

**STUDI TRANSFORMASI MINERALOGI DAN PERHITUNGAN
KESEIMBANGAN MASSA PADA PROFIL NIKEL
LATERIT DAERAH MALILI,
SULAWESI SELATAN**

*Study of Mineralogical Transformation and Mass Balance
Calculation of a Nickel Laterite Profile in Malili District,
South Sulawesi*

TESIS



**REIFAN FAHRISYAH
D062 19 1 005**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA
2023**

TESIS

STUDI TRANSFORMASI MINERALOGI DAN PERHITUNGAN KESEIMBANGAN MASSA PADA PROFIL NIKEL LATERIT DEARAH MALILI, SULAWESI SELATAN

*Study of Mineralogical Transformation and Mass Balance Calculation of
Nickel Laterite Profile in Malili District, South Sulawesi*

Oleh

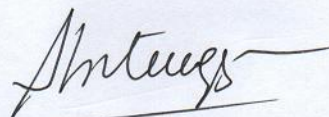
REIFAN FAHRISYAH
D062 19 1 005

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk
Melakukan studi tesis

Menyetujui,

Penasehat Utama

Penasehat Anggota



Prof. Dr. Adi Tonggiroh, ST., MT.
NIP: 19650928 200003 1 002



Dr. Sufriadin, ST., MT.
NIP: 19660817 200012 1 001

Mengetahui

Ketua Program Studi,



Dr. Eng. Meutia Farida, ST., MT.
NIP: 19731003 200012 0 001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Reifan Fahrisyah
NIM : D062 19 1 005
Program Studi : Magister Teknik Geologi

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa Tesis yang saya tulis benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 25 Juni 2023



Reifan Fahrisyah

PRAKATA

Assalamualaikum WR. WB.

Alhamdulillahirabbil'alamin.

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena berkat rahmat dan hidayah-Nya yang begitu besar kepada penulis sehingga tugas akhir ini yang berjudul “Studi Transformasi Mineralogi dan Keseimbangan Massa pada Profile Nikel Laterit Daerah Malii, Sulawesi Selatan” ini dapat diselesaikan dengan baik sebagai salah satu syarat kelulusan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S-2) pada Program Studi Teknik Geologi Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin.

Dalam kesempatan ini penulis kepada mengucapkan terimakasih banyak Kepada Bapak Dr. Adi Tonggihroh, ST., MT., selaku Penasehat Utama dan Bapak Dr. Sufriadin, ST., MT., selaku Penasehat Anggota atas bimbingan, arahan dan masukan kepada penulis. Serta seluruh Dosen dan Staf Departemen Teknik Geologi Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin.

Terima kasih sebesar-besarnya kepada orang tua dan keluarga yang selalu memberikan semangat dan doa, teman-teman Teknik Geologi Universitas Hasanuddin atas persaudaraannya, tawa, canda selama di kampus teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis mengharapkan para pembaca dan penyimak memberi kritik dan saran pada tugas akhir ini sehingga Tesis ini dapat digunakan

sebagai acuan untuk penelitian yang lebih lanjut ataupun tambahan ilmu pengetahuan. Akhir kata, apabila terdapat kesalahan penulisan dan tata bahasa, penulis mohon maaf yang sebesar-besarnya. Serta memohon kritik dan saran untuk membangun penulis bisa lebih baik pada penelitian ini.

Makassar, 24 Juni 2023

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Reifan Fahrisyah', written in a cursive style with a large initial 'R'.

Reifan Fahrisyah

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini mengetahui transformasi mineralogi dan keseimbangan massa untuk memahami mobilitas unsur laterit dengan menggunakan metode *X-Ray Diffraction (XRD)*, *X-Ray Fluorescence (XRF)* dan Pengamatan Mikroskop. Batuan dasar daerah penelitian merupakan batuan peridotit yang telah terserpentinisasi yang terdiri utamanya dari mineral lizardit dan sedikit magnetit. Zona saprolite daerah penelitian di dominasi mineral lizardit, sedangkan pada zona limonit dikarenakan proses pelapukan yang sempurna mentransformasi mineral menjadi goetit pada zona limonit. Hasil analisis keseimbangan massa menggunakan Ti sebagai unsur tidak bergerak menunjukkan bahwa Mg dan Si berkurang sepanjang semua lapisan endapan nikel laterit. Sementara Fe, Al, Mn, dan Cr mengalami penambahan menuju ke zona atas lapisan endapan nikel laterit. Sedangkan Ni terkonsentrasi pada zona saprolite dengan penambahan sebesar ~386,42%.

Kata Kunci: Tranformasi mineral, *XRD*, *XRF*, *mass balance*, batuan dasar, *saprolite*, *limonite*.

DAFTAR ISI

	Halaman
TESIS.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
PRAKATA	iv
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. LATAR BELAKANG	1
B. RUMUSAN MASALAH.....	2
C. TUJUAN PENELITIAN	3
D. BATASAN MASALAH	3
E. PENELITIAN TERDAHULU	3
F. HIPOTESIS	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
A. GEOLOGI UMUM.....	6
A.1 Stratigrafi.....	7
B.2 Geomorfologi.....	10
C.3 Struktur Geologi.....	12
B. LANDASAN TEORI	16
B.1 Endapan Nikel Laterit.....	16
B.2 Pembentukan Nikel Laterit.....	20
B.3. Keseimbangan Massa (<i>Mass Balance</i>)	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	26
A. RANCANGAN PENELITIAN	26

B. LOKASI DAN KESAMPAIAN DAERAH	27
C. INSTRUMEN DAN PENGUMPULAN DATA LAPANGAN.....	29
C.1 Alat	29
C.2 <i>Sampling</i>	30
D. ANALISIS LABORATORIUM	34
D.1 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	34
D.2 <i>X-Ray Flourescence (XRF)</i>	38
D.3 Petrografi	40
E. PENYUSUNAN DAN ANALISIS DATA.....	41
E.1 <i>Software Impact Match</i>	41
E.2 Perhitungan <i>Mass Balance</i>	43
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	44
A. HASIL PENELITIAN.....	44
B. PEMBAHASAN	57
BAB V PENUTUP	59
A. KESIMPULAN	59
B. SARAN	60
DAFTAR PUSTAKA.....	61
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1 Tabulasi nilai kadar dari profil endapan nikel laterit dengan analisis XRF.....	40
Tabel 2 Komposisi mineral batuan dasar dan zona pelapukan endapan nikel laterit daerah penelitian.....	51
Tabel 3 Nilai konsentrasi kimia pada profil endapan nikel laterit daerah penelitian.....	52
Tabel 4 Hasil perhitungan koefisien keseimbangan massa (τ) dan transfer massa (δm) unsur kimia profil endapan nikel laterit.....	55

