

PENAFSIRAN STRUKTUR GEOLOGI SEMENANJUNG MURIA DARI DATA CITRA SATELIT

Oleh :

P. Astjario dan D.Kusnida

Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan, Jl. Dr. Djundjuna No. 236 Bandung-40174

S A R I

Penafsiran data citra satelit yang ditunjang dengan data geologi sekunder, menunjukkan bahwa Semenanjung Muria telah mengalami minimal dua rejim tektonik yaitu peregangan (rifting/extension) dan tektonik tekanan (inverse/compression). Keberadaan gunungapi Muria saat ini menunjukkan pernah terjadi interaksi yang kompleks antara rejim tekanan dan keberadaan struktur regangan di daerah ini. Proses tektonik tekanan ini mengakibatkan batuan dasar berumur lebih tua mengalami pemampatan yang memungkinkan keluarnya magma melalui bidang sesar yang teraktifkan kembali dan membentuk Komplek Gunungapi Muria.

Kata kunci : struktur patahan, citra satelit, Semenanjung Muria

ABSTRACT

Satellite imageries data interpretation complemented by secondary geological data, indicate that the Muria Peninsula has been undergone by at least two tectonic regimes, those are rifting/extension and inversion/compression tectonics. At present, the occurrence of Muria volcano indicates there was a complex interaction between compression regime and the occurrence of extensional structures in the area. These tectonic processes implies that the older basement in the study area is accomplished by lithosphere shortening which allows active upwelling of magma through the reactivated fault planes forming a Muria Volcano Complex.

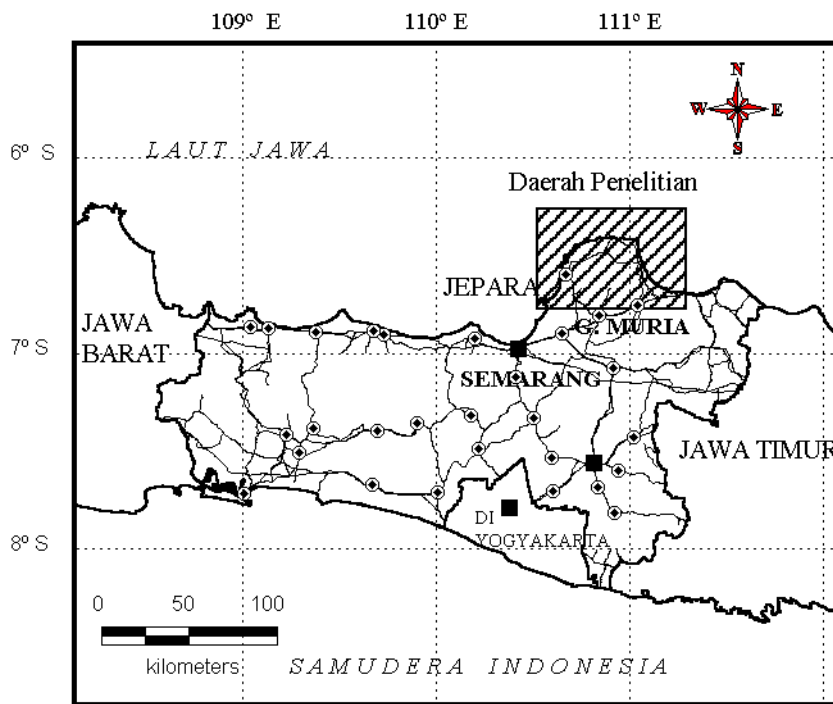
Keyword : fault structures, satellite imageries, Muria Peninsula

PENDAHULUAN

Kompleks gunungapi Muria berada di bagian utara Pulau Jawa, tepatnya di *Sunda back arc* (busur belakang Sunda). Semenanjung Muria merupakan suatu kumpulan/kompleks kegiatan vulkanik. Gunungapi Muria adalah yang terbesar dan tertinggi di kawasan ini, mencapai ketinggian 1625 meter di atas muka laut. Lokasi penelitian terletak pada koordinat 110°30'-111°30' Bujur Timur dan 6°20'-6°50' Lintang Selatan (gambar 1). Semenanjung Muria ini terbagi menjadi kabupaten Kabupaten Jepara, Kudus dan Pati.

Di kaki gunungapi Muria bagian utara ditemukan gunungapi Genuk dengan beberapa

intrusi dasit di sayap bagian timurnya. Pada lereng gunungapi Muria bagian tenggara tampak tinggian Patiayam yang merupakan batuan Tersier yang terangkat akibat intrusi batuan beku berbentuk kubah. Dari beberapa sumber data (Soemarno, 1982 dan Sukyar drr, 1998) batuan gunungapi Muria memperlihatkan tatanan kimia yang beragam dari kalk-alkali normal hingga kadungan potasium yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa sumber magma cukup dalam. Casadevall (1987), berpendapat bahwa berdasarkan penelitian pentarikan radiometrik kalium-argon letusan terakhir terjadi pada 80.000 tahun lalu, sehingga menurutnya gunungapi Muria diperkirakan



Gambar 1. Peta lokasi penelitian di kawasan kompleks gunungapi Muria dan sekitarnya.

berpotensi untuk aktif kembali yang memicu seismisitas dan erupsi aliran lava serta erupsi eksplosif material piroklastik.

