

SKRIPSI

**ANALISIS HUBUNGAN MgO DAN SiO₂ TERHADAP ZONASI ENDAPAN
NIKEL LATERIT BLOK “X” PT.VALE INDONESIA Tbk, SOROWAKO,
PROVINSI SULAWESI SELATAN**

Disusun dan diajukan oleh

**ZAINUDDIN NUKUHALY
D061 18 1325**



**PROGRAM STUDI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS HUBUNGAN MgO DAN SiO₂ TERHADAP ZONASI ENDAPAN
NIKEL LATERIT BLOK “X” PT.VALE INDONESIA Tbk, SOROWAKO,
PROVINSI SULAWESI SELATAN**

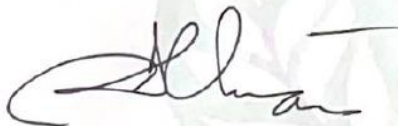
Disusun dan Diajukan Oleh

**ZAINUDDIN NUKUHALY
D061 18 1325**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 13 Juli 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

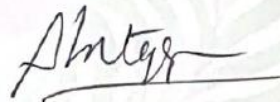
Menyetujui,

Pembimbing Utama



Ilham Alimuddin, S.T., MGIS., Ph.D
NIP. 19690825 199903 1 001

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Adi Tonggiroh, S.T., M.T
NIP. 19650928 200003 1 002

Ketua Program Studi,



Dr. Eng. Hendra Pachri, S.T, M.Eng
NIP. 19771214 200501 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Zainuddin Nukuhaly
NIM : D061 18 1325
Program Studi : Teknik Geologi
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

ANALISIS HUBUNGAN MgO DAN SiO₂ TERHADAP ZONASI ENDAPAN NIKEL LATERIT BLOK "X" PT.VALE INDONESIA Tbk, SOROWAKO, PROVINSI SULAWESI SELATAN

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa Skripsi yang saya tulis ini benar benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut

Makassar, 13 Juli 2023

Yang menyatakan,



Zainuddin Nukuhaly

SARI

Daerah penelitian secara administratif termasuk dalam wilayah daerah Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan. Secara geografis terletak pada koordinat 2°30'0.00" LS - 2°32'0.00" LS 121°30'0.00" BT - 121°32'0.00" BT. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan unsur MgO dan SiO₂ endapan nikel laterit pada daerah penelitian. Metode yang digunakan yaitu metode analisis data pengeboran, analisis laboratorium berupa geokimia dengan XRF dan petrografi dengan mikroskop polarisasi, serta analisis korelasi unsur dengan koefisien korelasi. Berdasarkan hasil analisis pengeboran, Profil laterit daerah penelitian terdiri dari lapisan limonit pada bagian atas, lapisan saprolit dengan ciri yaitu berwarna coklat kekuningan-kehijauan dan lapisan batuan induk (*bedrock*) memiliki ciri yaitu berwarna abu-abu kehitaman. Berdasarkan analisis geokimia, distribusi unsur Fe terkayakan secara residu di zona limonit. SiO₂ dan MgO mengalami *leaching* dengan kenaikan secara signifikan ke arah bawah profil laterit dan terkonsentrasi di lapisan *bedrock*. Unsur Ni terkayakan pada lapisan limonit bawah hingga lapisan saprolit, kemudian semakin berkurang pada lapisan *bedrock*. Hubungan Ni dengan SiO₂ berbanding lurus dengan koefisien korelasi sedang. Hubungan Ni dengan MgO berbanding lurus dengan koefisien korelasi sedang. Bijih nikel laterit dari lapisan limonit dengan kadar Ni dibawah 1,5%, Fe diatas 40%, dan MgO dibawah 5% diolah dengan proses hidrometalurgi. Sedangkan bijih nikel laterit dari lapisan transisi dengan kadar Ni 1,5%-2%, Fe 25%-40%, dan MgO dibawah 5%-15% dan lapisan saprolit dengan kadar Ni 1,8%-3%, Fe 15%-35%, dan MgO 15%-35% diolah menggunakan proses pirometalurgi.

Kata kunci : nikel laterit; geokimia; korelasi unsur; hidrometalurgi; pirometalurgi.

ABSTRACT

The research area is administratively included in the areas of Nuha District, East Luwu Regency, and South Sulawesi Province. Geographically, it is located at coordinates 2°30'0.00" LS - 2°32'0.00" LS 121°30'0.00" E - 121°32'0.00" E. This study aims to determine the relationship between MgO and SiO₂ elements of nickel laterite deposits in the study area. The method used is the method of analysis of drilling data, laboratory analysis in the form of geochemistry with XRF and petrography with a polarizing microscope, as well as analysis of elemental correlations with correlation coefficients. Based on the results of the drilling analysis, the laterite profile of the study area consists of a limonite layer at the top, a saprolite layer that is characterized by a yellowish-green color, and the bedrock layer that is characterized by a blackish-gray color. Based on the geochemical analysis, the distribution of elemental Fe is deposited in a residual manner in the limonite zone. SiO₂ and MgO undergo leaching, a significant increase down the laterite profile and inundation in the bedrock layer. Elemental Ni adds to the lower limonite layer to form the saprolite layer, then decreases in the bedrock layer. The association of Ni with SiO₂ is directly proportional to the moderate correlation coefficient. The correlation between Ni and MgO is directly proportional to the moderate correlation coefficient. Lateritic nickel ore from a limonite layer with Ni content below 1.5%, Fe above 40%, and MgO below 5% is processed by the hydrometallurgical process. Whereas lateritic nickel ore from the transition layer with Ni contents of 1.5% -2%, Fe 25% -40%, and MgO below 5% -15% and from the saprolite layer with Ni contents of 1.8% -3%, Fe 15% -35%, and 15%-35% MgO is processed by the pyrometallurgical process.

Keywords : *nickel laterite; geochemistry; elemental correlation; hydrometallurgy; pyrometallurgy.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkah dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyusun laporan penelitian tugas akhir yang berjudul “Analisis Hubungan MgO dan SiO₂ Terhadap Zonasi Endapan Endapan Nikel Laterit Blok “X” PT.Vale Indonesia Tbk, Sorowako, Provinsi Sulawesi Selatan”. Tidak lupa pula Shalawat dan salam atas Nabi Muhammad SAW yang merupakan Rasul Allah.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah membimbing, mengarahkan, dan membantu dalam penyusunan laporan ini, diantaranya :

1. Bapak **Ilham Alimuddin, ST., MGIS., Ph.D** sebagai Pembimbing I atas segala bimbingan, saran, dan arahnya mulai dari penentuan judul hingga proses pembuatan laporan ini.
2. Bapak **Prof. Dr. Adi Tonggiroh, S.T., M.T** sebagai Pembimbing II atas segala bimbingan, saran, dan arahnya mulai dari penentuan judul hingga proses pembuatan laporan ini.
3. Ibu **Dr.Eng. Meutia Farida, S.T., M.T** sebagai Penguji.
4. Ibu **Meinarni Thamrin, S.T., M.T** sebagai Penguji.
5. Bapak **Dr. Eng. Hendra Pachri, S.T., M.Eng** sebagai Ketua Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik Geologi Universitas Hasanuddin atas segala ilmu yang bermanfaat yang telah diberikan.

7. Staf Departemen Teknik Geologi Universitas Hasanuddin yang telah banyak memberikan bantuan demi kelancaran pengurusan administrasi dalam penyusunan laporan ini.
8. Kedua orang tua penulis yaitu Bapak **Musa Nukuhaly** dan Ibu **Intika** serta keluarga yang selalu memberikan motivasi, dukungan, bantuan kepada penulis, baik dukungan moril maupun materil, serta doa restu yang senantiasa terucapkan tiada henti menjadi sumber semangat bagi penulis.
9. Saudara(i) mahasiswa Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah banyak membantu selama penyusunan laporan ini.
10. Himpunan Mahasiswa Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin (HMG FT-UH) atas segala pengalaman berharga yang sarat akan pembelajaran.
11. Berbagai pihak yang penulis tidak dapat sebutkan satu persatu, atas segala bantuan maupun dorongan yang diberikan selama ini.

Dalam penyusunan laporan ini, segala kesalahan dan kekeliruan yang ada tidak luput dari keterbatasan penulis sebagai manusia yang memiliki kekurangan. Oleh karenanya saran dan masukan sangat diharapkan demi perbaikan laporan ini. Akhir kata, semoga penyusunan laporan ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang menggunakannya. Aamiin.

