

Variasi Tekstur Serpentinisasi Lherzolit dan Harzburgit Ofiolit Banggai: Implikasi Petrogenesis dan Evolusi Mantel

Alifia Widya Warapsari Badaru^{1*}, Ni Luh Ananda Pusvita Sari¹, Mohamad Sayid Rahmat¹,
Mohammad Ridho Paudi¹, Moh Fadlyansyah T¹

¹Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo

*Email Koresponden: alifiawidyawb@ung.ac.id

Diterima: 7-11-2025

Disetujui: 5-12-2025

Publish: 9-12-2025

Abstrak Batuan ultramafik terserpentinisasi dari Kompleks Ofiolit Banggai, bagian dari Sabuk Ofiolit Sulawesi Timur di Sulawesi Tengah, menyimpan rekaman penting sejarah geodinamik dan interaksi fluida-batuan pada litosfer oseanik. Penelitian ini menganalisis komposisi mineral, tekstur serpentinisasi, dan implikasi petrogenesis tiga sampel inti bor dari lubang bor NA2, Kabupaten Banggai. Tujuan penelitian adalah mengkarakterisasi variasi litologi dan tekstur serpentinisasi lintas jenis peridotit yang berbeda. Analisis petrografi dilakukan pada sayatan tipis menggunakan mikroskop polarisasi pada cahaya terpolarisasi bidang dan cahaya terpolarisasi silang; klasifikasi batuan menggunakan diagram klasifikasi batuan ultramafik Streckeisen. Dua sampel teridentifikasi sebagai lherzolit terserpentinisasi dengan kandungan olivin 35-40%, ortopiroksena 14-15%, klinopiroksena 13-20%, dan satu sampel sebagai harzburgit terserpentinisasi dengan ortopiroksena yang sangat tinggi (38%) dan klinopiroksena sangat rendah (5%). Tiga jenis tekstur serpentinisasi teridentifikasi: tekstur jaring setelah olivin pada ketiga sampel, tekstur penggantian piroksen hanya pada satu lherzolit, dan tekstur kataklastik hanya pada lherzolit kedua. Heterogenitas distribusi tekstur mengindikasikan kontrol struktural lokal pada serpentinisasi, bukan proses pervasif yang merata. Perbedaan deplesi klinopiroksena antar litologi mencerminkan heterogenitas derajat peleburan parsial dalam satu segmen mantel ofiolit.

Kata kunci: tekstur serpentinisasi; petrografi; lherzolit; harzburgit; Ofiolit Sulawesi Timur

Abstract Serpentinized ultramafic rocks from the Banggai Ophiolite Complex, part of the East Sulawesi Ophiolite Belt in Central Sulawesi, preserve important records of geodynamic history and fluid-rock interaction in oceanic lithosphere. This study analyzes mineral composition, serpentinization textures, and petrogenetic implications of three drill core samples from borehole NA2, Banggai Regency. The study aims to characterize lithological and serpentinization texture variations across different peridotite types. Petrographic analysis was performed on thin sections using polarizing light microscopy; rock classification used the Streckeisen ultramafic rock classification diagram. Two samples were identified as serpentinized lherzolite with olivine content 35-40%, orthopyroxene 14-15%, clinopyroxene 13-20%, and one sample as serpentinized harzburgite with very high orthopyroxene (38%) and very low clinopyroxene (5%). Three serpentinization textures were identified: mesh texture after olivine in all three samples, bastite texture after pyroxene in one lherzolite only, and cataclastic texture in the second lherzolite only. The heterogeneous texture distribution indicates local structural control on serpentinization rather than uniform pervasive alteration. Clinopyroxene depletion contrasts between lithologies reflect heterogeneous partial melting degrees within a single ophiolite mantle segment.

Keywords: serpentinization textures; petrography; lherzolite; harzburgite; East Sulawesi Ophiolite

1. PENDAHULUAN

Ofiolit Sulawesi Timur merupakan salah satu kompleks ofiolit terbesar di dunia dengan luas singkapan lebih dari 15.000 km² yang tersebar di Sulawesi Tengah dan Timur (Kadarusman et al., 2004). Ditinjau dari pembagian mandala litotektonik, daerah penelitian termasuk dalam Mandala Timur (*East Sulawesi Ophiolite Belt*) yang tersusun dari kompleks batuan ofiolit sebagai bagian dari empat lajur geologi Pulau Sulawesi (Somptan, 2012; Hall & Wilson, 2000). Secara regional, Lembar Luwuk (Rusmana et al., 1993) mencatat bahwa batuan ultramafik pada Formasi Kompleks Ultramafik (Ku) di daerah ini terdiri dari harzburgit, dunit, lherzolit, piroksenit, serpentin, basal, dan gabro, yang diperkirakan berumur Kapur Cretaceous (145–66 juta tahun lalu) berdasarkan perbandingan stratigrafi regional. Ofiolit Sulawesi Timur, bersama Ofiolit Papua Nugini dan Ofiolit Oman, termasuk dalam tiga kompleks ofiolit terbesar di dunia dan merepresentasikan rekaman litosfer oseanik penting dari Mesozoikum Akhir hingga Kenozoikum Awal di Asia Tenggara (Kadarusman et al., 2004; Kadarusman et al., 2023).

Asal-usul tektonik Ofiolit Sulawesi Timur masih menjadi perdebatan aktif. Interpretasi awal mengusulkan *origin mid-ocean ridge* berdasarkan afinitas geokimia peridotit dengan karakter N-MORB abisal (Kadarusman et al., 2004). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa zona supra-subduksi cekungan busur

belakang merupakan *setting* yang lebih *plausibel*, didukung oleh penanggalan U-Pb zirkon yang memberikan umur penyebaran dasar laut 74 ± 3 Ma, serta nilai ϵHf dan ϵNd yang konsisten dengan sumber mantel terdepleksi (Kadariusman et al., 2023). Penelitian petrologi batuan ultramafik dari Sulawesi Selatan juga mendokumentasikan harzburgit terserpentinisasi pervasif dengan komposisi spinel yang mengindikasikan *setting* supra-subduksi (Maulana et al., 2015), sementara studi di Kabaena (Sabuk Ofiolit Sulawesi Timur) mengungkap kromit dengan nilai Cr# tinggi yang khas untuk *setting* busur vulkanik (Idrus et al., 2022; Yao et al., 2023).

