



## Paragenesis Serpentin pada Batuan Ultramafik Kompleks Ofiolit Daerah Baula - Pomalaa, Sulawesi Tenggara

### *Serpentine Paragenesis in Ultramafic Rocks of the Baula - Pomalaa Ophiolite Complex, Southeast Sulawesi*

Rio Irhan Mais Cendra Jaya<sup>1</sup>, Masri<sup>1\*</sup>, Laode Ihksan Juarsan<sup>2</sup>, Syamsul Razak Haraty<sup>2</sup>,  
 Reza Pramadana<sup>1</sup>, Hasria<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Teknik Geologi, Universitas Halu Oleo,

<sup>2</sup> Teknik Geofisika, Universitas Halu Oleo

email: [masri@uho.ac.id](mailto:masri@uho.ac.id)

Naskah diterima: 30 Januari 2023, Revisi terakhir: 16 Februari 2024, Disetujui: 26 Februari 2024 Online: 14 Mei 2024

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v25i2.761>

**Abstrak-**Serpentinisasi merupakan proses hidrasi pada batuan ultramafik yang mengubah komposisi mineral primer. Pembentukan mineral serpentin pada batuan ultramafik dapat menunjukkan proses pengalih-tempatan dan karakteristik profil nikel laterit yang dapat dihasilkan. Studi paragenesis mineral serpentin telah dilakukan pada batuan ultramafik kompleks ofiolit daerah Baula – Pomalaa. Studi paragenesis mencakup identifikasi tipe mineral serpentin dan asosiasi mineral ubahan lain yang hadir. Tekstur dan struktur khas pada serpentin juga dianalisis menggunakan analisis petrografi pada 10 sampel sayatan tipis. Daerah penelitian tersusun atas harzburgit dan lherzolite terserpentinisasi dengan kandungan serpentin berkisar antara 22% hingga 62%. Serpentin yang hadir berupa lizardit, antigorit, dan krisotil bersama mineral ubahan lain seperti talk, klorit, magnesit, dan hematit. Tekstur pseudomorf dan *mesh rim* pada olivin menunjukkan ciri serpentinisasi bertemperatur tinggi diikuti tekstur bastite pada ortopyroxene. Hadirnya berbagai tipe *vein* serpentin yang didominasi oleh krisotil dan magnesit disertai struktur kink band menunjukkan bahwa proses serpentinisasi terbentuk oleh pengaruh deformasi. Kehadiran hematit, magnesit, dan granular lizardit disertai kehadiran vein tipe 3 menunjukkan proses awal pelapukan ultramafik. Pada sayatan juga menunjukkan subproses hidrasi dan rekristalisasi serpentin yang menunjukkan tipe serpentinisasi *retrograde*. Kehadiran tipe mineral serpentin, tekstur, struktur, dan berbagai tipe *vein* serpentin dapat digunakan untuk interpretasi paragenesis dan derajat serpentinisasi pada batuan ultramafik di daerah penelitian.

**Katakunci:** Kolaka, lherzolite, granular lizardite, retrograde, serpentinisasi, ultramafik.

**Abstract-** Serpentinization is a hydration process in ultramafic rocks that changes the primary mineral composition. The formation of serpentine minerals in ultramafic rocks can indicate the displacement process and the characteristics of the nickel laterite profile that can be produced. Serpentine paragenesis studies have been carried out in ultramafic rocks of the ophiolite complex in the Baula – Pomalaa area. Paragenesis studies include identifying the type of serpentine mineral and the associations of other alteration minerals present. The texture and structure of serpentine were also analyzed using petrographic analysis on ten thin-section samples. The study area comprises serpentinized harzburgite and lherzolite, with serpentine content ranging from 22% to 62%. Lizardite, antigorite, and chrysotile are serpentine minerals along with other altered minerals i.e., chlorite, magnetite, and hematite. Pseudomorph and mesh rim textures on olivine show high temperature serpentinization characteristics, followed by bastite textures on orthopyroxene. Various serpentine veins dominated by chrysotile and magnesite accompanied by kink band structures indicate a serpentinization process formed during deformation. The presence of hematite, magnesite, and granular lizardite, accompanied by type-3 serpentine veins, indicates an early process of ultramafic weathering. The thin section also shows a subprocess of hydration and serpentine recrystallization, indicating the retrograde type of serpentinization. The presence of serpentine mineral types, textures, structures, and types of various serpentine veins can be used to interpret paragenesis and the degree of serpentinization in ultramafic rocks in the study area.

**Keywords:** Kolaka, lherzolite, granular lizardite, retrograde, serpentinization, ultramafic.

## PENDAHULUAN

Pulau Sulawesi dibagi menjadi empat mandala geologi yang salah satunya adalah lajur ofiolit Sulawesi Timur (Suroño & Hartono, 2013, Hermanto, 2014). Batuan ultramafik pada ofiolit menjadi penyusun lajur Tinondo yang dipisahkan oleh Sesar Lasolo (Rusmana dkk., 1993). Kompleks Ofiolit tersebar luas di bagian Timur Sulawesi (Lengan Timur dan Lengan Tenggara Sulawesi) dan beberapa pulau di sekitarnya (Kadariusman dkk., 2004, Hamilton, 1979). Ofiolit di bagian Timur Sulawesi berumur Kapur Akhir - Eosen yang teralih-tempatkan selama Oligosen (Parkinson, 1998) yang terdiri atas batuan basa dan ultramafik yang ditutupi oleh sedimen laut dalam. Batuan basa dan ultramafik ini terdiri atas peridotit, mikrogabro, dan basal. Peridotit, didominasi oleh dunit, harzburgit, lertzolit dan piroksenit, sedangkan mikrogabro dan basal hanya dijumpai setempat di beberapa lokasi (Suroño, 2013). Studi unsur REE pada klinopiroksen peridotit menunjukkan asal *mid-oceanic ridge* (MOR) dibanding zona suprasubduksi (Kadariusman dkk., 2004). Secara umum batuan ultramafik terbentuk pada mantel bagian atas dan tersusun atas mineral tanpa gugus hidroksida (Winter, 2014). Pengalih-tempatan batuan ultramafik dapat menyebabkan reaksi hidrasi pada mineral penyusun ultramafik sehingga batuan dapat terserpentinisasi sebagian atau seluruhnya (Moody, 1976).

Serpentinisasi adalah suatu reaksi eksotermis, hidrasi fluida bereaksi dengan mineral mafik seperti olivin dan piroksen untuk menghasilkan lizardit, antigorit, dan/ atau krisotil (Palandri & Reed, 2004). Serpentinisasi peridotit adalah proses metamorfisme retrograde, dan terjadi melalui infiltrasi cairan di batuan di dasar laut atau selama pengangkatan. Selama proses ini, olivin digantikan oleh serpentin dan ortopiroksen membentuk bastit (Oud, 2010).

Pemahaman tentang serpentinisasi menjadi penting dalam mengetahui komposisi batuan dasar, menentukan suhu dan kondisi tekanan saat proses hidrasi berlangsung, dan menentukan lokasi serpentinisasi yang terjadi pada kerak benua, kerak samudera atau keduanya. Serpentinisasi juga dapat menentukan sumber dan komposisi fase fluida yang diperlukan untuk proses hidrasi, sehingga pengetahuan tentang komposisi fluida setelah terjadinya alterasi dapat diketahui (Wicks & O'Hanley, 1988). Pengetahuan tentang serpentinisasi akan bermanfaat bagi kegiatan eksplorasi utamanya eksplorasi endapan nikel laterit, karena mayoritas produksi bijih nikel laterit berasal dari pelapukan kimia batuan ultramafik terserpentinisasi (Freysinet

dkk., 2005). Pemahaman mengenai serpentinisasi juga akan sangat dibutuhkan dalam mengkaji proses-proses tektonik yang berhubungan dengan mekanisme pengalih-tempatan batuan ultramafik selama proses deformasi batuan (Guillot dkk., 2015, Hirth & Guillot, 2013).

