisi rekahan dan matriks memerlukan bukaan retakan aktif yang memungkinkan pengendapan minerals (Cluzel and Vigier, 2008). Analisis secara mikro memotong urat kerolit menunjukkan bahwa konsentrasi Ni menurun; sedangkan Mg meningkat dari pusat ke arah sisi urat. Bukti ini berlawanan dengan studi sebelumnya pada urat serpentin oleh Andreani dkk. (2004) yang menyimpulkan bahwa komposisi kimia antara pita-pita yang berbeda relatif konstan.

Secara umum, kelangkaan garnierit yang terdapat pada blok Petea dibandingkan dengan blok barat mungkin sebagian di kendalikan oleh perbedaan sifat fisika-kimia batuan protolit dan hasil pelapukannya. Peridotit pada blok barat Soroako adalah un-serpentinized dan massif. Intensitas rekahan yang tinggi memberikan kemudahan untuk melapuk sehingga ion Ni lebih mudah lepas dari ikatannya dan masuk ke larutan. Rekahan juga dapat bertindak sebagai jalan untuk perkolasi larutan yang jenuh Ni dengan cepat ke bawah dan mengalami presipitasi di bagian bawah profil membentuk urat-urat Ni-Mg hydrous silikat (garnierit) dimana kondisinya lebih alkalin.

Sebaliknya, batuan dasar pada blok Petea terutama tersusun oleh peridotit dengan tingkat serpentinisasi tinggi dan tekstur halus. Analisis XRD menunjukkan bahwa mineralogi didominasi oleh lizardit. Akan tetapi pelapukan kimia yang intensif terhadap serpentin primer menyebabkan pembentukan saprolit yang disusun oleh serpentin residual dengan kristal jelek. Menurut Pelletier (1996) saprolit yang berasal dari peridotit serpentinized menunjukkan kohesi yang lebih baik. Hal ini dapat menghambat presipitasi garnierit karena ion Ni^{2+} dalam larutan lebih mudah diserap oleh permukaan kristal atau dapat mensubstitusi ion Mg^{2+} pada struktur serpentin residual.

Ringkasnya, garnierit terbentuk melalui presipitasi larutan pembawa Ni dalam bentuk material pengisi rekahan (terutama pada blok barat) dan melalui proses

“crack seal” (terutama pada blok Petea). Meskipun mekanisme pembentukan garnierit sebetulnya kompleks, namun Gali *et al.* (2012) menjelaskan bahwa proses pengkayaan supergen Ni secara temporal dan spasial memiliki dua trend yaitu: leaching Ni dari oksida besi pada zona limonit oleh air meteorik dan siklus disolusi filosilikat miskin Ni diikuti oleh presipitasi filosilikat kaya Ni. Rendahnya mobilitas silika menyebabkan peningkatan aktifitas yang sejalan dengan waktu akan mencapai level saturasi pada profil. Presipitasi bijih Ni kemudian dicirikan oleh urutan pembentukan fasa mineral yang secara progressif kaya Ni dengan kandungan Si lebih tinggi. Dengan demikian, maka sekuen pengendapan adalah: Ni-serpentin --- Ni-kerolit --- Ni-sepiolit.

4.5 Perbandingan dengan endapa laterit Ni lainnya

Endapan laterit Soroako mewakili bijih Ni yang terbentuk akibat pelapukan kimia intensif batuan ultramafik pada wilayah iklim tropis dengan curah hujan rata-rata 2900 mm/tahun dan temperatur 24 °C. Kadar Ni yang bernilai ekonomis secara dominan terdapat pada fasa silikat sehingga deposit dapat digolongkan sebagai tipe bijih silikat (tipe A) menurut definisi Brand *et al.* (1998). Dalam kaitannya dengan protolit dan sejarah iklim, Endapan laterit Ni Soroako dapat dibandingkan dengan endapan di New Caledonia (Troly *et al.*, 1979) dan Cerro Matoso di Colombia (Gleeson *et al.*, 2004). Semua deposits ini terbentuk oleh hasil pelapukan batuan ultramafik kumulus dari sekuen bawah kompleks ofiolit yang telah mengalami obduksi menjadi daratan sejak Kala Miosen Atas.

Deposits lainnya seperti Murin-Murin dan Kalgoorlie, Western Australia (Wells and Butt, 2006; Elias *et al.*, 1981) dan Niquelandia, Brazil (Colin *et al.*, 1990) adalah tipikal endapan tipe clay silikat dengan kadar Ni menengah. Endapan ini berkembang di atas batuan komatitik peridotit serpentinized yang berumur Archean dan kadar Ni tertinggi terkonsentrasi pada zona smektit dengan kadar Ni mencapai 2,5 %. Di Jacuba, Niquelandia, Brazil, profil laterit nikel dibentuk oleh hasil pelapukan piroksenit dimana smektit yang berkembang

berfungsi sebagai perangkap Ni pada saat Ni bermigrasi secara lateral dari hasil pelapukan dunit dan harzburgit yang terletak di sampingnya.