Peridotit mantel residu Ofiolit Sulawesi Timur didominasi oleh spinel lherzolit yang berselang-seling dengan harzburgit dan dunit, dengan derajat deplesi yang bervariasi antar lokalitas (Kadariusman et al., 2004). Lherzolit mendominasi di Lengan Timur, sedangkan harzburgit lebih prevalen di Soroako, mencerminkan perbedaan spasial derajat peleburan parsial (Kadariusman et al., 2004). Serpentinisasi merupakan ciri pervasif batuan ultramafik tersebut, yaitu alterasi hidrotermal mineral ferromagnesian primer menjadi mineral kelompok serpentin melalui interaksi dengan fluida berair (Klein et al., 2013). Proses ini menghasilkan tekstur penggantian yang diagnostik dan digunakan sebagai proksi untuk merekonstruksi kondisi serpentinisasi, geometri jalur fluida, dan sejarah deformasi (Wicks & Whittaker, 1977; Guillot et al., 2015; Viti et al., 2018).

Klasifikasi tekstur serpentinisasi yang diusulkan oleh Wicks dan Whittaker (1977) membedakan tiga jenis utama: (1) tekstur *mesh*, terbentuk melalui penggantian isovolumetrik olivin; (2) bastit, penggantian pseudomorfik piroksen; dan (3) tekstur kataklastik akibat deformasi rapuh yang didefinisikan sebagai deformasi batuan melalui fraktur dan rotasi butiran mineral (Higgins, 1971). Penelitian terbaru di berbagai ofiolit menunjukkan bahwa distribusi spasial tekstur ini seringkali dikontrol oleh fitur struktural yang sudah ada, seperti jaringan fraktur dan bidang sesar (Rouméjon et al., 2015; Aupart et al., 2021; Audran et al., 2024). Di wilayah Banggai khususnya Blok 32 Kecamatan Bunta, batuan ultramafik telah dipelajari terutama dalam konteks eksplorasi nikel laterit dengan analisis liniamen yang menghasilkan struktur geologi berarah dominan barat laut–tenggara (Pusvita Sari, 2025; Ghaneswara et al., 2023; Irianto, 2023), namun karakterisasi petrografi komparatif variasi tekstur serpentinisasi lintas litologi dalam satu inti bor masih belum pernah dilaporkan secara khusus.

Penelitian ini menyajikan analisis petrografi komparatif tiga sampel inti bor dari Blok 32, Kecamatan Bunta, Kabupaten Banggai. Nilai kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan komparatif lintas dua litologi (lherzolit dan harzburgit) dalam satu lintasan lubang bor yang sama, sehingga memungkinkan pengisolasian variabel struktural dan litologi sebagai faktor pengontrol serpentinisasi secara simultan. Tujuan spesifik penelitian adalah: (1) mengkarakterisasi komposisi mineral dan sifat optik diagnostik masing-masing sampel berdasarkan analisis sayatan tipis; (2) mendokumentasikan dan membandingkan jenis serta distribusi tekstur serpentinisasi; serta (3) menginterpretasikan implikasi petrogenesis dan evolusi mantel dari variasi litologi dan tekstur dalam kerangka Ofiolit Sulawesi Timur

2. METODE PENELITIAN

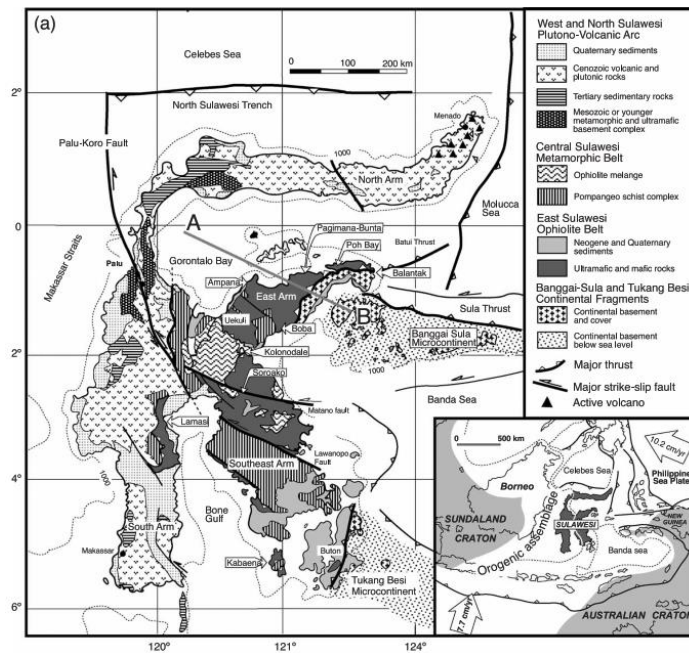
2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tahun 2024 menggunakan arsip sayatan tipis dari Laboratorium Teknik Geologi, Universitas Negeri Gorontalo. Tiga sampel inti bor dipilih dari lubang bor NA2 yang berlokasi di Blok 32, Kecamatan Bunta, Kabupaten Banggai, Sulawesi Tengah, sebagai bagian dari Sabuk Ofiolit Sulawesi Timur (Gambar 1a dan 1b). Kecamatan Bunta terletak di bagian selatan Kabupaten Banggai di pesisir timur Pulau Sulawesi, dan secara geologi berada dalam Formasi Kompleks Ultramafik (Ku) lembar Luwuk (Rusmana et al., 1993). Sampel dikumpulkan dari kegiatan pengeboran eksplorasi nikel laterit (Pusvita Sari, 2025). Data koordinat resmi diperoleh dari data *collar* pengeboran dengan sistem proyeksi UTM zona 51S (Tabel 1).

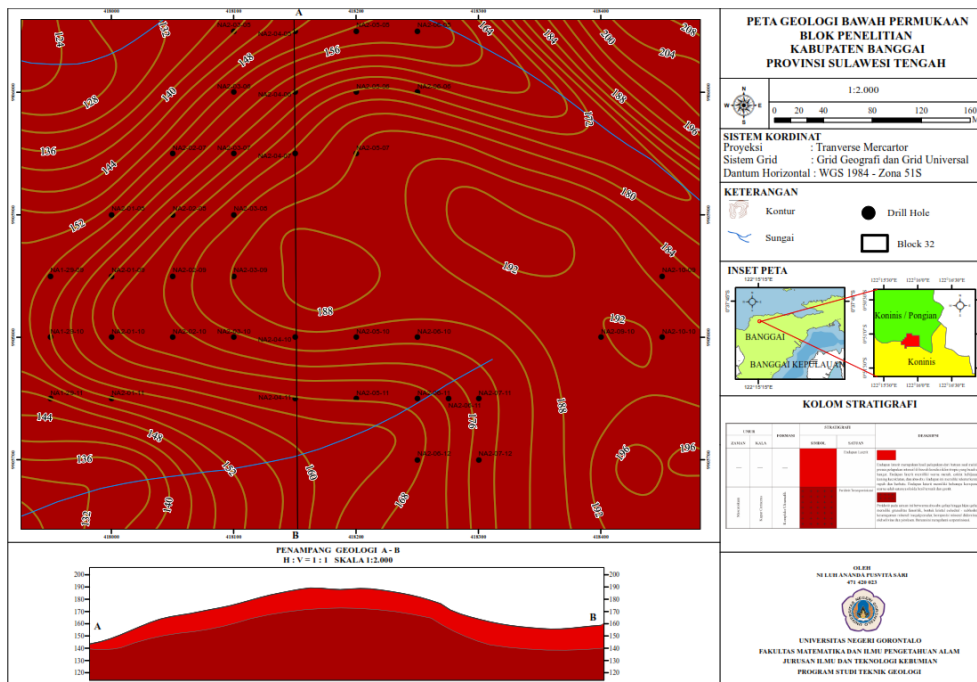
Tabel 1. Lokasi dan penetapan litologi sampel batuan ultramafik dari Kompleks Ofiolit Banggai.

