

STRUKTUR GEOLOGI SELAT MADURA JAWA TIMUR

GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE MADURA STRAIT, EAST JAVA

L. Arifin^{1*}, Susilohadi¹, D. Setiady¹, I. R. Silalahi¹, N. A. Kristanto¹,
P. Rahardjo¹, C. Purwanto¹

¹ Puslitbang Geologi Kelautan, Balitbang Kementerian ESDM

* Email: lukman.arifin@esdm.go.id

DOI: 10.32693/jgk.19.2.2021.737

Diterima : 25-11-2021, Disetujui : 07-12-2021

ABSTRAK

Penelitian dilakukan di perairan Selat Madura yang berada diantara Pulau Madura dan Jawa Timur. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui kondisi geologi dan pola sedimentasi yang ditafsirkan dari data rekaman seismik pantul. Orientasi struktur geologi Selat Madura berarah barat-timur, serupa dengan orientasi zona Kendeng di daratan Jawa Timur. Struktur antiklin yang berkembang di darat menerus hingga Selat Madura yang ditunjukkan di beberapa pulau seperti P. Kambing dan P. Ketapang yang merupakan puncak-puncak antiklin. Pada lereng selatan antiklin P. Gili Genting dan P. Gili Raja batuan berumur Pliosen Akhir dan batuan Quarter mencirikan adanya penurunan cekungan yang cepat dan menerus. Poros cekungan ini diperkirakan diisi oleh sedimen dengan ketebalan lebih dari 500 m, dimana pada bagian antiklin kemungkinan ditempati oleh batuan berumur Tersier Akhir sebanding dengan batuan yang tersingkap pada kedua pulau di atas.

Kata kunci: Struktur geologi, sedimentasi, cekungan, Selat Madura

ABSTRACT

The research carried out on the Madura Strait waters, which are between Madura and East Java islands. The purpose of the study was to determine the geological conditions and sedimentation patterns interpreted from seismic recording data. The orientation of the geological structure of the Madura Strait is west-east, similar to the orientation of the Kendeng zone on the mainland of East Java. The anticline structure that develops on land continues to the Madura Strait, shown on several islands such as P. Kambing and P. Ketapang, which are the peaks of the anticline. On the southern slope of the anticline of Gili Genting Island and Gili Raja Island, Late Pliocene and Quarter units showed a rapid and continuous basin subsidence. It is estimated that more than 500 m thick sediments on the basin axis. The Late Tertiary rocks similar to those exposed on the above two lands seem to form the anticlinorium.

Keyword: Geological structure, sedimentation, basin, Madura Strait

Kontribusi:

L. Arifin adalah kontributor utama pada makalah ini, sedangkan Susilohadi, D. Setiady, I. R. Silalahi, N. A. Kristanto, P. Rahardjo, C. Purwanto adalah kontributor anggota.

PENDAHULUAN

Daerah penelitian adalah kawasan Selat Madura yang dibatasi koordinat $07^{\circ}00'00''-07^{\circ}30'00''$ LS $112^{\circ}30'00''-114^{\circ}10'00''$ BT (Gambar 1). Selat Madura hingga perairan utara Bali merupakan kelanjutan zona Kendeng dan Randublatung dimana ke arah timur membentuk suatu cekungan memanjang barat-timur.

Daerah tersebut secara umum merupakan lembah sinklin yang dibatasi di bagian utara oleh Zona Rembang, yaitu P. Madura hingga Kepulauan Kangean, dan dibagian selatan oleh jajaran gunung api Kuartar Jawa Timur dan Bali Utara. Zona Kendeng hingga perairan utara Bali telah mengalami penurunan yang sangat cepat sejak jaman Pliosen yang kemungkinan berhubungan dengan adanya tekanan tektonik berarah utara-selatan. Endapan Plio-Plistosen sangat tebal di zona tersebut seperti ditunjukkan oleh dataseismic pantul dan data sumur eksplorasi migas. Selat Madura hingga perairan selatan Kepulauan Kangean, juga merupakan sub-cekungan dari Cekungan Busur Belakang Jawa Timur (*East Java Basin*) dan telah dieksplorasi secara mendalam sejak tahun 1970. Paling tidak di daerah tersebut terdapat 9 lokasi temuan cadangan minyak dan gas yang cukup ekonomis.

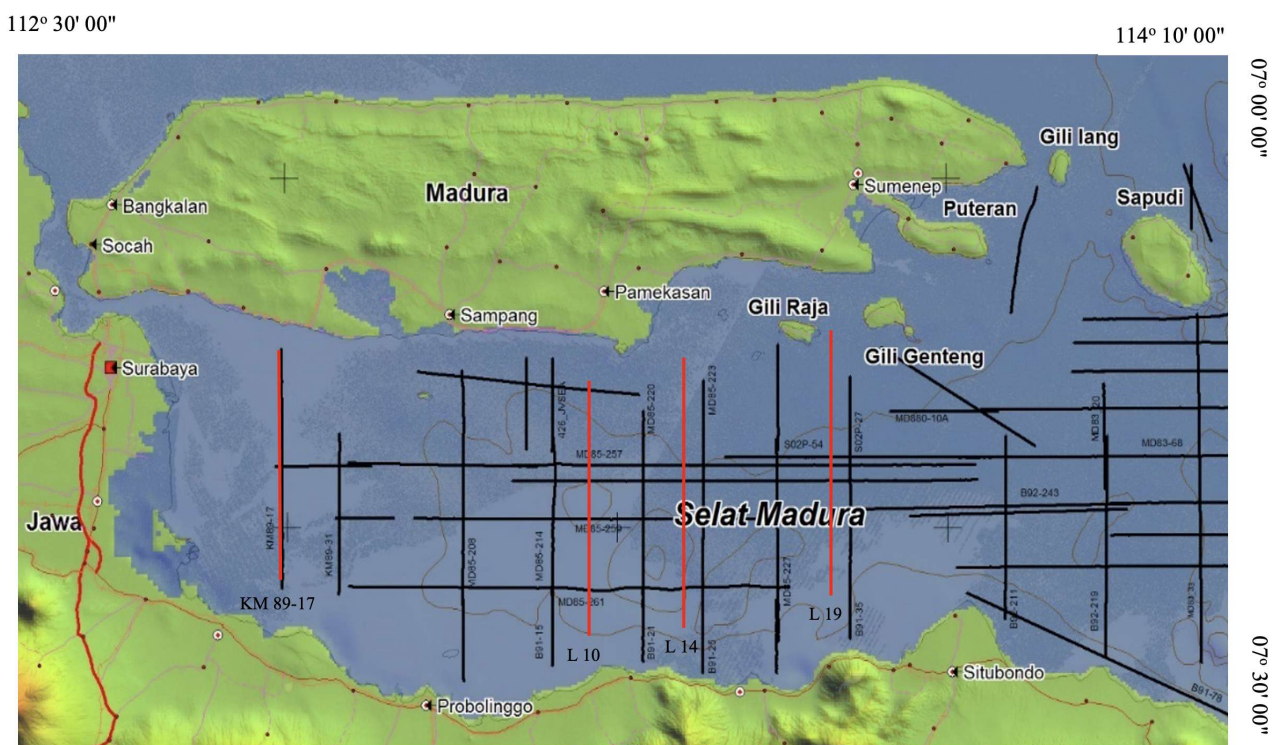
Penafsiran data seismik refleksi yang ditampilkan pada makalah ini adalah data yang telah diakuisisi oleh beberapa kontraktor migas yang bekerja di Jawa Timur dan data seismik dangkal yang diakuisisi oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan di Selat Madura dan perairan utara Bali.

