

EKLOGIT TERUBAH DAN BATUAN ASOSIASINYA SEBAGAI INDIKATOR SUBDUKSI PURBA SELAMA EOSEN ATAS HINGGA OLIGOSEN BAWAH DI SABUK METAMORFIK SULAWESI TENGAH BAGIAN TIMUR - INDONESIA

Ildrem Syafri

Laboratorium Petrologi dan Mineralogi, Fakultas Teknik Geologi – Universitas Padjadjaran

ABSTRACT

Eclogite is a metamorphic of rock derived from the continental crust or oceanic crust that can provide important information about the early stages of the orogenic process. In the Sulawesi island, eclogite or eclogite facies known expose in several places (Tectonic Complex of Bantimala, Palu valley and Bongka River Valley). In addition to these locations, eclogite have been also decoupled in the melange complex of Wasuponda. Wasuponda Eclogites shows a different textural and mineralogical composition than Bantimala eclogite or eclogite facies of Palu valley on the response of different processes occurred. These rocks formed in a different geological times which provides information about two ancient subduction zones in the western and eastern parts of Central Sulawesi metamorphic belt.

This study aims to obtain meaningful information about the chronology of the Sulawesi island in the Cretaceous and post Cretaceous periods. Some selected examples of eclogite and its associated rocks have been observed in petrographic and rock forming minerals of these rocks have been analyzed chemically using Microprobe Camebax and SX 50. The results of chemical analysis allows us to classify minerals appropriately used in the pressure and temperature condition of the rock formation. The maximum pressure and temperature conditions obtained from the application of geothermobarometer is 21.6 kbar for a temperature in 580 °C, while the application Thermocalc program provides pressure with an average of 20.7 ± 2.6 kbar at temperature in 500 ± 29 ° C. The pressure and temperature are very similar to the P-T conditions of eclogite formation of complex tectonic of Bantimala. Taking into account the uncertainty of the values for pressure, then the pressure obtained indicate that the eclogite formation was in depth of 61 to 80 km.

Altered eclogite from Wasuponda undergone retrograde towards the amphibolite - and green schist facies, while in stability field of amphibolite facies, these rocks are associated with garnet quartz, rutile, phengite, epidote schist and garnet, hornblende, quartz, rutile, muscovite, epidote schist and they have emerged to the surface and presented as a component melange of Wasuponda. Pressure and temperature conditions obtained from the study indicates that the direction of the P-T path of Wasuponda eclogite is clockwise. This condition is contrary to the results obtained by Parkinson (1991) of the blue schist and rock associations derived from Melange Peluru.

Eclogite from Wasuponda Melange Complex likely originated from the ancient oceanic crust and are classically referred to layer 3 which is expected a gabbroic by composition. Magmatic paragenesis on this rock observed under the microscope are: clinopyroxene, plagioclase and opaque minerals, while eclogitic paragenesis are garnet, omphacite, phengite and rutile. Mineral paragenesis indicating retrograde stage are calco-sodic amphibole, sphene and plagioclase, and they are present in the matrix.

When a rock undergoes a retrograde stage (toward the surface), the eclogite experienced an oceanic metamorphism indicated by the presence of edenite, edenitic hornblende, also hematite, quartz and chlorite showing the amphibolitization process, while minerals like zoisite, albite, white mica, calcite and zeolite states saussuritisation process that occurred at high temperature and low pressure.

Keywords: *Eclogite altered, Ancient subduction, Central Sulawesi Metamorphic Belt*

ABSTRAK

Eklogit merupakan batuan hasil metamorfisme material kerak benua atau kerak samudra yang dapat memberikan informasi penting tentang tahap awal dari proses orogenik. Di pulau Sulawesi eklogit atau fasies eklogit dikenal tersingkap di beberapa tempat (Komplek Tektonik Bantimala, Lembah Palu dan Lembah Sungai Bongka). Selain di lokasi-lokasi tersebut, eklogit dapat pula dijumpai di Komplek melange Wasuponda. Eklogit Wasuponda menampilkan tekstural dan komposisi mineralogi yang berbeda daripada eklogit Bantimala atau fasies eklogit dari lembah Palu atas respon proses berbeda yang dialaminya. Batuan tersebut terbentuk pada waktu geologi yang berbeda dan memberikan informasi tentang dua zona subduksi purba di Sabuk Metamorfik Sulawesi Tengah bagian barat dan bagian timur. Penelitian ini bertujuan mendapatkan informasi yang sangat berarti tentang sejarah pulau Sulawesi pada periode zaman Kapur dan pascanya. Untuk itu contoh-contoh terpilih eklogit dan batuan asosiasinya telah diamati secara petrografi dan mineral-mineral penyusun batuan tersebut telah dianalisis kimia dengan Microprobe Camebax dan SX 50. Hasil analisis kimia memungkinkan mengklasifikasikan mineral secara tepat dan digunakan dalam perhitungan kondisi Tekanan dan Temperatur pembentukan batuan. Kondisi Tekanan dan Temperatur maksimal yang didapat dari penerapan geothermobarometer adalah

21,6 Kbar untuk temperatur 580 °C, sedangkan aplikasi program Thermocalc memberikan Tekanan rata-rata sebesar $20,7 \pm 2,6$ Kbar dengan Temperatur 500 ± 29 °C. Tekanan dan Temperatur tersebut adalah sangat mirip dengan kondisi Tekanan dan Temperatur pembentukan Eklogit dari Komplek Tektonik Bantimala. Dengan memperhitungkan nilai ketidakpastian untuk tekanan, maka harga tekanan tersebut menunjukkan kedalaman dari 61 hingga 80 km.

Eklogit berubah dari Wasuponda mengalami retromorfosa menuju fasies ampibolit dan fasies sekis hijau. Saat berada di medan stabilitas fasies ampibolit, batuan ini berasosiasi dengan sekis garnet, kuarsa, rutil, phengit, epidot dan sekis garnet, hornblenda, kuarsa, rutil, muskovit, epidot yang secara bersama-sama naik ke permukaan dan hadir sebagai komponen melange Wasuponda. Kondisi Tekanan dan Temperatur yang didapat dari studi ini menunjukkan bahwa arah dari P-T path yang dialami oleh eklogit dari Wasuponda adalah searah dengan jarum jam. Kondisi ini berlawanan dengan hasil yang didapat oleh Parkinson (1991) dari sekis biru dan batuan asosiasinya yang berasal dari Melange Peluru.

Eklogit dari Komplek Melange Wasuponda berkemungkinan berasal dari kerak samudra purba yang dalam dan secara klasik disebut sebagai lapisan ke 3 yang diperkirakan disusun oleh batuan gabroik. Paragenesis magmatik pada batuan ini yang dapat diamati di bawah mikroskop adalah: klinopiroksin, plagioklas dan mineral opak, sedangkan paragenesis eklogitik adalah garnet, omphasit, phengit dan rutil. Mineral paragenesis yang mengindikasikan adanya retromorfosa adalah kalko-sodik ampibol, sfen dan plagioklas yang hadir dalam matriks.

Sewaktu mengalami proses retrograd (menuju ke permukaan) eklogit mengalami metamorfosa oseanik/ ubahan yang diindikasikan oleh kehadiran, edenit, edenit hornblenda, juga hematit, kuarsa dan klorit menunjukkan proses ampibolisasi, sedangkan mineral-mineral seperti zoisit, albit, mika putih, kalsit dan zeolit menyatakan proses sauritisasi yang terjadi pada temperatur dan tekanan rendah.