Kode Sampel	Litologi	Easting (X)	Northing (Y)	Elevasi Z (m)	Kedalaman (m)	Lubang Bor
NA2-07-11	Lherzolit Terserpentinisasi	418.3	9.905.750	166,78	20	NA2
NA2-05-07	Lherzolit Terserpentinisasi	418.2	9.905.950	155,181	20	NA2
NA2-01-11	Harzburgit Terserpentinisasi	418	9.905.750	140,267	14	NA2

Sumber: Pusvita Sari (2025).



Gambar 1a. Peta geologi regional Sulawesi menunjukkan empat mandala litotektonik dan distribusi Sabuk Ophiolit Sulawesi Timur, dengan lokasi daerah penelitian di Kabupaten Banggai (dimodifikasi dari Kadarusman et al., 2004; Hall & Wilson, 2000).



Gambar 1b. Peta geologi detail Blok 32, Kecamatan Bunta, Kabupaten Banggai, menunjukkan distribusi Formasi Kompleks Ultramafik (Ku), arah struktur dominan barat laut–tenggara, dan lokasi ketiga lubang bor NA2 (dimodifikasi dari Rusmana et al., 1993; Pusvita Sari, 2025).

Ketiga lokasi sampel memiliki jarak lateral 200–500 m dalam satu lintasan lubang bor yang sama. NA2-01-11 dan NA2-07-11 berada pada *Northing* yang sama ($Y = 9.905.750$) namun berbeda *Easting*, sementara NA2-05-07 berada 200 m lebih ke utara ($Y = 9.905.950$). Kedalaman bor berkisar 14–20 m, konsisten dengan kedalaman zona *bedrock* pada profil laterit di daerah ini (Pusvita Sari, 2025). Kondisi geologi permukaan pada daerah penelitian sudah berupa soil laterit akibat laterisasi intensif, sehingga sampel petrografi hanya dapat diperoleh dari inti bor (Pusvita Sari, 2025).

2.2. Analisis Petrografi

Analisis petrografi dilakukan pada sayatan tipis teroles standar dengan ketebalan 30 μm menggunakan mikroskop polarisasi binokuler yang dilengkapi meja putar. Setiap sayatan tipis diamati secara sistematis di bawah cahaya terpolarisasi bidang sejajar dan cahaya terpolarisasi silang pada perbesaran $4\times$ hingga $40\times$. Identifikasi mineral didasarkan pada sifat optik diagnostik meliputi relief, warna, pleokroisme,

birefringensi, warna interferensi, sudut pemadaman, karakter belahan, dan bentuk kristal, mengacu pada Nesse (2012) dan Deer et al. (1992).

Komposisi *modal mineral* diestimasi secara semi-kuantitatif melalui perbandingan area visual pada setiap sayatan tipis. Untuk keperluan klasifikasi litologi, proporsi mineral primer (olivin, ortopiroksena, klinopiroksena) dinormalisasi terhadap 100% dengan mengecualikan fase sekunder. Klasifikasi dilakukan menggunakan diagram Ol-Opx-Cpx untuk batuan ultramafik menurut Streckeisen (1973), yang diaplikasikan secara luas pada berbagai studi peridotit ofiolit (Jonnalagadda et al., 2019; Wang et al., 2023). Hasil analisis ini merupakan analisis terbaru dan mandiri yang dilakukan oleh tim peneliti, yang konsisten secara litologi dengan analisis petrografi terdahulu pada sampel-sampel yang sama dalam konteks estimasi nikel laterit (Pusvita Sari, 2025).

2.3. Karakterisasi Tekstur Serpentinisasi

Tekstur serpentinisasi dikarakterisasi mengacu pada skema Wicks dan Whittaker (1977) yang membedakan: (1) *tekstur mesh*, jaringan *polygonal veinlet* serpentin mengelilingi inti olivin sisa; (2) *bastit*, penggantian pseudomorfik piroksen oleh serpentin yang mempertahankan kontur dan belahan mineral induk; dan (3) *tekstur kataklastik*, deformasi melalui fraktur dan rotasi butiran mineral (Higgins, 1971). Kerangka ini dikonfirmasi dan dikembangkan lebih lanjut oleh studi petrografi ofiolit terkini (Viti et al., 2018; Nomuulin et al., 2021; Audran et al., 2024). Derajat serpentinisasi dikategorikan: lemah (<30%), sedang (30–60%), dan kuat (>60%). Hubungan pemotongan antar tekstur dicatat untuk menentukan kronologi relatif kejadian serpentinisasi.

2.4. Verifikasi Data

Seluruh sayatan tipis diperiksa ulang secara independen oleh penulis koresponden untuk memverifikasi identifikasi mineral, estimasi modal, dan deskripsi tekstur. Perbedaan interpretasi antar pengamat diselesaikan melalui diskusi dan pengamatan bersama. Hasil analisis terbaru ini kemudian dibandingkan dengan data petrografi yang tersedia dari studi terdahulu pada sampel yang sama (Pusvita Sari, 2025) sebagai langkah triangulasi; keduanya konsisten dalam penetapan jenis litologi, yaitu lherzolit untuk NA2-07-11 dan NA2-05-07, serta harzburgit untuk NA2-01-11.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Deskripsi Petrografi dan Komposisi Modal

Ketiga sampel inti bor mewakili dua jenis litologi: lherzolit terserpentinisasi (NA2-07-11 dan NA2-05-07) dan harzburgit terserpentinisasi (NA2-01-11). Secara megaskopis, ketiga sampel memiliki warna segar abu-abu gelap dan warna lapuk kecokelatan, dengan granularitas faneritik, bentuk kristal *ehedral-subehedral*, dan keseragaman mineral *inequigranular*, yang secara konsisten menunjukkan asal peridotit mantel atas. Secara mikroskopis, semua sampel menunjukkan tekstur granular dengan batas butir *interlocking*. Komposisi modal lengkap dan proporsi mineral ternormalisasi dirangkum dalam Tabel 2 bersama nilai referensi peridotit Ofiolit Sulawesi Timur dari Kadarusman et al. (2004) sebagai pembandingan.