Tipe bijih oksida umumnya memiliki kadar Ni lebih rendah dibandingkan dengan dua tipe bijih sebelumnya. Contoh dari tipe endapan ini dapat dijumpai di Moa Bay di Kuba (Roque-Rossel et al, 2010); Goro di New Caledonia (Freyssinet et al., 2005); Greenvale, Queensland (Zeissink, 1969) dan Cawse di Australia (Freyssinet et al., 2005) serta Caldag di Turki (Thorne et al., 2009).

4.6 Implikasinya terhadap pengolahan hidrometalurgi bijih

Meskipun belum ada pabrik yang dibangun untuk mengolah bijih laterit Ni Soroako dengan metode hidrometalurgi, namun, hasil percobaan leaching memberikan beberapa wawasan jika proses leaching ini merupakan pilihan untuk mengolah bijih laterit Ni ke depan. Untuk sampel WO, dissolusi olivin secara total meningkatkan konsentrasi ion Mg dalam larutan hasil leaching. Walaupun seluruh Ni terlindih dari olivin, namun Mg yang terlindih juga tinggi, sehingga tidak menguntungkan karena memerlukan banyak asam (Whittington and Muir, 2000). Hasil percobaan leaching juga menunjukkan bahwa sampel blok barat mempunyai perolehan Ni rendah. Keberadaan Ni-kerolit (*talc-like phase*) sebagai pembawa nikel mungkin salah satu faktor rendahnya ekstraksi Ni. Soler *et al.* (2008) menyatakan bahwa laju disolusi garnierit tidak kongruen pada kondisi asam pekat yang mengindikasikan laju disolusi serpentin lebih cepat daripada talk. Perbedaan struktur kristal antara *serpentine-like phase* (lapisan 1:1) dan *talc-like phases* (lapisan 2:1) ditunjang oleh tingginya ikatan hidrosil serpentin merupakan alasan rendahnya perolehan Ni dari sampel bijih barat (WO). Kehadiran mineral-mineral tak larut tidak mempengaruhi leaching Ni namun dapat berpotensi sebagai produk limbah.

Pada kasus bijih timur (EO) dari blok Petea, tingginya laju disolusi serpentin residual menyebabkan ekstraksi Ni bersama dengan Mg dan Fe serta menghasilkan silika amorf. Hal ini mungkin disebabkan oleh penggunaan asam sulfat pekat (~3M). Dalam prakteknya, pembentukan silika amorf dapat

menimbulkan masalah terutama pada pemisahan logam lebih lanjut dari larutan hasil pelindian (Terry, 1983) karena dapat menurunkan daya saring lumpur yang akhirnya memerlukan banyak air untuk mengatasinya. Namun demikian, residu dari silika amorf ini lebih mudah digerus dan sangat reaktif dibandingkan dengan silika kristalin, sehingga berpotensi sebagai bahan baku untuk memproduksi silikon karbida (Hirasawa and Horita, 1987). Di sarankan bahwa bijih saprolit dari blok Petea mempunyai potensi masa depan dalam mengekstraksi nikel dengan menggunakan proses leaching pada tekanan atmosfer.

Kendala utama dalam penerapan teknologi pelindian asam untuk memperoleh Ni dan Co dari bijih saprolit berkadar magnesium tinggi adalah besarnya jumlah kebutuhan asam. Namun demikian, perkembangan terkini mengenai teknologi leaching (McDonald and Whittington, 2008) menunjukkan bahwa bijih saprolit yang reaktif dapat digunakan dalam leaching tahap kedua untuk menetralkan larutan asam hasil dari proses HPAL.

Hasil studi leaching ini seyogyanya memberikan petunjuk dalam memahami proses pengembangan teknologi ekstraksi Ni dari bijih laterit. Karena kinetika dan mekanisme leaching mineral dalam bijih bervariasi, maka diperlukan upaya untuk meningkatkan ekstraksi Ni secara selektif dengan mengubah kondisi pelindian (misal. penggunaan asam encer) dengan variasi suhu.

Secara ringkas, rendahnya perolehan Ni yang dicapai dari bijih saprolit kedua blok disertai dengan disolusi Mg dan Fe dapat membatasi aplikasi teknologi berbasis asam sulfat pada tekanan atmosfer. Namun demikian, jika dilakukan bersama dengan leaching tekanan tinggi (HPAL), maka leaching pada tekanan atmosfer (AL) tampaknya dapat memberi harapan karena akan mengonsumsi asam secara efektif. Mineralogi dan reaktifitas bijih sangat kritis dalam mengekstraksi Ni yang tinggi (McDonald and Whittington, 2008). Dengan demikian, tanpa studi awal mineralogi yang sesuai, maka hasil leaching berpotensi menimbulkan kesalahan penapsiran.