Kata kunci: Eklogit Terubah, Subduksi Purba, Sabuk Metamorfik Sulawesi Tengah

PENDAHULUAN

Eklogit atau batuan yang termasuk dalam fasies eklogit tersingkap di beberapa tempat di Indonesia, yaitu di Komplek Tektonik Bantimala (Syafri, 1995; Miyazaki et al., 1996; Parkinson, 1998), di Komplek Tektonik Karang Sambung (Miyazaki et al., 1997), dan di Lembah Palu (Syafri, 2000; Kadarusman et al., 2000). Batuan tersebut pada umumnya dianggap sebagai material kerak benua atau kerak samudera yang terhunjam hingga kedalaman mantel bumi dan kemudian muncul ke permukaan bersatu dengan berbagai batuan lainnya membentuk melange di prisma akresi. Batuan tersebut memberikan informasi penting tentang tahap awal dari proses orogenik. Di pulau Sulawesi, eklogit atau batuan metamorfik tekanan tinggi lainnya yang terkait dengan subduksi pada Zaman Kapur telah dikenal dengan baik dan terdapat di bagian selatan pulau ini, yaitu Komplek Tektonik Bantimala (Syafri, 1995; Miyazaki et al., 1996; Parkinson, 1998). Kemungkinan, dalam arti yang sama, sesuai dengan sejarah pembentukan punggungan di daerah ini selama zaman Kapur, di bagian tengah Sulawesi, tepatnya di lembah Palu, yang masih

termasuk dalam fasies eklogit, tersingkap peridotit bergarnet dan piroksenit bergarnet berasosiasi dengan ge-nes kuarsa – feldspar juga telah dipelajari dengan baik (Helmert et al., 1990; Syafri, 1990, 2000; Kadarusman, 2000). Singkapan lain Mg-Cr peridotit bergarnet yang terdapat di bawah Ofiolit Sulawesi Timur dalam patahan mendatar Ampana di lembah Sungai Bongka dan daerah Boba telah pula diberitakan oleh Kadarusman (2000). Sayangnya, hasil semua studi petrologi ini belum bisa menjelaskan dengan jelas tentang apa yang terjadi pada tatanan tektonik di daerah ini setelah periode zaman Kapur. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang lebih lengkap tentang subduksi atau tumbukan mikrokontinen purba yang pernah terjadi di daerah ini. Dalam studi ini dengan memanfaatkan kriteria petrologi, dibahas tentang paragenesis mineral, kondisi P-T, evolusi tektonik pulau Sulawesi terutama setelah zaman Kapur.

TINJAUAN PUSTAKA

Sejak Mesozoikum hingga sekarang, Pulau Sulawesi dan sekitarnya telah dipengaruhi oleh konvergensi tiga lempeng besar; Lempeng Filipina,

Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Eurasia (Hamilton, 1979; Rangin et al., 1990; Daly et al., 1991; Cornee et al., 1995; Gunawan, 1999). Intearksi ketiga lempeng-lempeng tersebut menghasilkan konfigurasi tektonik yang sangat rumit di daerah ini. Atas fenomena tersebut, dari barat hingga ke timur dapat dipisahkan 4 satuan tektonik yang masing-masingnya adalah: 1). Busur Plutono-Vulkanik Sulawesi Barat; 2). Sabuk Metamorfik Sulawesi Tengah; 3) Ofiolit Sulawesi Timur; 4). Platform Banggai Sula (Audley-Charles; 1975; Katili, 1978; Sukamto, 1975; Sukamto dan Simandjuntak, 1983; Parkinson, 1991; Cottam et al., 2011; Gambar 1).

Daerah penelitian terletak di bagian selatan dari Komplek Melange Peleru atau di sebelah Barat-Daya Soroako, termasuk bagian dari Sabuk Metamorfik Sulawesi Tengah. Pada dasarnya, daerah ini ditempati oleh melange tektonik, dengan ketebalan beberapa ratus meter yang disusun oleh berbagai blok eksotik, seperti sekuen ofiolit (peridotit, gabro, dolerit dan lava), fragmen-fragmen dari sol metamorfik, dan infraofiolit (gastro, amfibolit berfoliasi, eklogit, sekis mika, dan genes) dengan varietas batuan sedimen pada bagian bawahnya (batugamping, flysch dan radiolarit). Semua blok-blok tersebut berukuran beragam dari sentimeter hingga ratusan meter tertanam dalam matriks serpentinit sekistosik (Girardeau, 1991; Gambar 2). Di daerah ini terekam sejumlah besar zona-zona gerusan (shear zones) berarah dari N130° E/45° (arah striasi adalah N70° E) hingga N120° E/35° (arah striasi N110° E) menunjukkan pergerakan arah ke barat. Zona-zona gerus tersebut dipotong oleh sesar-sesar normal minor dengan suatu arah sekitar N 140° E/45°. Singkapan-singkapan sekis mika pada bagian bawah peridotit dapat diamati sebagai potongan yang sub-horizontal di wilayah tenggara Soroako, Sungai Towuti dan Kampung Wawondola. Di Sungai

Wasuponda batuan pada umumnya terlihat berubah dan mengandung garnet, berupa eklogit yang ditemukan di Utara Kampung Wawondola. Fragmen-fragmen sedimen dalam melange kelihatannya autokton dan diwakili oleh marmer, batupasir dan radiolarit merah. Peridotit dan melange tektonik secara struktural ditindih oleh batugamping rekristalisasi/marmer. Kontak batuan berupa kontak tektonik yang dicirikan oleh keterdapatan batugamping sekistosik dan deformasi ductile; selain itu batugamping yang terbreksikan juga ditemukan. Kontak tektonik diperlihatkan oleh sesar-sesar mendatar (*strike-slip faults*) seperti halnya terlihat antara Malili dan Soroako. Patahan ini terekam pada batugamping sekistosik, berarah N40°E/35° dengan arah striasi N130° E dengan arah pergerakan ke arah Barat-Laut. Radiolarit merah tidak memperlihatkan efek metamorfisme, berkemungkinan batuan tersebut hanya mengalami metamorfisme dengan derajat rendah dan batuan ini setempat-setempat di antara melange tektonik dan batugamping. Batuan yang bersekistos dan setempat-setempat terlipat kuat, dipotong oleh zona-zona gerus yang sempit, memperlihatkan kisaran arah N 40° W/40° dengan arah striasi N 70° E., dari ia tergerus ke arah Barat-Daya.

METODOLOGI

Pengamatan terhadap singkapan-singkapan melange tektonik di daerah Wasuponda, telah dilakukan di sepanjang jalan utama Soroako – Tomini dan di Sungai Wasuponda. Dari wilayah ini eklogit berubah dan batuan asosiasinya telah diambil. Terhadap beberapa sampel terpilih, telah dilakukan analisis petrografi dan beberapa diantaranya dipisahkan pula untuk dianalisis kimia mineral dengan memakai Microprobe Camebac dan SX 50 milik Laboratorium Petrologi, Universitas Pierre et Marie-Curie (Paris 6), di Perancis. Perhitungan kondisi Tekanan dan Temperatur di-

lakukan dengan memakai Geotermobarometer yang banyak tersedia, serta Program Komputer Thermocalc (Powell & Holland, 1988).

Kondisi untuk analisis untuk berbagai mineral adalah sebagai berikut: Tegangan arus yang dipakai adalah 15 Kv, dengan intensitas sebesar 10 nA sampai 40 nA sesuai dengan ketahanan mineral, sebagai contoh; untuk feldspar, mika dan ampibol intensitas arus adalah 10 nA, sedangkan untuk garnet, ampibol, piroksin, ilmenit, magnetit dan olivin intensitas arus yang dipakai adalah 40 nA.

Adapun lamanya analisis yang berlangsung untuk setiap siklus, waktu yang dibutuhkan bervariasi sesuai dengan mineral-mineral dan unsur-unsurnya:

- Feldspar, biotit dan ampibol mengalami analisis untuk unsur-unsur penyusunnya sebagai berikut: Si, Cr, F = 20 detik, Na = 15 detik, Fe, Mg, Mn, K, Ca, Ti, Cl = 10 detik
- Garnet, perhitungan waktu analisis adalah sebagai berikut: Si, Cr, Mg, Mn = 20 detik Fe, Al, K, Na, Ca, Ti = 10 detik
- Piroksin, ilmenit, magnetit dan olivin memerlukan waktu analisis sebagai berikut: Si, Cr, Ti, Al, Na, Mg, Ni = 20 detik, Fe, Mn, K, Na, Ca = 10 detik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Petrologi dan Kimia Mineral

Eklogit

Secara tekstural eklogit dari Wasuponda sangat berbeda dengan batuan yang sama asal Komplek Tektonik Bantimala, Sulawesi Selatan. Eklogit Wasuponda merekam beberapa fasa deformasi yang diperlihatkan oleh beberapa kehadiran pergeseran rekahan-rekahan yang memotong batuan. Asosiasi mineral yang teramati pada batuan ini, meliputi garnet, klinopiroksin, ampibol, epidot, plagioklas, kuarsa, rutil, sfen, klorit dan mineral opak.