Tabel 2. Komposisi mineral modal komparatif tiga sampel ultramafik dari Kompleks Ofiolit Banggai. Proporsi ternormalisasi mengecualikan serpentin dan mineral opak. *Nilai referensi Kadarusman et al. (2004).

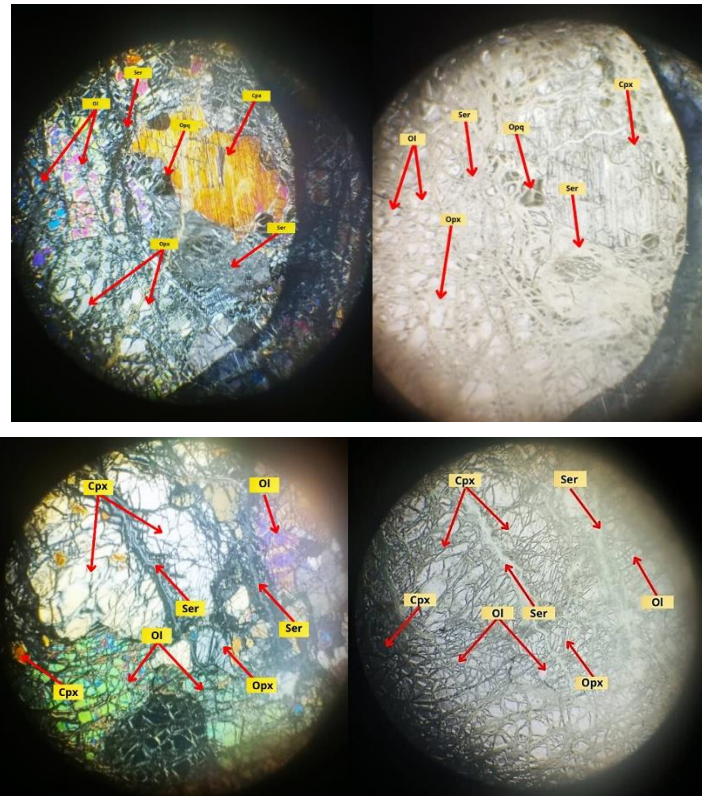
Parameter	NA2-07-11 (Lherzolit)	NA2-05-07 (Lherzolit)	NA2-01-11 (Harzburgit)	Lherzolit OST*	Harzburgit OST*
Olivin (% modal)	35	40	43	60-70	65-75
Ortopiroksena (% modal)	14	15	38	12-20	12-20
Klinopiroksena (% modal)	20	13	5	5-10	1-4
Serpentin (%)	30	27	~jejak	-	-
Mineral opak (%)	1	5	~jejak	-	-
Ol (% ternormalisasi)	50,72	58,82	50,00	-	-
Opx (% ternormalisasi)	20,28	22,06	44,20	-	-
Cpx (% ternormalisasi)	28,99	19,12	5,80	-	-
Klasifikasi	Lherzolit	Lherzolit	Harzburgit	-	-
Intensitas serpentinisasi	Sedang	Sedang-Kuat	Lemah-Sedang	-	-

Sumber: Data primer (2025); *Kadarusman et al. (2004).

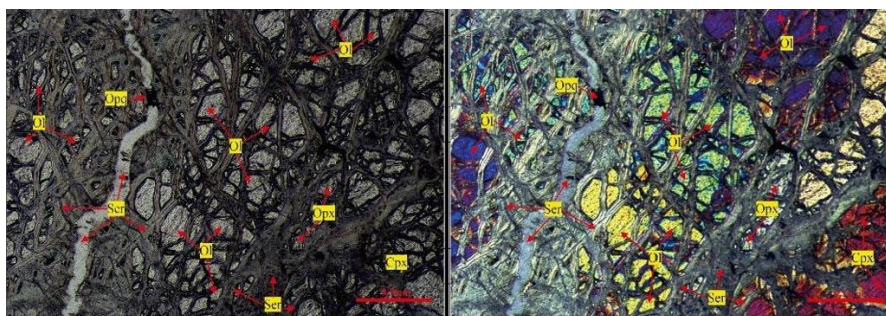
Lherzolit Terserpentinisasi (NA2-07-11 dan NA2-05-07)

Kedua sampel lherzolit mengandung empat komponen mineralogi utama peridotit mantel: olivin (35–40%), ortopiroksena (14–15%), klinopiroksena (13–20%), dan serpentin sekunder (27–30%), disertai mineral opak (1–5%). Olivin hadir sebagai butiran *subbedral* hingga *anbedral* dengan relief tinggi, tidak berwarna dalam cahaya terpolarisasi bidang, dan warna interferensi orde tinggi dalam cahaya terpolarisasi silang; analisis optik mengidentifikasi olivin ini berjenis forsterit, konsisten dengan komposisi olivin mantel yang dicirikan oleh Mg# tinggi (Pusvita Sari, 2025). Ortopiroksen (14–15%) berjenis enstatit, membentuk butiran *subbedral* dengan warna interferensi orde pertama abu-abu kecokelatan dan belahan satu arah yang jelas.

Kandungan klinopiroksena berjenis augit berbeda signifikan antara dua sampel: 20% pada NA2-07-11 dan 13% pada NA2-05-07, dengan ciri optik khas berupa semburat kehijauan dalam cahaya terpolarisasi bidang, relief tinggi, dua arah belahan berpotongan $\sim 87^\circ/93^\circ$, dan warna interferensi orde dua kuning-ungu. Setelah normalisasi terhadap mineral primer, NA2-07-11 mengandung Ol:Opx:Cpx = 50,72:20,28:28,99 dan NA2-05-07 mengandung 58,82:22,06:19,12. Kedua sampel ter-plot dalam bidang lherzolit pada diagram Streckeisen (1973), konsisten dengan komposisi lherzolit Ofiolit Sulawesi Timur Lengan Timur (Kadariusman et al., 2004) dan juga konsisten dengan penetapan litologi lherzolit dari analisis terdahulu pada sampel yang sama (Pusvita Sari, 2025). Perbedaan Cpx ternormalisasi antara NA2-07-11 (28,99%) dan NA2-05-07 (19,12%) mengindikasikan derajat deplesi yang sedikit berbeda meskipun kedua sampel terklasifikasi sebagai lherzolit.



Gambar 2. Mikrofotograf lherzolit terserpentinisasi NA2-07-11: (a) cahaya terpolarisasi silang dan (b) cahaya terpolarisasi sejajar, menunjukkan olivin (Ol), ortopiroksena (Opx), klinopiroksena (Cpx), serpentin dengan tekstur mesh (Ser), dan bastit (Bas). Skala bar = 0,5 mm.