Makassar, 21 Juni 2023

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
SARI.....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Maksud dan Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Lokasi Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Geologi Regional	5
2.1.1 Geomorfologi Regional	5
2.1.2 Stratigrafi Regional.....	6
2.1.3 Struktur Regional	9
2.1.4 Geologi Daerah Penelitian	11
2.2 Batuan Ultramafik.....	14
2.3 Serpentinisasi	16
2.4 Endapan Laterit.....	17
2.5 Profil Laterit.....	20
2.6 Nikel Laterit	23
2.7 Tipe Endapan Nikel Laterit.....	26
2.8 Faktor Pengontrol Nikel Laterit	29
2.9 Analisis Statistik Univariat dan Bivariat.....	29
BAB III METODE DAN TAHAPAN PENELITIAN.....	34
3.1 Variabel Penelitian.....	34
3.2 Metode Penelitian	34

3.2.1	Metode Analisis Data.....	35
3.2.1.1	Analisis Data Pengeboran (<i>coring</i>).....	35
3.2.1.2	Analisis Laboratorium.....	35
3.2.1.3	Analisis Korelasi Unsur.....	37
3.2.2	Penyusunan Laporan.....	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		40
4.1	Karakteristik dan Geokimia Endapan Laterit	40
4.1.1	Zonasi Endapan Laterit	40
4.1.2	Geokimia Endapan Laterit	42
4.1.3	Petrografi Batuan Dasar	68
4.1.4	Klasifikasi Tipe Endapan Laterit	69
4.2	Korelasi Unsur Profil Laterit	70
4.2.1	Korelasi Ni dan Fe	71
4.2.2	Korelasi Ni dan MgO.....	72
4.2.3	Korelasi Ni dan SiO ₂	73
4.2.4	Korelasi MgO dan SiO ₂	74
4.3	Pola Distribusi Bijih Laterit	75
4.3.1	Distribusi Ketebalan Bijih Laterit	76
4.3.2	Distribusi Geokimia Bijih Laterit	77
4.4	Implikasi Bijih Laterit terhadap Pengolahan	77
BAB V PENUTUP.....		80
5.1	Kesimpulan	80
5.2	Saran	81
DAFTAR PUSTAKA.....		82
LAMPIRAN		
1.	Deskripsi Petrografi	
2.	Data Statistik Geokimia	
3.	Peta	
	a. Sebaran Titik Bor	
	b. Distribusi Kadar Ni	
	c. Distribusi Kadar Fe	
	g. Distribusi Ketebalan Bijih Nikel	

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1	Peta tunjuk lokasi daerah penelitian 4
2.1	Pembagian mandala geologi dan tatanan tektonik pulau Sulawesi (Moss dan Wilson, 1998)..... 7
2.2	Struktur geologi danau Matano, Sorowako dan sekitarnya (Golightly, 1979) 12
2.3	Generalisasi profil laterit (Elias,2002)..... 23
2.4	Distribusi vertikal mineral yang umum pada penampang nikel laterit (Elias, 2002)..... 26
2.5	<i>Hydrous silicate deposit</i> , New Caledonia (Freyssinet, dkk., 2005)..... 27
2.6	<i>Clay Silicate deposit</i> , Murrin Australia (Freyssinet, dkk., 2005) 28
2.7	<i>Oxide deposit</i> , Goro New Caledonia (Freyssinet, dkk., 2005) 29
3.1	Diagram alir tahapan penelitian..... 39
4.1	Kenampakan lapisan limonit berwarna coklat kemerahan (A) dan lapisan limonit berwarna coklat kekuningan (B) pada titik bor C196823 38
4.2	Kenampakan lapisan saprolit pada titik bor C196823 41
4.3	Kenampakan lapisan bedrock pada titik bor C196823 41
4.4	Profil vertikal laterit titik bor C361337 42
4.5	Profil vertikal laterit titik bor C361338 44
4.6	Profil vertikal laterit titik bor C361339 46
4.7	Profil vertikal laterit titik bor C361353 47
4.8	Profil vertikal laterit titik bor C173156 49
4.9	Profil vertikal laterit titik bor C361354 51
4.10	Profil vertikal laterit titik bor C361366 53
4.11	Profil vertikal laterit titik bor C361367B..... 55
4.12	Profil vertikal laterit titik bor C361368 57
4.13	Profil vertikal laterit titik bor C361369 59
4.14	Profil vertikal laterit titik bor C361382 61
4.15	Profil vertikal laterit titik bor C199186 63
4.16	Profil vertikal laterit titik bor C361383 65
4.17	Profil vertikal laterit titik bor C196823 67

4.18	Kenampakan petrografi sayatan ST01 litologi <i>Lherzolite</i> dengan komposisi mineral terdiri dari olivin (OL), klinopiroksin (Cpx), ortopiroksin (Opx), chromit (Cr) dan serpentin (Srp).....	65
4.19	Sketsa profil laterit daerah penelitian	70
4.20	Grafik korelasi unsur Ni dan Fe	71
4.21	Grafik korelasi unsur Ni dan MgO	73
4.22	Grafik korelasi unsur Ni dan SiO ₂	74
4.23	Grafik korelasi unsur MgO dan SiO ₂	75

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
2.1	Peran beberapa elemen selama pelapukan laterit (Ahmad, 2009)	19
2.2	Interval koefisien korelasi (Sugiyono, 2013)	33
4.1	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C361337.....	40
4.2	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C361338.....	43
4.3	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C361339.....	45
4.4	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C361353.....	47
4.5	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C173156.....	48
4.6	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C361354.....	50
4.7	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C361366.....	52
4.8	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C361367B	54
4.9	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C361368.....	56
4.10	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C361369.....	58
4.11	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C361382.....	60
4.12	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C199186.....	62
4.13	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C361383.....	64
4.14	Persentase unsur mayor dan minor titik bor C196823.....	66
4.15	Nilai koefisien korelasi(r_s) unsur Ni dan Fe	71
4.16	Nilai koefisien korelasi(r_s) unsur Ni dan MgO.....	72
4.17	Nilai koefisien korelasi(r_s) unsur Ni dan SiO ₂	73
4.18	Nilai koefisien korelasi(r_s) unsur MgO dan SiO ₂	74
4.19	Distribusi bijih laterit berdasarkan relief.....	76
4.20	Pengolahan bijih nikel laterit berdasarkan spesifikasi.....	78

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Laterit merupakan hasil dari pelapukan kimia batuan yang berada di permukaan bumi yang terdiri berbagai macam mineral-mineral primer yang tidak stabil oleh pelarutan air dan mineral-mineral baru akan terbentuk yang lebih stabil terhadap lingkungan permukaan. Laterit sangat penting terhadap pembentukan suatu deposit mineral sebagai proses dari interaksi kimia dengan proses lateritisasi yang menghasilkan konsentrasi beberapa elemen (Evans, 1993).

Nikel merupakan salah satu di antara produk hasil pelapukan batuan ultramafik yang terbentuk melalui proses laterisasi salah satunya. Pelapukan pada batuan ultramafik menyebabkan unsur-unsur dalam batuan yang memiliki mobilitas tinggi akan terendapkan pada bagian bawah endapan laterit, sedangkan unsur – unsur yang memiliki mobilitas rendah akan mengalami pengkayaan residual. Hal ini akan mempengaruhi komposisi mineralogi dan volume setiap unsur selama proses pelapukan endapan laterit (Ahmad 2008).

Pada proses penambangan bijih nikel laterit umumnya terdapat perbedaan kadar dari bijih nikel laterit, hal ini dikarenakan perbedaan karakteristik pada masing-masing endapan nikel laterit. Variabilitas maupun heterogenitas endapan laterit dapat diketahui dari sifat fisik, jenis laterit, litologi maupun kondisi morfologinya, juga perbedaan sifat kimia berupa persentase dari kandungan unsur- unsur mayor dan minor kimianya. Oleh karenanya, pengetahuan terkait

perilaku berbagai unsur selama proses laterisasi sangat penting dalam memahami proses pembentukan endapan nikel laterit.

Berkaitan dengan hal tersebut, maka dilakukan penelitian dengan judul “Analisis keterkaitan MgO dan SiO₂ Terhadap Zonasi Endapan Nikel Laterit Blok “X” PT.Vale Indonesia Tbk, Sorowako, Provinsi Sulawesi Selatan”.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik endapan nikel laterit pada daerah penelitian?
2. Bagaimana korelasi SiO₂ dan MgO terhadap pembentukan zonasi endapan nikel laterit?
3. Bagaimana implikasi rasio SiO₂/MgO (S/M) terhadap pengolahan bijih nikel laterit?

1.3 Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah melakukan penelitian mengenai “analisis hubungan MgO dan SiO₂ terhadap zonasi endapan nikel laterit blok “X” PT.Vale Indonesia Tbk, Sorowako, Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan”.

Adapun tujuan dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut :

1. Mengidentifikasi karakteristik endapan nikel laterit pada daerah penelitian.
2. Mengidentifikasi korelasi SiO₂ dan MgO pada endapan nikel laterit.

3. Mengetahui implikasi rasio SiO_2/MgO (S/M) terhadap pengolahan bijih nikel laterit.

1.4 Batasan Masalah

Dalam melakukan penelitian dan pembahasan pada tulisan ini, penulis membatasi pada karakteristik endapan nikel laterit dengan analisis korelasi terhadap MgO dan SiO_2 pada endapan nikel laterit serta implikasi rasio SiO_2/MgO (S/M) terhadap pengolahan bijih nikel laterit pada lokasi penelitian.