Garnet berwarna coklat kemerahan, berbentuk iregular, elongasi, diameter 0.32 – 3.2 mm, tubuh kristal umumnya terekahkan dan terpatahkan, rekahan diisi oleh plagioklas, zoisit, kuarsa, rutil dan mika putih. Klinopiroksin, ampibol dan hematit hadir sebagai inklusi dalam garnet. Secara kimia garnet kaya akan Ca dan Fe dicerminkan oleh kandungan almandin yang relatif tinggi (65.26 %) dan Grosular (20.13 %). Kandungan pirop dalam garnet sekitar 9.90 %, sedangkan kandungan spessartin, uvarovit dan andradit relatif rendah, masing-masing secara berurutan adalah 2.64 %, 0.002 % dan 2.12 %. Komposisi utama garnet eklogit Wasuponda yang dibandingkan dengan garnet dari eklogit Bantimala diperlihatkan pada Gambar 3.

Klinopiroksin, yang hadir berjenis augit dan omfasit. Omfasit, seperti halnya garnet merupakan indeks mineral dalam eklogit. Mineral ini berwarna hijau muda, umumnya subhedral (diameter 0.08 – 0.56 mm), hadir dalam matriks batuan dan terkadang terdapat sebagai inklusi dalam garnet. Dalam matriks, omfasit dilingkupi oleh ampibol yang berbutir sangat halus, terkadang berasosiasi dengan kuarsa; seperti halnya garnet, klinopiroksin pada umumnya juga terpotong oleh rekahan. Komposisi kimia omfasit bervariasi sebagai berikut: 39.82–46.85 % jadeit; 12.59 – 13.72 % aegirin dan 40.55–46.43 % augit, sedangkan augit memperlihatkan kenampakan warna yang lebih pucat dibandingkan dengan omfasit. Mineral ini berkomposisi 1.13–2.49 % jadeit; 1.52–2.63 % aegirin; 95.99 – 96.24 % augit. Gambar 4 memperlihatkan komposisi klinopiroksin dari Eklogit Wasuponda yang dibandingkan dengan klinopiroksin dari eklogit Bantimala.

Ampibol terdapat dalam matriks, butiran berdiameter 0.16 – 0.64 mm. Sela-in itu ampibol juga hadir sebagai inklusi dalam garnet dengan variasi komposisi dari baroisit, hornblenda aktinolitik hingga hornblenda. Nilai

Na/(Na+Ca) untuk ampibol berkisar dari 0.142 – 0.481, sedangkan kandungan Si berkisar dari 6.64 – 7.26 dan X_{Mg} memperlihatkan nilai antara 0.39 – 0.45. Ampibol hadir berlimpah dalam matriks, memperlihatkan warna biru kehijauan, berbentuk agregat berserabut dan kristal-kristal prisma-tik. Pada umumnya ampibol terdapat pada bagian tepi klinopiroksin yang mengindikasikan adanya peng-gantian ompasit oleh ampibol. Zoning komposisi dalam ampibol terlihat dengan adanya perubahan warna dari biru muda di bagian tengah hingga hijau ke bagian tepi. Di bagian tengah kristal ampibol komposisi kimianya bervariasi dari glaukofan, winchit hingga taramit dengan rasio Na/(Na+Ca) bervariasi dari 0.36 – 0.69 dan Kadar Si berkisar dari 6.27-7.6, sedangkan komposisi dari bagian tepinya berkomposisi dari baroisit hingga taramit dengan rasio Na/(Na+Ca) dari 0.35 – 0.63 dan Kadar Si dari 6.41-6.98 (Gambar 5)

Di samping keterdapatannya ampibol dan plagioklas di dalam matriks atau kehadiran ampibol hijau yang menggantikan ampibol biru, maka kemunculan ke permukaan (Trayek Retro-grad) eklogit Wasuponda juga dicirikan oleh kemunculan sfen yang menggantikan rutil.

Kumpulan mineral sekunder yang muncul sebagai hasil ubahan hidro-termal yang terjadi dalam kerak samudra adalah zoisit, albit, mika putih, zeolit dan kalsit.

Secara kimia epidot (zoisit) dicirikan oleh rasio Fe^{3+}/Al yang sangat rendah, yaitu antara 0.108-0.141 sedangkan kadar Mg bervariasi dari 0.347 – 0.403. Komposisi lain dari epidot memperlihatkan rasio Fe^{3+}/Al sekitar 0.37 dengan kadar Mg dan Mn masing-masing berurutan adalah 0.36 dan 0.08. Komposisi ini sangat berbeda dengan epidot yang terkandung dalam Eklogit Bantimala. Plagioklas terdapat dalam matriks batuan dan juga hadir sebagai inklusi dalam garnet dengan variasi komposisi dari $Or_{0.05-0.51}$ – $Ab_{94.72-98.64}$ –

$An_{0.24-4.77}$ hingga $Or_{0.15-0.51}$ – $Ab_{97.18-99.71}$ – $An_{0.24-0.48}$. Dalam matriks, plagioklas diwakili oleh albit yang sering dilapisi oleh sfen sebagai produk retromorfisme. Klorit, pada umumnya terdapat sebagai produk kloritisasi dari ampibol; X_{Mg} klorit adalah sekitar 0.467.

Berdasarkan analisis petrografi dan kimia mineral, maka paragenesis dari Eklogit Wasuponda dapat dipisahkan atas 3 tahap:

1. Paragenes magmatik yang meng-indikasikan batuan asal dari Eklogit, yaitu plagioklas, klinopiroksin dan mineral opak
2. Paragenes metamorfisme tekanan tinggi: garnet, ompasit, phengit dan rutil
3. Paragenes metamorfisme retrograd dan metamorfisme oseanik:
 - a. Aktinolit → edenit, epidot, sfen, klorit, albit dan kuarsa
 - b. Edenit → hornblenda-edenit, hematit, kuarsa dan klorit
 - c. Zoisit, albit, mika putih, kalsit dan zeolit (sausuritisasi)

Batuan Asosiasi

Sekis garnet, kuarsa, rutil, phengit

Batuan berbutir halus dengan sekistositas yang tersusun baik, dibentuk oleh phengit dan kuarsa. Garnet hadir dalam bentuk kristal-kristal yang membundar dengan ukuran yang bervariasi antara 0.08 hingga 0.64 mm. Mineral ini retak-retak dan terubah menjadi klorit dan limonit. Secara kimia garnet merupakan larutan padat (solid solution) dari almandin – pirop – spesartin – grosular. Kadar uvarovit dan andradit dalam garnet hadir sangat rendah, <1 %. Kadar almandin adalah sangat dominan dalam batuan dengan kadar rata-rata adalah 71,66 %. Komposisi rata-rata garnet dalam batuan adalah $Alm_{71.66}$ $Prp_{5.19}$ $Grs_{20.32}$ $Sps_{2.42}$ $Adr_{0.35}$ $Ovr_{0.051}$ dengan variasi komposisi dari inti kristal ke bagian tepi sedikit bervariasi. Kadar pirop di bagian tepi garnet terlihat lebih kaya daripada

bagian intinya. X_{Fe} ber-kisar antara 0.92 hingga 0.96.

Mika putih membentuk sekistositas, hadir sebagai kristal-kristal yang memanjang dan seperti daun. Kebanyakan mineral ini berubah menjadi klorit. Komposisinya bervariasi dari Phengit hingga Muskovit. Kadar Si bervariasi dari 6.27 hingga 6.89, sedangkan kadar Al_{total} bervariasi dari 4.30 hingga 5.55.

Plagioklas hadir sebagai kristal-kristal hipidiomorf dengan kisaran ukuran antara 0.48 mm hingga 1.6 mm. Mineral ini banyak mengandung inklusi berupa garnet, rutil, kuarsa dan juga epidot. Jenis plagioklas dalam batuan adalah albit ($Ab_{96.16}An_{3.44}Or_{0.41}$).

Kuarsa adalah sebuah fasa yang dominan dalam batuan. Ia hadir berupa kristal-kristal yang memanjang membentuk sekistositas, diameter kristal mencapai 1.60 mm.