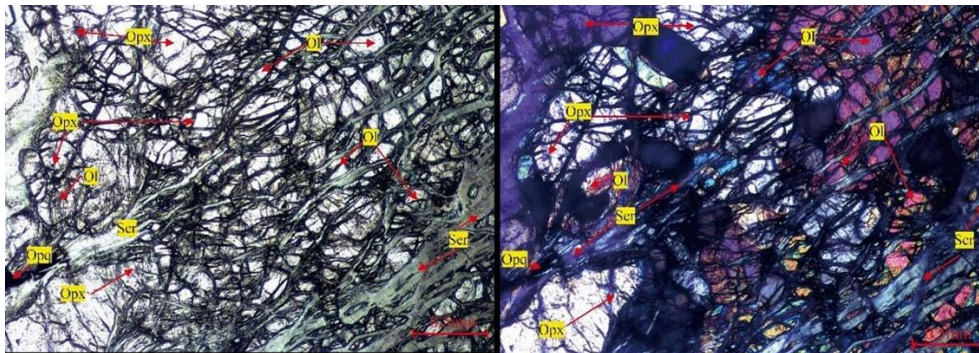


Gambar 3. Mikrofotograf lherzolit terserpentinisasi NA2-05-07: (a) cahaya terpolarisasi bidang dan (b) cahaya terpolarisasi silang, menunjukkan tekstur mesh setelah olivin dan fragmentasi kataklastik butiran mineral dengan veinlet serpentin mengisi rekahan. Skala bar = 0,5 mm.

Harzburgit Terserpentinisasi (NA2-01-11)

Sampel NA2-01-11 berbeda nyata dari kedua sampel lherzolit dalam hal kandungan ortopiroksena berjenis enstatit yang sangat tinggi (38% modal; 44,20% ternormalisasi) dan klinopiroksena berjenis augit yang sangat rendah (5% modal; 5,80% ternormalisasi). Olivin (43% modal; 50,00% ternormalisasi) hadir dengan sifat optik serupa sampel lherzolit. Rendahnya kandungan klinopiroksena ini merupakan penanda diagnostik litologi mantel residu yang lebih terdepleksi, konsisten dengan komposisi harzburgit Ofiolit Sulawesi Timur yang dilaporkan Kadarusman et al. (2004) dan dengan harzburgit terserpentinisasi dari Sulawesi Selatan (Maulana et al., 2015).

Beberapa butiran ortopiroksena menunjukkan tekstur *kink-band*, yaitu pelipatan *lamellar* akibat deformasi kristal-plastis pada kondisi suhu dan tekanan tinggi di mantel, yang mendahului pengangkatan dan serpentinisasi. Proporsi Ol:Opx:Cpx ternormalisasi = 50,00:44,20:5,80 menempatkan sampel ini dalam bidang harzburgit pada diagram Streckeisen (1973). Penetapan ini konsisten dengan analisis terdahulu pada sampel yang sama (Pusvita Sari, 2025). Batuan ini diperkirakan berumur Kapur Cretaceous (145–66 juta tahun lalu) sesuai dengan kolom stratigrafi lembar Luwuk (Rusmana et al., 1993).



Gambar 4. Mikrofotograf harzburgit terserpentinisasi NA2-01-11: (a) cahaya terpolarisasi sejajar dan (b) cahaya terpolarisasi silang, menunjukkan olivin (Ol), ortopiroksena (Opx) dengan tekstur kink-band, dan tekstur mesh serpentin (Srp). Skala bar = 0,5 mm.

Tekstur Serpentinisasi

Tiga jenis tekstur serpentinisasi teridentifikasi dengan distribusi tidak seragam antar sampel meskipun ketiganya berasal dari satu lubang bor (Tabel 3). Pola distribusi ini menjadi observasi kunci dalam menginterpretasikan kontrol serpentinisasi pada skala mesostruktur. Dalam analisis terdahulu, ketiga sampel hanya didokumentasikan mengandung serpentin dalam bentuk veinlet yang mengisi rekahan dan ruang antar kristal (Pusvita Sari, 2025); analisis terbaru ini mengidentifikasikan bahwa veinlet serpentin tersebut berasosiasi dengan tiga jenis tekstur yang secara mekanistik berbeda dan informatif untuk rekonstruksi sejarah hidrasi.

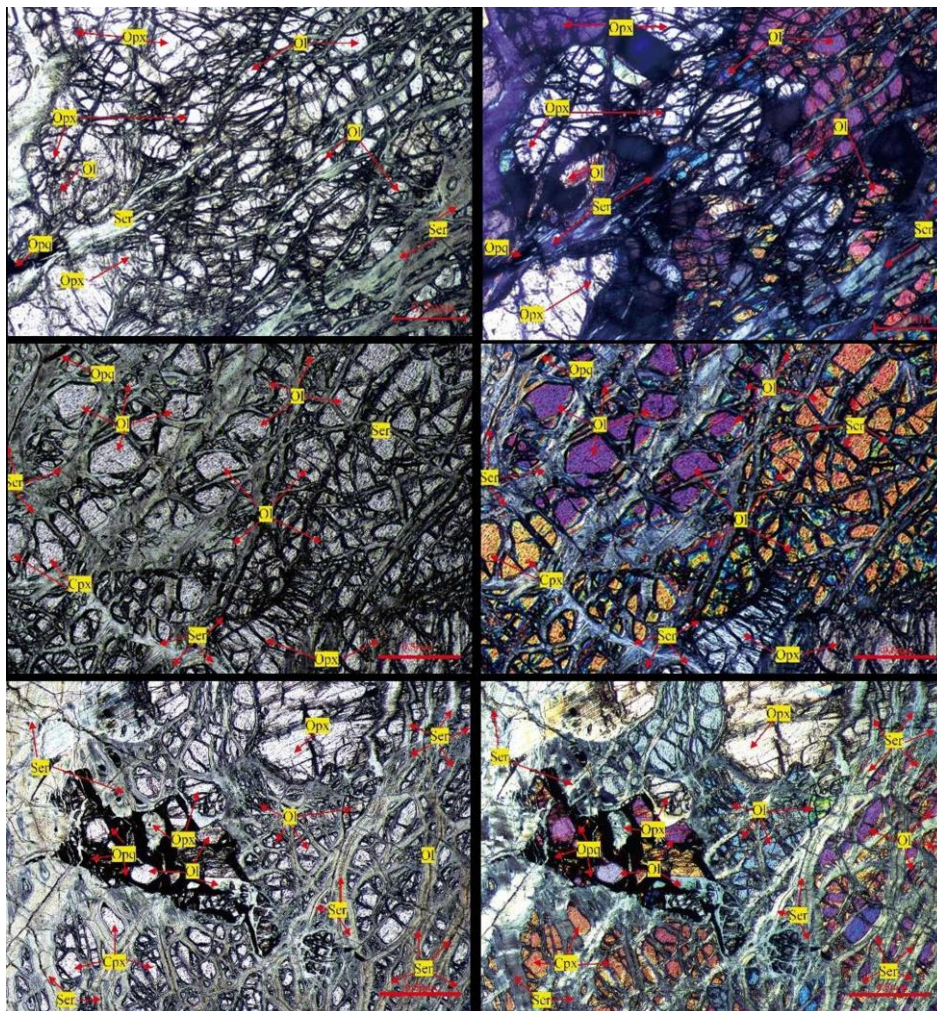
Tabel 2. Distribusi jenis tekstur serpentinisasi pada tiga sampel dari Kompleks Ofiolit Banggai.