GEOLOGI UMUM

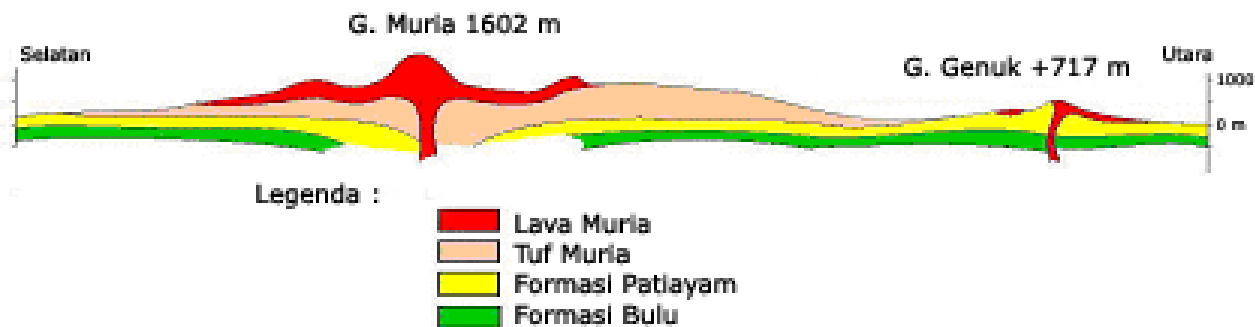
Menurut Suwarti dan Wikarno (1992), satuan batuan paling tua yang tersingkap di daerah telitian, yaitu Formasi Ngrayong yang terdiri atas perselingan napal, batupasir dan batulempung dengan sisipan batugamping pasiran; berumur Miosen Tengah. Napal berwarna putih keabu-abuan, berlapis kurang baik dengan ketebalan 20-30 cm dan banyak mengandung foraminifera plangton. Batupasir gampingan berwarna kuning kecoklatan, agak padat dan berlapis kurang baik dengan ketebalan mencapai 1 meter. Batulempung, agak keras, setempat gampingan, berfosil foraminifera. Batugamping pasiran putih kecoklatan, mengandung foraminifera besar, sebagian telah mengalami penghabluran ulang dengan tebal sisipan 10-30 cm. Formasi ini mempunyai arah jurus umum baratdaya-timurlaut dengan kemiringan 10° hingga 15° . Di daerah penelitian, Formasi Ngrayong tertindih selaras oleh Formasi Bulu yang terdiri atas batugamping dengan sisipan batugamping pasiran dan

batugamping lempungan yang berumur Miosen Akhir.

Formasi Bulu yang tertindih tak selaras oleh Formasi Patiayam yang terdiri atas perselingan batupasir tufaan dan konglomerat tufaan, dengan sisipan batulempung, batugamping dan breksi, dan berumur Pliosen. Batugamping berwarna putih abu-abu hingga kecoklatan, berlapis tipis dan memiliki ketebalan perlapisan 4-15 cm mengandung foreminifera kecil. Ketebalan seluruh perlapisan mencapai 70 cm. Batugamping pasiran berwarna kelabu, mengandung mineral hitam dan berlapis tipis. Batugamping lempungan berwarna kelabu muda, agak

padat dan memiliki tebal perlapisan sekitar 5 cm dan 10 cm. Kontak antara Formasi Bulu dan Formasi Patiayam tidak di temukan.

Formasi Patiayam merupakan perselingan batupasir tufaan dan konglomerat tufaan dengan sisipan batulempung, batugamping dan breksi. Batupasir tufaan berwarna kuning kecoklatan dijumpai banyak kepingan batu apung, ketebalan perlapisan antara 5-10 cm akan tetapi di beberapa tempat mencapai 1,5 meter. Konglomerat tufaan yang terdiri atas beragam material, ukuran fragmen 2-10 cm dan di beberapa tempat mencapai 1 meter, kompak dan tebal lapisan antara 2-5 meter. Terkadang dijumpai lensa batulempung tufaan berwarna abu-abu dan agak padat. Batulempung tufaan berwarna kuning kelabu, berlapis baik dengan ketebalan perlapisan antara 5-10 cm. Tebal lapisan antara 1-2 meter ditemukan sebagai sisipan dalam batupasir atau konglomerat. Batugamping berwarna putih sampai kelabu, berfosil foraminifera dan moluska sebagai sisipan dalam batu pasir atau konglomerat. Di sekitar gunungapi Genuk di bagian utara gunungapi Muria dijumpai struktur lapisan bersusun dalam batupasir, konglomerat dan breksi.



Gambar 2. Penampang tegak geologi yang memotong kompleks gunungapi, Muria dan gunungapi Genuk dari selatan ke utara (sketsa Astjario, 2007).

Batuan gunungapi Kuartar yang terdiri dari beberapa satuan batuan menindih tidak selaras batuan yang lebih tua. Batuan gunungapi tersebut tersusun dari hasil kegiatan gunungapi Muria yang berupa tufa, lahar, breksi dan lava; dan kegiatan gunungapi Genuk yang berupa lava, breksi gunungapi dan tufa serta retas basal, leusit, sienit dan andesit. Batuan terobosan berupa retas di dalam batuan gunungapi, tersingkap setempat-setempat. Endapan termuda adalah aluvium yang terhampar di sepanjang pantai barat dan bagian selatan daerah penelitian.

METODE

Metode yang digunakan dalam kajian ini adalah penafsiran data citra satelit. Untuk menunjang penafsiran tersebut, sebagai langkah pertama adalah melakukan studi literatur dari para peneliti terdahulu. Selain mempelajari literatur tentang gunungapi Muria yang telah ditebitkan oleh para pakar geologi maupun volcanologi (Soemarno, 1982; Casadevall, 1987; Sukyar drr, 1998; Soeria Atmaja drr, 1998 dan Sribudiyani drr, 2003), juga digunakan peta geologi Lembar Kudus yang dipetakan oleh Suwarti dan Wikarno (1992).