GEOLOGI REGIONAL

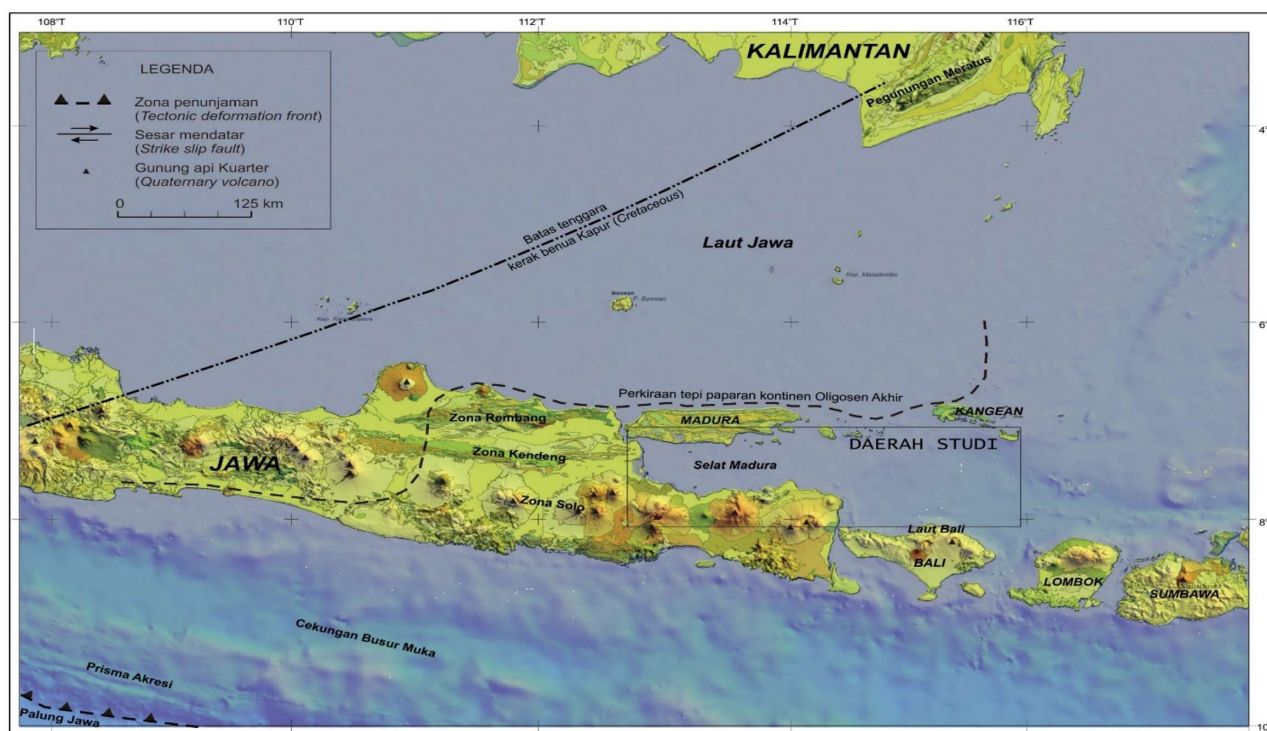
Tektonik dan fisiografi

Cekungan Jawa Timur berkembang sebagai cekungan busur belakang yang berada di utara jajaran gunung api aktif Jawa dan Bali. Bukti-bukti awal pembentukan cekungan tersebut berhubungan erat dengan awal dimulainya sistem penunjaman lempeng Indo-Australia di selatan Jawa. Hamilton (1977) menyebutkan bahwa penunjaman tersebut berawal pada Oligosen Akhir berdasarkan kenyataan bahwa sedimen-sedimen Eosen dan Oligosen di dekat tepi paparan Eurasia didominasi oleh sedimen non-vulkanik yang diendapkan pada paparan benua yang stabil. Pendapat tersebut didukung oleh Bauman (1972) dan de Genevraye dan Samuel (1972) dimana mereka menemukan bahwa sedimen Oligosen Akhir hingga Miosen Tengah di Jawa berfasies vulkanik, seperti Formasi Jampang di Jawa Barat dan Formasi Kerek yang berumur Miosen Akhir di Jawa Tengah dan Jawa Timur.

Sejumlah struktur tinggian berarah timur laut-barat daya dapat diamati di Laut Jawa bagian timur dan tampaknya mengikuti sistem penunjaman lama sebagaimana telah digambarkan oleh Hamilton (1979) pada Gambar 2. Struktur tersebut memanjang hingga Kalimantan selatan dimana batuan ultra basa terserpentinitkan tersingkap di kompleks pegunungan Meratus. Di Jawa bagian timur struktur geologi yang menonjol adalah setengah graben memanjang barat-timur di tengah P. Jawa, paralel dengan tepi lempeng saat ini, dimana sebagian dari padanya tertutupi oleh endapan gunung api Kuartar. Latar belakang tektonik di daerah ini



Gambar 1. Lokasi penelitian dan lintasan rekaman seismik



Gambar 2. Peta tektonik dan fisiografi sekitar lokasi studi yang didasarkan pada Hamilton (1979) dan van Bemmelen (1949).

telah digambarkan secara detail oleh Bransden dan Matthews (1992) bahwa struktur-struktur tersebut merupakan hasil sejarah geologi yang kompleks sebagai akibat pertemuan antara Lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia.

Secara fisiografi Jawa timur dan Laut Jawa bagian timur tersusun oleh suatu paparan yang memanjang dari utara P. Madura hingga Kepulauan Kangean (Gambar 2). Bagian selatan paparan tersebut merupakan cekungan yang meliputi Selat Madura hingga selatan Kepulauan Kangean dimana sebagian besar pengendapan Tersier dan Kuarter terjadi. Struktur geologi yang berkembang di bagian selatan Laut Jawa bagian timur dan cekungan di selatannya pada umumnya berarah barat-timur. Arah ini berbeda dengan orientasi struktur geologi yang berkembang di Laut Jawa bagian tengah yang dipengaruhi oleh zona penunjaman Kapur.