Jenis Tekstur	NA2-07-11	NA2-05-07	NA2-01-11
Tekstur mesh (setelah olivin)	Hadir	Hadir	Hadir
Bastit (setelah piroksen)	Hadir	Tidak hadir	Tidak hadir
Tekstur kataklastik	Tidak hadir	Hadir	Tidak hadir
Vein serpentin	Hadir	Hadir (melimpah)	Minor
Mineral dominan yang tergantikan	Olivin + Piroksen	Olivin	Olivin

Sumber: Data primer (2024).

Tekstur mesh hadir pada ketiga sampel sebagai produk alterasi dominan olivin. Dicitrakan oleh jaringan veinlet serpentin (lizardit dan/atau krisotil) yang membentuk pola poligonal di sekeliling inti olivin sisa, dengan warna interferensi abu-abu hingga putih orde pertama. Geometri non-direksional ini konsisten dengan serpentinisasi statis melalui infiltrasi fluida pervasif pada kondisi tekanan mendekati hidrostatik (Wicks & Whittaker, 1977; Rouméjon et al., 2015). Rentang suhu pembentukan yang diindikasikan adalah 150–350°C (Klein et al., 2013).

Bastit diamati eksklusif pada NA2-07-11 sebagai penggantian pseudomorfik ortopiroksena dan klinopiroksena oleh serpentin antigorit, mempertahankan kontur butiran, jejak belahan, dan bentuk kristal prismatic mineral induk. Dalam cahaya terpolarisasi silang, bastit menampilkan warna interferensi biru anomali karakteristik antigorit. Pelestarian geometri belahan piroksen mengindikasikan infiltrasi fluida dikontrol oleh bidang belahan sebagai jalur preferensial (Wicks & Whittaker, 1977; Viti et al., 2018). Ketidakhadiran bastit pada NA2-05-07 meskipun kandungan piroksen awalnya setara, mengindikasikan bahwa dominansi deformasi kataklastik pada sampel tersebut telah mengalihkan aliran fluida ke jalur fraktur makroskopik (Nomuulin et al., 2021).



Gambar 5. Perbandingan tekstur serpentinisasi: (a-b) tekstur mesh setelah olivin pada NA2-01-11; (c-d) bastit setelah piroksen pada NA2-07-11; (e-f) tekstur kataklastik dengan *veinlet* serpentin pada NA2-05-07. Cahaya terpolarisasi bidang (kiri) dan silang (kanan). Skala bar = 0,5 mm.

Tekstur kataklastik berkembang unik pada NA2-05-07 dan tidak hadir pada dua sampel lainnya, didefinisikan sebagai deformasi melalui fraktur dan rotasi butiran mineral (Higgins, 1971). Dimanifestasikan sebagai fragmentasi angular butiran olivin dan piroksen dengan veinlet serpentin mengisi sebagian rekahan. Pengisian rekahan kataklastik oleh serpentin merupakan rekaman langsung serpentinisasi yang dikontrol sesar, di mana deformasi rapuh mendahului atau berlangsung bersamaan dengan hidrasi (Aupart et al., 2021; Audran et al., 2024). Kehadiran tekstur ini secara terlokalisasi, sementara dua sampel lain dari lubang bor yang sama tidak menunjukkannya, mengindikasikan kedekatan NA2-05-07 dengan zona sesar diskret yang meningkatkan permeabilitas secara lokal. Observasi ini relevan dengan analisis liniamen Pusvita Sari (2025) yang mengidentifikasi arah struktur dominan barat laut–tenggara (N340°E – N125°E) di daerah penelitian.

Implikasi Petrogenesis dan Evolusi Mantel

Koeksistensi lherzolit dan harzburgit dalam satu lintasan lubang bor mencerminkan heterogenitas komposisi mantel pada skala puluhan hingga ratusan meter. Perbedaan kontras kandungan klinopiroksena antara lherzolit (19–29% ternormalisasi) dan harzburgit (5,80% ternormalisasi) merupakan indikator langsung perbedaan derajat ekstraksi lelehan parsial. Klinopiroksen sebagai fase paling *incompatible* pada peridotit mantel atas dikonsumsi secara progresif selama peleburan;

ketidakhadirannya yang mendekati total pada harzburgit mengindikasikan derajat peleburan yang lebih tinggi dibandingkan domain lherzolit (Kadarusman et al., 2004; Sepidbar et al., 2021).

Pada skala regional Ofiolit Sulawesi Timur, lherzolit mendominasi di lokalitas Lengan Timur yang terdekat dengan Banggai (wilayah Pagimana-Bunta), sementara harzburgit lebih prevalen di Soroako, mencerminkan variasi spasial dalam derajat peleburan lintas tubuh ofiolit (Kadarusman et al., 2004). Harzburgit yang berselang-seling dalam sekuens yang didominasi lherzolit pada lubang bor Banggai konsisten dengan heterogenitas stratigrafi mantel ini. Dalam konteks asal-usul zona supra-subduksi yang diusulkan terbaru (Kadarusman et al., 2023), transisi lherzolit-harzburgit dapat mencerminkan gradien lateral dalam peleburan yang diinduksi fluida pada mantel baji, di mana domain harzburgit terbentuk di wilayah produktivitas lelehan lebih tinggi akibat input fluida subduksi (Pearce, 2014; Yao et al., 2023).