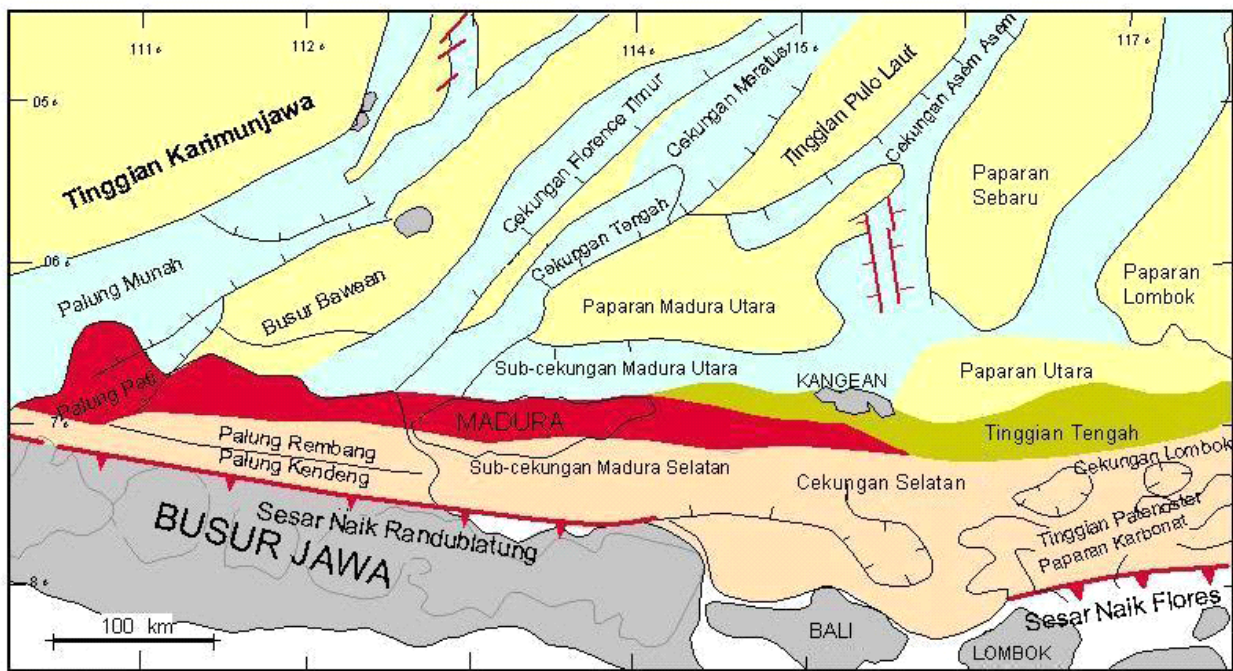
Analisis penginderaan jauh dari beberapa citra satelit Landsat 7 ETM+ multi band ditunjang oleh hasil pengamatan struktur di lapangan, memberikan informasi tentang kelurusan-kelurusan dan prakiraan bahaya geologi dalam lingkup pengembangan wilayah bagi suatu peruntukan. Selain mengolah citra satelit, juga dilakukan *ground check* di lapangan dengan menginventarisasikan indikasi struktur geologi.

Gabungan data DEM dan citra satelit komposit warna (2, 3 dan 1) yang ditampilkan dalam 3 dimensi, memudahkan dalam identifikasi patahan Tempur dan patahan Rahtawu. Perangkat lunak Global Mapper yang digunakan mampu memutar *image* 3 dimensi tersebut hingga putaran 360° guna mencari sudut tertentu yang dapat memberikan informasi tentang kedua patahan tersebut secara maksimal.

HASIL KAJIAN DAN PEMBAHASAN

Di perairan Laut Jawa terbentang cekungan-cekungan yang terbentuk pada Jaman Pra-Tersier paralel dengan zona subdaksi Jaman Kapur (Soediro, 1973). Palung Muria dimana kompleks Muria merupakan bagiannya adalah salah satu dari sub-cekungan yang ada di perairan Laut Jawa (gambar 3.). Hasil studi tektonik regional Jawa Timur yang dilakukan oleh Sribudiyani drr (2003), memperkuat bukti adanya benturan antara benua mikro dan Paparan Sunda sejak jaman kapur Akhir hingga Eosen Tengah. Para penulis ini menemukan dua kelurusan struktur utama dijumpai di daerah Jawa Timur yaitu berarah Timur-Barat (kelurusan Sakala) dan berarah Timurlaut-Baratdaya (kelurusan Meratus). Berdasarkan data stratigrafi dan umur batuan sedimen tertua yang diendapkan dalam Cekungan Jawa Timur, kelurusan struktur Sakala ternyata lebih tua dibandingkan dengan kelurusan struktur Meratus. Dari hasil studi ini disimpulkan bahwa sedimen pengisi cekungan dalam struktur Sakala berumur Eosen.

Perkembangan tektonik pada Jaman Tersier mengakibatkan terbentuknya cekungan-



Gambar 3. Peta sebaran cekungan di Laut Jawa (Soediro, 1973)

cekungan di Laut Jawa (*pull-apart basin*), bersamaan aktifitas tektonik peregangan mendatar (*extension*). Selain terjadi tekanan berlebihan pada litosfir saat itu, juga terjadi pelelehan mantel litosfir. Situasi ini yang merubah komposisi magma dari kandungan potasium rendah ke arah kandungan potasium tinggi. Ditafsirkan bahwa generasi magma di gunungapi Muria sangat beragam tergantung dari temperatur proses pelelehan magma (Sukyar drr, 1998). Kesimpulan ini diperkuat dengan hasil penelitian mengenai perkembangan busur magmatis Indonesia bagian barat oleh Soeria Atmadja drr (1998), sejak jaman Paleosen, Eosen Awal, Miosen Awal, Miosen Akhir dan jaman Pliosen yang mengindikasikan siklus puncak aktifitas vulkanik kalk-alkali tinggi pada masing-masing pada jaman tersebut.