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1 Geologi Regional Pulau Sulawesi (Kadarusman, et al., 2004). . 7	
Gambar 2 Tipikal Profil Endapan Nikel Laterit (Ahmad, 2006). 19	
Gambar 3 Proses Pembentukan Endapan Nikel Laterit (Butt & Cluzel, 2013)..... 21	
Gambar 4 Bagan rancangan penelitian..... 27	
Gambar 5 Peta Lokasi Area Penelitian. 29	
Gambar 6 Proses pengambilan sampel pada profil endapan nikel laterit. 33	
Gambar 7 Penomoran sampel pada profil endapan nikel laterit. 33	
Gambar 8 Proses pengeringan sampel basah dari profil endapan nikel laterit. 34	
Gambar 9 Sampel yang telah di gerus dengan ukuran 200 mesh..... 37	
Gambar 10 Proses pengamatan sayatan tipis batuan dasar profil endapan nikel laterit..... 41	
Gambar 11 laporan analisis XRD pengolahan data pada software Match! 3.0..... 42	
Gambar 12 Pattern Graphics hasil pengolahan data XRD. 42	
Gambar 13 Pengamatan mikroskopis sayatan tipis batuan dasar daerah penelitian. 45	
Gambar 14 Plot Penentuan Batuan Dasar Profil Endapan Laterit Daerah Penelitian. 45	
Gambar 15 Difractogram Sampel BR-06. 46	
Gambar 16 Difractogram Sampel SAP-05. 47	
Gambar 17 Difractogram Sampel SAP-04. 48	
Gambar 18 Difractogram Sampel TRANS-03. 49	
Gambar 19 Difractogram Sampel LIM-02. 49	
Gambar 20 Difractogram Sampel LIM-01. 50	
Gambar 21 Analisis mineralogi daerah penelitian dengan menggunakan data XRD. 51	

Gambar 22 Grafik Petrokimia pada Profil Nikel Laterit Daerah Penelitian.	54
Gambar 23 Grafik Profil Perhitungan keseimbangan Massa pada Profil Nikel Laterit Daerah Penelitian.....	56

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Peta Lokasi Penelitian	64
Lampiran 2 Hasil Pengolahan Data XRD	65
Lampiran 3 Hasil Pengolahan Data XRF	86
Lampiran 4 Deskripsi Pengamatan Mikroskopis Batuan Dasar	87

BAB I

PENDAHULUAN

A. LATAR BELAKANG

Endapan nikel laterit terbentuk melalui proses pelapukan (laterisasi) yang intensif pada batuan dasar. Keberadaan endapan nikel laterit memiliki perbedaan karakteristik pada masing-masing daerah. Perbedaan tersebut dapat diketahui dari sifat fisik yang nampak di atas permukaan meliputi jenis laterit, litologi, vegetasi yang tumbuh, dan kondisi morfologi. Selain itu perbedaan sifat kimia berupa persentase kandungan unsur-unsur kimianya, serta pengamatan sifat optik pada batuan dasar (*bedrock*) untuk menentukan batuan induk pembentuk endapan nikel laterit (Boldt, 1967).

Pembentukan endapan nikel laterit dipengaruhi beberapa faktor penting selama terjadinya proses pelapukan kimia seperti litologi, geomorfologi, iklim, dan tektonik suatu daerah. Berdasarkan faktor tersebut dapat diketahui hubungan antara karakteristik kimia, mineralogi, dan genesis endapan nikel laterit (Brand *et. al.*, 1998).

Pelapukan kimia pada batuan adalah salah satu proses utama yang memodifikasi permukaan bumi dan berkontribusi pada siklus geokimia. Pelapukan kimia jangka panjang telah menyebabkan alterasi mineral primer yang mengakibatkan pengkayaan supergen dan akumulasi mineral

sekunder dan residu (Traore, et al., 2008). Proses pelapukan dapat diprediksi dengan menghitung seberapa banyak elemen yang berpindah selama proses pelapukan kimia dan diketahui proses pengkayaan dan pembentukan endapan nikel laterit.

Diperlukan beberapa referensi pada endapan laterit, penelitian ini berfokus pada hubungan antara tingkat serpentinisasi dan variasi mineralogi dan kandungan Ni dari endapan laterit masih diperlukan untuk meningkatkan pemahaman yang lebih baik tentang evolusi mineral dan unsur, perilaku dengan penekanan khusus pada proses pengkayaan Ni dalam profil endapan Nikel Laterit. Perhitungan keseimbangan massa pada endapan nikel laterit diperlukan dalam memprediksi proses kehilangan dan penambahan elemen dalam pembentukan endapan Nikel Laterit.

B. RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dijelaskan maka rumusan masalah dalam studi ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh komposisi mineralogi dan jenis litologi selama proses pelapukan pada profil nikel laterit daerah penelitian?
2. Bagaimana proses perubahan unsur-unsur melalui model keseimbangan massa dalam proses pembentukan endapan nikel laterit?

C. TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan uraian rumusan masalah yang telah dijelaskan maka tujuan penelitian dalam studi ini adalah:

1. Menganalisis transformasi mineral selama proses pelapukan pada zona profil endapan nikel laterit.
2. Menganalisis perpindahan unsur-unsur selama proses pembentukan lapisan endapan nikel laterit dan pemodelan keseimbangan unsur.

D. BATASAN MASALAH

Berdasarkan uraian tujuan penelitian yang telah dijelaskan maka batasan masalah dalam studi ini adalah:

1. Berfokus pada mineral-mineral yang ditemukan dalam sampel lapisan endapan laterit.
2. Keseimbangan massa ditentukan dengan indikator penambahan dan kehilangan unsur.

E. PENELITIAN TERDAHULU

Pada tahun 2008 Traore, et, al. melakukan penelitian pada endapan profil laterit New Caledonia (Timur Pasifik). Distribusi unsur kimia alkali tanah, logam transisi, dan logam mulia (termasuk Pt dan Pd) ditentukan dalam profil pelapukan yang bervariasi dari batuan dasar dari bawah ke lapisan atas. Analisis kimia dan perhitungan keseimbangan massa menunjukkan bahwa pelapukan progresif batuan induk ditandai dengan

pengayaan Fe, Co, dan Mn, pemisahan Ni pada lapisan limonit dan kurangnya Mg, Ca, Si, Al, dan Cr pada lapisan saprolit. Konsentrasi logam transisi yang lebih tinggi pada antarmuka antara saprolit kasar dan halus disebabkan oleh transfer vertikal dan pengendapan pada dasar profil pelapukan.