Fisiografi modern P. Jawa telah secara detail digambarkan oleh van Bemmelen (1949) dan dinyatakan sebagai hasil kegiatan tektonik selama Tersier dan Kuarter. Di Jawa Timur terdapat dua zona antiklin utama, zona Rembang dan zona Kendeng. Zona Rembang yang dikenal sebagai zona kaya minyak, tersusun oleh beberapa antiklin berorientasi barat-timur yang saling dipisahkan oleh paparan aluvial. Zona Rembang mempunyai lebar sekitar 50 km dan membentuk perbukitan dengan ketinggian hingga 500 meter. Zona tersebut menerus ke timur dengan membentuk P. Madura dan jajaran Kepulauan Kangean. Dibanyak tempat, perlipatan tersebut tererosi hingga menyingkap batuan-batuan Miosen, atau bahkan di atas batuan tersebut kemudian secara tidak selaras diendapkan batuan Plio-Plistosen yang umumnya bersifat gampingan.

Zona Kendeng juga dicirikan oleh sejumlah antiklin berorientasi barat-timur yang terbentuk sejak Plistosen Tengah. Ketinggian, lebar dan kerapatan antiklin di zona Kendeng secara perlahan berkurang ke arah timur dan tertutupi oleh paparan aluvial serta air laut di Selat Madura. Batas selatan dari zona Kendeng adalah depresi yang kemudian terisi oleh sedimen hasil kegiatan vulkanik Kuarter di zona Solo (Gambar 2).

Karakter satuan-satuan sedimen di zona Kendeng berbeda dengan satuan-satuan di zona Rembang, terutama pada komposisi mineralogi. Perbedaan tersebut mengindikasikan adanya dua sumber utama sedimen selama Tersier dan Kuarter. Sedimen klastik vulkanik sangat umum terjadi di zona Kendeng, namun sedimen hasil rombakan paparan Sunda lebih dominan di zona Rembang.

METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode seismik pantul dangkal saluran tunggal dan multi saluran. Data seismik pantul dangkal saluran tunggal diperoleh dengan menggunakan sumber daya ledakan Sparker 350 Joule dengan peledakan setiap detik dan sapuan perekaman 0,5 -1 detik. Pengolahan signal dilakukan pada saat survei dengan menggunakan bandpass filter akustik 200-2000 Hz. Selama perekaman data seismik, kapal survei Geomarin I dipandu oleh peralatan *GPS Magnavox MX 1157* yang pada saat tersebut (tahun 1990) mempunyai *update rate* posisi hingga 2 jam dan akurasi horisontal hingga 100 meter.

Data seismik multichannel (*multichannel seismic*) berasal dari Pusdatin KESDM. Data seismik multi saluran

tersebut telah dalam format Seg-Y dan tidak dilakukan pengolahan data lebih lanjut.

HASIL PENELITIAN

Interpretasi data seismik pantul dilakukan berdasarkan kriteria yang digariskan oleh Vail dkk. (1977), Mitchum, dkk. (1991), Sangree dan Widmier(1977). Akan tetapi sebagian dari kriteria metodologi tersebut memerlukan penyesuaian, terutama dalam melakukan interpretasi data seismik dangkal. Metodologi tersebut umumnya digunakan untuk interpretasi data seismik pada eksplorasi migas yang pada umumnya berada pada tepi paparan dengan kemiringan sedimentasi yang cukup jelas. Beberapa hal yang menjadi pertimbangan adalah:

- Selat Madura mempunyai kemiringan lereng yang rendah pada arah barat-timur
- Satuan sedimen umumnya tipis dan tersebar luas
- Perubahan muka laut yang sangat cepat pada kala Plistosen menjadikan penentuan *coastal onlap* pada rekaman seismik menjadi sangat sulit.

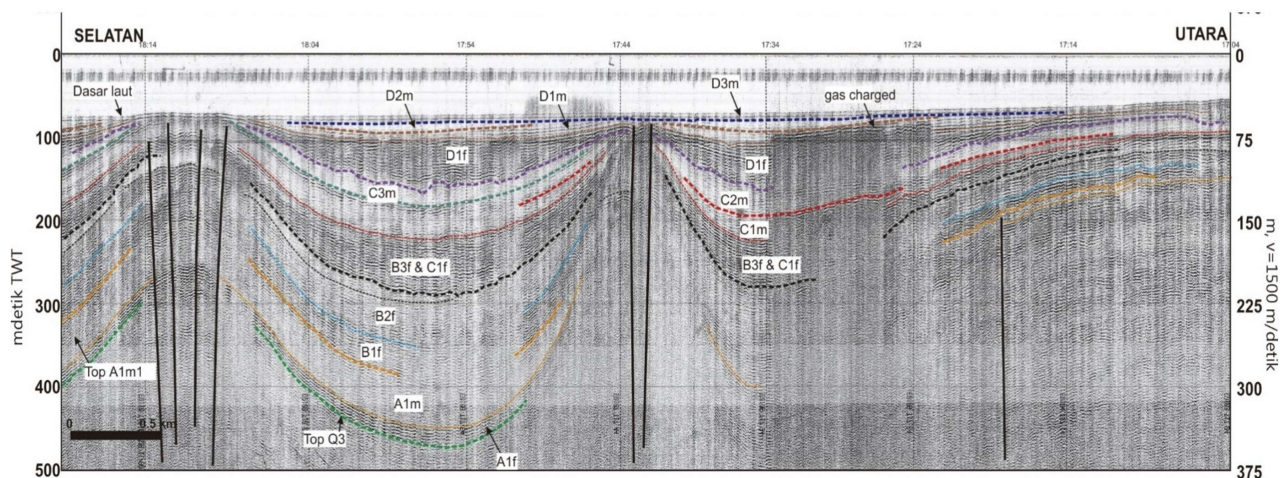
Ketiga hal tersebut menjadikan pemisahan satuan-satuan seismik didasarkan pada identifikasi permukaan erosi fluvial dan pemuncungan antiklin.

berasal Pusdatin KESDM(Gambar 4). Data seismik multi saluran tersebut telah dalam format Seg-Y dan tidak dilakukan pengolahan data lebih lanjut. Interpretasi terhadap data tersebut digunakan sebagai bahan diskusi sejarah sedimentasi Tersier.

Peta batimetri Selat Madura dapat dilihat pada Gambar 5, dimanasecara umum kedalaman dasar laut bertambah ke arah tengah selat dan membentuk lembah bawah laut. Beberapa tinggian lokal merupakan puncak-puncak antiklin atau struktur diapir yang tumbuh sejak akhir Plistosen. Gradien morfologi rata-rata di Selat Madura adalah 0,5 m/km pada arah barat-timur dan 2,2 m/km pada arah utara-selatan. Gradien morfologi dasar laut menjadi sangat curam di selatan deretan P. Sapudi, P. Raas dan Kepulauan Kangean hingga kedalaman kurang lebih 600 m, dan selanjutnya menjadi landai hingga kedalaman 1200 m di utara P. Bali.

Struktur Geologi Selat Madura

Tarikan lokal yang mengawali terbentuknya cekungan Jawa Timur terjadi pada awal Eosen. Pola umum sesar di Cekungan Jawa Timur adalah barat-timur. Dua zona sesar yang menonjol dan berperan dalam pembentukan Kepulauan Kangean, Sapudi dan P. Madura adalah Sesar Sakala dan Sesar Sepanjang. Kedua sesar tersebut juga menjadi batas selatan pusat pengendapan Paleogen di Kangean dan Lombok. Sesar Sakala berkembang di Kangean bagian timur hingga timur P.