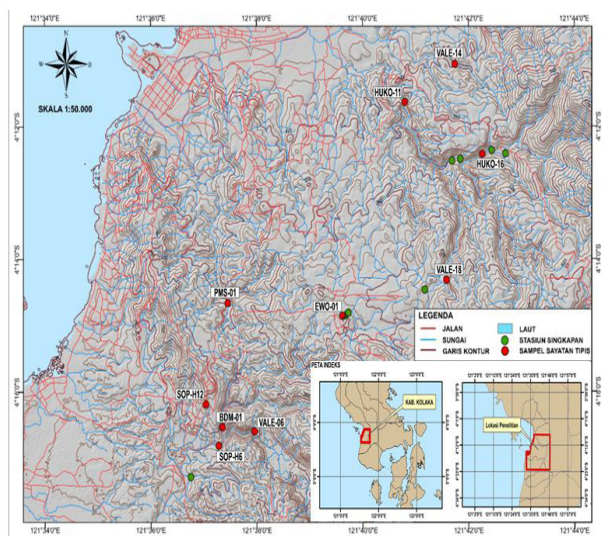
Penelitian ini membahas tentang karakteristik batuan ultramafik yang terserpentinisasi dan paragenesis mineral serpentin yang teramati pada sayatan tipis. Identifikasi tekstur, struktur, dan proses ubahan mineral primer menjadi serpentin pada batuan menggunakan analisis petrografi. Lokasi penelitian pada studi serpentinisasi batuan ultramafik adalah Daerah Pomalaa - Baula, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara. Pada daerah ini tersingkap batuan ultramafik yang terhampar luas, secara umum telah terserpentinisasi (Simandjuntak dkk., 1993, Jaya; 2017). Belum adanya penelitian relevan terkait proses serpentinisasi batuan ultramafik pada daerah ini menjadi dasar diajukannya penelitian ini.

Pada penelitian ini, karakteristik batuan ultramafik terserpentinisasi dan paragenesis mineral serpentin ditentukan melalui pengamatan sayatan tipis dengan analisis petrografi. Analisis mencakup pengamatan komposisi, tekstur, struktur, tipe vein, dan asosiasi mineral serpentin yang dapat menunjukkan proses serpentinisasi yang dikaitkan dengan pengalih-tempatan batuan ultramafik.

## METODE

Metode penelitian yang digunakan berupa pendekatan deskriptif metode geologi lapangan dengan dukungan analisis laboratorium. Penelitian kuantitatif dilakukan pada aspek penentuan persentase komposisi mineral primer maupun komposisi mineral ubahan oleh proses serpentinisasi. Deskripsi kualitatif ditujukan pada aspek interpretasi tipe vein serpentinisasi dan paragenesis mineral serpentin. Data primer berupa hand specimen batuan ultramafik dengan variasi derajat serpentinisasi yang dideskripsi secara megaskopis. Pemerolehan sampel batuan melalui perencanaan lintasan geologi (Gambar 1).

Objek penelitian adalah batuan ultramafik dalam kondisi segar, lapuk, maupun yang telah terserpentinisasi. Data singkapan yang diamati berjumlah 17 stasiun, dengan data litologi difokuskan pada 10 sayatan tipis, titik variasi batuan ultramafik secara lateral yang menunjukkan derajat serpentinisasi yang bervariasi. Selain itu, data geologi struktur difokuskan pada deskripsi urat serpentin yang mencakup kedudukan, persistensi, dan karakteristik isian. Deskripsi megaskopik batuan ultramafik mengacu pada Bonewitz (2012).



Sumber: olahan peneliti dengan peta dasar berasal dari citra topografi DEM-NAS

Gambar 1. Sebaran sampel batuan ultramafik pada daerah penelitian.

Analisis petrografi dilakukan dengan menggunakan mikroskop polarisasi tipe Nikon Eclipse E-100 di Laboratorium Teknik Geologi Universitas Halu Oleo dengan pembuatan sayatan tipis dilakukan di Laboratorium Petrologi Universitas Hasanuddin, Makassar. Sifat optik yang diamati mencakup bentuk dan ukuran kristal, belahan, relief, indeks refraksi, warna absorpsi dan pleokroisme, warna interferensi, orientasi optik, kembaran, dan sudut pepadaman. Deskripsi ini digunakan untuk mengidentifikasi berbagai grup serpenin yang hadir (antigorit, krisotil, lizardit) maupun mineral penyerta serpentinisasi lain (brusit, bastit, magnetit, talk, klorit, dan kuarsa). Pengenalan tipe vein serpentin juga dikenali berdasarkan ukuran, bentuk, dan tipe mineral pengisi vein (Frost dkk., 2013, Andreani dkk., 2007), sedangkan tekstur serpentin dikelompokkan ke dalam tesktur pseudomorf dan non-pseudomorf (Oud, 2010, Mével, 2003, Andreani dkk.; 2007). Deformasi mineral serpentin dan mineral primer pada batuan ultramafik juga dikenali berdasarkan ciri mikrostruktur yang teramati pada sayatan tipis (Vernon, 2018).

Derajat serpentinisasi dibagi menjadi tiga kategori (rendah, sedang, tinggi) berdasarkan tipe vein serpentin (Frost dkk., 2013). Keterdapatn tekstur dan struktur khas grup mineral serpentin dapat menunjukkan lingkungan proses serpentinisasi dengan temperatur dan tekanan tertentu. Berbagai variasi sampel sayatan tipis dapat menunjukkan proses serpentinisasi yang berbeda berdasarkan

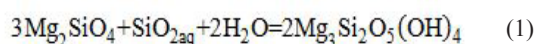
parameter tipe vein serpentin dan tekstur khas pada serpentin. Selanjutnya, proses serpentinisasi diinterpretasi pada temperatur tinggi yang berasosiasi dengan mid-oceanic ridge, tekanan tinggi pada zona subduksi, atau derajat rendah setelah ultramafik teralih-tempatkan dan terangkat. Interpretasi ini memberikan gambaran yang komprehensif terkait karakteristik batuan ultramafik yang terserpentinisasi pada daerah penelitian.

## HASIL PENELITIAN

### Kelompok Mineral Serpentin

Berdasarkan analisis petrografi pada sepuluh sayatan tipis, batuan di daerah penelitian dapat dikelompokkan menjadi dua tipe batuan ultramafik (Streckeisen, 1976). Harzburgit terserpentinisasi diidentifikasi pada sampel SOP-H12 dan PMS-01, sedangkan lertzolit terserpentinisasi diidentifikasi pada sampel BDM-01, EWO-01, HUKO-11, HUKO-16, SOP-H6, VALE-14, VALE-18, dan VALE-06. Pada kedua kelompok batuan hadir berbagai mineral, baik mineral primer, mineral sekunder grup serpentin, maupun mineral hidrosilikat lain, dan sedikit mineral oksida (Tabel 1).

Mineral serpentin pada daerah penelitian terdiri atas lizardit, krisotil, dan antigorit. Mineral serpentin yang keterdapatannya paling banyak pada daerah penelitian yaitu lizardit. Lizardit dapat dijumpai di semua sayatan dan hadir dengan berbagai tekstur. Lizardit terbentuk pertama kali selama tahap awal hidrasi serpentin pada suhu 400-600°C (Andreani dkk, 2007), membentuk tekstur *mesh rim* pada batuan ultramafik (Gambar 2). Pada tahapan yang lebih lanjut, *fibrous* lizardit akan terekristalisasi menjadi granular lizardit dalam tekstur *hourglass*. Rekrystalisasi ini diyakini terjadi setelah proses pengalih-tempatan dan masih dapat berlanjut hingga sekarang. Pada sayatan batuan dari sampel EWO-01 diperlihatkan kenampakan granular lizardit dengan tekstur *hourglass* yang hadir berdampingan dengan lizardit dan krisotil pada mesh rim yang mulai mengalami rekrystalisasi membentuk granular lizardit (Gambar 2b). Hal ini menunjukkan bahwa lizardit terbentuk setelah pengalih-tempatan yang mungkin juga dipengaruhi oleh pelapukan batuan. Pembentukan granular lizardit ini terjadi pada temperatur kurang dari 300°C. Secara umum reaksi kimia pembentukan grup mineral serpentin (krisotil dan lizardit) merupakan fungsi hidrasi mineral mafik (Pers. 1) dengan melibatkan larutan silika (Bucher & Grapes, 2011).