5. Kesimpulan dan Harapan Selanjutnya

5.1 Kesimpulan

Karakteristik mineralogi dan geokimia endapan laterit nikel Soroako dihasilkan oleh interaksi antara faktor geologi dan iklim. Kehadiran batuan ultramafik yang sesuai merupakan faktor pengontrol utama terhadap pembentukan endapan laterit Ni yang bernilai ekonomis. Perbandingan antara endapan laterit yang terbentuk pada batuan peridotit terserpentinisasi dan yang tak terserpentinisasi disimpulkan sebagai berikut:

1. Petrologi dan mineralogi batuan ultramafik tak terserpentinisasi pada blok barat dicirikan oleh harzburgit terekah dan sedikit dunit yang didominasi oleh olivin (>70 % vol) dengan kadar NiO tinggi. Batuan ini sangat cocok untuk pembentukan bijih laterit Ni kadar tinggi. Sebaliknya, peridotit pada blok Petea terutama disusun oleh serpentin (> 70 % vol) yang menunjukkan tekstur pseudomorfik jala setelah olivin dan setempat bastit setelah piroksin. Proses serpentinisasi sebelum pelapukan menyebabkan tekstur batuan asal berubah dan sedikit penurunan kadar nikel.
2. Distribusi mineral pada profil pelapukan batuan tak terserpentinisasi dari blok barat mengandung fasa sekunder terutama goetit dan garnierit; sedangkan pelapukan peridotit terserpentinisasi pada blok Petea menghasilkan pembentukan zona saprolit yang didominasi oleh serpentin residual. Proses pelapukan sempurna pada dua blok menyebabkan pembentukan zona limonit pada profil atas yang berkomposisi goetit. Distribusi unsur-unsur pada profil pelapukan menunjukkan bahwa Mg dan Si terdepleksi kuat ke arah atas profil, namun Si terindih lebih cepat pada profil blok barat dibanding dengan profil pada blok Petea. Pengkayaan Co dan Mn terjadi pada limonit bawah; sedangkan Fe, Al, Ti, dan Cr terkonsentrasi secara residual pada zona limonit bagian atas.
3. Proses supergen Ni dengan asumsi volume tetap menunjukkan dua mekanisme pengkayaan Ni pada larutan, yakni pelindian Ni dari zona limonit oleh air

meteorik dan siklus disolusi kongruen mineral primer pembawa Ni secara berulang. Pada blok barat, presipitasi Ni terutama berlangsung pada front pelapukan melalui reaksi antara Si dan Mg membentuk fillosilikat sekunder (garnierit). Sebaliknya, pengkayaan Ni pada blok Petea terjadi melalui reaksi pertukaran ion (*exchange reaction*) dimana Ni mensubstitusi Mg pada struktur kristal serpentin.

4. Garnierit lebih intensif dijumpai pada blok barat dibanding blok Petea dan terdapat pada bagian bawah profil. Asal mula garnierit dapat melalui satu atau dua proses berikut: *pengisian rekahan terbuka* yang berkembang pada batuan peridotit nir serpentinisasi di blok barat dan *crack-seal proses* yang berkembang pada batuan terserpentinisasi di blok Petea. Komposisi mineral garnierit blok barat merupakan percampuran antara seri kerolit-pimellit, lizardit-nepouit, setempat seri talk-wilemseit dan Ni-smektit; sedangkan garnierit pada blok Petea terutama terdiri dari seri sepiolit-falkondoit dan sedikit seri kerolit-pimellit serta lizardit-nepouit. Variasi mineralogi dan tekstur mencerminkan perubahan kimia larutan secara episodic. Presipitasi garnierit dimulai dari larutan dengan rasio $\text{Si}/(\text{Ni}+\text{Mg})$ rendah diikuti oleh rasio $\text{Si}/(\text{Ni}+\text{Mg})$ yang tinggi dan Ni cenderung meningkat ke arah pusat material.
5. Sifat leaching bijih saprolit dari kedua blok menunjukkan bahwa kehadiran mineral silikat 2:1 (talc-like phase) sebagai mineral pembawa Ni pada bijih blok barat dan serpentin residual sebagai mineral pembawa Ni pada bijih saprolit blok Petea dapat menyebabkan perbedaan laju pelindian. Ekstraksi Ni dari bijih Petea lebih tinggi daripada bijih blok barat, meskipun secara umum laju pelindian kedua bijih masih rendah. Disolusi bersama antara Ni, Mg dan Fe menunjukkan bahwa leaching tidak selektif karena adanya serangan proton yang kuat pada unsur reaktif. Dalam kaitannya dengan proses hydrometalurgi, kondisi ini tidak menguntungkan karena akan mengkonsumsi banyak asam. Disolusi serpentin residual pada bijih saprolit Petea juga menghasilkan pembentukan silika amorf. Secara praktis, silika amorf ini dapat menghambat proses pemisahan lebih lanjut logam-logam berharga dari larutan.