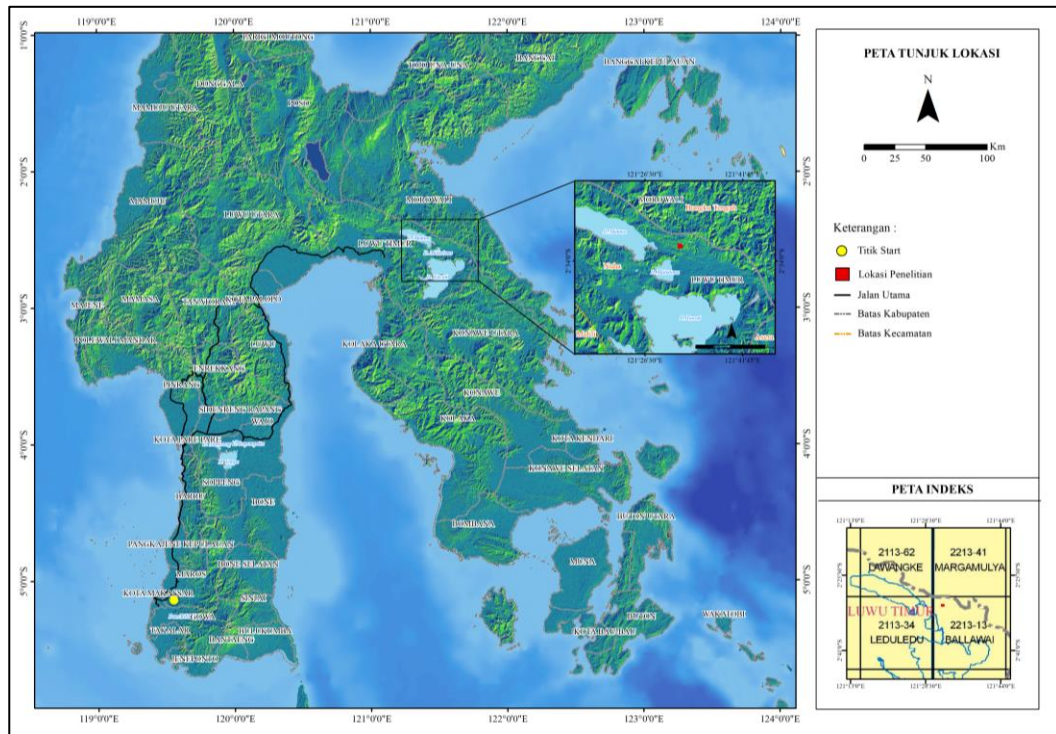
1.5 Lokasi Penelitian

Secara administratif daerah penelitian termasuk dalam daerah Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan dengan Batas geografis yaitu :

1. Sebelah utara berbatasan dengan Danau Matano, Kabupaten Poso dan Provinsi Sulawesi Tengah.
2. Sebelah barat berbatasan dengan Wasuponda, Kecamatan Bone-Bone dan Kabupaten Luwu Utara.
3. Sebelah selatan berbatasan dengan Wawondula, Kabupaten Kendari, Provinsi Sulawesi Tenggara dan Teluk Bone.
4. Sebelah timur berbatasan dengan Danau Mahalona dan Provinsi Sulawesi Tengah.

Secara geografis terletak di bagian selatan garis khatulistiwa yang terletak pada posisi $2^{\circ}30'0.00''$ LS - $2^{\circ}32'0.00''$ LS $121^{\circ}30'0.00''$ BT - $121^{\circ}32'0.00''$ BT. Kondisi topografi wilayah pusat Sorowako umumnya pegunungan dan perbukitan.

Penelitian ini dilakukan di Blok “X” PT.Vale Indonesia Tbk, Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan.



Gambar 1.1 Peta tunjuk lokasi daerah penelitian

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional

Secara regional daerah penelitian termasuk dalam stratigrafi regional daerah penelitian termasuk dalam Peta Geologi Lembar Bungku yang dipetakan oleh Simandjuntak,dkk (1993).

2.1.1 Geomorfologi Regional

Morfologi pada daerah ini terbagi menjadi lima satuan, di antaranya dataran rendah, dataran menengah, perbukitan menggelombang, karst dan pegunungan (Simandjuntak, dkk., 1993).

Morfologi dataran rendah memiliki ketinggian antara 0 - 50 meter di atas muka laut. Menempati daerah sepanjang pantai timur, terkecuali di pantai dekat desa Todua, Tabo dan Lalompe. Morfologi ini disusun oleh endapan sungai, pantai dan rawa.

Morfologi dataran menengah memiliki ketinggian di atas 300 meter di atas muka laut. Menempati daerah pantai timur Danau Towuti di sekitar Desa Tokalimbo dan Desa Tonsea, juga daerah yang terletak di antara Danau Mahalona dan Bulu Biniu. Morfologi ini disusun oleh endapan danau.

Morfologi perbukitan menggelombang, memiliki ketinggian antara 100 - 400 meter di atas muka laut. Menempati daerah sebelah utara Pegunungan Verbeek, antara Sungai Ongkaya dan Sungai Bulu Mbelu, daerah sekitar

Lamona, daerah sekitar Bahu Mahoni, sekitar Kampung Tabo serta di sekitar Bulu Talowa. Morfologi ini disusun oleh batuan sedimen dan Formasi Tomata.

Morfologi karst, memiliki ketinggian antara 400 - 800 meter di atas muka laut, adanya perbukitan kasar, sungai bawah tanah dan dolina menjadi penciri terhadap morfologi ini. Menempati daerah Sungai Ongkaya, Sungai Tetambahu, antara Sungai Bahu Mbelu dan Sungai Wata, antara Sungai Ambuno mengarah ke tenggara sampai sekitar Gunung Wahombaja, dan daerah perbukitan selatan membentang serta Pegunungan Wawoombu di barat sampai Pegunungan Lalompa di timur. Morfologi ini disusun oleh batuan karbonat dan Formasi Tokala, Matano dan Salodik.

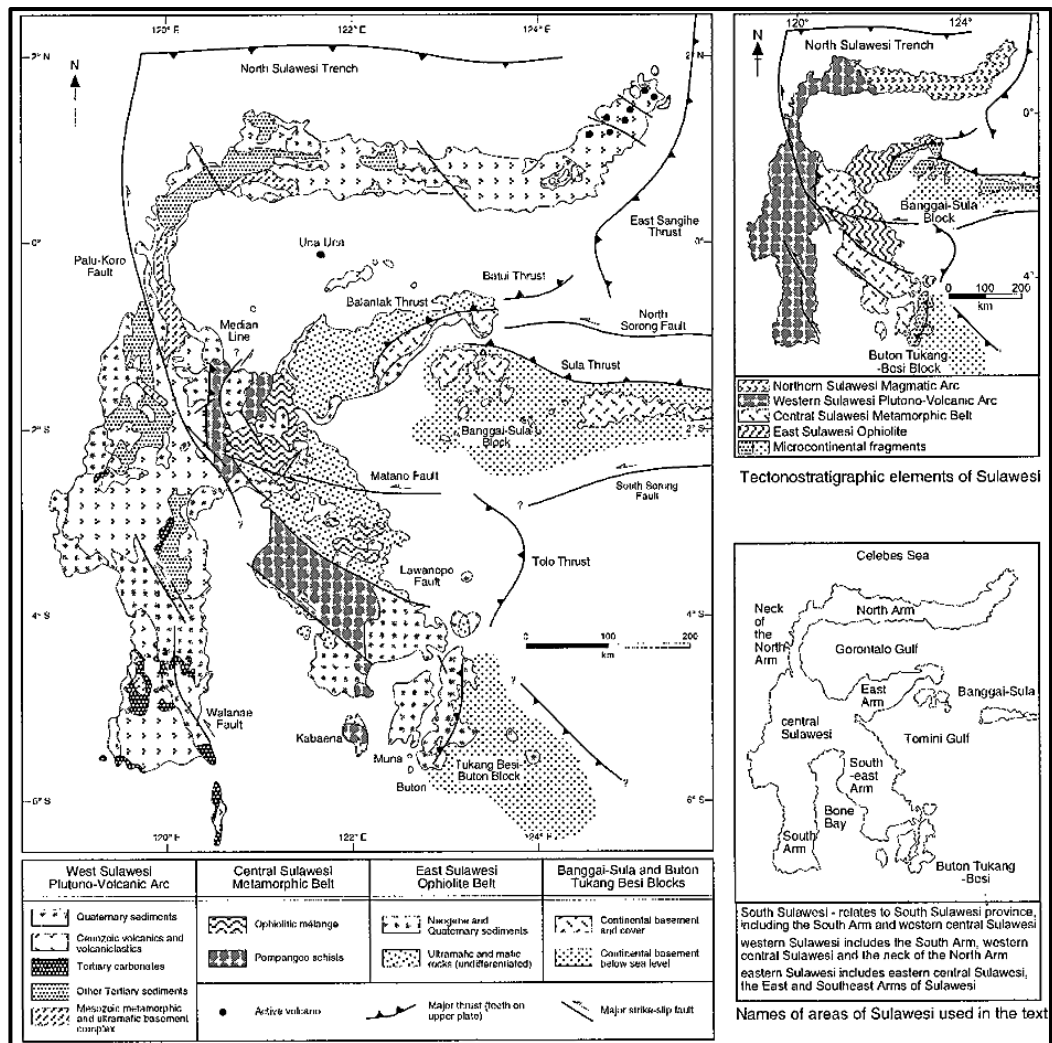
Morfologi Pegunungan, memiliki ketinggian lebih dari 700 meter di atas muka laut. Menempati lebih dari setengah daerah lembar ini, di antaranya pegunungan sekitar punggung pemisah air Bulu Karoni yang mengarah barat laut - tenggara, serta punggung pemisah air Wawoombu yang mengarah baratdaya - timurlaut. Puncak terdiri dari Bulu Lampesu (1068 mdpl) dan Bulu Karoni (1422 mdpl). Morfologi ini disusun oleh batuan ultramafik.

2.1.2 Stratigrafi Regional

Menurut Sukamto (1975) menyatakan bahwa pulau Sulawesi dan sekitarnya dibagi menjadi 3 Mandala Geologi di antaranya; Mandala Geologi Sulawesi Barat yang dicirikan dengan terdapatnya jalur gunung api Paleogen, Intrusi Neogen dan sedimen Mesozoikum. Mandala Geologi Sulawesi Timur yang dicirikan oleh terdapatnya batuan Ofiolit berupa batuan Ultramafik Peridotit,

Hazburgit, Dunit, Piroksenit dan Serpentin yang diperkirakan berumur Kapur. Mandala Geologi Banggai Sula yang dicirikan oleh batuan dasar berupa Metamorf, batuan plutonik yang bersifat granitis berumur Trias dan Batuan Sedimen Mesozoikum.