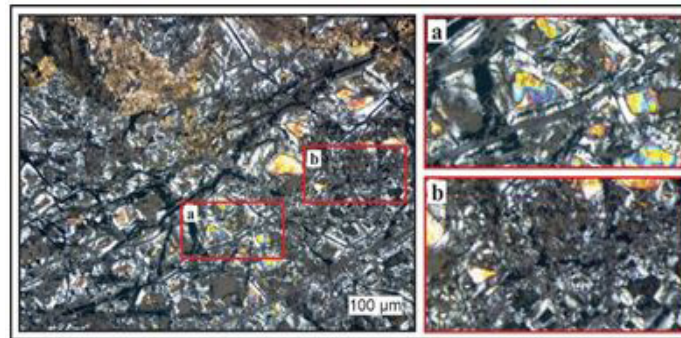


Forsterit + Fluida Silika + Air = Serpentin (mesh)



Tabel 1 Tabel persentase mineral primer dan sekunder dari 10 sayatan tipis batuan ultramafik terserpentinisasi (Ol = Olivin, Cpx = Klinopiroksen, Opx = Ortopiroksen, Lz = Lizardit, Ctl = Krisotil, Atg = Antigorit, Opq = Opak, Tlc = Talk, Chl = Klorit, Mgs = Magnesit, Hem = Hematit)

Kode Sampel	Persentase Mineral (%)										
	Primer			Sekunder							
	Ol	Cpx	Opx	Lz	Ctl	Atg	Opq	Tlc	Chl	Mgs	Hem
BDM-01	5	6	-	33	8	21	15	-	-	-	12
EWO-01	12	-	-	27	14	20	10	-	7	10	-
HUKO-16	25	13	21	13	10	8	10	-	-	-	-
HUKO-11	27	6	10	14	11	9	5	-	-	-	18
PMS-01	30	4	15	15	8	6	7	5	5	5	-
SOP-H12	21	2	15	25	4	26	4	-	-	2	-
SOP-H6	14	18	4	29	13	14	6	2	-	-	-
VALE-14	35	11	12	10	9	2	2	8	11	-	-
VALE-18	5	13	11	16	1	15	19	10	-	-	20
VALE-06	28	6	10	17	14	13	11	1	-	-	-
Keterangan:	Harzburgit			Lherzolit							



Gambar 2. Sayatan lherzolit (EWO-01) yang menunjukkan pembentukan granular lizardit; (a) Planar lizardit dan *fibrous* krisotil pada mesh, (b) Granular lizardit dengan tekstur *hourglass*. Mineral opak yang hadir yaitu magnetit.

Krisotil pertama kali terbentuk pada temperatur 400-500°C dari forsterit dan air (Oud, 2010). Krisotil dapat dijumpai di kedua tepi dan inti serpentin bertekstur mesh dengan persentase lebih kecil dibanding lizardit, dan diyakini mewakili pertumbuhan setelah hidrasi awal. Krisotil jenis ini diinterpretasikan terbentuk karena proses hidrasi sebelum pengalihan-tempatan. Krisotil selanjutnya terbentuk pada rekahan memanjang dengan struktur *kink band*. Krisotil ini diinterpretasikan sebagai *replacement* akibat proses rekristalisasi pada lizardit yang terbentuk pada rekahan sebelumnya. Struktur *kink band* krisotil menunjukkan bahwa pembentukannya disebabkan oleh deformasi ductile selama proses pengalihan-tempatan (Gambar 3).

Antigorit hadir dengan tekstur non-pseudomorf karena sudah tidak menunjukkan bentuk mineral asalnya. Contoh perubahan hidrasi olivin menjadi antigorit jauh lebih sedikit dibanding lizardit. Hampir tidak ada serpentin yang pertama kali terbentuk tanpa talk akan menjadi antigorit (Oud, 2010). Di beberapa sayatan tipis dijumpai talk sehingga dapat diinterpretasikan bahwa mineral serpentin yang pertama kali terbentuk yaitu lizardit, sedangkan antigorit terbentuk sebagai *replacement* lizardit

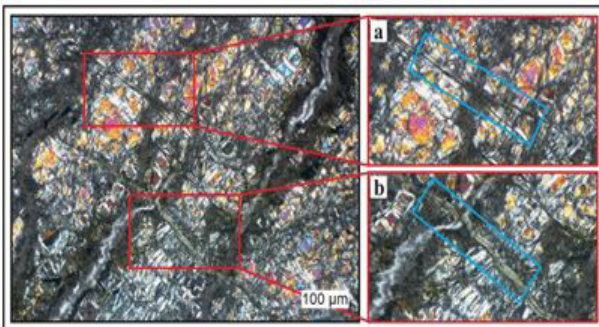
akibat proses hidrasi dan rekristalisasi. Antigorit dijumpai pada sayatan hadir dengan tekstur *hourglass* dan *interlocking* bersama dengan lizardit (Gambar 4). Mineral opak yang hadir terdiri atas kromit-spinel dan magnetit.

#### Tekstur Mineral Serpentin

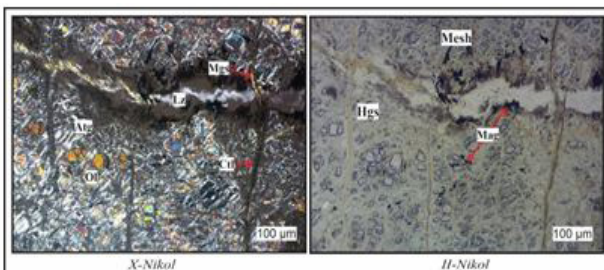
Pada mineral serpentin, umumnya hadir beberapa tekstur khas. Serpentin dapat hadir dalam tekstur pesuodomorf yang masih menunjukkan tekstur relik mineral primer yang berubah atau dalam tekstur non-pseudomorf yang menunjukkan pertumbuhan serpentin. Serpentin juga dapat mengisi rekahan maupun menunjukkan tekstur khas pelapukan.

Tekstur pseudomorf adalah tekstur yang masih menunjukkan kondisi batuan sebelum serpentinisasi seperti adanya pola rekahan dan belahan mineral asal. Tekstur pseudomorf yang paling umum adalah tekstur *mesh* dan *hourglass* pada olivin dan tekstur bastite pada piroksen dan amfibol. Secara umum mesh serpentin hadir pada tepi yang berserat saat serpentinisasi belum selesai (Gambar 5). Jenis tekstur lainnya adalah tekstur *hourglass*. Pada tekstur ini tidak mungkin lagi membedakan antara *mesh center* dan *mesh rim* (Gambar 6). Tekstur mesh pada daerah

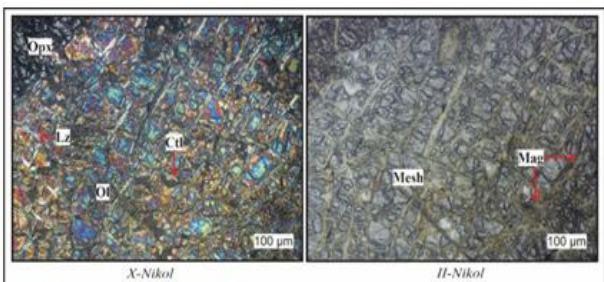
penelitian didominasi oleh mineral krisotil dan lizardit. Lizardit pada *mesh rim* merupakan polimorf serpentin dominan dijumpai pada serpentinisasi dasar samudera yang ditemukan dalam bentuk tekstur mesh dan bastit, yang mengindikasikan proses deformasi awal sebelum terjadinya proses pengalih-tempatan batuan lantai dasar samudera. Dalam sampel dengan kandungan serpentin tinggi, juga kerap diikuti pembentukan bastit (Gambar 7). Pada piroksenit, seringkali satu-satunya agregat serpentin yang membentuk tekstur bastit berasal dari ortopiroksen dan jarang dijumpai pada klinopiroksen (Mével, 2003).



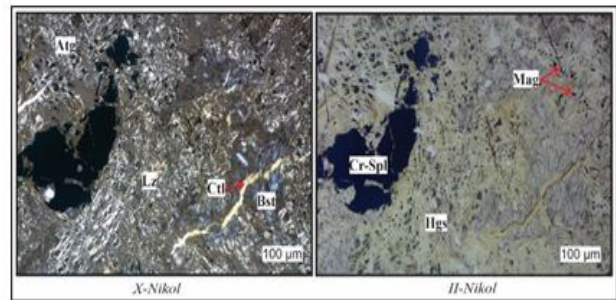
Gambar 3. Sayatan harzburgit (SOP-H12) yang menunjukkan perubahan mineral serpentin, (a) Rekahan yang diisi oleh lizardit sebelum mengalami rekristalisasi kemudian digantikan oleh (b) krisotil dengan tekstur *kink band*.