Rutil hadir sebagai batangan yang terorientasi mengikuti sekistositas dalam matriks dan juga hadir sebagai inklusi dalam garnet dan dalam plagioklas. Diameter kristal bervariasi dari 0.08 dan 0.52 mm. Epidot, hadir dalam jumlah sedikit dengan kristal-kristal yang berbutir sangat halus dan berbentuk iregular.

Urutan paragenes Sekis garnet, kuarsa, rutil, phengit adalah sebagai berikut:

- 1). Paragenes primer
Garnet, rutil, kuarsa, phengit, epidot
- 2). Paragenes sekunder
Albit, muskovit, klorit, ilmenit

Sekis garnet, hornblenda, kuarsa, rutil, muskovit, epidot

Batuan memperlihatkan sekistositas yang dibentuk oleh kuarsa, ampibol dan mika putih yang hadir membujur mengikuti sumbu panjang kristalnya.

Garnet hadir berupa kristal-kristal yang membundar dan iregular dengan ukuran yang bervariasi dari 0.08 hingga 2.3 mm. Mineral ini mengalami perekahan dan mengandung inklusi kuarsa dan rutil. Dalam diagram

(Alm+Sps)-Calc.Grt-Prp terlihat bahwa kadar Almandin dalam garnet sangat dominan. Komposisi rata-rata garnet dalam sekis garnet, hornblenda, kuarsa, rutil, muskovit, epidot adalah $Alm_{64.55}Prp_{11.28}Grs_{14.82}Sps_{6.09}Adr_{1.88}Ovr_{0.06}$

Ampibol hadir berupa kristal-kristal yang membujur sesuai sumbu panjangnya membentuk foliasi dengan maksimum diameter adalah 3.6 mm. Mineral ini berwarna hijau tua mengindikasikan jenis hornblenda. Nilai X_{Mg} ampibol ini bervariasi dari 0.535 hingga 0.611. Beberapa Ampibol mempunyai nilai X_{Mg} antara 6.31 & 6.71 dengan $Na/(Na+Ca)$ berada antara 0.08 sampai 0.13.

Mika putih juga hadir dalam bentuk seperti daun dan kristal-kristal yang memanjang membentuk sekistositas, jenis mika putih adalah muskovit. Kadar Si bervariasi antara 6.25 dan 6.28, sedangkan kadar Al total bervariasi antara 5.28 dan 5.42. Plagioklas yang hadir berjenis Albit ($Or_{0.22}Ab_{99.40}An_{0.37}$).

Kuarsa hadir dalam batuan berupa kristal-kristal yang memanjang sehingga membentuk sekistositas. Diameter kristal mencapai 1.2 mm, sedangkan epidot hadir dalam jumlah sedikit dengan butiran sangat halus (diameter 0.16 mm). Rutil hadir sebagai inklusi dalam garnet dan dalam ampibol. Diameter maksimum mencapai 0.24 mm.

Urutan paragenes pada Sekis garnet, hornblenda, kuarsa, rutil, muskovit, epidot adalah sbb.:

- a) Paragenes primer : Garnet, rutil, kuarsa, hornblenda dan epidot
- b) Paragenes sekunder : Klorit dan sfen

Gambaran tekstural atau variasi mineral penyusun eklogit berubah diperlihatkan oleh Gambar 6.

Kondisi Tekanan dan Temperatur Eklogit

Eklogit Wasuponda mengandung beberapa mineral yang dapat dipakai untuk menentukan kondisi Tekanan dan Temperatur dalam beberapa tahap dari rekristalisasi metamorfik. Estimasi kon-disi tekanan dan temperatur ini didapat dengan menggabungkan hasil dari berbagai geobarometer dan geotermometer yang dipakai. Selain itu hasil perhitungan kondisi Tekanan dan Temperatur yang didapat dari geobarotermometer digabungkan dengan hasil dari Program Thermocalc (Holland & Powell, 1990).

Perhitungan kondisi Tekanan dan Temperatur untuk eklogit terubah diwakili oleh Sampel SU.199, untuk Sekis garnet, kuarsa, rutil, phengit, epidot dan Sekis garnet, hornblenda, kuarsa, muskovit, epidot, masing-masing secara ber-urutan diwakili oleh sampel SU.358 dan SU.201.

Estimasi Temperatur dengan Termometer (Garnet-Klinopiroksin) dan (Horn-blenda-Plagioklas) pada eklogit terubah. Pada eklogit terubah temperatur metamorfik didapat dari Geotermometer Garnet-Klinopiroksin (Ellis & Green, 1979) adalah antara 511° dan 578° C untuk tekanan 14 kbar, atau antara 527° dan 594° C untuk tekanan sebesar 20 kbar. Temperatur trajek retrograde yang diukur melalui geotermometer Hornblenda-Plagioklas adalah 443° hingga 460° C untuk tekanan 6 kbar atau antara 474° hingga 489° C untuk tekanan 8 kbar.

Estimasi Tekanan dengan Kadar Al^{IV} dan $Na(M_4)$ dalam ampibol (Brown, 1977) pada eklogit terubah. Tekanan yang didapat merupakan representasi dari tekanan yang terjadi pada tahapan retrograd eklogit terubah dari Wasuponda. Munculnya ampibol biru terang dalam matriks terjadi pada tekanan 7 kbar hingga 6 kbar. Kemunculan ampibol biru kehijauan atau ampibol hijau terjadi pada Tekanan 4 kbar dan 3 kbar. Pengamatan petrografi memperlihatkan

kan bahwa Eklogit mengalami alterasi hidro-termal di lingkungan Samudra. Aktivitas ini berlangsung setelah proses meta-morfisme terjadi. Sesuai dengan Humphris dan Thompson (1978), bahwa metamorfisme hidro-termal di kerak samudra berada antara 100° – 500° C, dengan suatu tekanan yang sangat rendah. Dalam hal ini pada proses tersebut relatif jarang ditemukan batuan yang berderajat lebih tinggi dari fasies sekis hijau. Lava bantal pada umumnya terubah pada temperatur rendah atau termetamorfisme dalam fasies prehnite-pumpellyite, paling tinggi terubah dalam fasies sekis hijau (Mevel, 1984). Pada dolerit, metamorfisme pada umumnya berlangsung dari sekis hijau hingga ampibolit, berkemungkinan dalam fasies ampibol bagian bawah, sedangkan dalam gabro, metamorfisme selalu berawal dalam temperatur tinggi (batas ampibolit – fasies granulit) dan proses retrograd berlangsung secara konstan.

Sesuai dengan Mevel (1984), Kehadiran ampibol dalam sampel SU.199 menunjukkan bahwa batuan ini mengalami metamorfisme oseanik, paling tidak dalam fasies transisi sekis hijau – ampibolit, sedangkan kehadiran mineral-mineral ubahan berupa klorit, albit, epidot (zoisit), kalsit, mika putih dan juga zeolit menunjukkan bahwa Eklogit Wasuponda pernah mengalami meta-morfisme oseanik pada fasies derajat rendah hingga fasies metamorfisme terendah, yaitu fasies zeolit. Gambar 7 memperlihatkan bahwa metamorfisme berawal pada temperatur $<500^{\circ}$ C dan $>400^{\circ}$ C dinyatakan dengan kemunculan sfen, kuarsa, dan klorit (reaksi E). Kehadiran zeolit menunjukkan bahwa metamorfisme berlanjut hingga derajat rendah (temperatur $<200^{\circ}$ C). Perhitungan kondisi Tekanan dan Temperatur pembentukan eklogit Wasuponda telah dilakukan pula dengan Program Komputer Thermocalc (Holland & Powell, 1990). Jika air diperhitungkan dalam sistem (aH_2O antara 0.2 dan 1), temperatur

meningkat (dari 437° hingga 500 °C) bila tekanan air meningkat sesuai dengan aktifitasnya. Suatu Tekanan dari 19 hingga 20 kbar dan Temperatur 437° hingga 469 °C dengan suatu temperatur dari 437° hingga 469°C dengan aktifitas air antara 0.2 dan 0.4 adalah nilai yang dianggap sesuai untuk eklogit berubah (SU.199). Detil lintasan ubahan hidrotermal tersebut dapat dilihat pada Gambar 8.