Menurut Simandjuntak (1993) dan Moss dan Wilson (1998) Pulau Sulawesi dapat dibagi menjadi 4 Mandala (Gambar 2.1) di antaranya yaitu Mandala Plutono-vulkanik Sulawesi Barat, Mandala Ofiolit Sulawesi Timur, Lajur Malihan Sulawesi Tengah, Mandala Banggai Sula-Tukangbesi.



Gambar 2.1 Pembagian mandala geologi dan tatanan tektonik pulau Sulawesi (Moss dan Wilson, 1998)

Satuan batuan di Lembar Bungku dapat dikelompokkan dalam dua mandala, yaitu Mandala Banggai-Sula dan Mandala Sulawesi Timur (Sukanto, 1975).

Mendala Banggai-Sula mencakup Formasi Tokala (TR Jt) tersusun di antaranya atas batugamping klastika dengan sisipan batupasir sela, diperkirakan umurnya Trias - Jura Awal. Formasi Tokala ditindih secara selaras oleh Formasi Nanaka (Jn) yang tersusun atas konglomerat, batupasir kuarsa mikaan, serpih dan lensa batubara yang diperkirakan umurnya Jura Akhir. Formasi Masiku (KJn) terdiri dari batusabak, filit, batupasir, batugamping, berumur Jura Akhir - Kapur Awal. Formasi Salodik (Tems) diendapkan pada Eosen Akhir - Miosen Awal terdiri atas kalsilit, batugamping pasiran dan batupasir (Simandjuntak,dkk., 1993).

Mandala Sulawesi Timur mencakup Kompleks Ultramafik (Ku) yang hingga kini umumnya dianggap yang tertua. Batuannya tersusun harzburgit, lherzolit, wehrlit, websterlit, serpentinit, dunit dan gabro. Secara tektonik Kompleks Ultramafik menindih satuan batuan yang berumur Mesozoikum, baik itu dari Mendala Banggai-Sula atau juga Mandala Sulawesi Timur. Formasi Matano (Km) tersusun atas kalsilit hablur bersisipan napal, serpih dan rijang yang diduga umurnya Kapur Akhir. Formasi Matano secara tak selaras tertindih oleh Formasi Tomata (Tmpt) yang tersusun dari atas batupasir, lempung, tufa, dan konglomerat dengan sisipan lignit, yang diperkirakan umurnya Miosen Akhir - Pliosen. Pada beberapa tempat terdapat aluvium (Qa) yang menindih secara tak selaras Formasi Tomata. Aluvium berupa endapan sungai, pantai rawa dan danau,

terdiri dari atas kerikil, kerakal, pasir lempung dan sisa tumbuhan. Endapan muda tersebut diduga umurnya Plistosen – Holosen (Simandjuntak,dkk., 1993).

2.1.3 Struktur Regional

Sesar dan lipatan Struktur merupakan struktur utama di daerah ini. Sesar meliputi sesar turun, sesar geser, sesar naik dan sesar sungkup yang diduga berlangsung sejak Mesozoikum (Simandjuntak, dkk.,1993).

Sesar Matano sebagai sesar utama dengan arah baratlaut-tenggara menunjukkan gerakan mengiri yang diduga bersambung dengan Sesar Sorong. Keduanya merupakan satu sistem sesar jurus yang diduga telah terbentuk sejak Oligosen. Kelanjutannya diperkirakan pada Sesar Palu-Koro yang juga menunjukkan gerakan mengiri (di luar Lembar Bungku; yang diperkirakan masih aktif).

Sesar lain di daerah ini lebih kecil yang merupakan sesar tingkat kedua atau mungkin tingkat ketiga. Lipatan yang terdapat di Lembar ini tergolong lipatan terbuka, tertutup, dan pergentengan.

Struktur geologi Lembar Bungku memperlihatkan ciri kompleks tumbukan dari pinggiran benua yang aktif. Berdasarkan struktur, himpunan batuan, biostratigrafi dan umur, daerah ini dapat dibagi menjadi dua kelompok yang sangat berbeda, yaitu Alohton yang terdiri dari Ofiolit dan Malihan, sedangkan Autohton terdiri dari batuan gunungapi dan pluton Tersier dari pinggiran Sundaland, serta kelompok Molasa Sulawesi (Simandjuntak, dkk., 1991).

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 barat laut. Di duga pula kedua sesar itu masih aktif sampai sekarang, keduanya Bersatu di bagian barat laut. Diduga pula kedua sesar tersebut terbentuk sejak Oligosen dan bersambungan dengan Sesar Sorong sehingga merupakan suatu sistem Sesar Transform. Sesar lain yang lebih kecil berupa tingkat pertama dan atau kedua yang terbentuk bersamaan atau setelah sesar utama tersebut.

Pada Kala Oligosen, Sesar Sorong yang menerus ke Sesar Matano dan Palu Koro mulai aktif dalam bentuk sesar transcurrent. Akibatnya mikrokontinen Banggai Sula bergerak ke arah barat dan terpisah dari benua Australia. Lipatan yang terdapat di daerah ini dapat digolongkan ke dalam lipatan lemah, lipatan tertutup, dan lipatan tumpang-tindih, sedangkan kekar terdapat dalam hampir semua jenis batuan dan tampaknya terjadi dalam beberapa periode.

Pada Kala Miosen Tengah, bagian timur kerak samudera di Mandala Sulawesi Timur yakni Lempeng Banggai Sula yang bergerak ke arah barat tersorong naik (terobduksi). Di bagian barat lajur penunjaman dan busur luar tersesar sungkupkan di atas busur gunungapi, mengakibatkan ketiga Mandala tersebut saling berhimpit.

Kelurusan Matano sepanjang 170 km dinamakan berdasarkan nama danau yang dilaluinya yakni danau Matano. Analog dengan sesar Palu Koro sesar Matano ini merupakan sesar mendatar sinistral, membentang membelah timur Sulawesi dan bertemu kira-kira disebelah utara Bone, pada kelurusan Palu-Koro. Sesar-sesar sistem Riedel berkembang dan membentuk sistem rekahan umum.

Sepanjang sesar mendatar ini terdapat juga cekungan tipe pull apart. Yang paling nyata adalah Danau Matano dengan batimetri sekitar 600 m dan dikontrol oleh sesar-sesar normal yang menyudut terhadap kelurusan Matano. Medan gaya yang diamati di lapangan memperlihatkan bahwa tekanan umumnya horizontal dan berarah tenggara - barat laut didampingi tarikan timur laut - barat daya. Sesar Matano bermuara di Laut Banda pada cekungan dan teluk Losoni sebagai pull apart basin dan menerus ke laut sampai ke utara anjakan bawah laut Tolo.

2.1.4 Geologi Daerah Penelitian

Menurut Sukamto (1975) daerah Sorowako dan sekitarnya termasuk dalam Mandala Indonesia bagian timur dengan dicirikan batuan ofiolit dan malihan yang pada beberapa tempat tertindih oleh sedimen Mesozoikum.

Golightly (1979) dalam Kumarawarman (2016) membagi Geologi Daerah Sorowako dibagi menjadi tiga bagian yaitu :

1. Satuan batuan sedimen yang berumur Kapur yang terdiri dari Batugamping laut dalam dan rijang. Pada bagian Barat wilayah Sorowako dibatasi oleh sesar naik dengan kemiringan ke arah Barat.
2. Satuan Batuan Ultrabasa yang berumur awal Tersier, umumnya terdiri dari jenis peridotit, yang sebagian mengalami serpentinisasi dengan derajat yang bervariasi dan umumnya terdapat dibagian Timur. Pada satuan ini juga terdapat intrusi-intrusi pegmatit yang bersifat gabroik dan terdapat di bagian utara.

3. Satuan alluvial dan sedimen danau (*lacustrine*) yang berumur kuartar, umumnya terdapat di bagian utara dekat desa Sorowako.

Sesar besar yang berada di sekitar daerah menyebabkan relief topografi hingga 600 meter di atas muka laut dan hingga sekarang aktif tererosi. Sejarah tektonik dan geomorfik di kompleks ini berperan penting dalam pembentukan nikel laterit. Sesar Matano yang membuat topografi *lineament* cukup kuat adalah sesar aktif dan menggeser Matano *limestone* dan batuan lainnya sejauh 18 km ke arah barat pada sisi Utara. Danau Matano yang mempunyai kedalaman sekitar 600 m diduga merupakan graben yang terbentuk akibat efek zona dilatasi dari sesar tersebut. Danau Towuti pada sisi Selatan dari sesar diduga adalah pergeseran dari Tambalako akibat pergerakan sesar Matano. Pergerakan sesar ini memblokir aliran air ke arah Utara sepanjang lembah dan membentuk Danau Towuti dan aliran airnya mengalir ke barat menuju sungai Larona. Danau – danau yang terbentuk akibat dari *damming effect* akibat sesar ini adalah bendungan alami sehingga

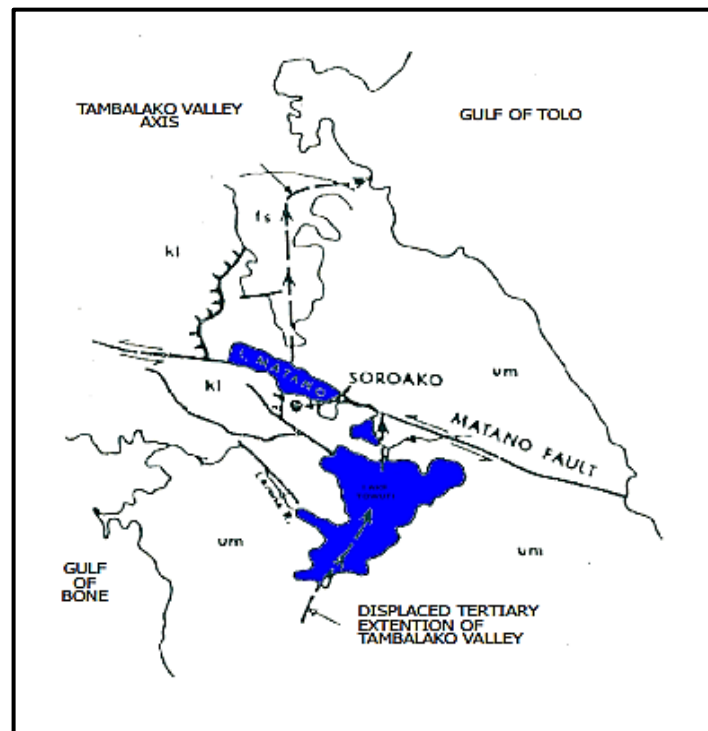
menahan laju erosi dan membantu mempertahankan endapan nikel laterit yang terbentuk pada daerah Sorowako.