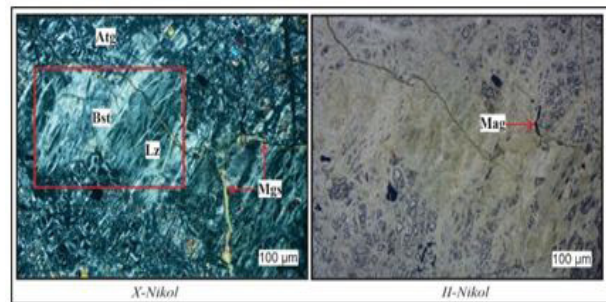
Gambar 4. Sayatan (SOP-H12) yang menunjukkan antigorit dengan tekstur *hourglass* dan magnetit.



Gambar 5. Kehadiran tekstur *mesh* oleh lizardit pada olivin (VALE-14).



Gambar 6. Kehadiran tekstur *hourglass* pada sayatan lertzolit (BDM-01) dengan tekstur relik.



Gambar 7. Tekstur bastit atau penggantian ortopiroksen oleh serpentin pada sayatan harzburgit (SOP-H12).

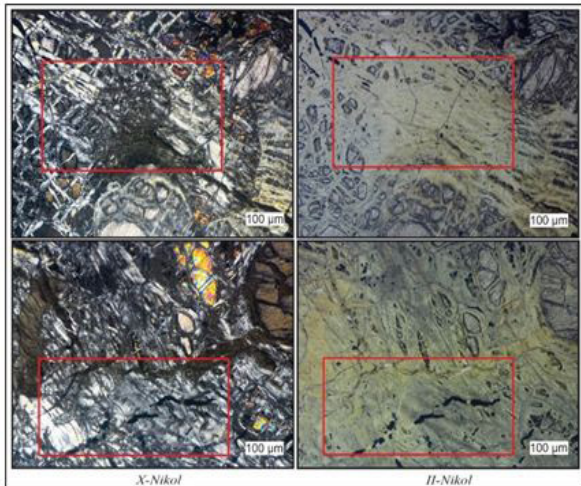
Tekstur non-pseudomorf dibedakan menjadi dua tipe yaitu tekstur *interpenetrating* dan tekstur *interlocking*. Tekstur *interpenetrating* memperlihatkan bentuk pipih memanjang. Tekstur ini mulai berkembang sebagai bentuk *blade* (lembaran) atau kipas yang tersebar pada lizardit atau silikat primer. Tekstur *interlocking* membentuk butiran yang tidak teratur dan saling memasuki (Gambar 8). Tekstur *interlocking* antigorit bersifat transisional antara tekstur pseudomorf dan nonpseudomorf (O'Hanley, 1991). Pada sayatan tipis, tekstur *interlocking* dapat dijumpai di beberapa sampel namun tekstur *interpenetrating* tidak ditemukan.

Tekstur vein umumnya hadir sebagai serpentin pengisi rekahan. Rekahan dapat berupa percabangan, bukaan kecil hingga besar, dan dalam bentuk *slip vein*. Vein serpentin umumnya berwarna hijau dan berasosiasi dengan magnetit (Sufriadin, 2013). Tekstur vein pada mineral serpentin yang dijumpai pada sayatan yaitu *kink band* pada mineral krisotil (Gambar 9). Deformasi *kink band* hadir pada beberapa sayatan sebagai ciri proses pengalih-tempatan. Deformasi *kink band* pada sayatan banyak dijumpai pada vein krisotil yang ditunjukkan oleh penekukan pada vein. Deformasi *kinked* ditandai dengan adanya kesan tertekuk pada mineral akibat deformasi plastis dan perbedaan sudut pemadaman dari suatu mineral. Tekstur ini dianalogikan sebagai karpet yang diberikan tekanan pada salah satu sisi karpet menuju sisi karpet yang lain maka karpet tersebut akan membentuk tekukan

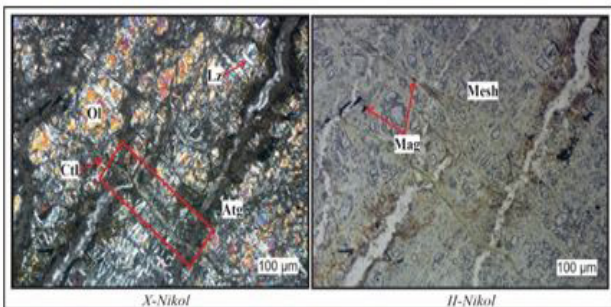


(Vernon, 2018). Hal ini diinterpretasikan bahwa vein krisotil terbentuk pada shear zone. *Kink band* hanya mengubah bentuk vein tanpa adanya penekukan pada kristal mineral.

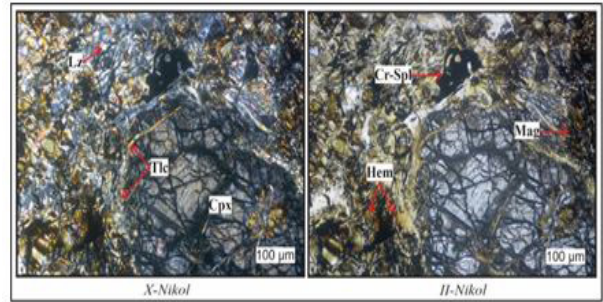
Di sebagian sayatan tipis, serpentin pada *mesh center* memiliki warna lapuk merah-coklat. Ini terutama terjadi di sekitar rekahan/urat serpentin dan pada permukaan mineral (Gambar 10). Pelapukan serpentin ini dapat dijelaskan dengan kehadiran oksidasi magnetit atau hematit yang terjadi di sepanjang tepi mesh. Oksidasi lebih sedikit pada piroksenit, karena memiliki kandungan besi-oksida yang lebih rendah (Oud, 2010). Mineral magnetit merupakan produk oksidasi yang paling sering hadir selama proses serpentinisasi, biasanya mengisi vein bersama dengan serpentin dan brusit. Magnetit juga teridentifikasi dengan bentuk granular sebagai hasil rekristalisasi kromit (Gambar 6). Hematit juga hadir selama proses oksidasi yang menunjukkan berlangsungnya fase awal pelapukan pada batuan ultramafik terserpentinisasi.



Gambar 8. Terbentuknya tekstur *interlocking* oleh pertumbuhan antigorit pada sayatan (SOP-H6).



Gambar 9. Sayatan (SOP-H12) yang menunjukkan tertekuknya vein krisotil membentuk struktur *kink band*.



Gambar 10. Kenampakan sayatan (VALE-18) yang mengalami proses pelapukan oleh proses oksidasi.

**DISKUSI**

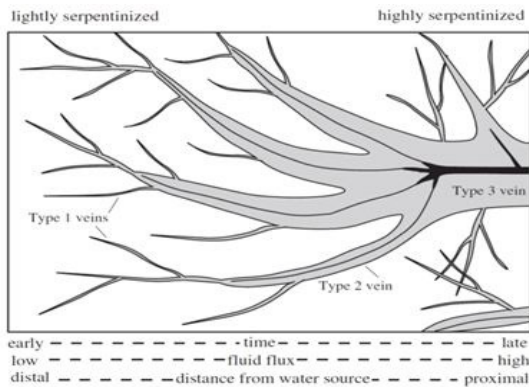
**Derajat Serpentinisasi**

Penentuan derajat serpentinisasi menggunakan diagram tahapan pembentukan vein serpentin (Frost dkk., 2013). Diagram tersebut menunjukkan derajat pembentukan vein serpentin dipengaruhi oleh lama proses serpentinisasi, jumlah *flux* larutan hidrotermal dalam pembentukan vein, dan jauh atau tidaknya vein terhadap sumber fluida hidrotermal (Gambar 11). Diagram ini juga menunjukkan bahwa semakin ke kanan maka proses serpentinisasi semakin tinggi, sedangkan semakin ke kiri maka serpentinisasi akan semakin rendah dengan mengelompokkan tipe vein serpentin menjadi vein tipe 1, 2 dan 3.