Menurut Sukyar drr (1998), magma yang mengandung potasium tinggi terbentuk pada temperatur lebih rendah dibandingkan dengan magma yang mengandung potasium rendah. Oleh sebab itu terjadi pengurangan temperatur pada pelelehan mantel selaras dengan berjalannya waktu. Peristiwa tektonik yang mengakibatkan peregangan (*extension*) menghasilkan pelelehan magma dengan panas tinggi dan magma berpotasium rendah. Selanjutnya terjadi peristiwa tektonik yang mengalami perubahan secara berangsur dan

mengakibatkan peregangan berhenti serta beralih menjadi bertekanan (*compression*) yang menghasilkan magma berpotasium tinggi.

Geokimia Kompleks Muria

Analisis geokimia batuan gunungapi Muria (Sukhyar drr, 1998), memperlihatkan tatanan kimia yang bervariasi dari batuan yang mengandung kalk-alkali yang normal hingga potasium tinggi. Banyak ragam batuan vulkanik di kawasan gunungapi Muria yang berbeda umur pembentukannya. Batuan yang mengandung potasium tinggi memiliki umur yang lebih muda jika dibandingkan dengan batuan yang kandungan potasiumnya rendah.

Walupun saat ini gunungapi Muria sedang dalam kondisi tidak aktif dan sangat jarang ditemukan rembesan gas, akan tetapi data bor yang dilakukan di kawasan gunungapi Muria, kubah lava Genuk, tinggian Patiayam, dan Lemahabang, gas dapat diidentifikasi sebagai gas H_2S , CH_4 , CO , O_2 , dan di beberapa tempat dijumpai CO_2 (Sukyar drr, 1998). Analisis kimia dari elemen utama dari gas di gunungapi Muria didominasi oleh CO_2 mencapai 72 % tanpa air, sementara komposisi gas lainnya adalah N_2 , O_2 , CH_4 dan sedikit H_2 dan He . Unsur HCl juga ditemukan dengan kadar yang agak tinggi dari percontoh bor di Banyumanis. Cukup sulit untuk

menjelaskan mengapa kandungan HCl memiliki nilai yang cukup tinggi, hal ini mungkin terjadi karena kontaminasi unsur Cl yang berasal dari NaCl karena adanya intrusi air laut, karena posisi Banyumanis dekat dengan kawasan pantai. Sementara tingginya kandungan CH₄ mungkin berasal dari biogas. Di gunungapi Muria dan sekitarnya tidak dijumpai gas-gas SO₂ dan H₂S. Ketidak hadirannya kedua gas tersebut dapat ditafsirkan sebagai tidak adanya panas yang cukup tinggi pada gunungapi Muria ini (Sukhyar drr, 1998).

Hasil analisis isotop (Sukhyar drr, 1998), yang berasal dari pemercontoh di gunungapi Genuk, Rowo dan Semliro menunjukkan nilai 6.50, 6.51, 7.13 dan 6.19 (dalam artian 6.50 hingga 7.13 kali lebih besar dari ³He/⁴He di udara). Nilai perbandingan karbon isotop tersebut sama dengan nilai perbandingan karbon isotop di gunungapi aktif di Merapi. Angka-angka tersebut di atas menunjukkan bahwa gas-gas yang di temukan dari pemboran di gunungapi Muria berasal dari magma, dan jika gas-gas tersebut agak sulit ditemukan rembesannya saat ini dapat ditafsirkan sebagai proses pendinginan, akan tetapi aktifitas magma masih tetap berlangsung hingga saat ini.

Analisis Citra Satelit Komplek Muria

Gunungapi Muria merupakan gunungapi yang menarik untuk dikaji baik secara visual di lapangan maupun melalui analisis data lainnya. Pengamatan struktur geologi pada kawasan semenanjung Muria dilakukan dengan menggunakan analisis penginderaan jauh citra Landsat 7 ETM+ multi band. Untuk analisis tersebut tersedia citra landsat hasil rekaman tahun 1997 dan 2000 yang memiliki perbedaan satu dengan lainnya karena dalam proses perekaman pantulan panjang gelombang disetiap objek rupa bumi memiliki sifat yang berbeda.

Didalam penafsiran struktur geologi dengan menggunakan metode pendekatan penginderaan jauh perlu di lakukan berbagai macam teknik pengolahan data citra dengan menggunakan perangkat lunak ER Mapper dan Global Mapper. Hal tersebut dilakukan dengan tujuan mempermudah dalam penafsiran patahan dari berbagai sudut pandang. Proses yang berlaku pada kedua perangkat lunak tersebut tidak memanipulasi data akan tetapi dengan melalui