Gambar 2.2 Struktur geologi danau Matano, Sorowako dan sekitarnya (Golightly, 1979)

2.2 Batuan Ultramafik

Batuan Ultramafik merupakan batuan yang terdiri dari mineral-mineral yang bersifat mafik (*ferromagnesian*), seperti olivin, piroksin, hornblend dan mika. Keseluruhan batuan ultramafik mempunyai indeks warna $>70\%$ (Ahmad, 2002).

Hal yang perlu diperhatikan bahwa istilah “ultrabasa” dan “ultramafik” tidak identik. Hampir sebagian besar batuan ultramafik juga ultrabasa, sedangkan tidak semua batuan ultrabasa yang ultramafik. Sehingga batuan yang kaya akan



feldspathoid merupakan ultrabasa namun bukan batuan ultramafik, karena tidak mengandung mineral ferromagnesian (Ahmad, 2002).

Berikut adalah jenis – jenis dari batuan ultramafik, antara lain:

- a) Peridotit, umumnya membentuk suatu kelompok batuan ultramafik yang disebut ofiolit, umumnya membentuk tekstur kumulus yang terdiri dari atas harsburgit, lertzolit, werlite dan dunit. Peridotit tersusun atas mineral – mineral holokristalin dengan ukuran medium – kasar dan berbentuk anhedral. Komposisinya terdiri dari olivin dan piroksin. Mineral aksesorisnya berupa plagioklas, hornblende, biotit dan garnet.
- b) Piroksinit, piroksinit merupakan kelompok batuan ultramafik monomineral dengan kandungan mineral yang hampir sepenuhnya adalah piroksin. Dalam hal ini Piroksinit diklasifikasikan lebih lanjut apakah masuk kedalam Piroksin ortorombik atau monoklin.
- c) Hornblendit, merupakan batuan ultramafik monomineral dengan komposisi mineral sepenuhnya hornblend.
- d) Dunit, merupakan batuan yang hampir murni olivin (90-100%), umumnya hadir sebagai forsterit atau kristolit, terdapat sebagai sill atau korok-korok halus (dalam dimensi kecil). Menurut Ahmad (2002), dunit memiliki komposisi mineral hampir seluruhnya adalah monomineralik olivine (umumnya magnesia olivin), mineral aksesorisnya meliputi kromit, magnetit, ilmenit dan spinel. Pembentukan dunit berlangsung pada kondisi padat atau hampir padat (pada temperatur yang tinggi) dalam larutan magma dan sebelum mendingin pada temperatur tersebut, batuan tersebut

siap bersatu membentuk massa olivin anhedral yang saling mengikat. Terbentuk batuan yang terdiri dari olivin murni (dunit) misalnya, membuktikan bahwa larutan magma (*liquid*) berkomposisi olivin memisah dari larutan yang lain.

- e) Serpentin, merupakan batuan hasil alterasi hidrotermal dari batuan ultramafik, dimana mineral-mineral olivin dan piroksin jika alterasi akan membentuk mineral serpentin. Serpentin sangat umum memiliki komposisi batuan berupa monomineralik serpentin, batuan tersebut dapat terbentuk dari serpentinisasi dunit, peridotit (Ahmad, 2002). Serpentin dapat dihasilkan dari mantel oleh hidrasi dari mantel ultramafik (mantel peridotit dan dunit). Di Bawah pegunungan tengah samudera (*mid Oceanic Ridge*) pada temperatur $<500^{\circ}\text{C}$.

2.3 Serpentinisasi

Serpentinisasi merupakan suatu reaksi eksotermis, hidrasi yang di mana air bereaksi dengan mineral mafik seperti olivin dan piroksen sehingga menghasilkan lizardit, antigorit dan / atau krisotil (Palandri dan Reed, 2004).

Terjadinya proses serpentinisasi dengan adanya penambahan air, adanya pelarutan magnesia (atau penambahan silika), adanya pelepasan besi dalam olivin (Fe, Mg), konversi besi yang lepas dari ikatan *ferro* (Fe^{2+}) menjadi *ferri* (Fe^{3+}) yang membentuk magnetit berbutir halus. Sehingga batuan terserpentinisasi umumnya akan menjadi lebih magnetik. Dampak yang sangat signifikan terhadap

karakterisasi tanah laterit yang ada diakibatkan peran mineral serpentin pada batuan dasar penghasil laterit.

Batuan dasar penghasil tanah laterit umumnya merupakan batuan ultramafik yang rendah akan unsur Si, dan tinggi akan unsur Fe, Mg serta terdapat unsur Ni yang berasal langsung dari mantel bumi. Keterdapatannya mineral serpentin pada batuan ultramafik menjadi suatu peranan pada pengkayaan unsur logam Ni pada tanah laterit. Proses serpentinisasi akan menyebabkan perubahan tekstur mineralogi dan senyawa pada mineral olivin maupun piroksen, pengurangan atau perubahan komposisi unsur Mg, Ni dan Fe pada mineralnya (Ahmad, 2002).

2.4 Endapan Laterit

Endapan laterit diartikan sebagai hasil dari proses pelapukan yang intensif di daerah *warm* maupun *tropic* dan kaya akan mineral lempung yang bersifat *kaolinitic* serta Fe- dan Al- *oxide/hydroxide*. Endapan laterit pada umumnya menampakkan bidang perlapisan yang baik sebagai hasil reaksi antara air hujan yang masuk ke dalam formasi dan kelembaban tanah yang naik ke atas permukaan (Maulana, 2017)

Laterit menurut Evans (1993), merupakan produk sisa dari pelapukan kimia batuan di permukaan bumi, sehingga mineral primer mengalami ketidakstabilan karena adanya air kemudian larut atau pecah sehingga membentuk mineral baru yang lebih stabil. Laterit penting karena berperan sebagai induk untuk endapan bijih ekonomis. Contoh terkenal dari endapan laterit yaitu endapan bijih bauksit, endapan bijih besi dan endapan bijih nikel.

Laterit merupakan sumber dari beberapa mineral ekonomis diantaranya bauksit dan nikel (Ni), mangan (Mn), tembaga (Cu), emas (Au) dan platinum *group element* (PGE). Zona saprolit merupakan bagian paling bawah dari profil laterit disebut dengan yang merupakan zona pelapukan tinggi dimana tekstur primer dan fabrik dari batuan asalnya masih dapat dilihat. Akibat fluida yang bersifat *oxide* dan asam, maka bagian paling bawah dari zona ini dicirikan dengan tidak stabilnya *sulfide* dan karbonat dengan hasil pencucian atau *leaching* dari logam-logam *chalcopile* dan unsur-unsur alkalin. Bagian bawah dari zona saprolit ini dicirikan dengan terurainya mineral-mineral *feldspar* dan *ferromagnesian*, sementara Si dan Al akan tetap tinggal pada mineral lempung (*kaolinite* dan *halloysite*). (Maulana, 2017).

Pada dasarnya perilaku berbagai unsur selama proses lateralisasi dikendalikan oleh dua faktor, yaitu: (Ahmad, 2009).

- a. Sifat kimia tertentu dari masing-masing unsur itu sendiri (geokimia).
- b. Kondisi lingkungan yang berlaku di antaranya suhu, curah hujan, kondisi batuan, kondisi pH, dll.
- c. Ca. Kalsium memiliki sifat yang sangat larut dalam air tanah di daerah tropis.
- d. Mg. Magnesium sangat larut dalam air tanah. Dalam kondisi tropis basah, magnesia dapat dengan cepat keluar dari profil laterit. Namun, di bawah kondisi iklim basah-kering, beberapa magnesia dalam bentuk lempung dalam profil laterit mungkin terhambat.

- e. Si. Silika memiliki kelarutannya lebih rendah dari magnesia, silika seringkali dapat diendapkan dalam zona saprolitik dari profil laterit di mana magnesia secara aktif masuk ke dalam larutan.
- f. Fe. Kelarutan zat besi sangat bervariasi tergantung pada keadaan valensinya, dimana zat besi (Fe ⁺⁺) cukup larut dalam air tanah sedangkan zat besi (Fe ⁺⁺⁺) sangat tidak larut.
- g. Al. Alumina adalah salah satu unsur yang tidak bergerak yang ada dalam profil laterit selama air tanah berada pada kisaran pH 4,5 hingga 9,5 (sebagian besar air tanah memang termasuk dalam kisaran ini)
- h. Cr. Kromium dalam kromit tidak larut dalam air tanah dan sangat stabil, bertahan sebagai kromit di zona limonit laterit.
- i. Mn dan Co memiliki mobilitas agak rendah di perairan asam dan cenderung bergerak ke bawah profil laterit. Namun, mereka mencapai tingkat ketidaksuburan mereka lebih cepat (dan lebih awal dari nikel) dan diendapkan baik di bagian bawah zona limonit atau di bagian atas zona saprolit. Konsentrasi kobalt umumnya mengikuti mangan dalam profil laterit.