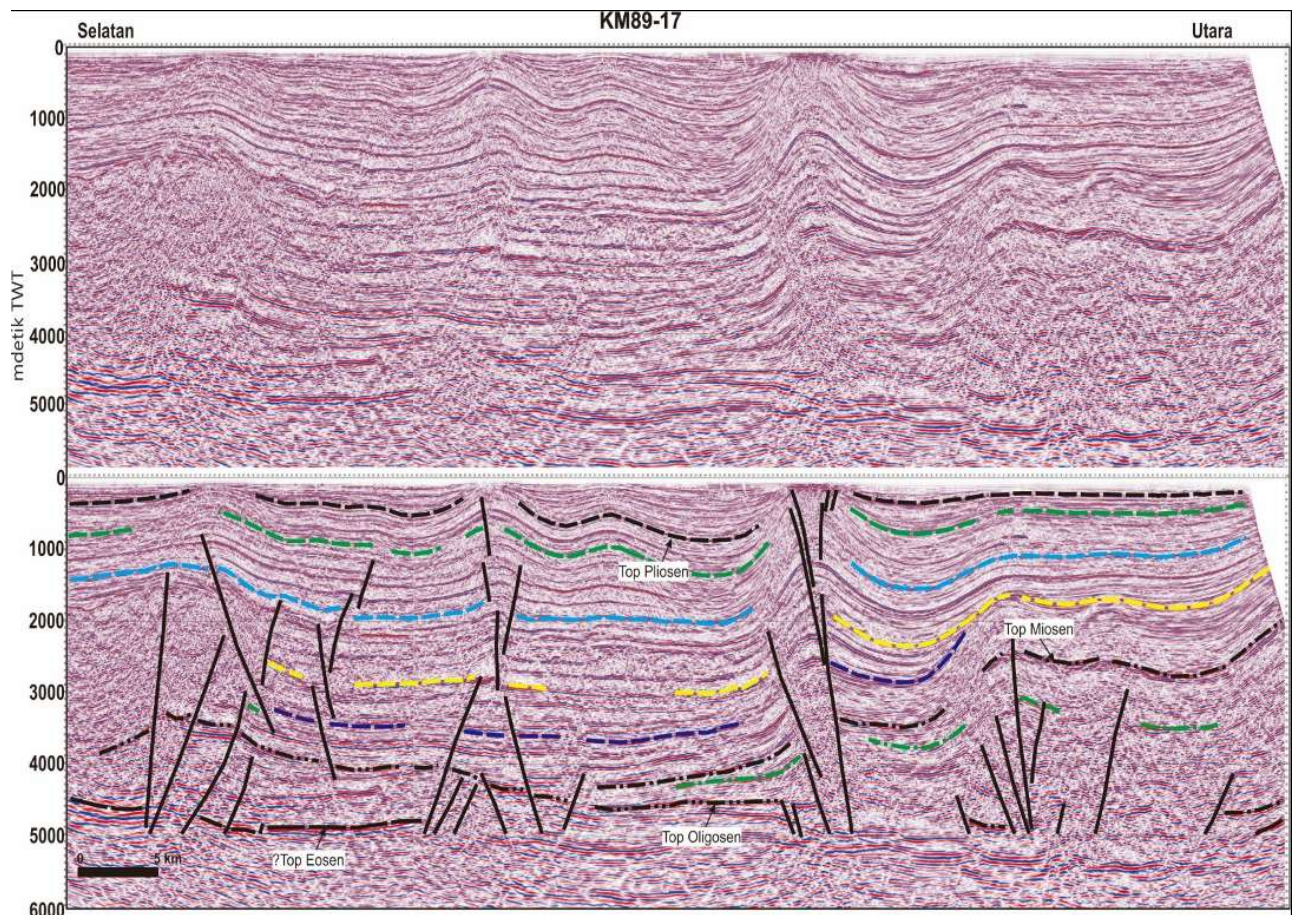
Gambar 3. Rekaman seismik dan interpretasinya di lintasan L10

Data rekaman seismik pantul dangkal resolusi tinggi yang ditafsirkan, ditampilkan pada Gambar 3. Rekaman seismik berada pada lintasan L10 dengan arah utara-selatan. Data tersebut mempunyai resolusi vertikal yang cukup tinggi, namun penetrasinya terbatas hingga sekitar 350 meter. Di beberapa tempat bahkan energi seismik mengalami pengurangan atau penghamburan sinyal yang diakibatkan oleh adanya gas terperangkap pada sedimen permukaan atau adanya sedimen berfraksi kasar/keras dengan impedansi akustik tinggi. Sehingga hanya sedimen berumur Plistosen yang dapat ditafsirkan.

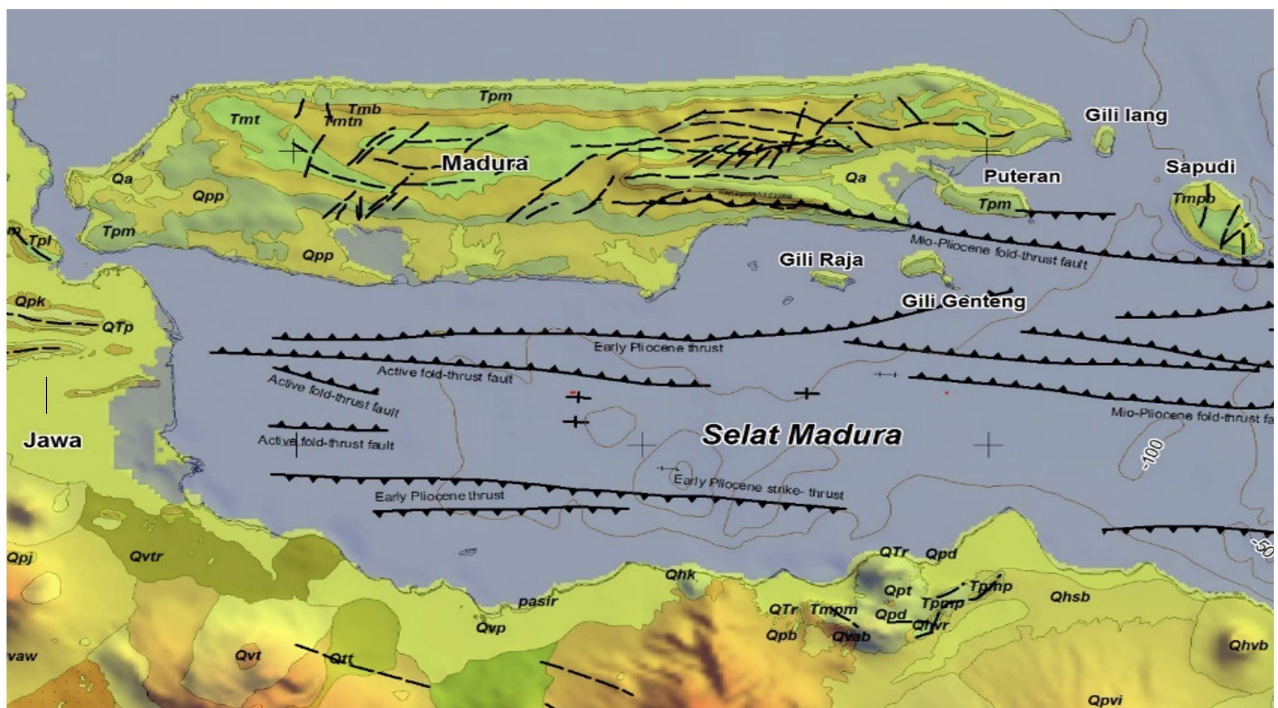
Data seismik dalam (*deep seismic*) merupakan hasil survei seismik multisaluran (*multichannel seismic*)