Vein tipe 1 dicirikan oleh kehadiran lizardit dan brusit yang melimpah tanpa kehadiran magnetit. Vein tipe 1 ini hadir dengan bukaan kecil (50 – 100 µm) dan jarang meluas lebih dari satu ukuran kristal olivin. Pembentukan vein ini oleh hidrasi dari peridotit saat serpentinisasi tahap pertama, sehingga vein yang terbentuk bergantung pada komposisi mineral penyusunnya, seperti olivin dan ortopiroksen dalam peridotit. Proses hidrasi ini mengakibatkan penambahan volume pada batuan. Vein ini umumnya mengindikasikan proses serpentinisasi tahap pertama yang tidak banyak melibatkan fluida, kurangnya aliran fluida berhubungan dengan tingkat kedalaman dan *vein distal* (jauh dari sumber fluida). Diinterpretasikan bahwa serpentinisasi awal yang rendah dicirikan oleh vein tipe 1 yang terjadi di tengah pematang samudera, berupa hidrasi olivin menjadi serpentin dan brusit yang kaya Fe terjadi pada tepian olivin bukan pada vein dengan bukaan besar karena fluida bereaksi terlebih dahulu dengan serpentin segar (Frost dkk., 2013).

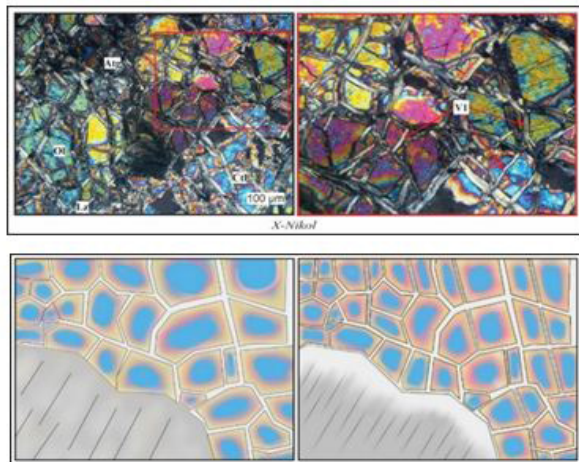
Generasi pertama serpentin teramati pada sayatan HUKO-16 yang dicirikan oleh hadirnya lizardit (Lz), krisotil (Ct) membentuk tekstur *mesh* pada olivin (Gambar 12). Klorit dan talk juga dijumpai di beberapa sayatan. Kehadiran mineral talk menunjukkan adanya aktivitas silikat pada temperatur serpentinisasi yang

lebih tinggi, sedangkan kehadiran mineral klorit menunjukkan temperatur yang sama dengan fasies sekis hijau pada kisaran temperatur 300-500°C (Mével, 2003). Asosiasi mineral pada sayatan HUKO-H16 mencirikan derajat serpentinisasi tinggi yang terjadi pada suhu 400-600°C (Oud, 2010). Serpentin ini menandakan tahapan awal serpentinisasi selama deformasi mantel pada temperatur tinggi (Hirth & Guillot, 2013) sebelum teralih-tempatkan.



Sumber Frost dkk. (2013)

Gambar 11. Sketsa vein serpentin tipe 1, 2, dan 3. Vein tipe 1 terbentuk pada tahap serpentinisasi awal. Seiring fungsi waktu, flux fluida, dan kedekatan dengan sumber fluida, vein tipe 1 berkembang menjadi vein tipe 2 dan tipe 3 yang menunjukkan peningkatan derajat serpentinisasi. Putih=peridotit, abu-abu=serpentin+brusit, hitam=magnetit.



Gambar 12. Foto mikrograf dan sketsa vein generasi pertama (V1) dengan tekstur pseudomorf (*mesh*) olivin (HUKO-16).

Vein tipe 2 memiliki lebar bukaan 0,01 - 0,1 mm memanjang melintasi kristal olivin dan memotong vein tipe 1. Dicitrakan oleh kehadiran mineral lizardit, krisotil dan magnetit pada inti vein dengan lebih sedikit brusit dibandingkan pada vein tipe 1. Kehadiran magnetit dan berkurangnya brusit dalam vein disebabkan oleh reaksi antara brusit dan

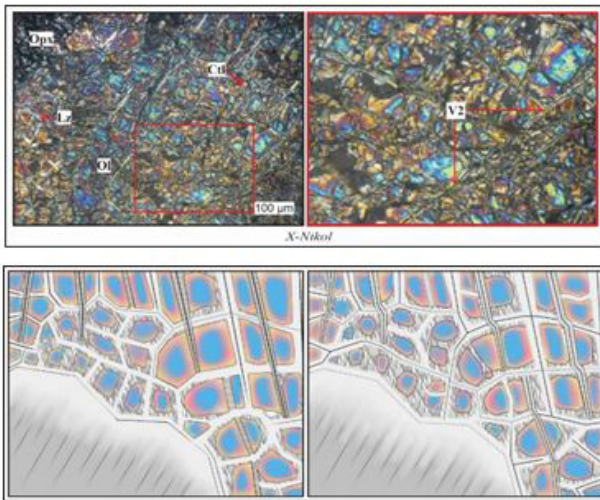
serpentin dengan besi (Fe) bersama hidrogen dari serpentinisasi tahap pertama, kemudian ekstraksi dari keduanya menghasilkan magnetit (persamaan 4). Hal ini juga menunjukkan bahwa batuan sudah bergerak dari posisi sebelumnya, sehingga diinterpretasi bahwa proses serpentinisasi ini berlangsung bersama proses pengalih-tempatan.

Vein tipe 2 memotong kristal olivin dan membentuk tekstur *mesh* pada olivin. Pada sayatan VALE-H14, terdapat lizardit dan magnetit, serta krisotil yang membentuk vein berpotongan (Gambar 13). Pada serpentinisasi lantai dasar samudera, olivin digantikan oleh serpentin dalam bentuk *mesh* pada temperatur relatif tinggi. Tekstur *mesh* kristal olivin yang rusak digantikan oleh lapisan serpentin yang berasosiasi dengan granular magnetit, sehingga dengan demikian tahapan serpentinisasi ini terbentuk sebelum ofiolit teralih-tempatkan (Mével, 2003). Mekanisme deformasi berikutnya melibatkan rekahan yang menyebabkan air laut menyusup ke bagian mantel atas sehingga menyebabkan serpentinisasi temperatur sedang (Hirth & Guillot, 2013). Generasi vein tipe 2 serpentin memiliki komposisi mineral yang didominasi oleh lizardit atau krisotil dan magnetit dengan persistensi hingga beberapa centimeter. Mineral tersebut merupakan komposisi utama urat serpentin. Proses serpentinisasi ini terjadi pada temperatur 300-400°C (Oud, 2010).

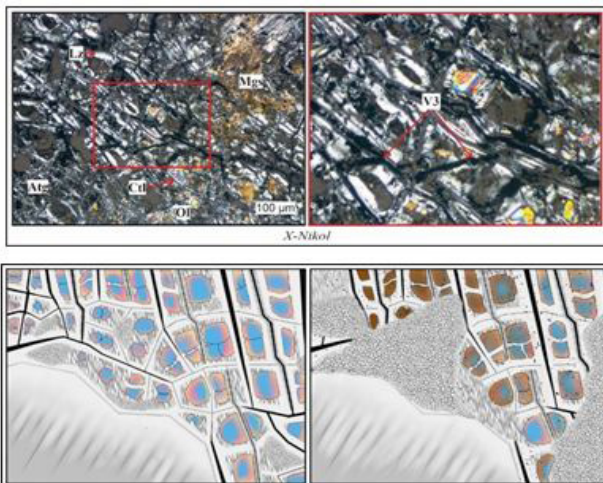
Vein tipe 3 relatif mudah dibedakan terhadap vein tipe 1 dan 2. Mineral pengisi vein didominasi oleh lizardit bersama dengan magnetit (opak) yang melimpah dengan bukaan lebih besar dari vein tipe 1 dan 2 (Gambar 14). Kehadiran magnetit yang ukurannya menjadi bertambah dari ukuran magnetit sebelumnya, dapat disebabkan oleh proses pembentukan dalam waktu yang lama dengan reaksi yang lebih kompleks. Berdasarkan ciri dari vein tipe 3, maka diinterpretasikan bahwa serpentinisasi tahap ketiga berlangsung setelah proses pengalih-tempatan.

Vein tipe 1 mencirikan serpentinisasi sebelum pengalih-tempatan. Vein serpentin hanya hadir setempat pada tepian olivin dan beberapa di antaranya membentuk *mesh*. Vein tipe 2 mencirikan proses saat pengalih-tempatan terjadi, ditandai dengan penambahan granular magnetit yang mengisi inti vein bersama lizardit dan sedikit brusit. Proses setelah pengalih-tempatan dicirikan oleh kehadiran vein tipe 3, beberapa di antaranya hadir dengan persistensi dan bukaan lebih besar dibanding tipe vein lainnya dan umumnya diisi oleh krisotil dengan kelimpahan magnetit (Gambar 15).