Kondisi Tekanan dan Temperatur Batuan Asosiasi

Sekis garnet, kuarsa, rutil, phengit

Sesuai dengan kehadiran asosiasi mineral dalam batuan ini, maka hanya temperatur pembentukan batuan ini yang bisa ditentukan. Temperatur tersebut didapat berdasarkan Geotermometer Garnet-Phengit (Krogh & Raheim, 1978). Temperatur tersebut adalah antara 465° hingga 496 °C untuk kisaran Tekanan antara 2 kbar dan 8 kbar (Sampel SU.358) sehingga menunjukkan bahwa batuan berada dalam medan stabilitas fasies ampibolit epidot.

Sekis garnet, hornblenda, kuarsa, rutil, muskovit, epidot

Analisis kimia mineral terhadap Sampel SU.201 memungkinkan untuk mendapatkan Tekanan dan Temperatur berdasarkan Termobarometer Al_{IV} - $Na(M_4)$ dalam ampibol (Brown, 1977); Garnet-Phengit (Krogh & Raheim, 1978) dan Garnet-Hornblenda (Graham & Powell, 1982).

Hubungan kadar Al_{IV} dan $Na^{(M_4)}$ dalam ampibol sesuai dengan isobar-isobar Brown (1977) memberikan tekanan maksimal sebesar 6.5 kbar. Tekanan ini terekam oleh bagian tengah (inti) ampibol.

Penerapan Termometer Garnet-Phengit (Krogh & Raheim, 1978) memberikan Temperatur yang berkisar antara 517° hingga 613 °C untuk Tekanan yang berkisar dari 2 kbar hingga 8 kbar, sedangkan estimasi

temperatur berdasarkan Termometer Garnet-Hornblenda (Graham & Powell, 1982) memberikan Temperatur sebesar 438 °C. Temperatur ini mengindikasikan bahwa batuan berada dalam medan stabilitas fasies Ampibolit epidot.

Penerapan termobarometer terhadap Sekis garnet, hornblenda, kuarsa, rutil, muskovit, epidot memberikan kondisi Tekanan dan Temperatur yang sesuai untuk batuan tersebut adalah 6.5 kbar; 438°C yang menunjukkan bahwa batuan berada pada medan stabilitas fasies Ampibolit epidot.

DISKUSI

Nilai Kd untuk pasangan Garnet-Klinopiroksin untuk Eklogit Wasuponda dan Eklogit Bantimala sangat berdekatan. Nilai tersebut masing-masing secara berurutan adalah 11.12 – 14.78; dan 12.41 – 14.53. Nilai-nilai ini mengindikasikan bahwa eklogit yang berasal dari kedua tempat tersebut terbentuk pada Temperatur yang sama.

Kondisi Tekanan dan Temperatur pembentukan eklogit Bantimala adalah terletak pada 21.7 kbar untuk Temperatur sebesar 560 ° hingga 570 °C (Syafri, 2000). Kondisi ini hampir sama dengan Kondisi Tekanan dan Temperatur pembentukan Eklogit Wasuponda yang berada pada 21.5 kbar untuk Temperatur sebesar 580 °C.

Walaupun mempunyai Kondisi Tekanan dan Temperatur pembentukan yang mirip, namun kedua eklogit tersebut memperlihatkan kenampakan tekstural yang berbeda. Eklogit Bantimala tidak mengalami ubahan hidrotermal, seperti halnya eklogit dari Wasuponda.

Eklogit Bantimala terbentuk dalam evolusi tektonik berupa; subduksi Kapur, tumbukan dan akresi mikrokontinen serta penumpukan keratan-keratan batuan secara tektonik pada kala Neogen yang disebabkan oleh tumbukan suatu mikrokontinen lainnya ke arah utara (Wakita et al., 1996; Syafri, 2000).

Berbeda halnya dengan eklogit Bantimala, eklogit Wasuponda terbentuk dalam evolusi tektonik berupa; subduksi Eosen-Oligosen dua kerak Samudra, obduksi dan penumpukan keratan-keratan secara tektonik ke arah (Barat) yang berlawanan dari obduksinya semula (Selatan). Dalam perjalanannya ke permukaan eklogit Wasuponda mengalami metamorfisme oseanik sehingga terjadi alterasi hidrotermal yang terlihat jelas dengan hadirnya beberapa mineral penunjuk seperti terlihat pada Gambar 6 di atas.

KESIMPULAN

Beberapa Geotermobarometer dan Program Thermocalc telah diterapkan untuk eklogit dari Komplek Melange Wasuponda. Kondisi Tekanan dan Temperatur maksimal yang didapat dari penerapan geotermobarometer adalah 21,6 Kbar untuk temperatur 580 °C, sedangkan aplikasi program Thermocalc memberikan Tekanan rata-rata sebesar $20,7 \pm 2,6$ Kbar dengan temperatur 500 ± 29 °C. Tekanan dan Temperatur tersebut adalah sangat mirip dengan kondisi Tekanan dan Temperatur pembentukan Eklogit dari Komplek Tektonik Bantimala. Dengan memperhitungkan nilai ketidakpastian untuk tekanan, maka harga tekanan tersebut menunjukkan kedalaman dari 61 hingga 80 km.

Eklogit Wasuponda mengalami retromorfosa menuju fasies ampibolit dan fasies sekis hijau. Saat berada di medan stabilitas fasies ampibolit, batuan ini berasosiasi dengan sekis garnet, kuarsa, rutil, phengit, epidot dan sekis garnet, hornblenda, kuarsa, rutil, muskovit, epidot. Kondisi Tekanan dan Temperatur yang didapat dari studi ini menunjukkan bahwa arah dari P-T path yang dialami oleh eklogit dari Wasuponda adalah searah dengan jarum jam. Kondisi ini berlawanan dengan hasil yang didapat oleh Parkinson (1991) dari sekis biru

dan batuan asosiasinya yang berasal dari Melange Peluru.

Eklogit dari Komplek Melange Wasuponda berkemungkinan berasal dari kerak samudra purba yang dalam, secara klasik disebut lapisan ke 3 yang diperkirakan disusun oleh batuan gabroik. Paragenesa magmatik pada batuan ini yang dapat diamati di bawah mikroskop adalah: Klinopiroksin, plagioklas dan mineral opak, sedangkan paragenesa yang teramati dalam eklogit adalah garnet, omphasit, phengit dan rutil. Eklogit ini mengalami retromorfosa ke dalam fasies ampibolit atau sekis hijau dan berasosiasi dengan batuan metapelite, yaitu sekis garnet, kuarsa, rutil, phengit, epidot serta sekis garnet, hornblenda, kuarsa, muskovit, epidot yang bersama naik ke permukaan hadir sebagai komponen melange Wasuponda. Hubungan struktural dan paragenese mineral yang hadir dalam eklogit Wasuponda memperlihatkan bahwa batuan ini telah mengalami metamorfisme samudra sewaktu menuju permukaan setelah pernah mencapai metamorfisme tekanan tinggi. Sesuai dengan Mevel (1984) eklogit yang diteliti mengalami metamorfisme oseanik dari fasies ampibolit, sekis hijau hingga fasies zeolit. Dalam eklogit paragenesa mineral yang mengindikasikan adanya retromorfosa adalah kehadiran kalkosodik ampibol, sfen dan plagioklas yang terlihat dalam matriks.

Kehadiran, edenit, edenit hornblenda, juga hematit, kuarsa dan klorit menunjukkan terjadinya proses ampibolisasi, sedangkan mineral-mineral seperti zoisit, albit, mika putih, kalsit dan zeolit menyatakan proses sauritisasi yang terjadi pada temperatur dan tekanan rendah.