5.2 Harapan Selanjutnya

Hasil penelitian ini harapan dan tawaran beberapa topik yang menarik untuk diteliti lebih lanjut sebagai berikut:

1. Hubungan antara pengkekaratan batuan dasar dan perkembangan endapan laterit nikel seperti ide yang dikemukakan oleh Golightly (1981). Spasi rekahan atau kerapatan kekar pada batuan dasar dapat mempengaruhi laju dan kedalaman pembentukan laterit. Ini menarik dan memungkinkan untuk mengukur kerapatan rekahan pada muka tambang sebelum dilakukan rehabilitasi dan jika rekaman pemboran dapat diperoleh. Blok barat Soroako merupakan lokasi terbaik untuk menguji ide ini.
2. Percobaan “leaching” lebih lanjut sebaiknya dilakukan pada bijih saprolit dengan menggunakan asam sulfat encer untuk menekan pelindian unsur-unsur yang tidak diinginkan terutama Mg dan Fe. Parameter lainnya seperti suhu, rasio larutan-padatan dan kecepatan pengadukan sebaiknya dipertimbangkan untuk menentukan kondisi leaching optimum. Menarik juga untuk melakukan studi leaching dalam memperoleh Ni dan Co berbasis teknologi asam klorida. Meskipun HCl lebih mahal daripada H_2SO_4 , namun studi sebelumnya menunjukkan bahwa perolehan Ni lebih efektif menggunakan asam klorida karena jumlah pelarut yang digunakan lebih sedikit dan Mg dapat diperoleh sebagai hasil samping. Bioleaching juga dapat dipertimbangkan untuk mengekstraksi logam dari bijih laterit karena dapat menawarkan teknologi bersih dengan kebutuhan energi dan biaya yang lebih rendah dibanding dengan proses konvensional.
3. Sangat dianjurkan untuk melakukan mikroanalisis baik untuk bijih awal maupun padatan sisa dengan menggunakan teknologi baru (seperti QEM-SCAN, EPMA dan LA-ICP-MS). Informasi ini sangat penting dalam menambah pemahaman yang lebih baik mengenai hubungan antara mineralogi, tekstur, kadar dan perolehan logam. Metode kuantitatif secara otomatis dalam mengkarakterisasi bijih merupakan hal mendasar dalam mengoptimasi metode pengolahan dan ekstraksi.

Daftar Pustaka

- Ahmad, W. 2008. *Nickel Laterites: Fundamental of chemistry, mineralogy, weathering processes, formation and exploration*, Unpublished Training Manual, Vale Inco – VITSL, 330 p.
- Andreani, M. Baronet, A. Boullier, A.M. and Gratier, J.P., 2004, A microstructural study of a “crack-seal” type serpentine vein using SEM and TEM techniques, *Eur. J. Mineral*, 16, 585 – 595.
- Barros de Oliveira, S.M. Trescases, J.J. and Melfi, A.J. 1992. Lateritic nickel deposits of Brazil. *Mineralium Deposita*, 27, 137 – 146.
- Birsoy, R. 2002. Formation of sepiolite-palygorskite and related minerals from solution. *Clays and Clay Minerals*, 50, 36 – 745.
- Bons, P.D. and Jessel, M.W., 1997, Experimental simulation of the formation of fibrous veins by localised dissolution-precipitation creep, *Mineralogical Magazine*, 61, 53 – 63.
- Brand, N.W. Butt, C.R.M. Elias, M. 1998. Nickel Laterite : classification and feature. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17 (4), 81- 88.
- Brindley, G.W. Bish, D.L. and Wan, H.M. 1977. The nature of kerolite, its relation to talc and stevensite. *Mineralogical Magazine*, 41, 443-452
- Caillaud, J. Proust, D. Righi, D. and Martin, F. 2004. Fe-rich clays in a weathering profile developed from serpentinite. *Cays and Clay Minerals*, 52, 779 – 791.
- Chen, T.T., Dutrizac, J.E., Krause, E., and Osborne, R. 2004. Mineralogical Characterization of Nickel Laterites From New Caledonia and Indonesia. Imrie, W.P. and Lane, D.M. Editors. *International Laterite Nickel Symposium, TMS, Charlotte*.
- Cluzel, D. And Vigier, B. 2008. Syntectonic mobility of supergene nickel ores of New Caledonia (Southwest Pacific). Evidence from garnierite veins and faulted regolith. *Resources Geology*, 58 (2), 161 – 170.
- Colin, F. Nahon, D. Trescases, J.J. and Melfi, A.J. 1990. Lateritic weathering of pyroxenites at Niquelandia, Goias, Brazil: The supergene behaviour of nickel. *Economic Geology*, 85, 1010 – 1023.
- Cooper, G.R.C. 2002. Oxidation and toxicity of chromium in ultramafic soils in Zimbabwe. *Applied Geochemistry*, 17, 981 – 986.
- Cornell, R.M. and Schwertmann, U. 2003. *The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrences and uses*. 2nd Edition. Wiley-VCH., NewYork, 664 p.
- Duzgoren-Aydin, N.S. Aydin, A. Malpas, J. 2002. Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering Geology*, 63, 99 – 119.
- Eggleton, R.A. 1986. Relation between crystal structure and silicate weathering rates: in Colman, S.M & Dethier, D.P, *Rates of chemical weathering of rock and minerals*, Academic Press, Orlando, pp. 21 – 40.
- Elias, M. Donalson, M.J. and Giorgetta, N. 1981. Geology, mineralogy, and chemistry of lateritic nickel-cobalt deposits near Kalgorlie, Western Australia. *Economic Geology*, 76, 1775 – 1783.
- Freyssinet PH. Butt, C.R.M. Morris, R.C. Piantone, P. 2005. Ore-forming processes related to lateritic weathering. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, pp. 681 – 722.
- Frost, R.L. and Beard, J.S. 2007. On silica activity and serpentinization. *Journal of Petrology*, 48 (7), 1351 – 1368.