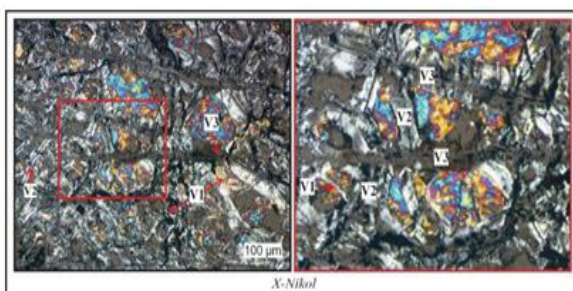




Gambar 13. Foto mikrograf dan sketsa vein generasi kedua (V2) yang memperlihatkan tekstur *mesh* pada olivin disertai vein krisotil (VALE-14).



Gambar 14. Foto mikrograf dan sketsa vein serpentin generasi ketiga (V3) dengan dominasi *mesh*, bukaan lebih besar, dan kelimpahan magnetit (EWO-01).



Gambar 15. Paragenesis vein serpentin pada sayatan EWO-01 yang menunjukkan vein tipe 1 dipotong oleh vein tipe 2 dan tipe 3.

### Paragenesis Mineral Serpentin

Batuan ultramafik di daerah penelitian terdiri atas harzburgit dan lertzolit. Mineral penyusun harzburgit terdiri atas olivin, ortopiroksen, klinopiroksen,

krisotil, lizardit, antigorit, talk, klorit, magnesit, dan mineral opak (kromit-spinel dan magnetit). Mineral penyusun lertzolit terdiri atas olivin, ortopiroksen, klinopiroksen, krisotil, lizardit, antigorit, talk, klorit, magnesit, hematit, dan mineral opak (kromit-spinel dan magnetit). Mineral silikat seperti olivin dan piroksen yang teralterasi akan berubah menjadi mineral serpentin. Mineral serpentin yang teramati yaitu krisotil, lizardit, dan antigorit. Dari pengamatan petrografi pada sayatan tipis, berdasarkan tekstur dan mineralisasi serpentin yang dihasilkan, dapat ditemui adanya dua sub-proses serpentinisasi, yaitu hidrasi dan rekristalisasi serpentin.

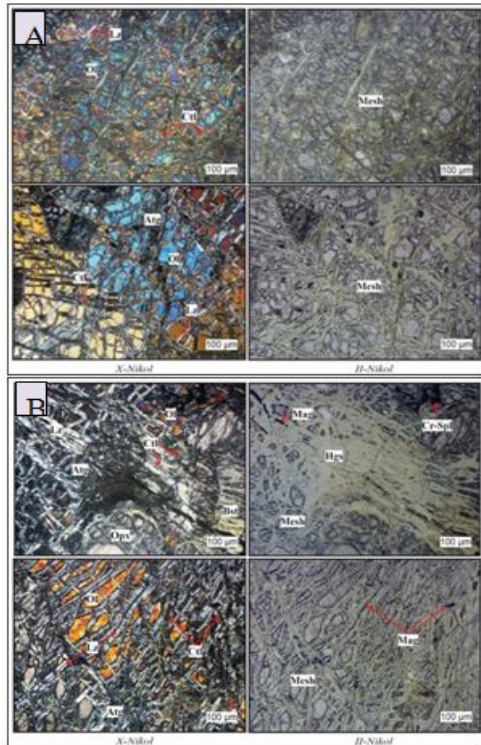
Mineral serpentin generasi pertama dan kedua terbentuk pada fase pemekaran lantai samudera dengan kisaran temperatur 300-600°C (Oud, 2010). Generasi serpentin ini didominasi oleh mineral lizardit dan krisotil yang hadir dengan tekstur *mesh* (Gambar 16A). Hadirnya tekstur *mesh* juga menjadi penciri bahwa telah terjadi proses hidrasi (O'Hanley, 1992). Hidrasi pada olivin adalah reaksi pembentukan serpentin, setidaknya selama tahap pertama serpentinisasi (Malvoisin dkk., 2012).

Mineral serpentin generasi ketiga terbentuk pada fase orogenik selama proses pengangkatan dengan kisaran temperatur <300°C (Oud, 2010). Generasi ketiga serpentin ini didominasi mineral lizardit dan *fibrous* krisotil yang membentuk vein bertekstur *hourglass*, juga teramati kehadiran bastit dan antigorit. Krisotil yang hadir diinterpretasikan sebagai penggantian (*replacement*) lizardit pada generasi pertama akibat proses rekristalisasi serpentin. Bastit hadir sebagai *replacement* piroksen. Antigorit hadir dengan tekstur *mesh* dan *hourglass* yang menggantikan lizardit dan krisotil generasi pertama serta interlocking terhadap lizardit generasi kedua (Gambar 16B). Peralihan tekstur dari *mesh* menjadi *hourglass* dan banyaknya tekstur *replacement* mencirikan dimulainya rekristalisasi serpentin (Oud, 2010).

Pada sayatan tidak ditemukan antigorit dengan tekstur *interpenetrating* yang merupakan penciri deserpentinisasi dan *prograde* metamorfisme (Evans & Frost, 2021). Proses serpentinisasi yang terjadi pertama kali yaitu hidrasi, selanjutnya diikuti proses rekristalisasi serpentin. Kedua proses serpentinisasi ini termasuk dalam serpentinisasi *retrograde* yang melibatkan penyerapan fluida (hidrasi) dalam prosesnya, sedangkan proses deserpentinisasi melepaskan fluida (dehidrasi) termasuk ke dalam proses serpentinisasi *prograde*. Serpentinisasi pada daerah penelitian adalah serpentinisasi *retrograde* yakni perubahan serpentin terjadi pada temperatur tinggi dan terus berlanjut seiring penurunan temperatur.



Gambar 16. (A) Kompilasi sayatan yang menunjukkan tekstur *mesh* oleh lizardit dan krisotil sebagai ciri sub-proses hidrasi; (B) Kehadiran *fibrous* krisotil sebagai *replacement* lizardit dan tekstur *interlocking* merupakan penciri dari sub-proses rekristalisasi serpentin.



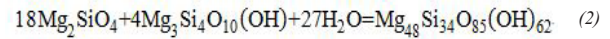
Gambar 16. (A) Kompilasi sayatan yang menunjukkan tekstur *mesh* oleh lizardit dan krisotil sebagai ciri sub-proses hidrasi; (B) Kehadiran *fibrous* krisotil sebagai *replacement* lizardit dan tekstur *interlocking* merupakan penciri dari sub-proses rekristalisasi serpentin.

### Perubahan Fase Serpentinisasi

Tahapan perubahan fase serpentinisasi diamati berdasarkan struktur dan tekstur pada sayatan dan paragenesis mineral pada rekahan tersebut yang berkaitan dengan pembentukan vein (derajat serpentinisasi). Parameter tersebut dihubungkan dengan perubahan temperatur dan tekanan selama proses serpentinisasi berdasarkan diagram fase pembentukan mineral serpentin (Gambar 17).

Perubahan fase serpentinisasi diinterpretasi berdasarkan kelimpahan tipe serpentin, tekstur/struktur yang hadir, tipe vein, dan kehadiran tekstur subproses pada serpentin (Tabel 2). Fase serpentinisasi daerah penelitian dibagi menjadi tiga fase utama. Fase pertama yang merupakan awal serpentinisasi berkaitan dengan proses awal serpentinisasi sebelum alih-tempat secara tektonik terjadi. Fase ini dicirikan dengan terbentuknya vein tipe 1 bertekstur *mesh* dan kehadiran mineral talk yang hadir pada beberapa

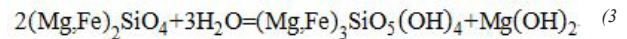
sayatan. Kehadiran mineral talk mengindikasikan fase ini terjadi pada temperatur 400-600°C (kurva 2, 3, 4, dan 5 pada diagram Andreani dkk. (2007) Gambar 17). Reaksi kimia pada fase serpentinisasi pertama (Pers. 2) berlangsung pada temperatur tinggi menghasilkan antigorit (Bucher dan Grapes, 2011).