Sakala dan merupakan sesar naik dengan kemiringan ke arah selatan, namun di selatan P. Kangean keaktifan sesar tersebut kemungkinan berpindah ke arah selatan dengan kemiringan yang berlawanan.

Sesar Sepanjang berkembang lebih ke arah selatan dari Sesar Sakala. Jejak sesar tersebut dapat di urut dari P. Sepanjang di tenggara P. Kangean, melalui selatan Pulau-pulau Sapudi dan Raas, hingga zona perlipatan di utara Pamekasan di P. Madura. Pada kala Paleogen, Sesar Sepanjang di selatan P. Kangean ke arah timur berkembang sebagai sesar normal dan membentuk konfigurasi setengah graben dengan kemiringan ke arah utara, sehingga menjadi pusat pengendapan sedimen



Gambar 4. Rekaman seismik multisaluran dan interpretasinya di Lintasan KM 89-17



Gambar 5. Peta batimetri dan struktur geologi di Selat Madura yang berkembang sejak awal Tersier berdasarkan hasil penafsiran data seismik dangkal dan eksplorasi migas.

Paleogen. Proses inversi cekungan yang melibatkan pembalikan arah geser Sesar Sakala dan Sesar Sepanjang terjadi mulai akhir Oligosen hingga awal Miosen (Brandsen dan Matthews, 1992). Inversi tersebut kemungkinan berhubungan dengan perubahan konfigurasi zona penunjaman lempeng Indo-Australia yang bergeser ke arah selatan.

Di Selat Madura orientasi struktur geologi juga barat-timur, serupa dengan orientasi zona Kendeng di daratan Jawa Timur. Data seismik mengindikasikan bahwa struktur antiklin yang berkembang di darat menerus hingga Selat Madura, namun menjadi lebih sederhana dimana antiklin satu dengan lainnya dapat dengan mudah dipisahkan. Beberapa pulau, seperti P. Kambing dan P. Ketapang, merupakan puncak-puncak antiklin. Data seismik juga menunjukkan bahwa struktur antiklin yang berkembang umumnya juga merupakan representasi sesar naik yang berkembang sejak Mio-Pliosen, dan beberapa diantaranya masih aktif (Gambar 6). Diapir lumpur yang banyak dijumpai di Jawa Timur kemungkinan diakomodasi oleh struktur-struktur tersebut.

Sedimentasi dan Stratigrafi Tersier

Cekungan busur belakang sebagaimana halnya Cekungan Jawa Timur, pada umumnya dikontrol oleh pelengkungan kebawah dari tepi lempeng sebagai konsekuensi beban tektonik secara lokal, dan sedimentasi akan mengikuti penurunan cekungan tersebut Dickinson (1977). Di Cekungan Jawa Timur ketebalan sedimen dapat mencapai 5000 meter dan beberapa pemboran tidak dapat mencapai batuan dasar Lemigas/BEICIP (1969).

Berdasarkan data seismik dan pemboran hasil eksplorasi migas Brandsen dan Matthews (1992) telah membagi urutan sedimentasi Cekungan Jawa Timur kedalam 3 mega-urutan (*megasequence*). Mega-urutan I merupakan urutan pengendapan awal mula pembentukan cekungan di Jawa timur kemungkinan bersamaan dengan saat tumbukan benua India (yang merupakan bagian dari lempeng Indo-Australia) dengan benua Eurasia yang menyebabkan penurunan kecepatan konvergensi antara lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia dan bahkan tarik balik (*roll-back*) penunjaman. Tarikan yang membentuk cekungan di Jawa Timur kemungkinan telah dimulai pada Eosen Awal dan meluas pada Eosen Akhir. Tarikan tersebut umumnya diakomodasi oleh sesar-sesar berarah barat-timur, seperti Sesar Sakala dan Sesar Sepanjang.

Sedimentasi awal Eosen di Cekungan Jawa Timur dijumpai terbatas dan bersifat transgresi dari lingkungan darat hingga paparan pantai dan tepi laut, namun berkembang lebih luas pada akhir Eosen and dibeberapa wilayah menjadi berlingkungan batial (Brandsen dan Matthews, 1992). Setelah pengendapan tersebut terjadi pengangkatan dan penurunan muka laut relatif hingga mengakibatkan beberapa wilayah berada di atas permukaan laut. Bidang ketidak-selarasan tersebut dapat diamati dengan jelas pada penampang seismik (Gambar 4) Sumur-sumur eksplorasi migas di Selat Madura dan

perairan selatan Kangean pada umumnya tidak mencapai sedimen Eosen. Tetapi beberapa sumur di timur P. Madura mengindikasikan adanya paparan batuan karbonat yang tidak selaras berada di atas batulempung batial Eosen. Di daerah Ngimbang, Jawa Timur, sumur eksplorasi dapat mencapai batupasir Oligosen Tengah yang kemungkinan menerus hingga Selat Madura (Gambar 4). Muka laut kemudian cenderung bersifat transgresi hingga Oligosen Akhir dan cekungan Jawa Timur (P. Madura hingga Kep. Kangean) cenderung didominasi oleh pengendapan berfasies lempung gampingan dan batugamping. Namun ke arah selatan, Selat Madura dan perairan selatan Kep. Kangean, satuan batuan tersebut cenderung menipis atau bahkan tidak dijumpai. Pengendapan paparan karbonat (Fm. Prupuh) yang luas terjadi kemudian mengikuti perubahan muka laut pada akhir Oligosen.

Inversi cekungan terjadi pada akhir Oligosen hingga awal Miosen. Inversi yang diakomodasi oleh Sesar Sepanjang dan Sesar Sakala secara perlahan mengangkat P. Madura hingga Kepulauan Kangean. Sebaliknya wilayah di selatan Sesar Sepanjang mengalami penurunan yang kemungkinan karena beban tektonik. Wilayah ini kemudian menjadi pusat pengendapan sedimen Neogen sehingga di beberapa tempat mencapai ketebalan lebih dari 4 detik TWT.

Perubahan muka laut global Plio-Plistosen yang cepat dan ekstrim sangat berperan dalam pengendapan fasies sedimen yang diendapkan di Cekungan Jawa Timur. Namun area pengendapan sepenuhnya dikontrol oleh berkembangnya struktur geologi lokal di cekungan tersebut.