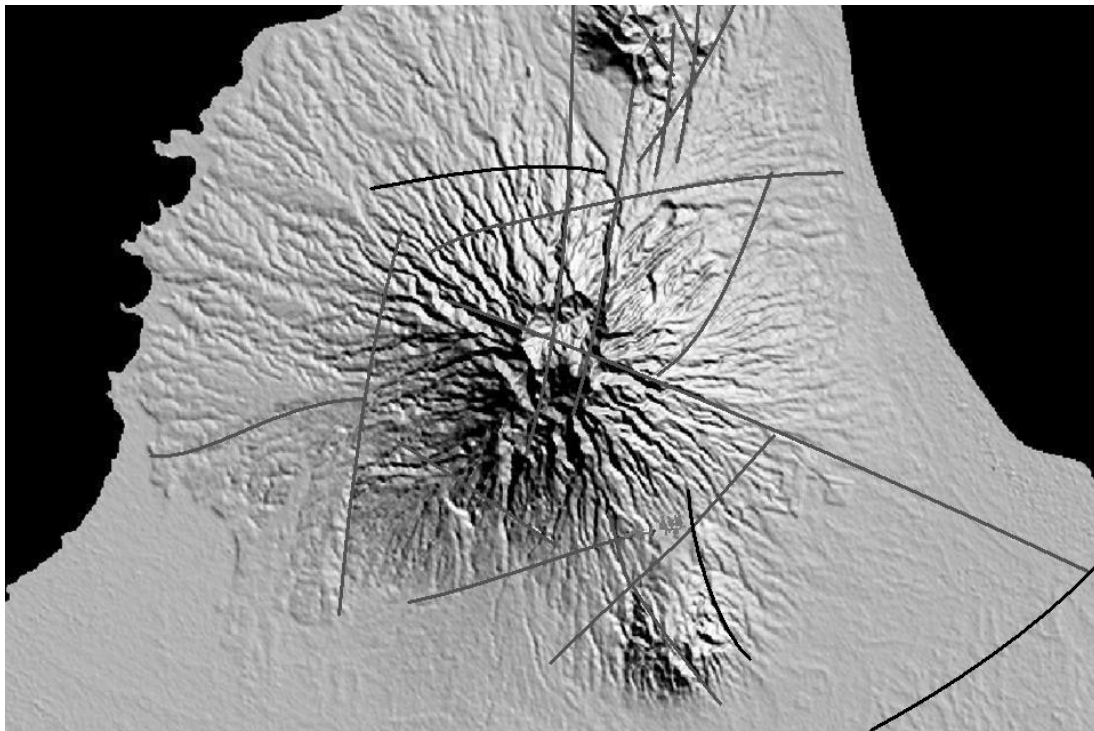
penggabungan data citra digital yang tersedia serta pengamatan visual di lapangan.

Proses penafsiran patahan dapat di lakukan dengan menafsirkan langsung dari citra satelit Landsat 7 ETM+ akan tetapi proses ini masih memiliki kelemahan karena hanya dapat menampilkan satu *image* dengan perubahan komposit warna yang beragam. Identifikasi vegetasi, pola aliran sungai, pemukiman dan lahan terbuka mudah dilakukan dengan proses ini. Akan tetapi struktur geologi yang berkembang di kawasan penelitian tidak seluruhnya akan dapat teridentifikasi dengan baik. Dengan menggunakan perangkat lunak ER Mapper data citra yang tersedia dapat di gabung dengan data ketinggian dari setiap pixel dan memberikan informasi tentang elevasi daerah penelitian dengan tampilan data *Digital Elevation Model* (DEM). Dengan menggunakan DEM maka penafsiran struktur geologi lebih mudah untuk dilakukan (gambar 4.).

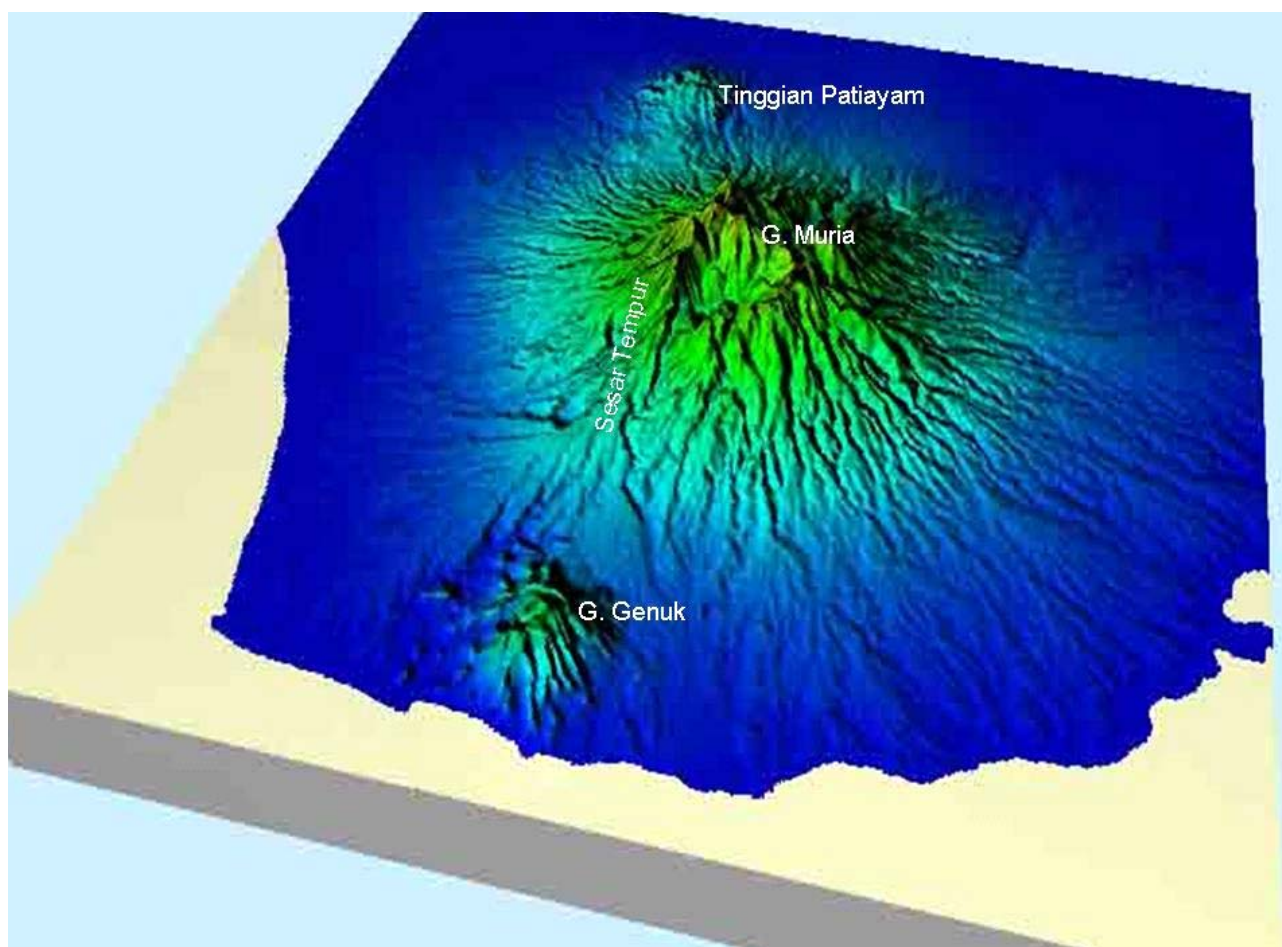
Dengan menggunakan DEM dapat diidentifikasi patahan-patahan dengan beragam arah. Patahan-patahan tersebut memiliki orientasi tertentu yang dapat memberikan gambaran tentang proses terjadinya. Di dasar Laut Jawa dan di sekitar perairan semenanjung Muria (Soediro,1973), diketahui banyak di temukan cekungan Tersier yang berarah timurlaut – baratdaya, tepian cekungan tersebut di batasi oleh patahan-patahan naik yang mengakibatkan cekungan Tersier tersebut membentuk struktur terban tidak setangkup (*half graben*). Cekungan maupun patahan dasar laut tersebut yang menjadi dasar terbentuknya semenanjung Muria dengan munculnya gunungapi Muria, Genuk dan tinggian Patiayam.