UCAPAN TERIMA KASIH

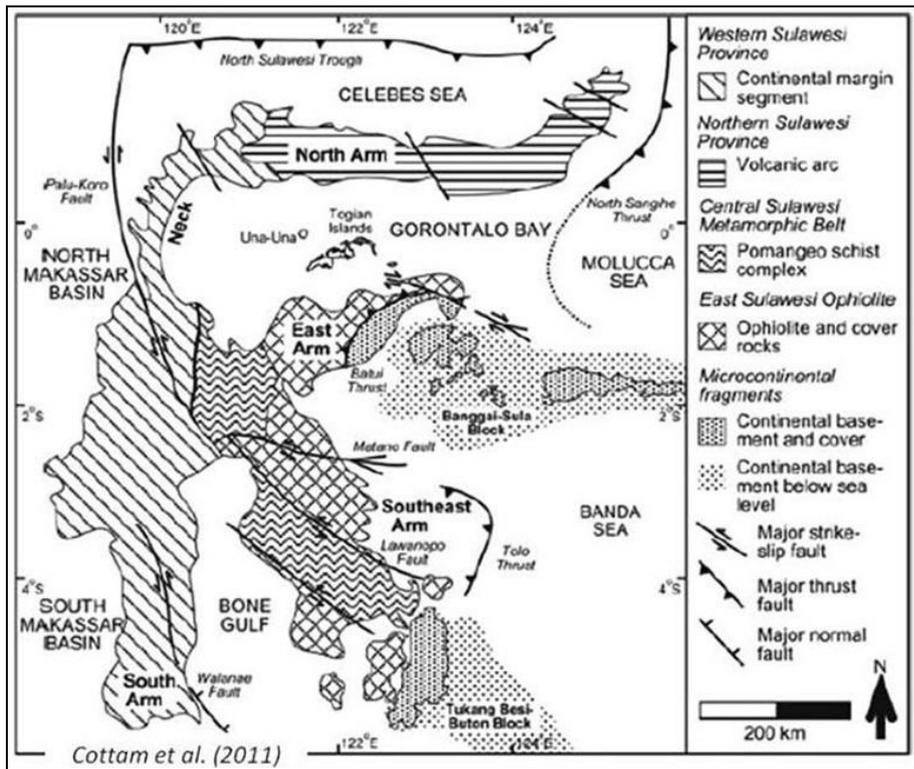
Terima kasih penulis haturkan kepada Prof. Dr. Jacques GIRARDEAU dari Universite de Nantes, Perancis atas izin yang diberikan untuk memanfaatkan contoh-contoh batuan

yang dimilikinya. Kepada Prof. Dr. J.R. KIENAST juga penulis ucapkan terima kasih atas bantuan fasilitas Microprobe yang diberikan dalam menganalisis kimia mineral-mineral yang terkandung dalam sampel sayatan tipis batuan yang digunakan.

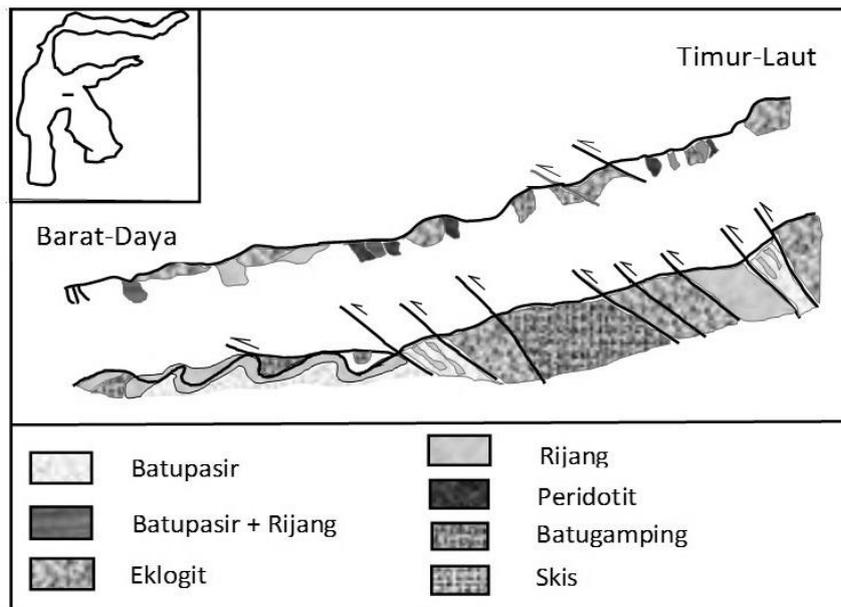
DAFTAR PUSTAKA

- Audley-Charles, M. G. (1974). Sulawesi. In Spencer A.M. ed. Mesozoic-Cainozoic Orogenic Belts. *Geological Society of London Special publication 4*, p.365-378
- Brown, E.H. (1977). The crossite content of Ca-amphiboles as a guide to pressure of metamorphism. *J. Petrol.* 18, p.53- 72.
- Cornee, J.J., G. Tronchetti, M. Villeneuve, B. Lathuiliere, M.C. Janin, P. Saint-Marc, W. Gunawan & H. Samodra (1995). Cretaceous of eastern and southeastern Sulawesi (Indonesia): new micro-paleontological and biostratigraphical data. *J. Southeast Asian Earth Sci.* 12, p. 41-52
- Cottam, M, Hall, R, Forster, M. (2011). 'Basement character and basin formation in Gorontalo Bay, Sulawesi, Indonesia: new observations from the Togian Islands', *Geological Society of London Special Publication*, 355, p. 177-202.
- Daly, M.C., Cooper, M. A. and I. Wilson, I. (1991). Cenozoic plate tectonics and basin evolution in Indonesia. *Marine and Petroleum Geology*, Vol 8, p.2-21
- Ellis, D.J., GREEN, D.H. (1979). An experimental study of the effects of Ca upon Garnet-
- Girardeau, J. (1990). Rapport Mission a Sulawesi. Non publie.
- Hamilton, W. B. (1979). Tectonics of the Indonesian region, *Professional Paper 1078 USGS Numbered Series*, 345 p.
- Helmers, H,, MAASKANT, P., HARTEL, T.H.D. (1990). Garnet peridotite and associated high-grade rocks from Sulawesi, Indonesia. *Lithos*, 25, p. 171-188.
- Holland, T.J.B., POWELL, R. (1985). An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations; 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. *Journ. Met. Geol.*, 6, p. 173-204.
- Holland, T.J.B., POWELL, R. (1990). An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: the system K₂O-Na₂O-CaO-MgO-MnO-FeO-Fe₂O₃-Al₂O₃-TiO₂-SiO₂-C-H₂-O₂. *Journ. Met. Geol.*, 8, p. 89-124.
- Humphris, S.E. and Thompson, G. (1978). Hydrothermal alteration of oceanic basalts by seawater. *Geochem Cosmochim Acta*, 42, p.107-125
- Kadarusman, A. & Parkinson, C.D. (2000). Petrology and P-T evolution of garnet peridotites from Central Sulawesi, Indonesia. *J. Metamorphic Geol.*, 18, 2, p. 193-209.
- Katili, J.A. (1978). Past and present geotectonic position of Sulawesi, Indonesia. *Tectonophysics*, 45, p. 289- 322.
- Krogh, E.J. , Raheim, A. (1978). Temperature and pressure dependence of Fe-Mg partitioning between garnet and phengite, with particular reference to eclogites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 66, p.75-80.
- Mevel, C. (1984). Le metamorphisme dans la croûte oceanique: apport de la petrologie a la comprehension des phenomenes de circulation hydrothermale et de deformation; *These d'Etat*, Universite P. et M.Curie, 434p.
- Miyazaki, K., I. Zulkarnain, J. Sopaheluwakan & K. Wakita (1996). Pressure-temperature conditions and retrograde paths of eclogites, garnet-glaucophane rocks and schists from South Sulawesi, Indonesia. *J. Metam. Geol.* 14, p. 549-563.