Forsterit + Talk + Air = Antigorit

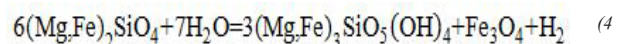
Menurut Andreani dkk. (2007), lizardit dan krisotil juga bisa terbentuk melalui reaksi pada Pers. 2. Lizardit bertekstur *mesh* terbentuk pada fase ini dengan temperatur 480-530°C, dilanjutkan oleh pembentukan krisotil pada temperatur 400-480°C.

Fase kedua serpentinisasi berkaitan dengan proses serpentinisasi dalam pengaruh deformasi selama alih-tempat peridotit. Fase kedua ini terjadi pada temperatur 300-400°C (kurva 1 dan 7 pada diagram Andreani dkk; 2007; Gambar 17). Fase ini dicirikan dengan terbentuknya vein tipe 2 (dominan lizardit/krisotil bertekstur *mesh*), kehadiran retrograde antigorit (*interlocking*) pada temperatur 340-400°C akibat hidrasi dan rekristalisasi lizardit, dan kehadiran magnetit. Reaksi kimia pada fase serpentinisasi kedua, sesuai dengan Andreani dkk. (2007), yakni



Olivin + Air = Serpentin (*mesh*) + Brusit

Berdasarkan pengamatan petrografi, brusit kemungkinan hadir pada sampel, yang akan membuat reaksi ini konsisten dengan Pers. 3. Terbentuknya kink band fibrous krisotil diyakini menandakan proses pengangkatan hampir selesai atau sudah dekat dengan permukaan (Oud, 2010). Menurut Mével (2003), magnetit sangat umum hadir pada *mesh* rim mineral serpentin selama proses serpentinisasi. Reaksi kimia pembentukan magnetit selama serpentinisasi oleh Oud (2010) dinyatakan dalam:

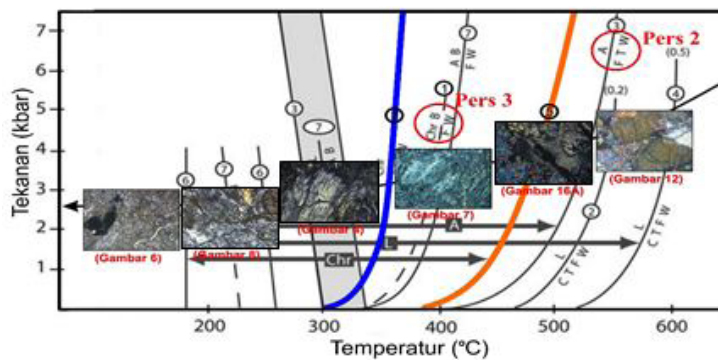


Olivin + Air = Serpentin + Magnetit + Hidrogen

Fase ketiga atau fase akhir serpentinisasi berkaitan dengan proses serpentinisasi setelah alih-tempat peridotit secara tektonik terjadi. Fase ini terjadi di bawah temperatur 300°C (Andreani dkk. (2007; Gambar 17). Fase ini dicirikan dengan dominasinya rekristalisasi serpentin fase pertama dan kedua menjadi granular lizardit bertekstur *hourglass* dan hadirnya klorit. Proses ini diikuti dengan proses laterisasi atau pelapukan yang ditunjukkan dengan meningkatnya kehadiran magnetit dan hadirnya hematit

Tabel 2. Interpretasi fase serpentinisasi *retrograde* pada batuan ultramafik berdasarkan kehadiran tekstur, struktur, tipe vein, dan penciri subproses serpentinisasi

Suhu (°C)	Mineral Serpentin	Struktur/ Tekstur	Tipe Vein	Sub-Proses	Foto & Sketsa
500	Lizardit	<i>Mesh rim</i>	Tipe 1	Hidrasi	
	Lizardit Krisotil	<i>Mesh rim Bastite</i>	Tipe 1	Hidrasi	
400	Lizardit Krisotil Antigorit	<i>Mesh rim Bastite Hourglass</i>	Tipe 1 & 2	Hidrasi Rekristalisasi serpentin	
	Lizardit Krisotil Antigorit	<i>Mesh rim Bastite Hourglass Interlocking Kinked/band</i>	Tipe 1 & 2	Hidrasi Rekristalisasi serpentin	
300	Lizardit Krisotil Antigorit	<i>Mesh rim Bastite Hourglass Interlocking Kinked/band</i>	Tipe 1, 2, & 3	Hidrasi Rekristalisasi serpentin	
	Lizardit Krisotil Antigorit	<i>Mesh rim Bastite Hourglass Interlocking Kinked/band</i>	Tipe 1, 2, & 3	Hidrasi Rekristalisasi serpentin	
200	Lizardit Krisotil Antigorit	<i>Mesh rim Bastite Hourglass Interlocking</i>	Tipe 1, 2, & 3	Hidrasi Rekristalisasi serpentin	

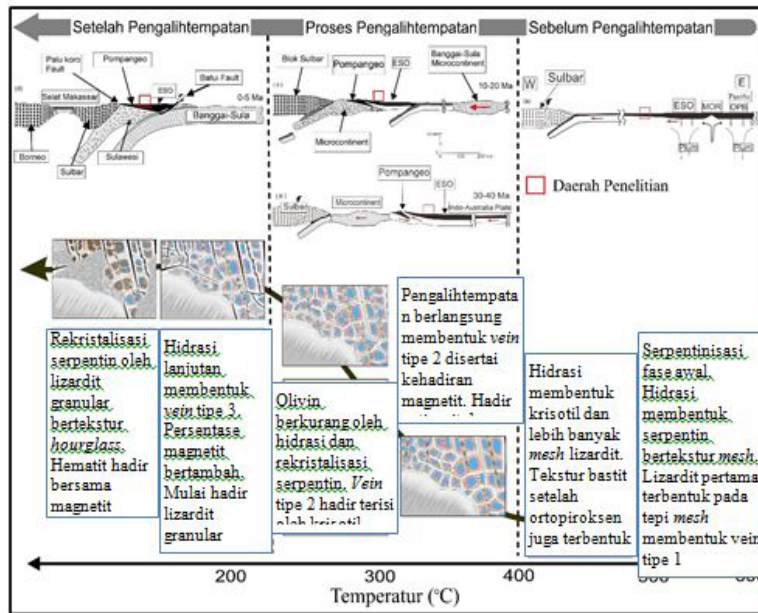


Gambar 17. Diagram fase mineral serpentin pada daerah penelitian terhadap fungsi perubahan temperatur dan tekanan. Batas serpentinisasi fase awal ditunjukkan pada garis jingga, sedangkan batas fase kedua serpentinisasi ditunjukkan pada garis biru.

Berdasarkan data yang diperoleh, sulit menghubungkan proses serpentinisasi, perubahan lingkungan tektonik dan pengalih-tempatan secara akurat, termasuk kisaran temperatur dan tekanan pada serpentin saat pengalih-tempatan terjadi. Jika dihubungkan dengan proses serpentinisasi pada daerah penelitian beserta derajat serpentinisasi oleh tipe vein (V1, V2, V3) dapat diinterpretasikan proses serpentinisasi erat kaitannya dengan proses pengalih-tempatan (Gambar 18). Kemungkinan pada fase mineralisasi serpentin yang pertama dan kedua terjadi sebelum pengalih-tempatan yang ditunjukkan dengan tekstur *mesh* yang menjadi penciri proses hidrasi selama tahap awal serpentinisasi. Ini diperkirakan terjadi pada temperatur 400 - 600°C. Proses pengalih tempatan

dimulai pada fase kedua yang ditunjukkan dengan terbentuknya vein tipe 2 oleh lizardit dan krisotil karena proses hidrasi dan rekristalisasi serpentin. Struktur *kink band* pada krisotil terbentuk pada fase kedua yang juga menjadi bukti kuat adanya proses pengangkatan dan tektonik. Proses pengangkatan ini diperkirakan berlangsung pada temperatur 300-400°C dan berakhir pada fase ketiga yang ditandai dengan dimulainya pembentukan vein tipe 3 dan granular lizardit. Pembentukan vein tipe 3 terjadi setelah pengalih tempatan, terjadinya peningkatan kehadiran klorit dan rekristalisasi serpentin menjadi granular lizardit serta diikuti dengan proses pelapukan dan laterisasi yang ditunjukkan oleh pembentukan mineral hematit di sekitar mesh serpentin. Proses ini terjadi pada temperatur <300°C.