- Gahlan, H.A. Arai, S. Ahmed, A.H. Ishida, Y. Abdel-Aziz, Y. M. and Rahimi, A. 2006. Origin of magnetite veins in serpentine from the Late Proterozoic Bou-Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco: An implication for mobility of iron during serpentinization. *Journal of African Earth Sciences*, 46, 318 – 330.
- Galan, E. and Pozo, M. 2011. Palygorskite and sepiolite deposits in continental environments. Description, Genetic Patterns and Sedimentary Settings: in *Development in Palygorskite-Sepiolite Research*, Galan E. and Singer, A. Editors, Elsevier, pp. 125 – 174.
- Gali, S., Soler, J.M., Proenza, J.A., Lewis, J.F., Cama, J., and Tauler, E., 2012, Ni enrichment and stability of Al-free garnierite solid-solutions, A thermodynamic approach, *Clays and Clay Minerals*, 60, 121 – 135.
- Georgiou, D. and Papangelakis, V.G. 2009. Behaviour of cobalt during sulphuric acid pressure leaching of a limonitic laterite. *Hydrometallurgy*, 100, 35 – 40.
- Gleeson, S.A. Herrington, R.J. Durango, J. Velasquez, C.A. and Koll, G. 2004. The Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni Laterite Deposit, Montelibano, Colombia. *Economic Geology*, 99, 1197 – 1213.
- Golightly, J.P. 1979a. Nickeliferous laterites: a general description, in Evans, D.J.I. Shoemaker, R.S. and Veltman, H. eds. *International Laterite Symposium*, New York, Society of Mining Engineers, pp. 3–23.
- Golightly, J.P. 1979b. Geology of Soroako nickeliferous deposits, in Evans, D.J.I. Shoemaker, R.S. and Veltman, H. eds., *International Laterite Symposium*: New York, Society of Mining Engineers, pp. 38 – 56.
- Golightly, J.P. 1981. Nickeliferous laterite deposits. *Economic Geology 75th Anniversary Volume*, 710 – 735.
- Golightly, J.P. 2010. Progress in understanding the evolution of nickel laterites. *Society of Economic Geologist, Special Publication*, 15, pp. 451 – 486.
- Gupta, C.K. 2003. *Chemical metallurgy: principle and practice*. Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 811 p.
- Harder, H. 1977. Clay mineral formation under lateritic weathering conditions. *Clay Minerals*, 12, 281 – 288.
- Hirasawa, R. and Horita, H., 1987, Dissolution of nickel and magnesium from garnierite ore in an acid solution, *International Journal of Mineral Processing*, 19, 273-284.
- Jenne, E.A. 1968. Control on Mn, Fe, Co, Ni, Cu, and Zn concentration in soils and water: the significant role of hydrous Mn and Fe oxides. *Advance in Chemistry Series*, 73, 337-387
- Jurinski, J.B. and Rimstidt, J.D. 2001. Biodurability of talc. *American Mineralogist*, 86, 392 – 399.
- Lambiv Dzemua, G. and Gleeson, S.A. 2012. Petrography, mineralogy, and geochemistry of the Nkamouna serpentinite: Implications for the formation of the cobalt-manganese laterite deposits, Southeast Cameroon. *Economic Geology*, 107, 25 – 41.
- Landers, M. and Gilkes, R.J. 2007. Dehydroxylation and dissolution of nickeliferous goethite in New Caledonia lateritic Ni ore, *Applied Clay Science*, 35, 162 – 172.
- Landers, M. Gilkes, R.J. Wells, M. 2009. Dissolution kinetics of dehydroxylated nickeliferous goethite from limonitic lateritic nickel ore. *Applied Clay Science*, 42, 615 – 624.
- Liu, K. Chen, Q.Y. Hu, H.P. Yin, Z.L. 2009. Characterization and leaching behavior of lizardite in Yunjiang laterite ore. *Applied Clay Science*, 47, 311 – 316.