Satuan batuan Pliosen Akhir

Pada penampang seismik dangkal penetrasi sangat terbatas walaupun mempunyai resolusi yang tinggi. Sehingga Satuan batuan Tersier Akhir hanya dapat dipelajari pada penampang seismik yang berasal dari daerah dekat dengan pulau-pulau antiklin. Pada penampang seismik dekat dengan P. Gili Genting dan P. Gili Raja (Gambar 5) terdapat dua karakter seismik yang berbeda. Pada lereng selatan antiklin satuan Pliosen Akhir dan satuan Quarter mendominasi penampang sebagai akibat adanya penurunan cekungan yang cepat dan menerus, sehingga didapatkan lebih dari 500 m tebal sedimen pada poros cekungan. Pada bagian antiklin kemungkinan ditempati oleh batuan Tersier Akhir serupa dengan yang tersingkap pada kedua pulau di atas. Singkapan batuan tersebut, termasuk di P. Madura, telah dipetakan oleh Duyfjes (1938), Situmorang dkk. (1992), Aziz dkk. (1993). Di P. Madura terdapat 4 satuan stratigrafi sejak awal Miosen hingga Pliosen dan umumnya tersingkap di sepanjang lereng antiklin yang berarah barat-timur. Satuan tersebut adalah endapan paralik dan batugamping klastik Miosen Awal/Tengah yang ekuivalen dengan Formasi-Formasi Tawun dan Bulu; endapan Miosen Akhir/Pliosen berfasies lanau, batugamping terumbu dan batugamping klastik yang

secara lokal masing-masing disebut sebagai Formasi Pasean dan Formasi Madura. Formasi Pasean yang berfasies lanau secara stratigrafi ekuivalen dengan Formasi Mundu dan Kalibeng/Atasangin di zona Rembang dan Kendeng.

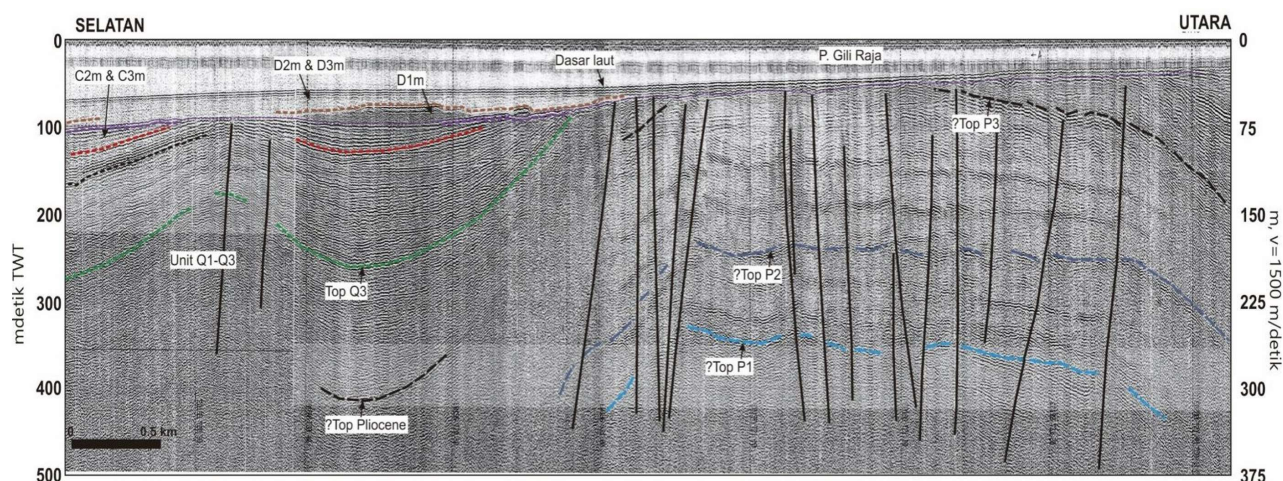
Subsatuan P1 dan P2

Bagian terbawah, satuan P2, terpotong oleh adanya ketidak-selarasan bersudut. Satuan tersebut memperlihatkan karakter reflektor seismik dengan amplitudo yang kuat dengan kontinuitas (*reflector continuity*) yang rendah, kecuali dibagian utara dimana reflektor-reflektor dengan amplitudo kuat dan kontinuitas tinggi dapat dijumpai. Satuan P2 menebal ke utara dan dicirikan oleh reflektor dengan amplitudo menengah berkontinuitas rendah. Beberapa pola reflektor *baselapping* dapat diamati dan umumnya memperlihatkan pola reflektor dengan amplitudo kuat, menerus dan tipis.

Berdasarkan korelasi dengan singkapan geologi di

tipis sisa erosi. Batugamping serupa tersingkap secara luas di sepanjang pantai selatan P. Madura dan intiantiklin yang menjadi P. Gili Raja dan P. Gili Genting, dan disebut sebagai Formasi Madura oleh Situmorang dkk. (1992) yang ekuivalen dengan Formasi Paciran. Dikedua pulau, fasies batugamping dilandasi oleh batulempung lanauan yang ditafsirkan sebagai subsatuan dalam P3 yang dicirikan oleh pola pantul subparalel dengan amplitudo rendah. Satuan ini menurut Situmorang dkk. (1992) adalah Formasi Pasean yang secara lateral ekuivalen dengan Formasi Mundu. Ke arah P. Madura satuan tersebut menipis dan menghilang.

Didaerah Kamal, P. Madura, fasies batugamping dapat diamati dengan baik dan mengindikasikan telah terendapkan dibawah pengaruh arus pasang-surut yang menghasilkan struktur sedimen *crossbedding* dari *sandwave* ukuran besar dengan kemiringan ke arah selatan. Duyfjes (1938) menggambarkan urutan batugamping yang berkembang di bagian barat P. Madura



Gambar 6. Interpretasi penampang seismik L19 arah selatan-utara melintasi pantai timur P. Gili Raja.

beberapa pulau terdekat, kedua satuan P1 dan P2, ditafsirkan masing-masing sebagai endapan paralik Miosen dan batugamping. Endapan paralik didominasi oleh batulempung yang kaya akan bahan organik dengan perselingan batupasir kuarsa dan batugamping klastik.

Keterdapatan foraminifera bentonik *Ammonia sp.*, *Brizalina sp.*, *Triloculina sp.*, *Quinqueloculina sp.*, *Eponides sp.* (Situmorang dkk., 1992) mengindikasikan bahwa lingkungan pengendapannya adalah *inner neritic*. Batugamping dalam satuan tersebut dicirikan oleh adanya foraminifera besar *Lepidocyclina sp.*, *Cycloclipeus sp.*, *Operculina sp.*, yang umumnya berasosiasi dengan gamping terumbu dan alga gampingan.