Tabel 2.1 Peran beberapa elemen selama pelapukan laterit (Ahmad, 2009)

<i>Element</i>	<i>Exists in the ultramafics as</i>	<i>Role during lateritic weathering</i>
Ca	Cpx > Opx > Oliv	<i>Highly mobile. Leached away</i>
Na	<i>Very little</i>	<i>Highly mobile. Leached away</i>
Mg	Oliv > Opx > Cpx	<i>Highly mobile. Mostly leached away. Some stays behind as clay minerals</i>

K	<i>Very little</i>	<i>Highly mobile. Mostly leached away. Some stays behind as clay minerals</i>
Si	<i>Opx > Cpx > Oliv</i>	<i>Highly mobile. Mostly leached away. Some stays behind as clay minerals and silica boxwork.</i>
Mn	<i>Oliv > Opx > Cpx</i>	<i>Semi-mobile. Forms oxide (pyrolusite) and hydroxides (manganite, pyrochroite & psilomelane)</i>
Co	<i>Oliv > Opx > Cpx</i>	<i>Semi-mobile. Follows manganese</i>
Ni	<i>Oliv > Opx > Cpx</i>	<i>Semi-mobile. Forms nickel serpentine, nickel talc, nickel chlorite and nickel clays</i>
Al	<i>Cpx > Opx > Oliv</i>	<i>Non-mobile. Stays behind as boehmite, bauxite & gibbsite</i>
Cr	<i>Cpx > Opx > Oliv</i>	<i>Non-mobile. Stays behind as chromite</i>
Fe	<i>Oliv > Opx > Cpx</i>	<i>Non-mobile. Stays behind as oxides (hematite & maghemite) and hydroxides (turgite, goethite, hydrogoethite, limonite, ferrihydrite, xanthosiderite & esmeraldaite)</i>

2.5 Profil Laterit

Pelapukan kimia pada batuan ultrabasa biasanya disertai dengan fraksinasi dari elemen-elemen menjadi tipe yang larut dan tidak larut dalam air. Elemen-elemen yang larut dalam air nantinya akan tercuci keluar dari sistem pelapukan sementara elemen-elemen yang tidak larut dalam air akan tertinggal sebagai pengayaan residu. Proses pelapukan kimia pada akhirnya akan menghasilkan pembentukan profil laterit dengan urutan laterit termuda pada bagian bawah dan laterit tertua pada bagian atas.

Menurut Golightly (1979) profil laterit dibagi menjadi 4 zonasi, yaitu:

1. Zona Limonit

Zona ini berada paling atas pada profil dan masih dipengaruhi aktivitas permukaan dengan kuat. Zona ini tersusun oleh humus dan limonit. Mineral-mineral penyusunnya adalah goethit, hematit, tremolit dan mineral-mineral lain yang terbentuk pada kondisi asam dekat permukaan dengan relief relatif datar. Secara umum material-material penyusun zona ini berukuran halus (lempung-lanau), sering dijumpai mineral stabil seperti spinel, magnetit dan kromit.

2. *Zona Medium Grade Limonit*

Sifat fisik zona *Medium Grade Limonit* tidak jauh berbeda dengan zona overburden. Tekstur sisa batuan induk mulai dapat dikenali dengan hadirnya fragmen batuan induk, yaitu peridotit atau serpentinit. Rata-rata berukuran antara 1-2 cm dalam jumlah sedikit. Ukuran material penyusun berkisar antara lempung-pasir halus. Ketebalan zona ini berkisar antara 0-6 meter. Umumnya singkapan zona ini terdapat pada lereng bukit yang relatif datar. Mineralisasi sama dengan zona limonit dan zona saprolit, yang membedakan adalah hadirnya kuarsa, lihopirit, dan opal.

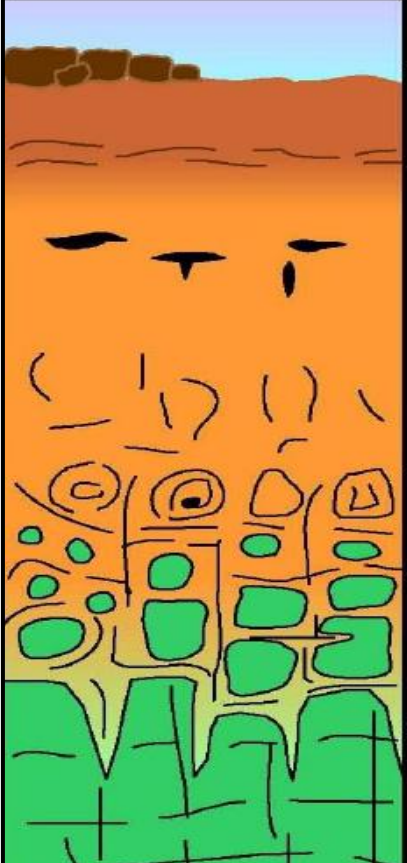
3. Zona Saprolit

Zona saprolit merupakan zona bijih, tersusun atas fragmen-fragmen batuan induk yang teralterasi, sehingga mineral penyusun, tekstur dan struktur batuan dapat dikenali. Derajat serpentinisasi batuan asal laterit akan mempengaruhi pembentukan zona saprolit, dimana peridotit yang sedikit

terserpentinisasi akan memberikan zona saprolit dengan inti batuan sisa yang keras, pengisian celah oleh mineral – mineral garnierit, kalsedon-nikel dan kuarsa, sedangkan serpentinit akan menghasilkan zona saprolit yang relatif homogen dengan sedikit kuarsa atau garnierit.

4. Zona batuan induk (*Bedrock zone*)

Zona batuan induk berada pada bagian paling bawah dari profil laterit. Batuan induk ini merupakan batuan yang masih segar dengan pengaruh proses-proses pelapukan sangat kecil. Batuan induk umumnya berupa peridotit, serpentinit, atau peridotit terserpentinisasikan.

SCHEMATIC LATERITE PROFILE	COMMON NAME	APPROXIMATE ANALYSIS (%)			
		Ni	Co	Fe	MgO
	RED LIMONITE	<0.8	<0.1	>50	<0.5
	YELLOW LIMONITE	0.8 to 1.5	0.1 to 0.2	40 to 50	0.5 to 5
	TRANSITION	1.5 to 4	0.02 to 0.1	25 to 40	5 to 15
	SAPROLITE/ GARNIERITE/ SERPENTINE	1.8 to 3		10 to 25	15 to 35
	FRESH ROCK	0.3	0.01	5	35 to 45

Gambar 2.3 Generalisasi profil laterit (Elias,2002)

2.6 Nikel Laterit

Endapan nikel laterit terbentuk dari hasil proses pelapukan yang sangat intensif di daerah tropis pada batuan yang mengandung nikel seperti, dunit (olivin), peridotit (olivin+piroksin), dan serpentin. Proses pelapukan pada batuan asal tersebut (lateralisasi) menyebabkan nikel berubah menjadi larutan dan diserap oleh mineral-mineral oksida besi yang membentuk garnierite pada lapisan saprolit (Golightly, 1981 dalam Maulana, 2017).

Mineral piroksin dan olivin pada batuan asalnya mengalami proses serpentinisasi oleh akibat adanya interaksi dengan air laut (*seawater*) atau selama proses *low-grade* metamorphism atau alterasi. Pada beberapa kasus proses serpentinisasi ini terjadi sebelum adanya proses laterisasi. Alterasi olivin akibat proses hidrasi akan menyebabkan perubahan menjadi silika *amorphous*, serpentin dan limonit.

Proses pelapukan dimulai pada batuan ultramafik (peridotit, dunit, serpentin) yang banyak mengandung mineral olivin, piroksin, magnesium silikat, dan besi silikat dengan kandungan nikel kira-kira sebesar 0.30%. Proses laterisasi pada endapan nikel laterit diartikan sebagai proses pencucian pada mineral yang mudah larut dan mineral silika dari profil laterit pada lingkungan yang bersifat asam, hangat, dan lembab, serta membentuk konsentrasi endapan hasil pengayaan proses laterisasi pada unsur Fe, Cr, Al, Ni, dan Co.