- Manceau, A. Liorca, S. and Calas, G. 1987. Crystal chemistry of cobalt and nickel in lithiophorite and asbolane from New Caledonia. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 51, 105 – 113.
- Marker, A. Friedrich, G. Carvalho, A. Melfi, A. 1991. Control of the distribution of Mn, Co, Zn, Zr, Ti and REEs during the evolution of lateritic covers above ultramafic complexes. *Journal of Geochemical Exploration*, 40, 361 – 383.
- McDonald, R.G. and Whittington, B.I. 2008a. Atmospheric acid leaching of nickel laterites review, Part I. Sulphuric acid technologies. *Hydrometallurgy*, 91, 33 – 55.
- Mevel, C. 2003. Serpentinization of abyssal peridotite at mid-ocean ridges. *Comptes Rendus Geoscience*, 335, 825 – 852.
- Nahon, D.B. Colin, F. and Tardy, Y. 1982. Formation and distribution of Mg, Fe, Mn smectites in the first stages of the lateritic weathering of forsterite and tephroite. *Clay Minerals*, 17, 339 – 348.
- Nahon, D.B. Boulange, B. and Colin, F. 1992. Metallogeny of weathering: an Introduction. in Martini and Chesworth, Editors, *Weathering, Soils & Paleosols*, Elsevier, Amsterdam, 445-471.
- Noack, Y. Colin, F. Nahon, D. Delvigne, J. and Michaux, L. 1993. Secondary-mineral formation during natural weathering of pyroxene: Review and thermodynamic approach. *American Journal of Science*, 293, 111 – 134.
- Okada, K. Temuujin, J. Kameshima, Y. And MacKenzie, K.D.J. 2003. Selective acid dissolution of talc. *Clay Science*, 12, pp. 159 – 165.
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 2005, *Microtectonics*, Springer, Berlin.
- Pelletier, B.G. 1996. Serpentine in nickel silicate ore from New Caledonia: Melbourne, Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series 6/96, 197–205.
- Price, J.R. and Velbel, M.A. 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles on heterogenous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*, 202, 397 – 416.
- Ramsay, J.G. 1980. The crack-seal mechanism of rock deformation. *Nature*, 284, 135–39.
- Roque-Rossel, J. Mosselmans, J.F.W. Proenza, J.A. Labrador, M. Gali, S. Atkinson, K.D. and Quinn, P.D. 2010. Sorption of Ni by “lithiophorite-asbolane” intermediates in Moa Bay lateritic deposits, eastern Cuba. *Chemical Geology*, 275, 9 – 18.
- Scout, M.K. 2008. Regolith geochemistry of elements, (In: *Regolith Science*: Scott, M.K. and Pain, C.F, editors), Springer-CSIRO Publishing.
- Shervais, J.W. Kolesar, P. and Andreasen, K. 2005. A Field and Chemical Study of Serpentinization— Stonyford, California: Chemical Flux and Mass Balance. *International Geology Review*, 47, 1 – 23.
- Song, Y. Moon, H.S and Chon, H.T., 1995, New occurrence and characterization of Ni-serpentine in Kwangcheon area, Korea, *Clay Minerals*, 30, 211 – 224.
- Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rocks its proper name. *Earth Science Reviews*, 12, 1 – 33.
- Tardy, Y. 1997. *Petrology of laterites and tropical soil*. Balkema, Amsterdam.
- Tauler, E. Proenza, J.A. Gali, S. Lewis, J.F. Labrador, M. Garcia Romero, E. Suarez, M. Longo, F. and Bloise, B. 2009. Ni-sepiolite-falcondoite in garnierite mineralization from the Falcondo Ni-laterite deposits, Dominican Republic, *Clay Minerals*, 44, 435 – 454.
- Taylor, G. and Eggleton, R.A. 2001. *Regolith geology and geomorphology*, Wiley, New York.
- Terry, B. 1983. The acid decomposition of silicate minerals Part I. Reactivities and modes of dissolution of silicates. *Hydrometallurgy*, 10, 135 – 150.