Subsatuan P3

Satuan P3 dicirikan oleh pola reflektor subparalel beramplitudo rendah dengan kontinuitas yang kuat. Ketebalan satuan tidak dapat ditentukan dengan tepat dikarenakan adanya erosi Plistosen Akhir yang kuat, tetapi mungkin lebih dari 300 m. Bagian atas satuan cenderung memperlihatkan amplitudo pantul yang kuat dan kemungkinan akibat adanya reflektor batugamping

sebagai fasies batugamping Lapisan Kalibeng Atas (*Upper Kalibeng Beds*). Secara stratigrafi batugamping tersebut ekuivalen dengan gamping terumbu dari Formasi Mundu. Pada sumur MS1-1 batugamping tersebut tidak dijumpai dan menunjukkan bahwa lingkungan laut dangkal hanya berkembang di sepanjang bagian selatan P. Madura pada kala Pliosen, ke arah selatan kemudian berkembang lingkungan laut yang lebih dalam.

Dibeberapa tempat di P. Madura, seperti: di timur Kamal, selatan Pamekasan dan P. Gili Raja, satuan batugamping ditutupi secara tidak selaras oleh batulempung karbonatan yang kaya bahan organik. Batuan tersebut serupa dengan Formasi Lidah yang umumnya tersingkap di daerah Mojokerto dan dijumpai pada sumur MS1-1. Berdasarkan posisi stratigrafi dan korelasinya dengan penampang seismik, batuan ini kemungkinan merupakan endapan lakustrin bagian dari satuan A pada penampang seismik Gambar 5. Analisa mikrofauna dari sampel darat di P. Gili Genting dan P. Madura menunjukkan bahwa umur Satuan P3 tidak lebih tua dari N19 (Pliosen Akhir) berdasarkan kehadiran *Pulleniatina obliqueloculata*. Lingkungan pengendapan

berdasarkan sampel darat tersebut adalah *inner neritic* hingga litoral berdasarkan kandungan genus *Elphidium* dan genera *Nonion* serta *Quinqueloculina*.

Sedimentasi dan Stratigrafi Plistosen

Di Selat Madura, orientasi struktur geologi menyerupai dengan Zona Kendeng di daratan sebelah baratnya, tetapi berangsur-angsur menjadi sederhana ke arah timur. Sebagian daristruktur tersebut berasosiasi dengan diapir lumpur, dan di Selat Madura sering menyertai struktur sesar.

Enamsatuan seismik dapat diidentifikasi pada dataseismik dangkal dari Selat Madura dan perairan selatan Kep. Kangean (Gambar 6), masing-masing satuan dapat terdiri dari dua atau lebih sub-satuan dengan karakter seismik berbeda dan sebaran yang luas. Keseluruhan satuan dilandasi oleh ketidakselarasan dan dapat dianggap mewakili urutan (*sequence*) seismik stratigrafi orde keempat dengan lama pengendapan kurang dari 1 juta tahun. Umumnya ketidakselarasan dasar (basal) berasosiasi karakter seismik yang cenderung chaotik dan ditafsirkan sebagai endapan fluvial berketebalan tipis namun tersebar luas yang kemungkinan merupakan representasi muka laut rendah selama Plistosen awal hingga tengah. Satuan A hanya dapat diamati pada beberapa lereng lipatan yang mengarah ke pulau-pulau dimana satuan batuan Pliosen tersingkap. Dasar satuan tersebut menumpang (*onlap*) pada sedimen Pliosen, sehingga dapat dianggap mewakili endapan Kuartar tertua.

Satuan batuan Plistosen Awal

Satuan batuan Plistosen Awal terdiri dari sub-satuan

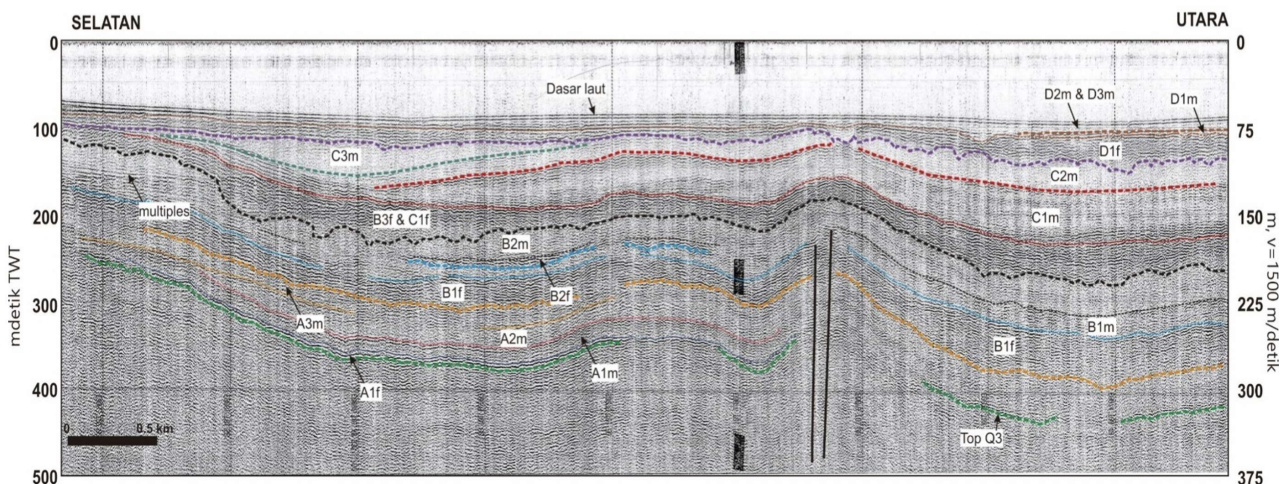
Selat Madura, namun cukup dapat dibedakan pada rekaman seismik multichannel (*multichannel*) yang diambil di perairan selatan Kep. Kangean dimana penurunan cekungan pada kala Plistosen sangat cepat.

Pada kebanyakan rekaman seismik dangkal yang dipelajari satuan Q3 cenderung memperlihatkan pola pantul *chaotic* pantul beramplitudo lemah dan onlap pada satuan Pliosen (Gambar 6). Pola paralel dan subparalel dikombinasikan dengan amplitudo sedang dengan frekuensi dan kontinuitas tinggi juga terjadi pada bagian atas satuan.

Bila dibandingkan dengan geologi di daratnya, menunjukkan bahwa satuan ini merupakan batulempung gampingan yang mengandung sisa tanaman, lignit dan pirit. Fasies yang sama juga tersingkap di beberapa tempat pantai selatan P. Madura (timur Kamal dan selatan Pamekasan) dan P. Gili Raja, dan secara stratigrafi berada di atas satuan gampingan Formasi Pasean dan Formasi Madura secara tidak selaras. Satuan ini kemungkinan merupakan ekstensi Formasi Lidah ke arah timur. Formasi Lidah merupakan endapan lakustrin yang berkembang secara luas di Zona Rembang dan Zona Kendeng. Perkembangannya ke arah Selat Madura tampaknya dibatasi oleh bentuk cekungan dari selat tersebut. Hubungan ketidak-selarasan dengan satuan di bawahnya mungkin mencerminkan adanya perubahan muka laut.