Penelitian lain dilakukan oleh Campodonico, et al pada tahun 2019 di bagian utara Argentina. Beberapa karakteristik mineralogi / geokimia dari profil laterit dianalisis dalam penelitian ini untuk membatasi sifat proses pelapukan di wilayah ini dan asal dari lapisan laterit. Batuan dasar basaltik di lokasi pengambilan sampel menunjukkan tekstur intergranular dan terutama terdiri dari mineral klinopiroksen, plagioklas dan mineral opak (kemungkinan titanomagnetit dan ilmenit). Difraksi sinar-X dari fraksi seukuran tanah liat menunjukkan kaolinit dan hematit yang berlaku pada sampel yang paling banyak diubah, dilengkapi dengan oksida Fe-Al . diagram jaring dan perhitungan keseimbangan massa memastikan hilangnya hampir semua oksida utama (yaitu, ~ 50g bahan telah dihilangkan dengan pelapukan dari setiap 100g basal asli) dan penipisan beberapa elemen jejak (misalnya, Sc, V, Sr, Cr, Ni, Rb dan U) di lapisan paling atas dan menengah dari profil laterit, mencerminkan pelapukan feldspar, klinopiroksin dan apatit. Sebaliknya, beberapa elemen diperkaya di lapisan paling atas dan menengah, karena imobilitas intrinsik selama pelapukan (misalnya, Zr, Hf, Ta, Th).

F. HIPOTESIS

Pelapukan kimia pada batuan ultrabasa daerah Malili telah menjadikan endapan nikel laterit yang memungkinkan untuk ditambang. Konsentrasi unsur Ni terakumulasi pada zona saprolit. Tingginya konsentrasi unsur Ni mengindikasikan bahwa pelapukan kimia dan mineralogi dari batuan dasar memiliki pengaruh besar dalam mensuplai unsur Ni yang terakumulasi pada zona saprolit dalam proses pelapukan.

Perhitungan keseimbangan massa menunjukkan unsur Fe, Al, Ti, Mn terkonsentrasi pada zona atas profil endapan sebagai unsur *immobile*. Sedangkan unsur Ni terkonsentrasi pada zona saprolit sebagai unsur *mobile*. Persentase unsur-unsur yang besar yaitu unsur Mg, Si, Fe, Al, Mn, Ni, Co dan Ti. Sedangkan unsur-unsur yang persentasinya kecil yaitu Ca, Na, G, dan Ka.

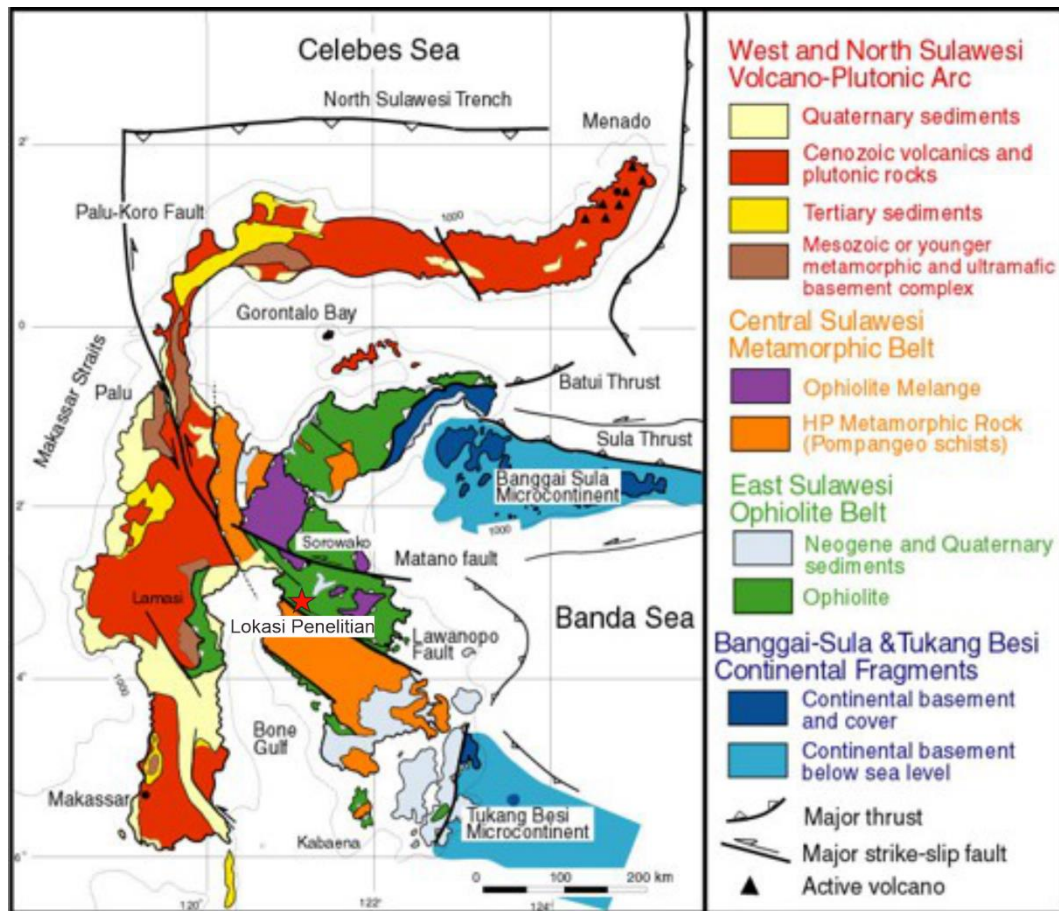
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. GEOLOGI UMUM

Pulau Sulawesi, di Indonesia bagian tengah, terletak di tepi konvergen lempeng Eurasia, Pasifik-Filipina, dan India-Australia. Ini berisi empat sabuk litotektonik dari barat ke timur: Sabuk Plutono-Vulkanik Sulawesi Barat, Sabuk Metamorfik Sulawesi Tengah, Sabuk Ophiolite Sulawesi Timur (ESO), dan fragmen benua pulau Banggai–Sula dan platform Tukang Besi–Buton (Hall dan Wilson, 2000; Kadarusman dkk., 2004; Maulana dkk., 2013;). ESO secara tektonik terpotong-potong dan tersebar luas dari Teluk Gorontalo melalui Lengan Timur dan Sulawesi Tengah menuju Lengan Tenggara dan pulau Buton dan Kabaena (Hall dan Wilson, 2000; MacPherson dan Hall, 2002; Kadarusman dkk., 2004). Ni laterit sebagian besar terletak di kompleks batuan ultrabasa Kapur di Sulawesi bagian timur, yang tersingkap selama konvergensi Miosen pada ~10 Ma (Golightly, 1979; Kadarusman et al., 2004).