- Thorne, R. Herrington, R. and Roberts, S. 2009. Composition and origin of the Caldag oxide nickel laterite, W. Turkey. *Mineralium Deposita*, 44, 581 – 595.
- Traore, D. Beauvais, A. Chabaux, F. Peiffert, C. Parisot, J.C. Ambrosi., J.P. Colin, F. 2008. Chemical and physical transfers in an ultramafic rock weathering profile: Part 1. Supergene dissolution of Pt-bearing chromite. *American Mineralogist*, 93.
- Troly, G. Esterlie, M. Pelletier, B. and Reibell, W., 1979, Nickel deposits in New Caledonia: Some factors influencing their formation, in Evans, D.J.I. Shoemaker, R.S. and Veltman, H. eds., *International Laterite Symposium*: New York, Society of Mining Engineers, pp. 85 – 119.
- Van der Pluijm, B. A and Marshak, S., 2004, *Earth Structure, An Introduction to Structural geology and Tectonics*, W.W. Norton and Company, New York
- Wang, X.M. Zeng, Z.G. Liu, C.H. Chen, J.B. Yin, X.B. Wang, X.Y. Chen, D.G. Zhang, G.L. Chen, Sh. Li, K. Ouyang, H. 2009. Talc-bearing serpentinized peridotites from the southern Mariana forearc: implications for aseismic character within subduction zones. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 27 (3), 667-673.
- Wells, M.A. Ramanaidou, E.R. Verral, M. and Tessarolo, C. 2009. Mineralogy and crystal chemistry of “garnierites” in the Goro lateritic nickel deposit, New Caledonia. *European Journal of Mineralogy*, 21, 467 – 483.
- Wells, M.A. and Butt C.R.M. 2006. *Geology, geochemistry and mineralogy of the Murin Murin nickel laterite deposit*. CRC-LEME Open File Report, 207.
- White, A.F. 2008. Quantitative approaches to characterizing natural chemical weathering rates. In Brantley, S.L. Kubicki, J.D and White, A.F: *Kinetic of Water-Rock Interaction*. Elsevier, pp. 469 – 544.
- Whittington, B.I. and Muir, D. 2000. Pressure acid leaching of nickel laterite: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Reviews*, 21, 527 – 600.
- Wiltzco, D.V. and Morse, J.W. 2001. Crystallization pressure versus “crack-seal” as the mechanism for banded veins. *Geology*, 29, 79 – 82.
- Yalcin, H. and Bozkaya, O., 2004, Ultramafic-rock-hosted vein sepiolite occurrences in the Ankara ophiolite melange, central Anatolia, Turkey. *Clays and Clay Minerals*, 52, 227 – 239.
- Zeissink, H.E. 1969. The mineralogy and geochemistry of a nickeliferous laterite profile (Greenvale, Queensland, Australia). *Mineralium Deposita*, 4, 132 – 152.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. DATA PRIBADI

N a m a : **Sufriadin**
Tempat/Tgl lahir : Enrekang/17 Agustus, 1966
Jenis Kelamin : Laki-laki
Kebangsaan : Indonesia
No. Induk Pegawai : 196608172000121001
Golongan : III-C
Pekerjaan : Dosen
Institusi : Universitas Hasanuddin
Fakultas/Jurusan : Fakultas Teknik/Teknik Pertambangan
Alamat Kantor : Jl. Perintis Kemerdekaan KM.10 Tamalanrea,
Makassar 90245; Tel/fax.+62 0411 580202
e-mail : *sufriadin_as@yahoo_com*
Alamat Rumah : Jl. Gn. Lompobattang 206A Makassar 90114
No. Telp./HP : (062)- 0411-322356; 081342760137
Nama Istri : Warzukni Wagimin, SE
Nama Anak : 1. Nurul Muslimah
2. Muh. Zahran Mubarok
3. Muh. Zahir Makhsum

B. Pendidikan Tinggi

2008 – 2013 : Program S3 Teknik Geologi, Sekolah Pascasarjana
Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Judul Disertasi: Mineralogy, geochemistry, and
leaching behavior of the Soroako nickeliferous
laterite deposits, South Sulawesi, Indonesia.
1999 – 2002 : Program Magister Rekayasa Pertambangan, Institut
Teknologi Bandung
Judul Tesis: Karakteristik mineral matter dan
pengaruhnya terhadap kualitas batubara
Tondongkurah, Sulawesi Selatan, Indonesia.
1986 – 1992 : Program S1 Teknik Geologi, Universitas Hasanuddin
Judul Skripsi: Geologi dan studi gerakan tanah,
daerah Kulinjang, Kab. Enrekang, Sulawesi Selatan.