- Parkinson, C.D. (1991). The petrology, structure and the geologic history of the metamorphic rocks of Central Sulawesi, Indonesia. *PhD thesis, University of London*.
- Parkinson, C.D. (1998). Emplacement of the East Sulawesi Ophiolite: evidence from subophiolite metamorphic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16, p.13-28
- Powell, R. (1985). Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/ geobarometer calibration: the Garnet- Clinopyroxene geothermometer revisited. *Journ. Metamor. Geol.*, 3, p. 231-243.
- Rangin, C., Jolivet, M., Pubellier, M., & The Tethys Pacific Working Group (1990). A simple model for the tectonic evolution of Southeast Asian and Indonesian regions for the past 43 years. *Bulletin Societe Geologique de France*, VI, 889 – 905.
- Sukamto, R. (1975). Geologic map of Ujung Pandang Sheet, scale 1:1000.000. Geol. Surv. Indonesia.
- Sukamto, R. et al (1981). Tectonic relationship between geologic provinces of Western Sulawesi, Eastern Sulawesi and Banggai-Sula in the light of sedimentological aspects. Reports of GRDC, Bandung, Indonesia.
- Sukamto, R. and T.O. Simandjuntak (1983). Tectonic relationship between geologic province of Western Sulawesi, Eastern Sulawesi and Banggai-Sula in the light of sedimentological aspects. *Bull. Geol. Res. Dev. Center*, 7, 1-12. Bandung.
- Syafri, I. (2000). Etude petrologique et geochemique des peridotites a grenat, eclogites et roches associees des parties ouest et centrale de l'île Sulawesi, Indonesie. *These de doctorat*, Universite P. et M.Curie.

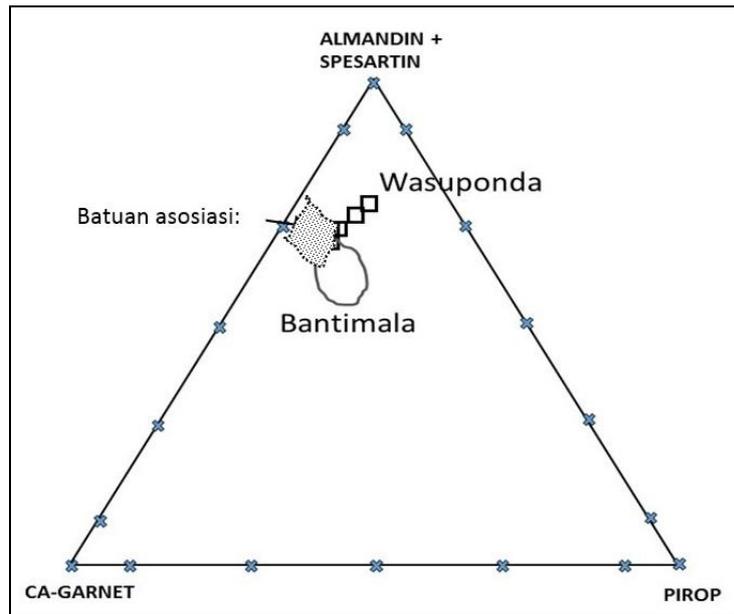


Gambar 1. Peta tektonik Sulawesi (Sumber: Cottam et al., 2011)

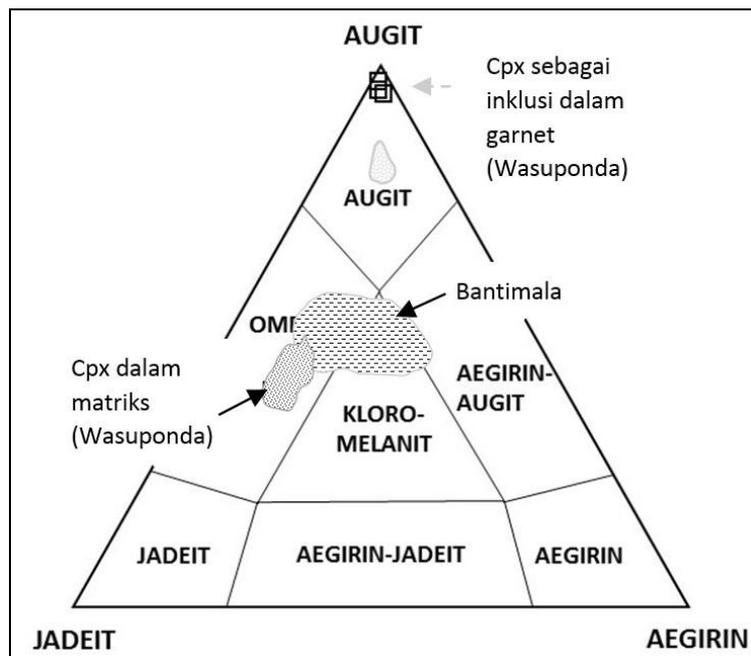


Gambar 2. Penampang yang berarah Barat-Daya-Timur-Laut pada lintasan S. Wasuponda memperlihatkan hubungan eklogit berubah dengan satuan tektonik lainnya.

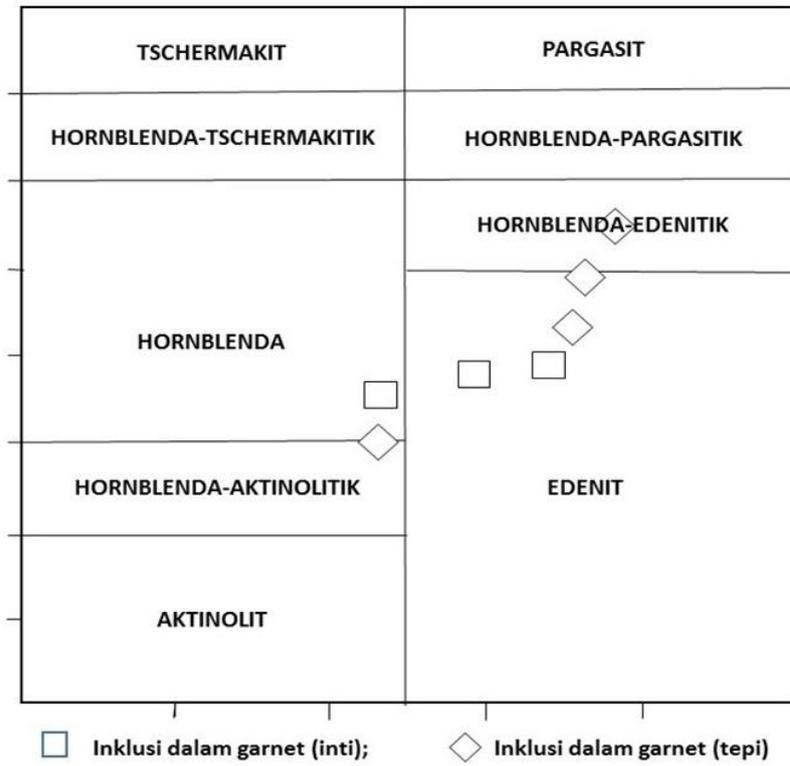
Eklogit terubah dan batuan asosiasinya sebagai indikator subduksi purba selama Eosen Atas hingga Oligosen Bawah di sabuk metamorfik Sulawesi Tengah Bagian Timur – Indonesia (Ildrem Syafri)



Gambar 3. Komposisi garnet dalam eklogit terubah dari Komplek Tektonik Wasuponda, Sulawesi Tengah