Pada penelitian ini dilakukan pada profil lapisan endapan nikel laterit daerah Malili, Provinsi Sulawesi Selatan.



Gambar 1 Geologi Regional Pulau Sulawesi (Kadariusman, et al., 2004).

A.1 Stratigrafi

Berdasarkan himpunan batuan, struktur dan biostratigrafi, secara regional Lembar Malili termasuk Mendala Geologi Sulawesi Timur dan Mendala Geologi Sulawesi Barat, dengan batas Sesar Palu Koro yang membujur hampir utara-selatan. Mendala Geologi Sulawesi Timur dapat dibagi menjadi dua lajur (Telt): lajur batuan malihan dan lajur ofiolit Sulawesi Timur yang terdiri dari batuan ultramafik dan batuan sedimen petagos Mesozoikum.

Mendala Geologi Sulawesi Barat dicirikan oleh lajur gunungapi Paleogen dan Neogen, intrusi Neogen dan sedimen flysch Mesozoikum

yang diendapkan di pinggiran benua (Paparan Sunda). Di Mendala Geologi Sulawesi Timur, batuan tertua adalah batuan ofiolit yang terdiri dari ultramafik termasuk harzburgit, dunit, piroksenit, wehrlit dan serpentinit, setempat batuan mafik termasuk gabro dan basal. Umurnya belum dapat dipastikan, tetapi diperkirakan sama dengan ofiolit di lengan timur Sulawesi yang berumur Kapur – Awal Tersier (Simandjuntak, 1986).

Di bagian barat mendala ini terdapat lajur metamorfik, kompleks Pompangeo yang terdiri dari berbagai jenis sekis hijau di antaranya sekis mika, sekis hornblenda, sekis glaukofan, filit, batusabak, batugamping terdaunkan atau pualam dan setempat breksi. Umurnya diduga tidak lebih tua dari Kapur. Di atas ofiolit diendapkan tak selaras Formasi Matano: bagian atas berupa batugamping kalsilutit, rijang radiolaria, argilit dan batulempung napalan, sedangkan bagian bawah terdiri dari rijang radiolaria dengan sisipan kalsilutit yang semakin banyak ke bagian atas. Berdasarkan kandungan fosilnya Formasi ini menunjukkan umur Kapur.

Pada mendala ini dijumpai pula kompleks bawah bancuh (Melange Wasuponda), terdiri dari bongkahan asing batuan mafik, serpentinit, pikrik, rijang, batugamping terdaunkan, sekis, amfibolt dan eklogit berbagai ukuran yang tertanam di dalam masa dasar lempung merah bersisik.

Batuan tektonika ini tersingkap baik di daerah Wasuponda serta di daerah Ensa, Koro Mudi dan Petumbea, diduga terbentuk sebelum Tersier (Simandjuntak, 1980). Pada Kala Miosen Akhir batuan sedimen pasca orogenesis Neogen (Kelompok Molasa Sulawesi) diendapkan tak selaras

di atas batuan yang lebih tua. Kelompok ini termasuk Formasi Tomata yang terdiri dari klastika halus sampai kasar, dan Formasi Larona yang umumnya terdiri dari klastika kasar yang diendapkan dalam lingkungan laut dangkal sampai darat. Pengendapan ini terus berlangsung sampai Kala Pliosen.

Di Mendala Geologi Sulawesi Barat batuan tertua adalah Formasi Latimojong yang diduga berumur Kapur Akhir. Batuan ini terdiri dari deret flysch, perselingan antara argilit, filit, batusabak dan wake dengan sisipan rijang radiolaria dan konglomerat. Batuan ini diduga telah diendapkan di pinggiran benua Sunda. Tak selaras di atasnya di-endapkan Formasi Toraja yang terdiri dari serpih, batugamping, batupasir dan konglomerat. Umurnya berjangka dari Eosen - Miosen Tengah.

Pada Kala Oligosen terjadi kegiatan gunungapi bawah laut yang menghasilkan lava bantal dan breksi yang bersusunan basa sampai menengah. Batuan itu membentuk Batuan Gunungapi Lamasi. Kegiatan ini berlangsung terus sampai Kala Miosen Tengah (Batuan Gunungapi Tineba dan Tufa Rampi), yang sebagian sudah muncul ke atas permukaan laut. Di atasnya secara tak selaras diendapkan Formasi Bonebone yang terdiri dari endapan turbidit dan perselingan antara konglomerat dan klastika halus. Formasi ini banyak mengandung fosil foram kecil yang menunjukkan umur Miosen Akhir - Pliosen. Kegiatan gunungapi terjadi lagi pada Plio-Plistosen bahkan sampai Holosen yang

menghasilkan lava dan bahan piroklastika yang bersusunan andesit (Batuan Gunungapi Masamba).

Terdapat dua bauan terobosan granit yang berbeda umurnya; yang pertama berumur Miosen Akhir dan yang kedua Pliosen. Yang terakhir lamparannya cukup luas di bagian barat laut lembar Malili. Di daerah Palopo granit berumur Miosen Akhir menerobos Formasi Latimojong dan Formasi Toraja dan menghasilkan mineralisasi hidrotermal. Batuan termuda di daerah ini adalah aluvium yang terdiri dari endapan sungai, danau dan pantai. Sebarannya luas di utara Teluk Bone dan di selatan Danau Poso.

B.2 Geomorfologi

Secara morfologi daerah dalam lembar Malili dapat dibagi atas 4 satuan: Daerah Pegunungan, Daerah Pebukitan, Daerah Karst dan Daerah Pedataran. Daerah Pegunungan menempati bagian barat dan tenggara lembar Malili. Di bagian barat terdapat 2 rangkaian pegunungan: Pegunungan Tineba dan Pegunungan Koro-Ue yang memanjang dan barat laut - tenggara, dengan ketinggian antara 700-3016 m di atas permukaan laut dan dibentuk oleh batuan granit dan malihan. Sedangkan di bagian tenggara lembar peta terdapat Pegunungan Verbeek dengan ketinggian antara 800 - 1346 m di atas permukaan laut, dibentuk oleh batuan ultramafik dan batugamping. Puncak-puncaknya antara lain G. Baliase (3016 m), G. Tambake (1838 m), Bulu Nowinokel (1700 m), G. Kaungabu (1760 m), Buhi Taipa (1346 m), Bulu Ladu (1274 m), BuLu

Burangga (1032 m) dan Bulu Lingke (1209 m). Sungai-sungai yang mengalir di daerah ini yaitu S. Kataena, S. Pincara, S. Rongkong. S. Larona dan S. Malili merupakan sungai utama. Pola aliran sungai umumnya dendrit.