C. Publikasi

1. **Sufriadin**, A. Idrus, S. Pramumijoyo, I.W. Warmada, A. Imai, Y. Yamauchi, 2012. Chromian Spinel in Peridotite of the Soroako Ultramafic Complexes, Sulawesi and its Petrogenetic Significance, *Proceedings The 41st IAGI Annual Convention and Exhibition*, pp. 452 – 459, 17th – 20th Sept., Yogyakarta (ISBN: 9789798216246).

2. **Sufriadin**, A. Idrus, S. Pramumijoyo, I.W. Warmada, 2012. Mineralogical Aspects of Nickeliferous Limonite Ores: An Implication For Hydrometallurgical Processing., *Proceedings the 2nd Asia Africa Mineral Resources Conference*, 17th September, Bandung.
3. **Sufriadin**, A. Idrus, S. Pramumijoyo, I.W. Warmada, I. Nur, A. Imai, A.M. Imran, and Kaharuddin, 2012. “Thermal and infrared studies of “Garnierite” from The Soroako Nickeliferous Laterite Deposits, Sulawesi, Indonesia”, *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol. 7, No.2, (77-85), (ISSN: 1907 - 2953).
4. **Sufriadin**, A. Idrus, S. Pramumijoyo, I.W. Warmada, I. Nur, A. Imai, 2011, “Mineralogical transformation and element distribution in two weathering profiles of the Soroako nickel mining district, Sulawesi, Indonesia”, *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology*, Kyushu University, Fukuoka, Japan, 6th-7th December, pp. 447 – 454, (reviewed paper) (ISBN: 978-4-9902356-1-1).
5. **Sufriadin**, A. Idrus, S. Pramumijoyo, I.W. Warmada, I. Nur, A. Imai, A.M. Imran, and Kaharuddin, 2011. “Thermal and infrared studies of “Garnierite” from The Soroako Nickeliferous Laterite Deposits, Sulawesi, Indonesia”, *Proceedings of the Joint Convention Makassar HAGI-IAGI, Indonesia*, 26th – 29th September, (ISBN: 978-979-8126-23-9).
6. **Sufriadin**, A. Idrus, S. Pramumijoyo, I.W. Warmada, A. Imai, 2011. Study on mineralogy and chemistry of the saprolitic nickel ores from Soroako, Sulawesi, Indonesia: Implication for the lateritic ore processing. *Journal of Southeast Asian Applied Geology*, Vol.3. No. 1, (23 -33), (ISSN: 2086-5104).
7. **Sufriadin**, A. Idrus, S. Pramumijoyo, I.W. Warmada, K. Yonezu, A. Imai, 2010, “Characterisation and Leaching Behavior of Minerals by Sulphuric Acid in the Soroako Nickeliferous Laterite Ores, Sulawesi, Indonesia”, *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology*, Kyushu University, Fukuoka, Japan, 7th – 8th December, pp. 421 – 425, (reviewed paper), (ISBN: 978-4-9902356-0-4).
8. **Sufriadin**, A. Idrus, S. Pramumijoyo, I.W. Warmada, A. Imai, S. Ueno, 2010, “Characteristics and The Occurrence of “Garnierite” from The Soroako Nickeliferous Laterite Deposits, Sulawesi, Indonesia”, *Proceedings of The 39th IAGI Annual Convention & Exhibition*, Senggigi Beach - Lombok, 22nd – 25th November, (ISBN-978-979-8126-22-2).
9. **Sufriadin**, A. Idrus, S. Pramumijoyo, I.W. Warmada, S. Ueno, A. Imai, 2010, “Ni-Sepiolite of Garnierite Mineralization in the Nickeliferous Laterite Deposits, Soroako, Indonesia”, *Proceedings of The 3rd Regional Conference Interdisciplinary on Natural Resources and Materials Engineering (3rd RCNRM)*, University Sains Malaysia, Langkawi-Penang, Malaysia, pp. 414 – 419, 25th – 26th October.
10. **Sufriadin**, A. Idrus, S. Pramumijoyo, I.W. Warmada, I. Nur, Suharto, 2009., “Identification of Microstructures Developed on Ultramafic Rocks and Their Relation to Nickel Silicate Ore Formation”, *Proceedings of The 38th IAGI Annual Convention and Exhibition*, Semarang, 12th – 14th October. (ISBN: 978-979-8126-21-5).
11. **Sufriadin**, A. Idrus, S. Pramumijoyo, I.W. Warmada, I. Nur., Suharto., 2009, “Serpentinisasi pada batuan ultramafik dan aplikasinya terhadap eksplorasi endapan nikel laterit”, *Proceedings of International Conference on Earth Science and Technology*, Yogyakarta, 6th – 7th August, C011 – C018. (ISBN: 978979175494-1).