Sumber: modifikasi dari berbagai model tektonik (Andreani dkk., 2007, Parkinson, 1998, Kadarusman dkk., 2004)

Gambar 18. Tahapan proses serpentinisasi yang dihubungkan dengan rekonstruksi pengalih-tempatan Kompleks Ofiolit regional pada daerah penelitian.

## KESIMPULAN

Perkembangan serpentinisasi lerzolit pada Kompleks Ofiolit Baula Pomalaa ditunjukkan melalui paragenesis mineral serpentin yang teramati. Paragenesis mineral serpentin terbagi menjadi tiga kategori vein; vein tipe 1, vein tipe 2, dan vein tipe 3. Tipe vein ini berkaitan dengan proses alih-tempat ofiolit selama serpentinisasi berlangsung. Vein tipe 1 merupakan vein dengan bukaan 50-100  $\mu\text{m}$ , yang memotong langsung mineral magmatik primer olivin dan piroksen, dicirikan dengan kehadiran lizardit dan krisotil bertekstur *mesh*, serta kehadiran talk. Vein tipe 1 menandakan fase awal serpentinisasi (hidrasi) pada temperatur 400-600°C sebelum proses alih-tempat ofiolit berlangsung. Vein tipe 2 merupakan vein dengan bukaan 0,01-0,1 mm, yang memotong mineral olivin, piroksen dan vein

tipe 1, dicirikan dengan kehadiran lizardit dan krisotil bertekstur *mesh* dan magnetit. Vein tipe 2 menandakan fase kedua serpentinisasi (hidrasi-rekristalisasi) pada temperatur 300-400°C selama proses alih-tempat ofiolit berlangsung. Vein tipe 3 merupakan vein dengan bukaan >0,1 mm, yang memotong vein tipe 1 dan 2, didominasi oleh granular lizardit bertekstur *hourglass*. Vein tipe 3 menandakan fase akhir serpentinisasi (rekristalisasi) pada suhu <300°C setelah proses alih-tempat ofiolit berlangsung. Proses perubahan fase serpentinisasi juga mencakup subproses hidrasi dan rekristalisasi yang menunjukkan tipe serpentinisasi *retrograde* yang berlangsung seiring penurunan temperatur. Selain paragenesis serpentinisasi, korelasi terhadap mekanisme pengalih-tempatan juga dapat ditentukan dengan studi mikrostruktur pada ultramafik yang terdeformasi.

## ACUAN

- Andreani, M., Mével, C., Boullier, A.M. and Escartín, J., 2007. Dynamic Control on Serpentine Crystallization in Veins: Constraints on Hydration Processes in Oceanic Peridotites. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(2), Q02012. <https://doi.org/10.1029/2006GC001373>
- Bonowitz, R.L., 2012. *Rocks and Minerals* (1 ed.). DK Publishing Smithsonian Institute, New York.
- Bucher, K. and Grapes, R., 2011. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks* (8 ed.). Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74169-5>
- Deschamps, F., Godard, M., Guillot, S. and Hattori, K., 2013. Geochemistry of Subduction Zone Serpentinites: A Review. *Lithos*, 178, 96-127. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.05.019>
- Evans, K.A. and Frost, B.R., 2021. Deserpentinization in Subduction Zones as a Source of Oxidation in Arcs: A Reality Check. *J. of Petrology*, 62(3), 1-32. <https://doi.org/10.1093/petrology/egab016>

- Freyssinet, P.H., Butt, C.R. M., Morris, R.C. and Piantone, P., 2005. Ore-Forming Processes Related to Lateritic Weathering. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P. (eds.). *Society of Economic Geologists*. pp. 681-722. <https://doi.org/10.5382/AV100.21>
- Frost, B.R., Evans, K.A., Swapp, S.M., Beard, J.S. and Mothersole, F.E., 2013. The Process of Serpentinization in Dunitite from New Caledonia. *Lithos*, 178, 24-39. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.02.002>
- Guillot, S., Schwartz, S., Reynard, B., Agard, P. and Prigent, C., 2015. Tectonic Significance of Serpentinities. *Tectonophysics*, 646, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.01.020>
- Hamilton, W.B., 1979. *Tectonics of the Indonesian Region*. Professional Paper 1078, U.S. Govt. Print. Off. <https://doi.org/10.3133/pp1078>
- Hermanto, B., 2014. Perkembangan Kerangka Tektonik Laut Maluku, Kepulauan Banggai – Sula dan Lajur Ofiolit Sulawesi Timur. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 15(2), 69-74. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v15i2.62>
- Hirth, G. and Guillot, S., 2013. Rheology and Tectonic Significance of Serpentinite. *Elements*, 9(2), 107-113. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.107>
- Jaya, R.I.M.C., 2017. Studi Petrogenesis dan Mineralisasi Kompleks Ofiolit Baula, Kolaka, Sulawesi Tenggara. Tesis, Institut Teknologi Bandung.
- Kadarusman, A., Miyashita, S., Maruyama, S., Parkinson, C.D. and 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>
- Malvoisin, B., Brunet, F., Carlut, J., Rouméjon, S., and Cannat, M., 2012. Serpentinization of Oceanic Peridotites: 2. Kinetics and processes of San Carlos Olivine Hydrothermal Alteration. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117, B04102. <https://doi.org/10.1029/2011JB008842>
- Mével, C., 2003. Serpentinization of Abyssal Peridotites at Mid-ocean Ridges. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(10-11), 825-852. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.08.006>
- Moody, J.B., 1976. Serpentinization: A Review. *Lithos*, 9(2), 125-138. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(76\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0024-4937(76)90030-X)
- O'Hanley, D.S., 1991. Fault-Related Phenomena Associated with Hydration and Serpentine Recrystallization During Serpentinization. *The Canadian Mineralogist*, 29(1), 21-35.
- O'Hanley, D.S., 1992. Solution to the Volume Problem in Serpentinization. *Geology*, 20(8), 705-708. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0705:STTVPI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0705:STTVPI>2.3.CO;2)
- Oud, K., 2010. Serpentinization and Fracture Formation in Peridotites on Otrøy, Western Gneiss Region, Norway: Late Stage PT-Conditions and Implications for Tectonic Decompression. Disertasi, Utrecht University.
- Palandri, J.L. and Reed, M.H., 2004. Geochemical Models of Metasomatism in Ultramafic Systems: Serpentinization, Rodingitization, and Sea Floor Carbonate Chimney Precipitation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(5), 1115-1133. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.08.006>
- Parkinson, C., 1998. Emplacement of the East Sulawesi Ophiolite: Evidence from Subophiolite Metamorphic Rocks. *J. of Asian Earth Sciences*, 16(1), 13-28. [https://doi.org/10.1016/s0743-9547\(97\)00039-1](https://doi.org/10.1016/s0743-9547(97)00039-1)
- Rusmana, E., Sukido, Sukarna, D., Haryono, E. dan Simandjuntak, T.O., 1993. *Peta Geologi Lembar Lasusua-Kendari*, Sulawesi, Skala 1 : 250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung
- Simandjuntak, T.O., Surono dan Sukido, 1993. *Peta Geologi Lembar Kolaka, Sulawesi*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Streckeisen, A., 1976. To Each Plutonic Rock Its Proper Name. *Earth-Science Reviews*, 12(1), 1-33. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(76\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0)
- Sufriadin, 2013. Mineralogy, Geochemistry, and Leaching Behavior of the Soroako Nickeliferous Laterite Deposit, South Sulawesi, Indonesia, Disertasi, Universitas Gadjah Mada.
- Surono, 2013. *Geologi Lengan Tenggara Sulawesi* (2 ed.). Badan Geologi, Bandung.
- Surono dan Hartono, U., 2013. *Geologi Sulawesi* (1 ed.). LIPI Press. Jakarta.
- Vernon, R.H., 2018. *A Practical Guide to Rock Microstructure* (2 ed.). Cambridge University Press., New York. <https://doi.org/10.1017/9781108654609>
- Wicks, F.J. and O'Hanley, D.S., 1988. Serpentine Minerals: Structures and Petrology. In: Bailey, S.W. (ed.) *Hydrous Phyllosilicates*. Canada: De Gruyter. 91-168. <https://doi.org/10.1515/9781501508998-010>
- Winter, J.D., 2014. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology* (2 ed.). Pearson Education Limited, Edinburgh.