Daerah Pebukitan menempati bagian tengah dan timurlaut lembar Malili dengan ketinggian antara 200 - 700 m di atas permukaan laut dan merupakan pebukitan yang agak landai yang terletak di antara daerah pegunungan dan daerah pedataran. Pebukitan ini dibentuk oleh batuan vulkanik, ultramafik dan batupasir. Puncak-puncak bukit yang terdapat di daerah ini di antaranya Bulu Tiruan (630 m), Bulu Tambunana (477 m) dan Bulu Bukila (645 m). Sungai-sungai yang bersumber di daerah pegunungan mengalir melewati daerah ini terus ke daerah pedataran dan bermuara di Teluk Bone. Pola alirannya dendrit. Daerah Karst menempati bagian timurlaut lembar Malili dengan ketinggian antara 800 - 1700 m dari permukaan laut dan dibentuk oleh batugamping. Daerah ini dicirikan oleh adanya dolina, "Sinkhole" dan sungai bawah permukaan. Puncak yang tinggi di daerah ini di antaranya Butu Wasopute (1768 m) dan Pegunungan Toruke Empenai (1185 m).

Daerah Pedataran menempati daerah selatan lembar Malili, melampar mulai dari utara Palopo, Sabbang, Masamba sampai Bone-Bone. Daerah ini mempunyai ketinggian hanya beberapa meter di atas permukaan laut dan dibentuk oleh endapan aluvium. Pada umumnya merupakan daerah pemukiman dan pertanian yang baik. Sungai yang mengalir di daerah ini

diantaranya S. Pampengan, S. Rongkong dan S. Kebu, menunjukkan proses berkelok. Terdapatnya pola aliran subdendrit dengan air terjun di beberapa tempat, terutama di daerah pegunungan, aliran sungai yang deras, serta dengan memperhatikan dataran yang agak luas di bagian selatan peta dan adanya perkelokan sungai utama.

C.3 Struktur Geologi

Struktur dan geologi Lembar Malili memperlihatkan ciri Komplek tubrukan dan pinggiran benua yang aktif. Berdasarkan struktur, himpunan batuan, biostratigrafi dan umur, daerah ini dapat dibagi menjadi 2 domain yang sangat berbeda, yakni: 1) alohton: ofiolit dan malihan, dan 2) autohton: batuan gunungapi dan pluton Tersier dan pinggiran benua Sundaland, serta kelompok molasa Sulawesi. Lembar Malili, sebagaimana halnya daerah Sulawesi bagian timur, memperlihatkan struktur yang sangat rumit. Hal ini disebabkan oleh pengaruh pergerakan tektonik yang telah berulang kali terjadi di daerah ini.

Struktur penting di daerah ini adalah sesar lipatan, selain itu terdapat kekar dan perdaunan. Secara umum kelurusan sesar berarah barat laut-tenggara. Yang terdapat di daerah ini berupa sesar naik, sesar sungkup, sesar geser dan sesar turun, yang diperkirakan sudah mulai terbentuk sejak Mesozoikum. Beberapa sesar utama tampaknya aktif kembali. Sesar Matano dan sesar Palu-Koro merupakan sesar utama berarah barat laut-tenggara, dan menunjukkan gerak mengiri. Diduga kedua sesar itu masih

aktif sampai sekarang, keduanya bersatu di bagian baratlaut Lembar. Diduga pula kedua sesar tersebut terbentuk sejak Oligosen, dan bersambungan dengan sesar Sorong sehingga merupakan satu sistem sesar "transform". Sesar lain yang lebih kecil berupa tingkat pertama dan/atau kedua yang terbentuk bersamaan atau setelah sesar utama tersebut. Dengan demikian sesar-sesar ini dapat dinamakan Sistem Sesar Matano-Palu-Koro.

Lipatan yang terdapat di daerah ini dapat digolongkan dalam lipatan lemah, lipatan tertutup dan lipatan tumpang tindih. Pada yang pertama kemiringan lapisannya landai biasanya tidak melebihi 3° yang dapat digolongkan dalam jenis lipatan terbuka. Lipatan ini berkembang dalam batuan yang berumur Miosen hingga Plistosen; biasanya sumbu lipatannya bergelombang dan berarah baratdaya-timurlaut. Pada yang kedua, baik yang simetris maupun yang tidak, kemiringan lapisannya antara 50° dan tegak, ada juga yang terbalik. Lipatan ini biasanya terdapat dalam batuan sedimen Mesozoikum. Sumbu lipatan pada umumnya berarah utara-selatan, mungkin golongan ini terbentuk pada Kala Oligosen atau lebih tua. Adapun yang ketiga berkembang dalam batuan sedimen Mesozoikum, batuan malihan dan di beberapa tempat dalam serpentinit yang terdaunkan. Lipatan dalam batuan sedimen Mesozoikum berimpit dan/atau memotong lipatan terdahulu, sehingga ada sumbu lipatan pertama (f_1) yang berimpit dengan yang kemudian (f_2), di samping f_1 terpotong oleh f_2 . Lipatan kedua (f_2) ini diperkirakan terbentuk

pada Miosen Tengah. Kedua lipatan ini tampaknya mengalami deformasi lagi pada Plio-Plistosen, dan membentuk lipatan fasa ketiga (f3) dengan sumbu lipatan yang berarah barat-laut-tenggara, sama dengan lipatan pada batuan sedimen muda. Jenis lipatan ini dalam ukuran megaskopis berkembang dataran batuan malihan dan serpentin yang terdaunkan.

Kekar terdapat dalam hampir semua jenis batuan dan tampaknya terjadi dalam beberapa perioda. Pola dan arah kekar ini sesuai dengan jenisnya, ac; b atau diagonal. Perkembangan tektonik dan sejarah pengendapan batuan sedimen di daerah ini tampaknya sangat erat hubungannya dengan perkembangan Mendala Banggai-Sula yang sudah terkeratonkan pada akhir Paleozoikum.

Pada Zaman Trias Formasi Tokala diendapkan di dalam paparan tepi lereng benua. Pada akhir Trias terjadi pemekaran pinggiran benua yang kemudian disusul pengendapan Formasi Batebeta secara selaras di atasnya pada awal Jura.