Distribusi tekstur serpentinisasi yang tidak seragam antar sampel yang berdekatan mendukung model serpentinisasi yang dikontrol secara struktural. Pertama, kehadiran eksklusif tekstur kataklastik pada NA2-05-07 menunjukkan deformasi rapuh yang terlokalisasi, sejalan dengan arah struktur dominan barat laut-tenggara yang teridentifikasi dari analisis liniamen di daerah yang sama (Pusvita Sari, 2025); pengisian rekahan oleh serpentin merupakan rekaman langsung mekanisme serpentinisasi yang dikontrol sesar (Aupart et al., 2021; Audran et al., 2024). Kedua, keterbatasan bastit hanya pada NA2-07-11 mencerminkan penggantian piroksen yang selektif secara struktural, konsisten dengan kondisi rasio fluida-batuan lebih rendah pada posisi tersebut (Viti et al., 2018). Ketiga, serpentinisasi yang relatif lemah pada harzburgit NA2-01-11 konsisten dengan laju reaksi ortopiroksena yang secara inheren lebih lambat terhadap fluida serpentinisasi dibandingkan olivin (Klein et al., 2013). Keseluruhan pola ini sesuai dengan model serpentinisasi pervasif yang terdistribusi secara heterogen, di mana zona deformasi rapuh menciptakan permeabilitas preferensial untuk infiltrasi fluida (Rouméjon et al., 2015; Guillot et al., 2015).

Kontrol Serpentinisasi: Heterogenitas Struktural dan Jalur Fluida

Perbedaan *assemblage* tekstur serpentinisasi antar ketiga sampel yang berdekatan dalam satu lintasan lubang bor menunjukkan dengan kuat bahwa serpentinisasi di segmen Banggai dikontrol oleh variasi lokal dalam keadaan struktural dan geometri jalur fluida, bukan oleh proses pervasif yang seragam. Tiga jalur bukti independen mendukung interpretasi ini.

Pertama, kehadiran eksklusif tekstur kataklastik pada NA2-05-07 menandakan deformasi rapuh lokal yang tidak dialami sampel bersebelahan. Fraktur kataklastik menciptakan permeabilitas tinggi yang memfasilitasi infiltrasi fluida serpentinisasi secara dramatis (Higgins, 1971). Pengisian sebagian fraktur ini oleh serpentin adalah rekaman langsung mekanisme serpentinisasi yang dikontrol sesar, analog dengan dokumentasi Aupart et al. (2021) di Ofiolit Samail dan Audran et al. (2024) di Massif Ronda, Spanyol.

Kedua, keterbatasan bastit hanya pada NA2-07-11 mengindikasikan penggantian piroksen yang selektif secara struktural. Pembentukan bastit memerlukan kondisi rasio fluida-batuan lebih rendah dengan penetrasi fluida dikontrol oleh belahan kristalografi, bukan jaringan fraktur makroskopik (Wicks & Whittaker, 1977). Koeksistensi mesh dan bastit pada NA2-07-11 menunjukkan serpentinisasi yang lebih lengkap dengan durasi interaksi fluida lebih panjang atau ketersediaan fluida lebih tinggi.

Ketiga, serpentinisasi yang relatif lemah pada harzburgit NA2-01-11 konsisten dengan laju reaksi ortopiroksena yang lebih rendah dibandingkan olivin dalam fluida serpentinisasi (Klein et al., 2013). Absennya tekstur kataklastik pada NA2-01-11 mengindikasikan posisi ini tidak mengalami peningkatan permeabilitas setara NA2-05-07. Pola keseluruhan ini sesuai dengan model di mana infiltrasi fluida terkonsentrasi di sepanjang zona deformasi rapuh, sementara domain kurang terdeformasi mengalami serpentinisasi difusif yang lebih terbatas, sebagaimana terdokumentasi di berbagai sistem peridotit ofiolit (Rouméjon et al., 2015; Guillot et al., 2015; Audran et al., 2024).

4. KESIMPULAN

Analisis petrografi tiga sampel inti bor dari Blok 32, Kecamatan Bunta, Kompleks Ofiolit Banggai mengidentifikasi dua jenis litologi: lherzolit terserpentinisasi (NA2-07-11 dan NA2-05-07) dan harzburgit terserpentinisasi (NA2-01-11). Harzburgit dibedakan dari lherzolit oleh kandungan ortopiroksena berjenis enstatit yang jauh lebih tinggi (44,20% ternormalisasi) dan klinopiroksena berjenis augit yang sangat rendah (5,80% ternormalisasi). Adanya tekstur kink-band pada ortopiroksena harzburgit mengindikasikan deformasi kristal-plastis pada kondisi mantel yang mendahului serpentinisasi. Seluruh sampel diklasifikasikan menggunakan diagram Streckeisen (1973) berdasarkan komposisi modal ternormalisasi, konsisten dengan analisis terdahulu pada sampel yang sama (Pusvita Sari, 2025), serta konsisten dengan rentang komposisi peridotit Ofiolit Sulawesi Timur yang didokumentasikan Kadarusman et al. (2004).

Tiga tekstur serpentinisasi terdokumentasi dengan distribusi tidak seragam: tekstur mesh hadir pada ketiga sampel sebagai produk serpentinisasi statis olivin, bastit hanya pada NA2-07-11 sebagai penggantian pseudomorfik piroksen yang dikontrol belahan, dan tekstur kataklastik hanya pada NA2-05-07. Pola distribusi yang terlokalisasi ini pada sampel-sampel berdekatan dalam satu lubang bor yang sama menunjukkan bahwa serpentinisasi dikontrol oleh variasi lokal dalam keadaan struktural dan geometri jalur fluida, bukan oleh alterasi pervasif yang merata. Kehadiran tekstur kataklastik pada NA2-05-07 mengindikasikan peningkatan permeabilitas yang dikontrol sesar, relevan dengan arah struktur dominan barat laut–tenggara yang teridentifikasi di daerah penelitian (Pusvita Sari, 2025), sementara bastit pada NA2-07-11 merekam penggantian piroksen di bawah kondisi rasio fluida-batuan lebih rendah. Temuan ini memberikan bukti mikrostruktur langsung untuk serpentinisasi yang dikontrol deformasi rapuh dalam sekuens mantel ofiolit Banggai.

Perbedaan deplesi klinopiroksena antara lherzolit dan harzburgit mencerminkan heterogenitas derajat peleburan parsial dalam segmen Banggai, konsisten dengan variasi stratigrafi mantel yang didokumentasikan pada skala regional Ofiolit Sulawesi Timur (Kadarusman et al., 2004). Dalam konteks asal-usul zona supra-subduksi yang diusulkan (Kadarusman et al., 2023), transisi lherzolit-harzburgit pada skala lubang bor dapat merekam gradien lateral pengaruh fluida subduksi terhadap produktivitas peleburan mantel baji. Penelitian ini memberikan kontribusi pada pemahaman heterogenitas mantel dan kontrol struktural serpentinisasi pada segmen Banggai, dan mendukung perlunya penelitian terpadu petrografi-geokimia lebih lanjut untuk merekonstruksi sejarah geodinamik penuh Sabuk Ofiolit Sulawesi Timur.