Satuan batuan Plistosen Tengah dan Akhir

Berdasarkan hasil interpretasi data seismik dangkal di seluruh Selat Madura hingga perairan selatan Kep. Kangean dapat dikelompokkan adanya 4 siklus besar pengendapan Plistosen Tengah dan Akhir. Ketiga siklus tersebut, A, B, C, dan D, selalu diawali dengan susut laut



Gambar 7. Interpretasi penampang seismik L14 yang menunjukkan empat siklus sedimentasi: A, B, C, dan D, yang berkembang di Selat Madura.

Q1, Q2, dan Q3. Satuan Q3 merupakan satuan terdalam yang dapat dijangkau oleh data seismik dangkal dan hanya dapat diamati pada lereng antiklin yang membentuk beberapa pulau di timur P. Madura dimana batuan Pliosen tersingkap. Satuan-satuan Q1 dan Q2 tidak dapat diamati pada rekaman seismik yang berasal dari

yang berlangsung meluas hingga menyingkap seluruh Selat Madura dan sebagian wilayah perairan selatan Kep. Kangean (Gambar 7) sebagai akibat perubahan muka laut Kuartar yang cepat dan ekstrim. Keempat siklus tersebut dapat diamati Selat Madura, namun semakin ke arah timur hanya siklus C dan D yang dapat diamati karena

energi seismik yang terbatas dibandingkan dengan batimetri yang semakin dalam.

Bagian atas subsatuan Q3 kemungkinan merupakan bidang erosi akibat penurunan muka laut relatif yang meluas. Penurunan tersebut mengawali berlangsungnya keempat siklus

kala Plistosen kemungkinan berada pada kedalaman tidak lebih dari 80 meter dan sedangkan perubahan muka laut Kuartar bervariasi dari 0 hingga lebih dari 100 meter, maka sedimen Plistosen yang terendapkan cenderung memperlihatkan dua fasies darat atau laut.

KESIMPULAN

Orientasi struktur geologi di Selat Madura berarah barat-timur, serupa dengan orientasi zona Kendeng di daratan Jawa Timur. Data seismik mengindikasikan bahwa struktur antiklin yang berkembang di darat menerus hingga Selat Madura, namun menjadi lebih sederhana dimana antiklin satu dengan lainnya dapat dengan mudah dipisahkan. Beberapa pulau, seperti P. Kambang dan P. Ketapang, merupakan puncak-puncak antiklin. Data seismik juga menunjukkan bahwa struktur antiklin yang berkembang umumnya juga merupakan representasi sesar naik yang berkembang sejak jaman Mio-Pliosen, dan beberapa diantaranya masih aktif. Diapir lumpur yang banyak dijumpai di Jawa Timur kemungkinan diakomodasi oleh struktur-struktur tersebut.

Sedimen Kuartar secara luas tersingkap di daratan Jawa Timur sepanjang zona antiklin Kendeng. Korelasi lateral zona tersebut dengan sedimen Kuartar di Selat Madura dimungkinkan karena keduanya sejak Pliosen telah tumbuh sebagai satu cekungan memanjang. Satuan batuan Kuartar, umumnya diendapkan pada satuan batuan Pliosen yang tersingkap di pulau-pulau sekitarnya. Setelah pengendapan satuan Kuartar tersebut, dari rekaman seismik menunjukkan adanya fluktuasi perubahan fasies seismik yang kemungkinan merupakan representasi perubahan muka laut global cepat dan ekstrim sejak kurang lebih 800 ribu tahun terakhir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kapuslitbang Geologi Kelautan yang telah memberikan izin pembuatan makalah ini untuk dipublikasikan. Tak lupa ucapan terima kasih saya sampaikan kepada rekan-rekan sejawat yang telah memberikan masukan dan koreksi sehingga makalah ini dapat diselesaikan.

DAFTAR ACUAN

- Aziz, S., Sutrisno, Noya, Y. and Brata, K., 1993. *Geology of the Tanjungbumi and Pamekasan Quadrangle, Jawa*. Bandung, Geological Research and Development Centre, 11 p.
- Baumann, P., Oesterle, H., Suminta and Wibisono, 1972. *The Cenozoic of Java and Sumatra. Proceeding*

of the Indonesian Petroleum Association, 1st Annual Convention June 1972, p. 31-42.

- Brandsen, P.J.E., Matthews, S.J., 1992. Structural and stratigraphic evolution of the East Java Sea, Indonesia. *Proceedings Title : Proc. Indon. Petrol. Assoc., 21st Ann. Conv., 1992*.
- De Genevraye, P. and Samuel, L., 1972. Geology of the Kendeng Zone (Central and East Java). *Proceeding of the Indonesian Petroleum Association, 1st Annual Convention June 1972*, p. 17-30.
- Dickinson, W.R., 1977. Tectono-Stratigraphic Evolution of Subduction-Controlled Sedimentary Assemblage. In Talwani, M. and Pitman III, W.C., (eds). *Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back-Arc Basin*, p. 33-40, American Geophysical Union, Maurice Ewing Series 1.
- Duyfjes, J., 1936. Zur Geologie und Stratigraphie des Kendenggebietes Zwischen Trinil und Soerabaja (Java). *De Ingenieur in Nederlandsch Indie*, v. 3, sect. IV, p. 136-149.
- Hamilton, W.B., 1979. *Tectonics of the Indonesian Region*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1078, 345 p.
- Lemigas/BEICIP, 1969. *North-East Java Basin: Evaluation of Petroleum Possibilities*. Lemigas, unpublished, 114 p.
- Mitchum, Jr., R.M. and Van Wagoner, J.C., 1991. *High-Frequency Sequences and Their Stacking Patterns: Sequence-Stratigraphic Evidence of High-Frequency Eustatic Cycles*. *Sedimentary Geology*, v. 70, p. 131-160.
- Raymo, M.E., Mitrovica, J.X., O'Leary, M.J., DeConto, R.M., Hearty, P.J., 2011. Departures from eustasy in Pliocene sea-level records. *Nature Geoscience*, v. 4, p. 328-332.
- Sangree, J.B. and Widmier, J.M., 1977. *Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 9: Seismic Interpretation of Clastic Depositional Facies*. In Payton, C.E., (ed.). *Seismic Stratigraphy - Application to Hydrocarbon Exploration*, p. 165-184. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26.
- Situmorang, R.L., Agustianto, D.A. and Suparman, M., 1992. *Geology of the Waru-Sumenep Quadrangle, Jawa*. Bandung, Geological Research and Development Centre, 16 p.
- Vail, P.R., Mitchum, Jr., R.M., Todd, R.G., Widmier, J.M., Thompson, III, S., Sangree, J.B., Bubb, J.N. and Hatlelid, W.G., 1977. *Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level*. In Payton, C.E., (ed.). *Seismic Stratigraphy -*

Application to Hydrocarbon Exploration, p. 49-212. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 26.

Van Bemmelen, R.W., 1949. *The Geology of Indonesia*: vol. 1. The Hague, Martinus Nijhoff, 732 p.