Pada Zaman Jura Formasi Nanaka diendapkan secara tidak selaras di atas batuan yang lebih tua, dalam lingkungan darat hingga laut dangkal. Di bagian neritik luar diendapkan Formasi Tetambahu dan Formasi Masiku pada akhir Jura hingga permulaan Kapur. Ketiga satuan ini terbentuk di pinggiran benua yang saat ini menjadi Mendala Banggai-Sula. Semuanya tersingkap di Lembar Bungku (Simandjuntak, 1981) di sebelah timur lembar ini.

Pada Zaman Kapur, dibagian lain dalam cekungan laut dalam di sebelah barat terjadi pemekaran dasar samudera, dan membentuk kerak samudera yang sebagian menjadi Lajur Ofiolit Sulawesi Timur. Pengendapan bahan-bahan pelagos di atas kerak samudera ini berlangsung hingga Zaman Kapur Akhir (Formasi Matano).

Pada Zaman Kapur Akhir, lempeng samudera yang bergerak ke arah barat menunjam di bawah pinggiran benua dan/atau di daerah busur gunungapi. Jalur penunjaman ini sekarang ditandai oleh batuan bancuh di Wasuponda (Simandjuntak, 1980). Di cekungan rumpang parit busur di pinggiran yang aktif di sebelah barat, diendapkan batuan sedimen jenis "flysch, Formasi Latimojong pada Kapur Atas. Pengendapan batuan ini disusul oleh Formasi Toraja pada Kala Eosen dan kegiatan gunungapi bawah laut pada Kala Oligosen (Vulkanik Lamasi) yang berlangsung terus hingga Miosen (Vulkanik Rampi dan Tineba). Satuan batuan ini sekarang merupakan bagian dari Mendala Sulawesi Barat.

Pada Zaman Paleogen pengendapan batuan karbonat (Formasi Larca) berlangsung dalam busur laut yang semakin mendangkal, yang disusul pengendapan Formasi Takaluku pada Kala Miosen Tengah.

Pada Kala Oligosen, sesar Sorong yang menerus ke sesar Matano dan Palu-Koro mulai aktif dalam bentuk sesar transcurrent. Akibatnya minikontinen Banggai-Sula bergerak ke arah barat dan memisahkan diri dari benua Australia.

Pada Kala Miosen Tengah bagian timur kerak samudera di Mendala Sulawesi Timur menumpang tindih (obducted) platform Banggai-Sula yang bergerak ke arah barat. Dalam pada itu, di bagian barat lajur penunjaman dan busur luar tersesarsungkupkan di atas rumpang parit busur dan busur gunungapi, dan mengakibatkan ketiga mendala geologi tersebut saling berhimpitan.

Pada Akhir Miosen hingga Pliosen, batuan klastika halus sampai kasar Kelompok Molasa Sulawesi (Formasi Tomata, Bone-Bone) diendapkan dalam lingkungan taut dangkal dan terbuka dan sebagian berupa endapan darat yang bersamaan dengan intrusi yang bersifat granit di bagian barat.

Pada Kala Plio-Plistosen keseluruhan daerah mengalami deformasi. Intrusi yang bersifat granit menerus di Mendala Sulawesi Barat, yang dibarengi oleh perlipatan dan penyesaran bongkah yang mengakibatkan terbentuknya berbagai cekungan kecil, dangkal dan sebagian tertutup. Di dalamnya diendapkan batuan klastika kasar dan keseluruhan daerah terangkat. Pada bagian tertentu, endapan aluvium, danau, sungai dan pantai berlangsung terus hingga sekarang.

B. LANDASAN TEORI

B.1 Endapan Nikel Laterit

Endapan nikel laterit adalah produk residu pelapukan kimia pada batuan di permukaan bumi, dimana berbagai mineral primer tidak stabil

karena adanya air yang melaluinya sehingga lapuk dan terbentuk mineral baru yang lebih stabil terhadap lingkungan. Endapan laterit penting sebagai tempat endapan bijih yang ekonomis, karena interaksi kimiawi yang bersama-sama membentuk proses lateritisasi. Dalam kasus tertentu menjadi sangat efisien dalam mengkonsentrasikan beberapa unsur (Boldt, 1967).

Pengetahuan tentang nikel laterit dimulai dengan penemuan endapan nikel di Kaledonia Baru oleh Garnier pada tahun 1863. Endapan ini telah ditambang dan dipelajari dengan dalam sejak saat itu. Literatur tentang laterit di Kaledonia Baru telah ditinjau ulang dalam konteks modern oleh Tresca pada tahun 1975. Eksplorasi endapan laterit nikel di tempat lain di dunia terjadi pada pertengahan abad 21, dan sebagian besar literatur tentang endapan nikel laterit dikembangkan lebih jauh dari tahun 1950 (Golightly, 1981).

Nikel laterit terbentuk di zona yang telah mengalami pelapukan dari batuan ultramafik yang berkepanjangan. Batuan ultramafik terdiri dari dunit (dasarnya olivin), peridotite (olivin, piroksin, dan hornblende), piroksenit (orthopiroksin atau clinopiroksin), hornblendit (hornblende monomineralik) dan serpentinit (pada dasarnya serpentinit).

Lapisan endapan laterit dapat dibagi menjadi 3 lapisan (Gambar 2). Berikut susunan zona yang terdapat dalam endapan nikel laterit dan dideskripsikan dari bawah ke atas yang merupakan urutan aktual pembentukannya:

a. Batuan Dasar

Terletak di bagian paling bawah dari profil laterit, zona batuan dasar menandai batuan ultramafik asli yang belum terpengaruh oleh proses pelapukan. Komposisi kimia dari batuan ini sangat dekat dengan komposisi batuan dasar yang tidak berubah. Lipatan dan rekahan masih dalam kondisi baru dan belum terbuka secara signifikan karena tekanan hidrostatik dari material atasnya.

Batuan dasar endapan nikel laterit merupakan batuan ultramafik (opholitik harzburgit, dunit, dan lherzolit) yang memiliki kandungan Unsur Ni >0,16% (Golightly, 2010).

b. Zona Saprolit

Terletak di atas batuan dasar, zona saprolit terdiri dari batuan dasar yang sebagian atau telah benar-benar terurai di bawah pengaruh pelapukan. Proses pelapukan dimulai sepanjang permukaan batuan dasar dengan adanya lipatan dan rekah yang mengakibatkan pembentukan zona saprolit.