Pola struktur muda yang berkembang di semenanjung Muria tentunya sangat di pengaruhi oleh struktur Tersier sebelumnya yang berada di bawah dasar laut yang berarah timurlaut – baratdaya. Setidaknya ada empat kelompok struktur yang memiliki arah berbeda, antara lain :

1. kelompok struktur berarah timurlaut – baratdaya
2. kelompok struktur berarah barat – timur
3. kelompok struktur berarah baratlaut - tenggara
4. kelompok struktur berarah hampir utara – selatan



Gambar 4. Penafsiran kelurusan pada data Digital Elevation Model kawasan Semenanjung Muria.



Gambar 5. Identifikasi gawir patahan Tempur dengan Menggunakan image 3 dimensi kawasan semenanjung Muria.

Kelompok struktur yang berarah timurlaut-baratdaya merupakan struktur yang dominan dan diperkirakan masih dipengaruhi oleh struktur Tersier yang berkembang di Laut Jawa. Sementara struktur yang berarah utara – selatan boleh jadi terbentuk bersamaan dengan munculnya Gunungapi Genuk, Muria, dan tinggian Patiayam. Berdasarkan kelurusan yang ada, boleh jadi kelurusan struktur utara – selatan merupakan struktur regangan yang mengontrol terbentuknya gunung Muria – Patiayam (?).

Data DEM menunjukkan dua buah patahan yang memotong puncak gunungapi Muria sangat mudah dikenali secara visual dilapangan karena memiliki tebing sangat curam. Patahan yang memanjang dari puncak gunungapi Muria menerus kearah gunungapi Genuk di utara melalui desa Tempur, selanjutnya disebut sebagai patahan Tempur, memiliki indikasi patahan yang mudah untuk diidentifikasi. Indikasi tersebut dicirikan oleh tebing yang sangat curam dengan *triangular faset* yang berjajar pada permukaannya. Banyak dijumpai air terjun yang mengalir pada gawir patahan yang terjal serta breksi patahan yang dijumpai pada tepian sungai. Sungai Gelis yang mengalir serta menoreh zona patahan ini menyingkapkan perlapisan batuan pada dua sisi gawir patahan sehingga memudahkan dalam penafsiran pergerakan *sinistral* patahan Tempur (gambar 6.). Patahan tersebut merupakan patahan menyerong (*oblique*), dimana tebing bagian timur sebagai *foot wall* sedangkan tebing bagian barat sebagai *hanging wall*.

Indikasi patahan yang sama juga dijumpai pada patahan yang membelah puncak gunungapi Muria di bagian barat dan memanjang ke arah utara dan berlanjut hingga sebelah barat gunungapi Genuk. Patahan ini melalui desa Rahtawu, selanjutnya patahan ini disebut sebagai patahan Rahtawu, dapat dicapai dari arah desa Gebog, Kabupaten Kudus. Tebing yang sangat curam dari patahan Rahtawu ini sangat mudah di kenali dari arah utara maupun selatan gunungapi Muria (gambar 7.). Patahan Rahtawu merupakan patahan menyerong (*oblique*), dimana tebing bagian barat yang sangat curam merupakan *foot wall* dengan *triangular faset*, sedangkan tebing bagian timur yang menyingkapkan selangseling batuan tuf dan breksi serta airterjun sebagai *hanging wall*. Patahan Rahtawu serta patahan-patahan yang

membelah gunungapi Genuk memanjang arah utara menerus ke laut. Namun demikian hal tersebut perlu pembuktian dengan menggunakan perangkat seismik yang dapat merekam tatanan sedimen dasar laut serta perkembangan patahannya.

Blok terban memanjang tidak setangkup (*half graben*) antara patahan Rahtawu dan patahan Tempur merupakan zona labil di kompleks Muria. Struktur *half graben* dicirikan oleh jarak *net slip* dan *dip slip* pada patahan Tempur lebih besar dibandingkan pada patahan Rahtawu.