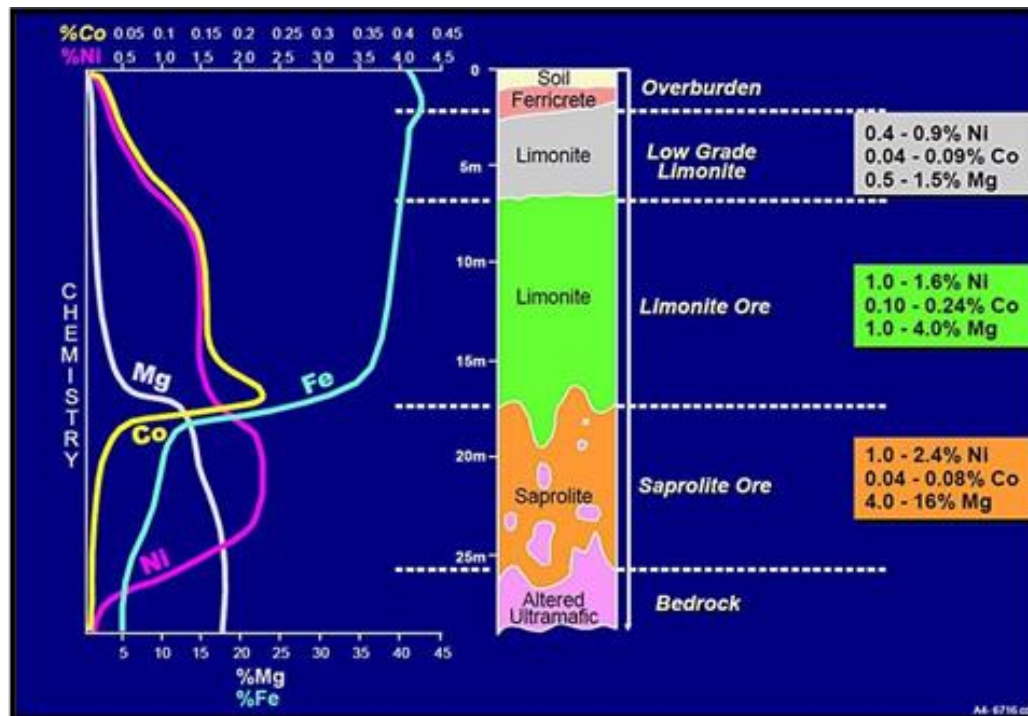
Air permukaan yang mengandung CO₂ dari atmosfer dan terkayakan kembali oleh material-material organik di permukaan meresap ke bawah permukaan tanah sampai pada zona pelindian (*leaching zone*), tempat terjadinya fluktuasi air tanah berlangsung. Akibat fluktuasi ini, air tanah yang kaya CO₂ akan mengalami kontak dengan zona saprolit yang masih mengandung batuan asal dan melarutkan mineral-mineral yang tidak stabil seperti olivin/serpentin dan piroksin. Unsur Mg, Si, dan Ni akan larut dan terbawa sesuai dengan aliran air tanah dan akan membentuk mineral-mineral baru pada proses pengendapan kembali. Endapan besi yang bersenyawa dengan oksida akan terakumulasi dekat dengan permukaan tanah, sedangkan magnesium, nikel, dan silika akan tetap

tertinggal di dalam larutan dan bergerak turun selama suplai air yang masuk ke dalam tanah terus berlangsung. Rangkaian proses ini merupakan proses pelapukan dan pelindian/*leaching*.

Pada proses pelapukan lebih lanjut magnesium (Mg), Silika (Si), dan Nikel (Ni) akan tertinggal di dalam larutan selama air masih bersifat asam. Tetapi jika dinetralisasi karena adanya reaksi dengan batuan dan tanah, maka zat-zat tersebut akan cenderung mengendap sebagai mineral hidrosilikat (*Ni-magnesium hidrosilicate*) yang disebut mineral garnierit $[(Ni,Mg)_6Si_4O_{10}(OH)_8]$ atau mineral pembawa Ni.

Adanya suplai air dan saluran untuk turunnya air, dalam hal ini berupa kekar atau rekahan pada batuan, maka Ni yang terbawa oleh air akan turun ke bawah, lambat laun akan terkumpul di zona ketika air sudah tidak dapat turun lagi dan tidak dapat menembus batuan dasar (*bedrock*). Ikatan dari Ni yang berasosiasi dengan Mg, SiO, dan H akan membentuk mineral garnierit. Apabila proses ini berlangsung terus-menerus maka yang akan terjadi adalah proses pengayaan supergen/supergen *enrichment*. Zona pengayaan supergen ini terbentuk di zona saprolit (*saprolite zone*).

Dalam satu penampang vertikal profil laterit dapat juga terbentuk zona pengayaan yang lebih dari satu, hal tersebut dapat terjadi karena muka air tanah yang selalu berubah-ubah, terutama bergantung dari perubahan musim. Di bawah zona pengayaan supergen terdapat zona mineralisasi primer yang tidak terpengaruh oleh proses oksidasi maupun pelindian, yang sering disebut sebagai zona batuan dasar (*bedrock*) (Maulana, 2017).



Gambar 2.4 Distribusi vertikal mineral yang umum pada penampang nikel laterit (Elias, 2002)

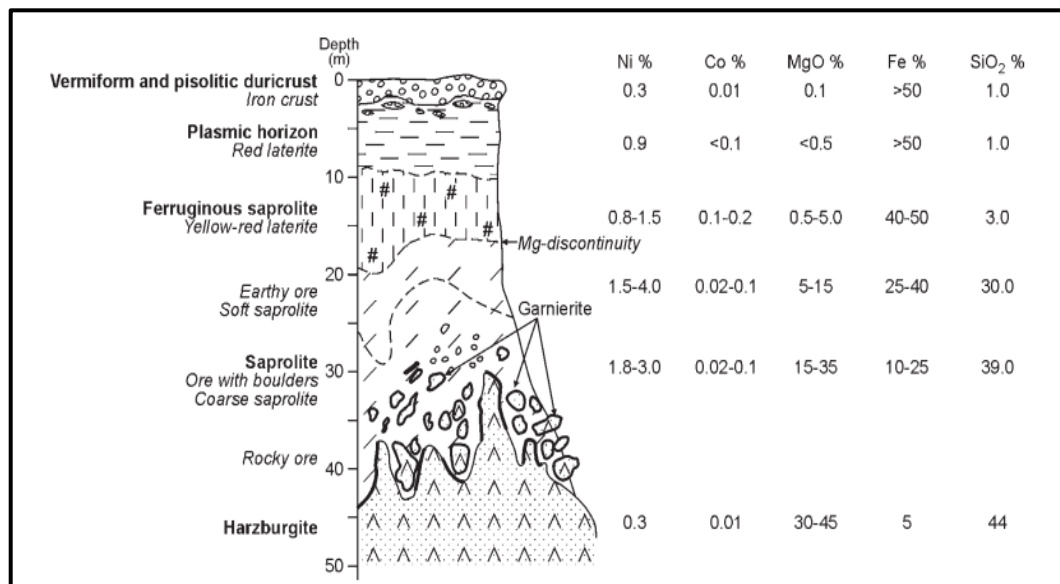
2.7 Tipe Endapan Nikel Laterit

Brand, dkk (1998) membedakan tiga jenis deposit pokok, berdasarkan mineralisasi bijih yaitu *Hydrous Silicate Deposit*, *Clay Silicate Deposit* dan *Oxides Deposit*.

a. *Hydrous Silicate Deposit*

Pada endapan tipe *hydrous silicate* bagian bawah zona saprolit (horizon bijih) didominasi oleh mineral-mineral *hydrous* Mg-Ni silikat setempat pada zona saprolit, urat-urat halus dan *box-work* dapat terbentuk. Rekahan dan batas-batas antar butir dapat terisi oleh mineral silikat dan mineral yang kaya dengan nikel. Sebagai contoh garnierit dapat memiliki kandungan nikel sampai dengan 40%. Nikel akan mengalami pelindian dan limonit pada fase Fe-oksihidroksida akan

bergerak turun ke bawah sebelum terendapkan kembali sebagai mineral hydrous silicate atau menggantikan dalam ubahan serpentin. Pengkayaan Ni melalui proses supergen ini sangat penting untuk pembentukan endapan *hydrous silicate* pada kadar yang ekonomis. Pada endapan tipe *hydrous silicate*, posisi muka air tanah relatif dalam, kondisi ini menyebabkan infiltrasi air yang dalam sehingga nikel lebih banyak terakumulasi pada zona saprolit bagian bawah (Elias, 2002).

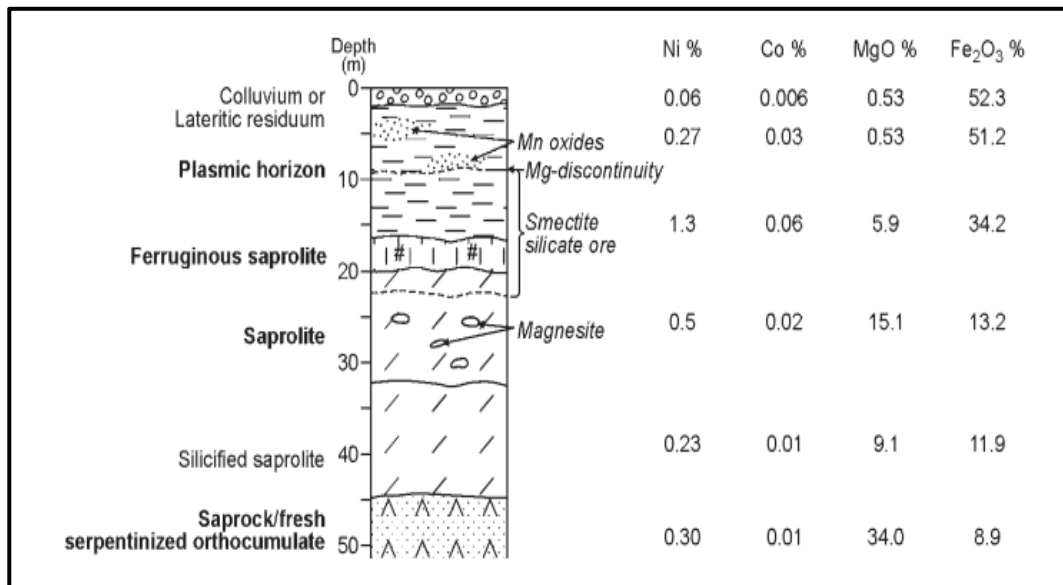


Gambar 2.5 *Hydrous silicate* deposit, New Caledonia (Freyssinet, dkk., 2005)

b. *Clay Silicate Deposit*

Kondisi pelapukan yang tidak berjalan dengan baik seperti pada iklim dingin dan iklim panas, silika tidak tercuci sebagaimana di lingkungan tropis lembab. Silika tersebut kemudian bergabung bersama Fe dan Al membentuk zona dimana lempung smektit (nontronit) mendominasi. Silika sisa dari pembentukan nontronit kemudian terendapkan sebagai nodul opal atau kalsedon dalam lempung. Profil laterit seperti ini biasanya ditindih oleh lapisan tipis yang kaya Fe

oksida di bagian atasnya dan didasari oleh lapukan saprolit yang mengandung serpentin dan nontronit (Elias, 2002).