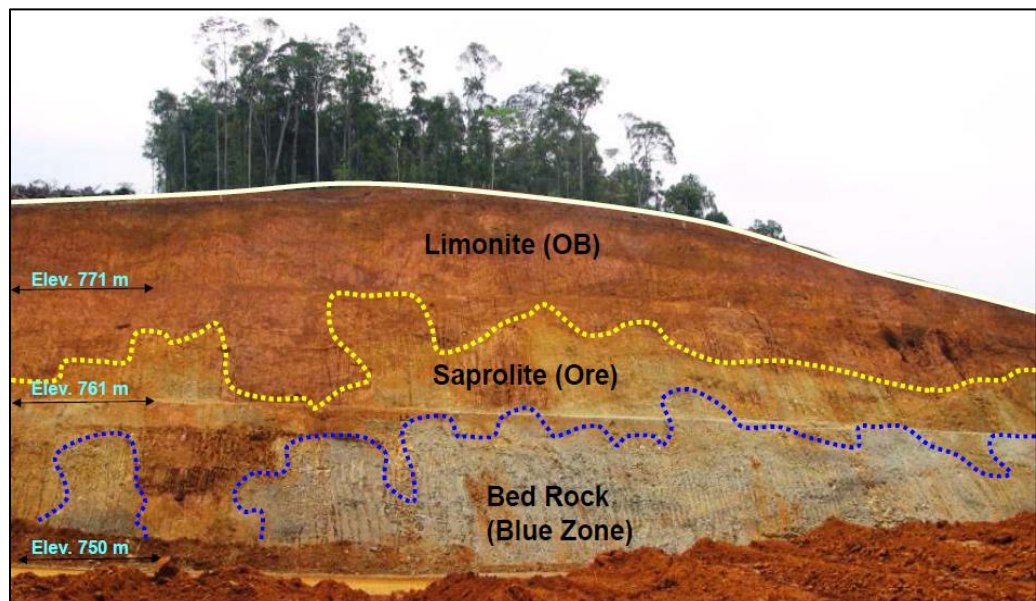
Zona saprolit adalah zona batuan yang sebagian telah terurai. Ini adalah zona perubahan dalam komposisi fisik dan kimia dan umumnya merupakan zona pengayaan supergen nikel (Golightly, 1981).

Struktur batuan dasar dapat diamati di bagian bawah zona saprolit ditandai dengan adanya *boulder* batuan dasar, sementara *boulder* batuan dasar hampir lenyap di bagian yang lebih tinggi dari

zona ini dimana massa tanah dominan karena pelapukan yang lebih kuat (Fu, *et. al.*, 2014).

c. Zona Limonit

Terletak di atas profil laterit, zona limonit merupakan produk akhir dari pelapukan tropis batuan ultramafik dan konsentrasi residu unsur *non-mobile*. Pencucian lengkap dari komponen larut telah meninggalkan materi yang lemah dan menyebabkan hilangnya mineral utamanya. Konsentrasi residu nikel di zona limonit umumnya lebih rendah daripada zona saprolit, jarang mencapai kadar 2 % Ni. Kandungan nikel meningkat dengan kedalaman pada zona limonit (Golightly, 1981).



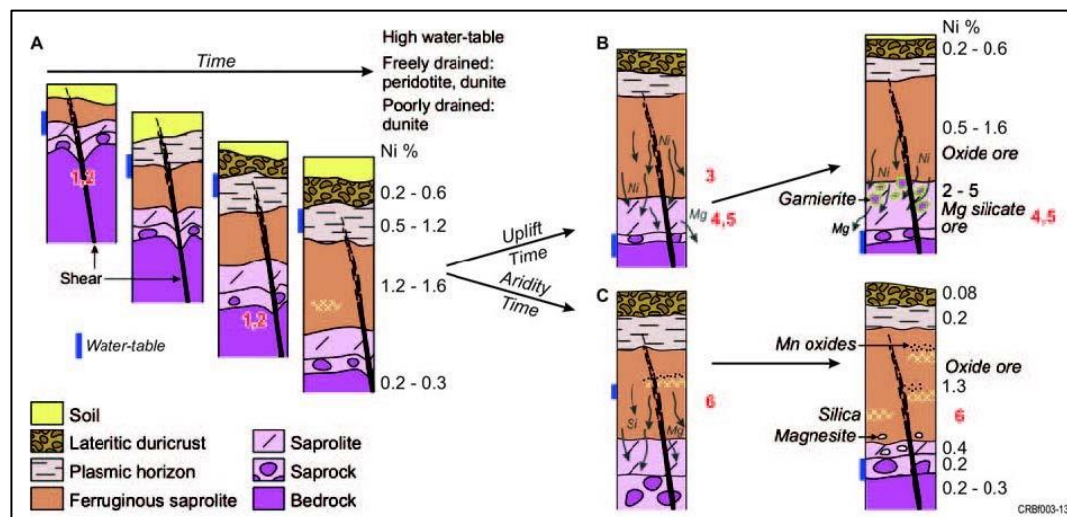
Gambar 2 Tipikal Profil Endapan Nikel Laterit (Ahmad, 2006).

B.2 Pembentukan Nikel Laterit

Proses utama dalam lateritisasi pada dasarnya adalah pelapukan kimia yang terjadi di daerah iklim yang lembab dalam jangka waktu yang lama dalam kondisi aktivitas tektonik yang stabil. Singkatnya, proses lateritisasi merupakan pemecahan mineral primer dan pelepasan beberapa komponen kimianya ke dalam air tanah, pencucian komponen *mobile* atau larut, konsentrasi residu komponen *immobile* atau tidak larut, dan pembentukan mineral baru yang stabil di dalam lingkungan pelapukan (Ellias, 2002).

Proses pelapukan dimulai pada batuan ultramafik (peridotit, dunit, serpentin), dimana pada batuan ini banyak mengandung mineral olivin, magnesia silikat, dan besi silikat yang pada umumnya banyak mengandung 0,30 % Ni. Batuan tersebut sangat mudah dipengaruhi oleh pelapukan lateritik. Air tanah yang kaya akan CO₂ berasal dari udara luar dan tumbuh-tumbuhan akan menghancurkan olivin. Terjadi penguraian olivin, magnesia, besi, nikel dan silika ke dalam larutan, cenderung untuk membentuk koloid dari partikel-partikel silika yang submikroskopis. Di dalam larutan besi akan bersenyawa dengan oksida dan mengendap sebagai ferri hidroksida. Akhirnya endapan ini akan menghilangkan air dengan membentuk mineral-mineral karat, yaitu hematit dan kobalt dalam jumlah kecil jadi besi oksida mengendap dekat dengan permukaan tanah.

Air permukaan yang mengandung CO₂ dari atmosfer dan terkayakan kembali oleh material-material organik di permukaan lalu meresap ke bawah permukaan tanah sampai pada zona pelindian, dimana fluktuasi air tanah berlangsung. Akibat fluktuasi ini, air tanah yang kaya akan CO₂ akan kontak dengan zona saprolit yang masih mengandung batuan asal dan melarutkan mineral-mineral yang tidak stabil seperti olivin, serpentin dan piroksin. Mg, Si dan Ni akan larut dan terbawa sesuai dengan aliran air tanah dan akan memberikan mineral-mineral baru pada proses pengendapan kembali (Boldt, 1967).