Pada dasarnya seluruh patahan yang berkembang di kawasan semenanjung Muria dapat diklasifikasikan sebagai patahan aktif karena berumur muda menurut skala waktu geologi yaitu sekitar 80.000 tahun yang lalu (Casadevall, 1987), serta berkembang pada kawasan gunungapi yang memiliki material yang kurang padat (*uncosolidated*) hingga padat, dan sangat mudah mengalami pergerakan ulang.

Kondisi patahan-patahan di kompleks Muria (berumur 80.000 tahun yang lalu), sesuai dengan kriteria sebuah patahan aktif menurut Billings (1979), yang mana patahan tersebut pernah bergerak setidaknya 50.000 tahun lalu atau bergerak secara periodik selama 500.000 tahun. Memang saat ini patahan-patahan di kompleks Muria tidak memperlihatkan pergerakannya, namun demikian jika suatu saat pembebanan energi dapat melampaui kemampuan patahan, maka patahan-patahan tersebut akan mengalami pergerakan dan berpotensi menimbulkan gempa bumi serta longsoran material vulkanik.

Data digital yang ditampilkan dalam bentuk *image* tumpang tindih (gambar 8.), dapat dimanfaatkan untuk penelitian struktur geologi di kompleks gunungapi Muria. Data digital yang dimaksud dalam gambar 7 merupakan data citra komposit warna Landsat 7 ETM+ multi band kawasan semenanjung Muria dan data penafsiran patahan. Sebagai contoh patahan Tempur dan Rahtawu yang merupakan dua buah patahan besar yang membelah puncak gunungapi Muria.

SIMPULAN

- Hasil penafsiran struktur geologi kompleks gunungapi Muria dari citra satelit menunjukkan bahwa arah dominan struktur adalah timurlaut-baratdaya. Hal ini



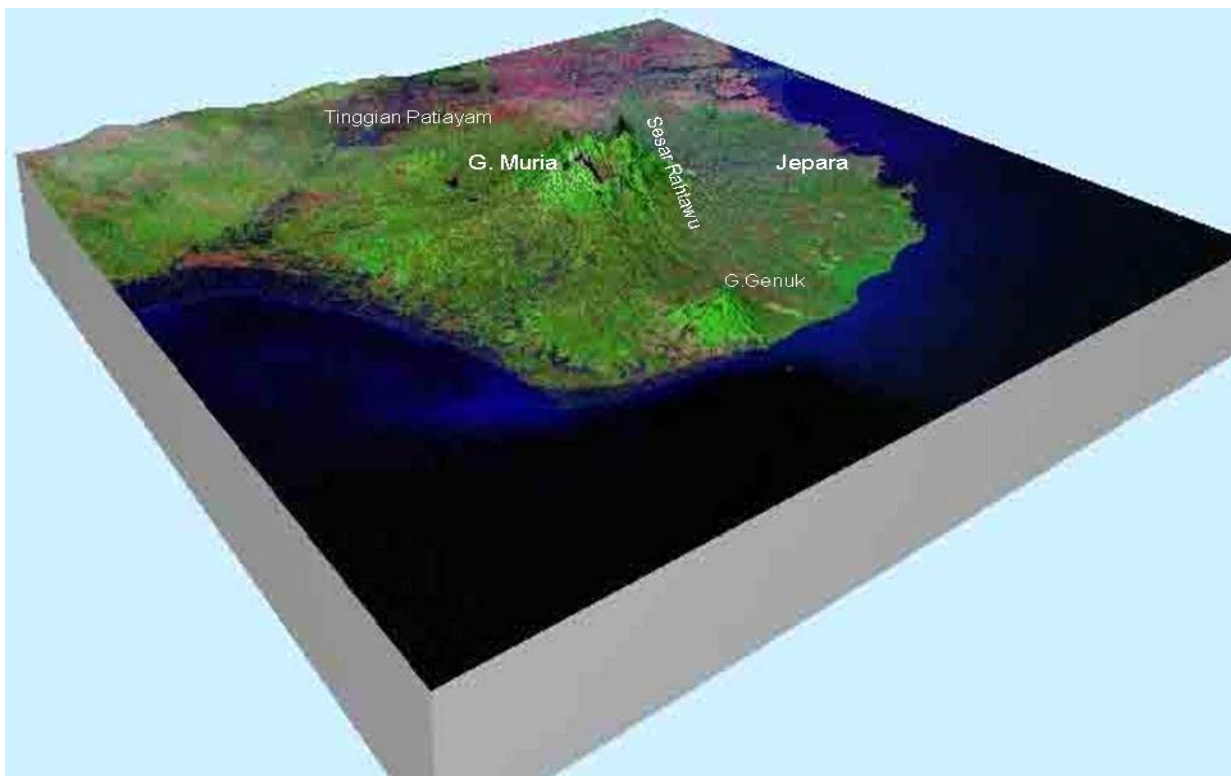
Gambar 6. Zona sesar Tempur, tampak segitiga faset dan kelurusan sungai Gelis yang terletak pada zona breksiasi

mengindikasikan bahwa struktur geologi yang berkembang terutama struktur patahan mengikuti pola kelurusan Meratus. Sedangkan struktur sesar Tempur dan sesar Rahtawau yang memotong Komplek Gunungapi Muria berarah utara – selatan diduga merupakan komponen struktur regangan.