5. REFERENSI

- Aupart, C., Morales, L., Godard, M., & Jamtveit, B. (2021). Seismic faults triggered early stage serpentinization of peridotites from the Samail Ophiolite, Oman. *Earth and Planetary Science Letters*, 574, 117137. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117137>
- Audran, B., Boulvais, P., Branquet, Y., Gautier, P., Ulrich, M., Raymond, G., Beaudoin, G., Layton-Matthews, D., Leduc, E., Bévan, M., & Coltat, R. (2024). Serpentinization of the Ronda Massif (Spain): Structural controls and fluid origin. *Lithos*, 488–489, 107817. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107817>
- Bodinier, J. L., & Godard, M. (2014). Orogenic, ophiolitic, and abyssal peridotites. In H. D. Holland & K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (2nd ed., Vol. 3, pp. 103–167). Elsevier.
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). *An introduction to the rock-forming minerals* (2nd ed.). Longman.
- Ghaneswara, O. A., Permana, A. P., & Hutagalung, R. (2023). Karakteristik Endapan Nikel Laterit Blok O Daerah Bunta, Kabupaten Banggai. *Jurnal Sains Informasi Geografi (J SIG)*, 6(1), 31–37..
- Guillot, S., Schwartz, S., Reynard, B., Agard, P., & Prigent, C. (2015). Tectonic significance of serpentinites. *Tectonophysics*, 646, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.01.020>
- Hall, R., & Wilson, M. E. J. (2000). Neogene sutures in eastern Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6), 781–808. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(00\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(00)00040-7)
- Higgins, M. W. (1971). *Cataclastic rocks* (USGS Professional Paper 687). United States Government Printing Office. <https://pubs.usgs.gov/pp/0687/report.pdf>
- Idrus, A., Septiana, S., Zaccarini, F., Garuti, G., & Hasria, H. (2022). Mineralogical, textural and chemical characteristics of ophiolitic chromitite and platinum group minerals from Kabaena Island (Indonesia): their petrogenetic nature and geodynamic setting. *Minerals*, 12(5), 516. <https://doi.org/10.3390/min12050516>
- Jonnalagadda, M. K., Karmalkar, N. R., Benoit, M., Grégoire, M., Duraiswami, R. A., Harshe, S., & Kamble, S. (2019). Compositional variations of chromian spinels from peridotites of the Spontang ophiolite complex, Ladakh, NW Himalayas, India: petrogenetic implications. *Geosciences Journal*, 23(6), 895–915. <https://doi.org/10.1007/s12303-019-0001-3>
- Kadarusman, A., Miyashita, S., Maruyama, S., Parkinson, C. D., & Ishikawa, A. (2004). Petrology, geochemistry and paleogeographic reconstruction of the East Sulawesi Ophiolite, Indonesia. *Tectonophysics*, 392(1–4), 55–83. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.04.008>
- Kadarusman, A., et al. (2023). Geochronological and geochemical constraints on the East Sulawesi Ophiolite with implications for tectonic reconstructions in Southeast Asia. *Conference: Goldschmidt2023*. <https://doi.org/10.7185/gold2023.15472>
- Klein, F., Bach, W., & McCollom, T. M. (2013). Compositional controls on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Lithos*, 178, 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.03.008>

- Maulana, A., Christy, A. G., & Ellis, D. J. (2015). Petrology, geochemistry and tectonic significance of serpentized ultramafic rocks from the South Arm of Sulawesi, Indonesia. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 75(1), 73–87. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2014.09.003>
- Nesse, W. D. (2012). *Introduction to mineralogy* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Nomuulin, A., Tsuchiya, N., Dandar, O., Okamoto, A., Uno, M., Batsaikhan, U., & Wang, J. (2021). Multi-stage serpentization of ultramafic rocks in the Manlay Ophiolite, southern Mongolia. *Mongolian Geoscientist*, 26(53), 1–17. <https://doi.org/10.5564/mgs.v26i53.1787>
- Pearce, J. A. (2014). Immobile element fingerprinting of ophiolites. *Elements*, 10(2), 101–108. <https://doi.org/10.2113/gselements.10.2.101>
- Pusvita Sari, N. L. A. (2025). Estimasi kadar sumberdaya nikel laterit menggunakan metode ordinary kriging pada Blok 32 Kabupaten Banggai Sulawesi Tengah. Skripsi, Program Studi Teknik Geologi, Universitas Negeri Gorontalo.
- Rouméjon, S., Cannat, M., Agrinier, P., Godard, M., & Andreani, M. (2015). Serpentinization and fluid pathways in tectonically exhumed peridotites from the Southwest Indian Ridge (62–65°E). *Journal of Petrology*, 56(4), 703–734. <https://doi.org/10.1093/petrology/egv014>
- Rouméjon, S., Williams, M. J., & Früh-Green, G. L. (2018). In-situ oxygen isotope analyses in serpentine minerals: constraints on serpentization during tectonic exhumation at slow- and ultraslow-spreading ridges. *Lithos*, 323, 156–173. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.09.021>
- Rusmana, E., Sukido, Sukarna, D., Haryono, E., & Toha, B. (1993). Peta Geologi Lembar Luwuk, Sulawesi (skala 1:250.000). Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Sepidbar, F., Khedr, M. Z., Ghorbani, M. R., Palin, R. M., & Xiao, Y. (2021). Petrogenesis of arc-related peridotite hosted chromitite deposits in Sikhoran-Soghan mantle section, South Iran. *Ore Geology Reviews*, 136, 104256. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104256>
- Sompotan, A. F. (2012). Struktur geologi Sulawesi. Perpustakaan Sains Kebumihan ITB.
- Streckeisen, A. (1973). Plutonic rocks: Classification and nomenclature recommended by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geotimes*, 18(10), 26–30.
- Viti, C., Collettini, C., Tesei, T., Tarling, M. S., & Smith, S. A. F. (2018). Deformation processes, textural evolution and weakening in retrograde serpentinites. *Minerals*, 8(6), 241. <https://doi.org/10.3390/min8060241>
- Wang, Z., Yan, J., Tang, H., Xiao, Y., Deng, Z., Meng, G., Sun, H., Qi, Y., & Yuan, L. (2023). Geochemistry and mineralogy of peridotites and chromitites from Zhaheba Ophiolite Complex, Eastern Junggar, NW China: implications for the tectonic environment and genesis. *Minerals*, 13(8), 1074. <https://doi.org/10.3390/min13081074>
- Wicks, F. J., & Whittaker, E. J. W. (1977). Serpentine textures and serpentization. *The Canadian Mineralogist*, 15(4), 459–488.
- Yao, J., Xu, J., Wu, C., Zhang, Z., Rosana, M. F., Li, X., & Jin, Z. (2023). Origin of high-Cr podiform chromitites from Kabaena Island, Southeast Sulawesi, Indonesia: constraints from mineralogy and geochemistry. *International Geology Review*, 65(19), 2943–2960. <https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2167130>