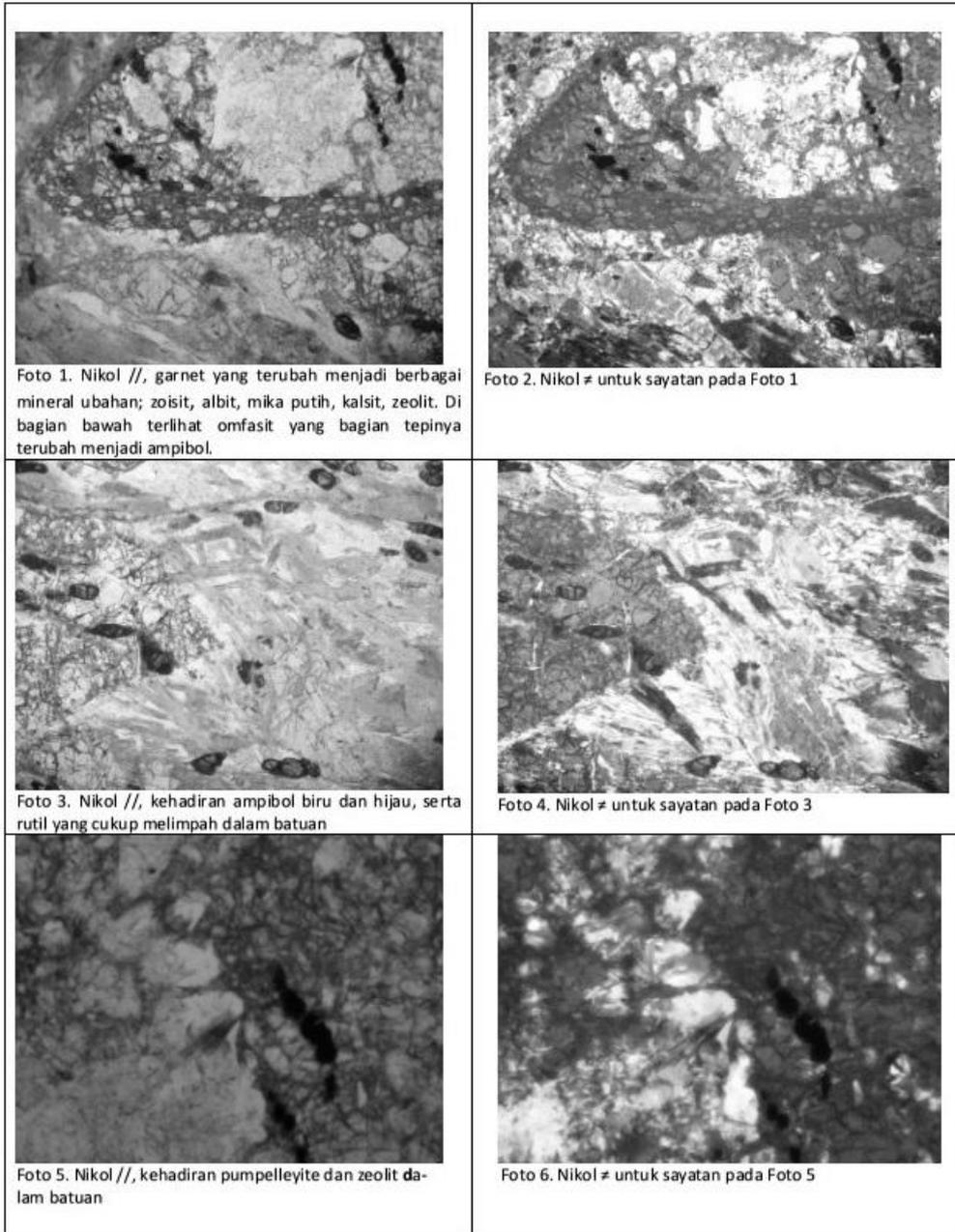


Gambar 4. Komposisi Klinopiroksin dalam eklogit terubah dari Komplek Tektonik Wasuponda, Sulawesi Tengah

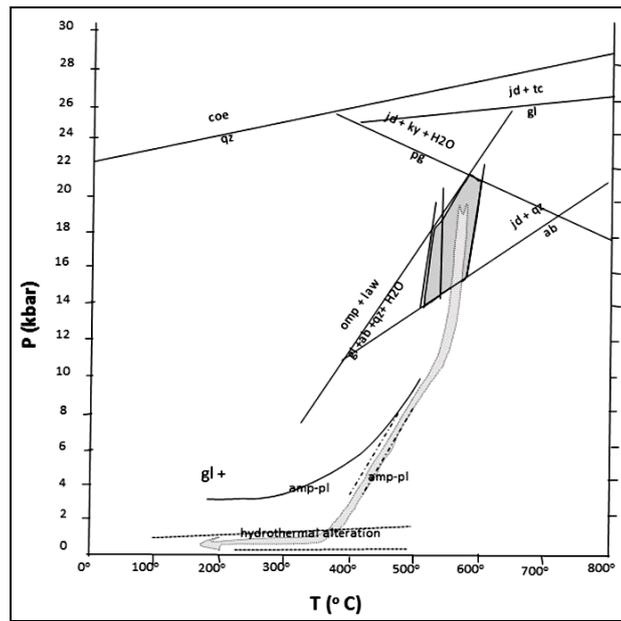


Gambar 5. Variasi komposisi ampibol dalam eklogit berubah dari Komplek Tektonik Wasuponda, Sulawesi Tengah.

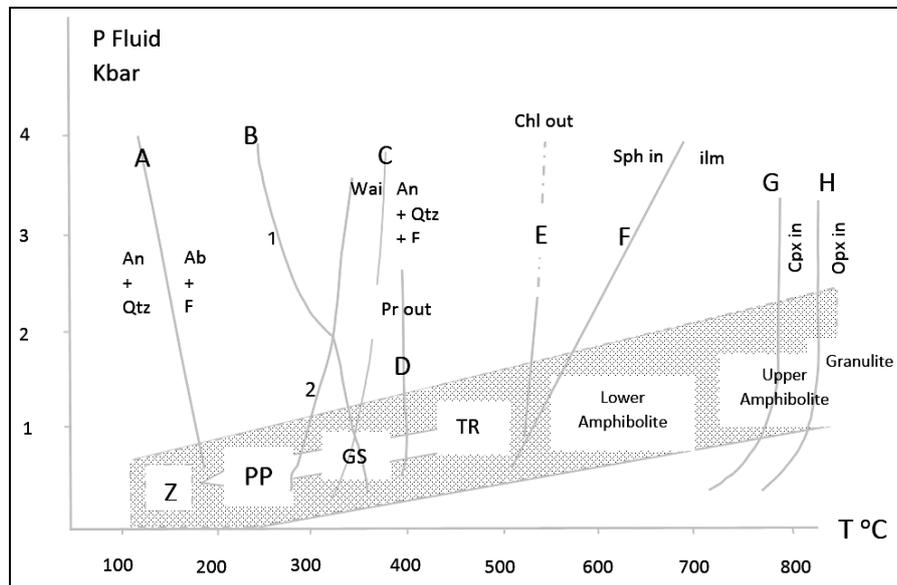
Eklogit terubah dan batuan asosiasinya sebagai indikator subduksi purba selama Eosen Atas hingga Oligosen Bawah di sabuk metamorfik Sulawesi Tengah Bagian Timur – Indonesia (Ildrem Syafri)



Gambar 6.
Beberapa foto sayatan eklogit terubah memperlihatkan mineral penyusun utama dan mineral ubahan hasil proses hidrotermal



Gambar 7. Kondisi Tekanan & Temperatur (P,T path) eklogit berubah dari Komplek Tektonik Wasuponda, Sulawesi Tengah



Legenda: PP = Prehnite-pumpellyite; GS = Green Schist; TR = Green Schist – Amphibolite Transition; A: $An+Qtz = Ab+H_2O$ (Liu, 1971a); B: Assemblage stability field of prehnite-pumpellyite (Nitsch, 1971), ditentukan berdasarkan suatu sistem magnesium murni. 1: $Pmp+Prh+Chl+Qtz/Pmp+Ep+Chl+Qtz/Prh+Act+Chl+Qtz$; 2: $Prh+Ep+Chl+Qtz/Prh+Ep+Chl+Pmp$. Field 1 dengan Field 2 dibatasi oleh reaksi: $Pmp+Qtz = Prh+Czo+Chl$, dan Field 2 dengan field temperatur tinggi dibatasi oleh reaksi: $Prh+Chl+Qtz = Di+Act$. C: $Wai = An+Qtz+H_2O$ (Liu, 1970); D: $5Prh=2Zo+2Gr+3Qtz+4H_2O$ (Liu, 1971b); E: $Chl+Spn+Qtz = Amp.al+Ilm+H_2O$ (Liu, 1974); F: Fasa mafik oksida+ Spn =Fasa mafik reduksi+ $Ilm+O_2$ (Spear, 1981); G: $Hbl_1+Pl_1=Hbl_2+Pl_2+Pl_2+Cpx+Fe-Ti$ Oksida+ H_2O (Spear, 1981) dengan Hbl_2 berkominasi lebih pargasitik dan lebih kaya akan Ti daripada Hbl_1 ; H: $Hbl_2+Pl_2=Hbl_3+Pl_3+Cpx+Opx+Ilm+H_2O$ (Spear, 1981)

Gambar 8. Lintasan Ubahan Hidrotermal untuk Eklogit berubah dari Wasuponda berdasarkan kondisi Tekanan dan Temperatur fasies yang terekam untuk metamorfisme kerak samudra (Mevel, 1984)