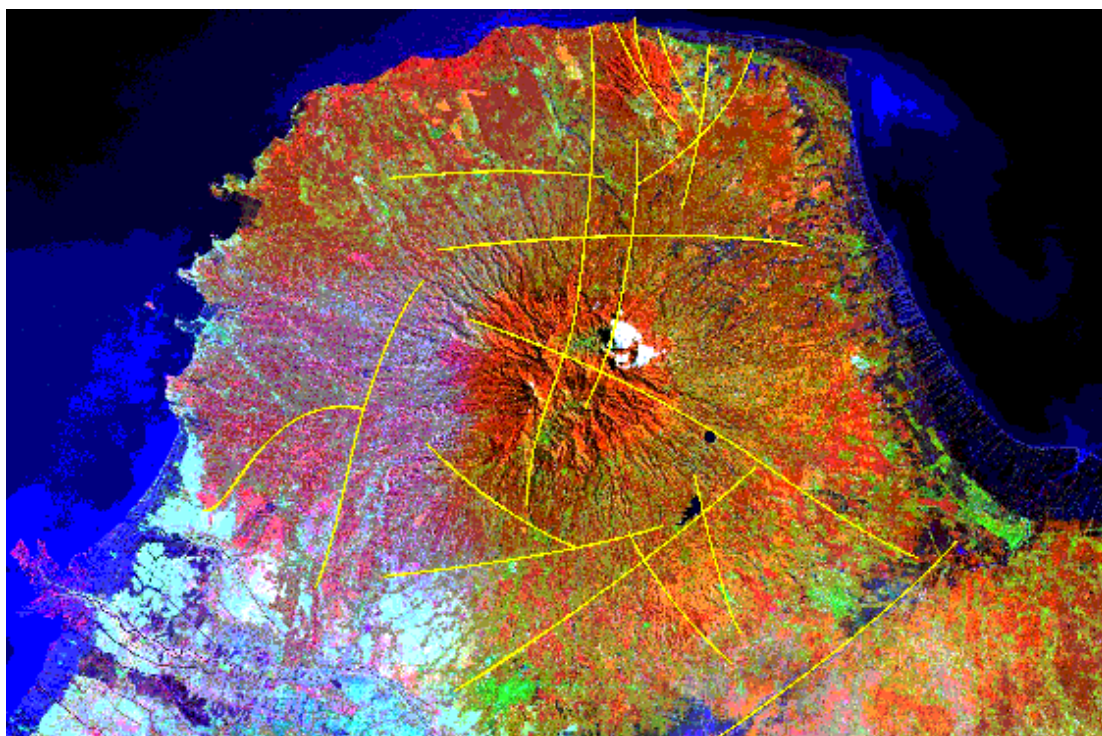
- Batuan beku berkadar potasium rendah di Komplek Gunungapi Muria diperkirakan merupakan produk lelehan magma bertemperatur tinggi hasil tektonik peregangan (*rifting/extension*). Sebaliknya produk batuan beku berkadar potasium tinggi diduga berasal dari magma bertemperatur relatif rendah atau hasil proses tektonik tekanan (*compression*).
- Berdasarkan sejarah tektonik yang berlangsung di daerah Muria berupa tetonik peregangan (Paleogen) dan tektonik inversi berupa tektonik tekanan (Neogen Akhir), maka batuan vulkanik berkadar potasium rendah boleh jadi berasal dari kegiatan ekstrusi pelelehan melalui bidang sesar Paleogen yang teraktifkan kembali. Sebaliknya batuan vulkanik bekadar potasium rendah boleh jadi berasal dari kegiatan intrusi pada fase tektonik tekanan Plistosen.

Ucapan Terima Kasih

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Soebardjio Tjokrosapetro MSc, Ir. Suwijanto dan Ir. T.A. Soeprapto MSc



Gambar 7. Identifikasi gawir patahan Rahtawau dengan menggunakan image gabungan 3 demensi antara Digital Elevation Model dan citra Landsat 7 ETM+.



Gambar 8. Image gabungan antara citra Landsat 7 ETM+ multi band dan penafsiran patahan di kawasan semenanjung Muria.

atas masukan serta diskusi mengenai struktur geologi dan citra satelit di daerah penelitian.

ACUAN

- Billings, M.P., 1979, Structural Geology, 3rd Ed. *Whitehall Books Limited, Wellington, New Zealand*.
- Casadevall, T.J., 1987, Muria Volcano, Central Java : Ideal site for Indonesia's first Nuclear Power Plan ?, A report to the director Volcanological Survey Indonesia.
- Soemarno, S., 1982, Penelitian Batuan Mengandung Kalium di Sekitar Gunung Muria (Jawa Tengah), Dengan Cara Geomagnet, Laporan Penelitian Sub Proyek Inventarisasi Sumberdaya Mineral, Lembaga Geologi dan Pertambangan Nasional-Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- Sribudiyani, Muchsin, N., Tyacudu, R., Kunto, T., Astono, P., Prasetya, I., Sapiie, B., Asikin, S. Dan Harsolumakso, A.H., 2003, The Collision of the East Java Microplate and its Implication for Hydrocarbon Occurences in the East Java Basin, Proceeding of the Indonesian Petroleum Association, Twenty-Ninth Annual Convention and Exhibisition.
- Sudiro, T.W., 1973, The structural units of the Java Sea, *Indon. Petroleum Assoc. Petroleum Geologist Conv., Houston, Texas*.
- Sukhyar, Mamay, S., Agus, B., dan Hirabayashi, J., 1998. New chemical data of gas and rocks from Muria volcanik complex Central Java, Indonesia. *Symposium on Japan – Indonesia IDNDR Project*.
- Soeria Atmadja R., Suparka S., Abdullah C., Noeradi D. & Sutanto, 1998, Magmatism in western Indonesia, the trapping of the Sumba block and the gateways to the east of Sundaland, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 16, no.1, p. 1-12.
- Suwarti, T., dan Wikarno, R., 1992. Peta Geologi Lembar Kudus, Jawa Lembar 1409 – 3 & 1409 – 6. . Skala : 1 : 100.000. *Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi*.