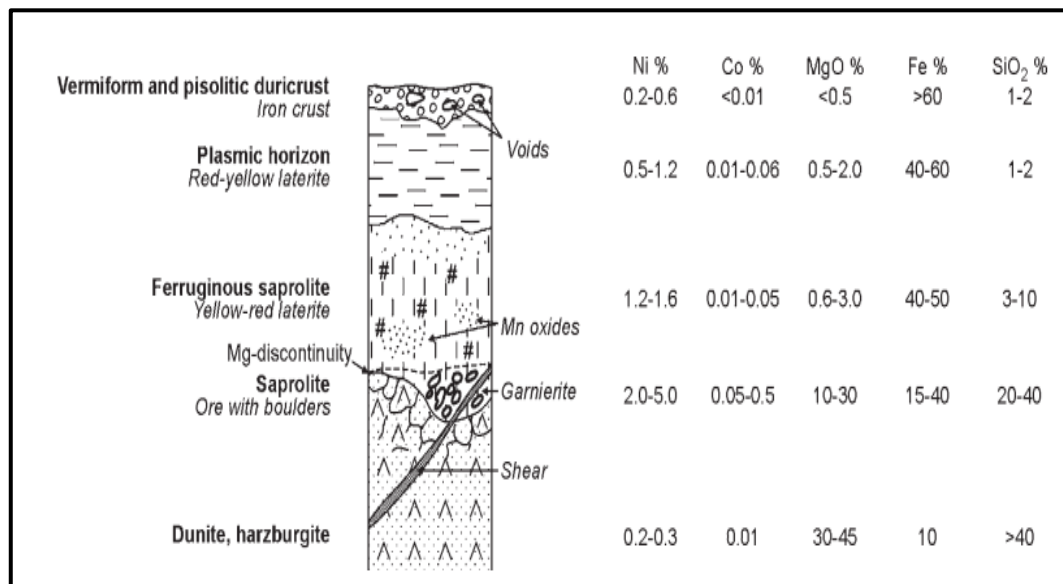


Gambar 2.6 Clay Silicate deposit, Murrin Australia (Freyssinet, dkk., 2005)

c. Oxide Deposit

Dengan adanya air, mineral pembentuk batuan primer (terutama olivin dan/atau serpentin, *orthopyroxene* dan yang kurang umum adalah *clinopyroxene*) dipecah oleh hidrolisis yang melepaskan unsur penyusunnya sebagai ion dalam larutan berair. Olivin adalah mineral yang paling tidak stabil dan merupakan yang pertama mengalami pelapukan. Di lingkungan tropis yang lembab, Mg^{2+} nya benar-benar tercuci dan hilang karena air tanah, dan Si sebagian besar tercuci dan dibuang. Fe^{2+} juga dilepaskan namun dioksidasi dan diendapkan sebagai hidroksida besi, awalnya bersifat amorf atau kurang kristalin tapi secara progresif mengkristal ulang dengan tanaman goetit yang membentuk *pseudomorph* setelah olivin. *Orthopyroxene* dan serpentine hidrolisis setelah olivin, juga melepaskan Mg, Si dan digantikan oleh *pseudomorph* goethitik. Transformasi tekstur

isovolumetrik dan batuan primer, namun seiring dengan hancurnya mineral primer, bergantung pada tekstur primer yang hilang karena pemadatan yang menghasilkan geotit dengan tekstur masif. Transformasi mineralogi yang melibatkan hilangnya Mg dan konsentrasi residu Fe menghasilkan tren kimia yang jelas dan familiar pada laterit Mg yang menurun ke atas dan Fe meningkat ke atas melalui profil laterit (Butt dan Morris, 2005).



Gambar 2.7 Oxide deposit, Goro New Caledonia (Freyssinet, dkk., 2005)

2.8 Faktor Pengontrol Nikel Laterit

a) Batuan Asal Laterit

Menurut Ahmad (2006) laterit Ni – Fe dapat berkembang pada batuan yang mengandung mineral ferromagnesian yang cukup. Oleh karena itu batuan ultramafik merupakan batuan yang paling cocok untuk menghasilkan laterit Ni – Fe karena memiliki proporsi mineral ferromagnesian yang tinggi.

b) Iklim

Iklim memiliki peran penting dalam terbentuknya endapan laterit. Temperatur yang hangat dan curah hujan yang tinggi dan ditambah dengan aktivitas biogenik yang tinggi akan mempercepat proses pelapukan kimia. Daerah beriklim tropis dengan temperatur lebih dari 20°C yang cenderung tetap sepanjang tahun merupakan daerah yang sangat ideal untuk pembentukan endapan laterit (Ahmad, 2006). Curah hujan menentukan jumlah air yang melewati tanah, sehingga dapat mempengaruhi intensitas pencucian batuan. Akan tetapi, sebenarnya tingkat curah hujan dapat bervariasi yang nantinya akan membentuk tanah laterit yang berbeda-beda pula (Ellias, 2002).

c) Topografi

Topografi akan mempengaruhi pola aliran air, kelerengan dan relief mempengaruhi intensitas air yang masuk ke dalam tanah atau batuan dan muka air tanah (Elias, 2002). Topografi atau morfologi yang tidak curam tingkat kelerengannya akan menyebabkan endapan laterit untuk ditopang oleh permukaan topografi sehingga tidak terangkut semua oleh proses erosi ataupun ketidakstabilan lereng (Maulana, 2017). Laterit membutuhkan topografi yang tidak begitu curam, permukaan tanah yang curam akan mempercepat erosi pada tanah laterit. Topografi yang terlalu datar dengan drainase yang buruk juga tidak begitu bagus, hal ini menyebabkan pencucian berjalan kurang maksimal sehingga tanah laterit sulit terbentuk (Ahmad, 2009).

d) PH

Menurut Ahmad (2009) kelarutan mineral akan meningkat di perairan yang memiliki kadar pH yang rendah. Dengan demikian, air yang sedikit asam akan mempercepat proses pelapukan kimia. Air asam banyak terbentuk pada iklim tropis basah melalui hujan asam alami.

e) Tektonik

Tektonisme dapat menghasilkan pengangkatan yang menyebabkan tanah atau batuan tersingkap dan mempercepat proses erosi, menurunkan muka air tanah, dan merubah relief. Untuk menghasilkan pembentukan endapan laterit yang stabil diperlukan kondisi tektonik yang stabil karena dapat mengurangi proses erosi dan memperlambat gerak air tanah (Elias, 2002)

f) Struktur

Struktur geologi memiliki peran penting dalam pembentukan endapan laterit. Adanya struktur geologi seperti sesar dan kekar akan membuat batuan menjadi permeabel sehingga memudahkan air untuk dapat masuk ke dalam batuan. Masuknya air ke dalam batuan akan memudahkan proses pelapukan kimia sehingga laterisasi dapat berjalan dengan baik (Elias, 2002).

2.9 Analisis Statistik Univariat dan Bivariat

Analisis statistik univariat menggunakan analisis statistik deskriptif yang terdiri dari nilai statistik berupa nilai minimum, nilai maksimum, mean, median, modus, standar deviasi, dan koefisien variasi serta disajikan dalam bentuk tabel. Metode penelitian deskriptif adalah metode yang digunakan untuk mengetahui

nilai variabel mandiri atau lebih tanpa membuat perbandingan atau menggabungkan antara variabel satu dengan yang lainnya. Analisis bivariat berupa asosiatif yang bertujuan untuk membagi unsur dan senyawa ke dalam beberapa kelompok asosiasi unsur dan senyawa dengan cara melihat hubungan kekerabatan secara spasial. Penelitian asosiatif merupakan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui hubungan dua variabel atau lebih (Sugiyono, 2013).

Salah satu metode yang digunakan pada analisis bivariat adalah metode koefisien korelasi Spearman. Metode koefisien korelasi Spearman bertujuan untuk menilai tingkat hubungan dari dua variable unsur atau senyawa yang dinyatakan ke dalam koefisien Spearman. Rumus dalam menentukan koefisien korelasi Spearman dinyatakan pada persamaan 2.1 (Sugiyono, 2013).

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{(n^3 - n)} \dots\dots\dots(\text{pers 1})$$

Keterangan:

r_s = Koefisien korelasi Spearman

d^2 = Selisih tiap pasang rank

n = Banyak pasangan nilai ($5 < n < 30$)

Berdasarkan interpretasi terhadap koefisien korelasi Spearman, Sugiyono (2013) membaginya dalam beberapa interval.

Tabel 2.2 Interval koefisien korelasi (Sugiyono, 2013)

Interval Koefisien Korelasi (r)	Tingkat Hubungan
0,80 - 1,000	Sangat Kuat
0,60 - 0,799	Kuat
0,40 - 0,599	Sedang
0,20 - 0,399	Rendah
0,00 - 0,199	Sangat Rendah