Gambar 3 Proses Pembentukan Endapan Nikel Laterit (Butt & Cluzel, 2013).

Pembentukan endapan nikel laterit dipengaruhi oleh beberapa faktor.

Adapun faktor-faktor yang memengaruhi pembentukan nikel laterit adalah:

1. Batuan Asal

Adanya batuan asal merupakan syarat utama terbentuknya endapan nikel laterit. Batuan asal dari nikel laterit adalah batuan ultramafik. Dalam hal ini pada batuan ultramafik terdapat unsur nikel (Ni) yang paling banyak

diantara batuan lainnya. Batuan ultramafik mempunyai komponen-komponen yang mudah larut dan memberikan lingkungan pengendapan yang baik untuk nikel serta mempunyai mineral-mineral yang paling mudah lapuk atau tidak stabil, seperti olivin dan piroksin.

2. Iklim

Pergantian musim kemarau dan musim penghujan akan menyebabkan terjadinya kenaikan dan penurunan permukaan air tanah sehingga terjadi proses pemisahan dan akumulasi unsur-unsur. Perbedaan temperatur yang cukup besar akan membantu terjadinya pelapukan mekanis, dimana akan terjadi rekahan-rekahan dalam batuan yang akan mempermudah proses atau reaksi kimia pada batuan.

3. Reagen-Reagen Kimia

Reagen-reagen kimia adalah unsur-unsur dan senyawa-senyawa yang membantu dalam mempercepat proses pelapukan. Air tanah yang mengandung CO_2 memegang peranan penting di dalam proses pelapukan kimia. Asam-asam pada humus menyebabkan dekomposisi batuan dan dapat mengubah pH larutan. Asam-asam pada humus berkaitan erat dengan vegetasi yang ada di daerah tersebut. Vegetasi akan mengakibatkan penetrasi air dapat lebih dalam dan lebih mudah mengalir (Ahmad, 2005).

4. Topografi

Keadaan topografi setempat akan sangat memengaruhi sirkulasi air beserta reagen-reagen lain. Untuk daerah yang landai, maka air akan

bergerak perlahan-lahan sehingga akan mempunyai kesempatan untuk mengadakan penetrasi lebih dalam melalui rekahan-rekahan atau pori-pori batuan. Akumulasi endapan umumnya terdapat pada daerah-daerah yang landai sampai kemiringan sedang, hal ini menerangkan bahwa ketebalan pelapukan mengikuti bentuk topografi. Pada daerah yang curam, secara teoritis, jumlah air yang meluncur (*run off*) lebih banyak daripada air yang meresap sehingga dapat menyebabkan pelapukan kurang intensif (Golightly, 1981).

5. Waktu

Waktu merupakan faktor yang sangat penting dalam proses pelapukan, transportasi, dan konsentrasi endapan pada suatu tempat. Untuk terbentuknya endapan nikel laterit membutuhkan waktu yang lama, mungkin ribuan atau jutaan tahun. Bila waktu pelapukan terlalu muda maka terbentuk endapan yang tipis. Waktu yang cukup lama akan mengakibatkan pelapukan yang cukup intensif karena akumulasi unsur nikel cukup tinggi. Banyak dari faktor tersebut yang saling berhubungan dan karakteristik profil di satu tempat dapat digambarkan sebagai efek gabungan dari semua faktor terpisah yang terjadi melewati waktu, ketimbang didominasi oleh satu faktor saja (Golightly, 1981).

6. Struktur Geologi

Struktur geologi yang penting dalam pembentukan endapan laterit adalah rekahan (*joint*) dan patahan (*fault*). Adanya rekahan dan patahan ini akan mempermudah rembesan air ke dalam tanah dan mempercepat

proses pelapukan terhadap batuan induk. Selain itu rekahan dan patahan dapat pula berfungsi sebagai tempat pengendapan larutan-larutan yang mengandung nikel (Ni) sebagai urat-urat. Seperti diketahui bahwa jenis batuan beku mempunyai porositas dan permeabilitas yang kecil sekali sehingga penetrasi air sangat sulit, maka dengan adanya rekahan-rekahan tersebut akan memudahkan masuknya air dan proses pelapukan yang terjadi akan lebih intensif (Ahmad, 2005).

B.3. Keseimbangan Massa (*Mass Balance*)

Perhitungan keseimbangan massa terkait dengan proses pelapukan membutuhkan penerapan cara perhitungan untuk memperkirakan penambahan atau berkurang berdasarkan studi-studi menyeluruh (Brimhall dan Dietrich, 1986). Struktur batuan induk tidak lapuk dengan baik dalam saprolit yang menunjukkan bahwa proses pelapukan telah mempertahankan volume aslinya. Berdasarkan asumsi bahwa volumenya tidak bervariasi antara batuan dasar dan bagian atas saprolit, perhitungan keseimbangan massa dapat diterapkan untuk mengukur perpindahan massa yang diinduksi oleh transformasi batuan induk ke dalam saprolit.

Banyak penulis telah secara matematis menuliskan perhitungan Keseimbangan massa dengan bentuk fungsional dari hubungan konstitutif antara komposisi kimia bahan induk dan bahan cuaca, kepadatan massal, dan volume. Koefisien penambahan dan kerugian dihitung dari persamaan berikut (Brimhall dan Dietrich, 1987):

$$\tau_{i,j} = \left[\left\{ \frac{C_{j,w} \rho_w}{C_{j,p} \rho_p} \right\} - 1 \right] \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

Dimana C_j adalah kandungan elemen j (wt%), sedangkan ρ merupakan densitas. Subskrip w dan p masing-masing mengacu pada material lapuk dan batuan dasar. Titanium (Ti) digunakan sebagai elemen tidak bergerak untuk perhitungan $\tau_{i,j}$.

Total massa (m_{jw}) dari setiap elemen yang diperoleh atau hilang selama proses pelapukan dihitung dari persamaan berikut (Cadwick et al., 1993):

$$\Delta M_{jw} = \Sigma C_{jp} \times \rho_p \times V_p \times \tau_{i,j} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana C_{jp} adalah kandungan elemen bergerak batuan dasar (kg/ton), ρ adalah densitas batuan dasar (ton/m³), $\tau_{i,j}$ adalah koefisien perpindahan massa elemen dan V_p merupakan volume dari batuan dasar ($V_p = 1 \text{ m}^3$).