

IDENTIFIKASI PENURUNAN SIFAT FISIK ENDAPAN SEDIMEN DELTA CIMANUK BERDASARKAN DATA STRATA BOX

IDENTIFICATION OF SEDIMENT PROPERTIES DEGRADATION OF DELTA CIMANUK DEPOSIT BASED ON STRATA BOX DATA

Riza Rahardiawan

Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan, Kementerian ESDM
Jln. Dr. Junjuran No. 236 Bandung 40174
Pos-el: riza_mgi@yahoo.com

ABSTRACT

Knowledge on physical properties of seafloor sediments is essential in planning offshore construction, in particular oil and gas construction. Changes in the physical properties of sediments such as faults and fractures, as well as the presence of gas within seafloor sediments can be detected as a decrease in acoustic wave velocity due to reduction in sediment shear strength. Normalization of Cimanuk River in early 1980s has resulted in higher sediment influx and increasing rate of compaction that change the physical properties of the sediment. Analysis of amplitude and wave velocity using software SonarWiz 5 on the records obtained from sounding equipment: Sub-Bottom Profiler type ODEC Strata Box and Bathy 1500, show significant change in wave speed that is caused by shallow gas seepage associated with fractures in the Polygonal Fault System (PFS). This fault system formed as a result of diagenetic processes of fine grain sediment and reduction of the sediment shear strength due to accumulated sediment cover. Shallow gas seepage itself is commonly found in organic-rich marine sediments and are usually composed of methane.

Keyword: *Sediment Properties, Cimanuk Delta, Strata Box*

ABSTRAK

Kondisi sifat fisik sedimen sangat penting dalam perencanaan pekerjaan konstruksi bangunan lepas pantai, khususnya sektor migas. Perubahan sifat fisik sedimen seperti patahan dan rekahan, serta keberadaan kandungan gas dalam sedimen dasar laut dapat terdeteksi sebagai penurunan kecepatan gelombang akustik akibat penurunan kuat geser sedimen. Normalisasi sungai Cimanuk pada awal dekade tahun 1980-an telah mengakibatkan tingginya pasokan sedimen, peningkatan kecepatan pemadatan, dan mengakibatkan terjadinya perubahan sifat fisik sedimen. Analisis besaran amplitudo dan kecepatan gelombang menggunakan *software SonarWiz 5* pada hasil rekaman peralatan pantul gema *Sub-Bottom Profiler* tipe *ODEC Strata Box* dan *Bathy 1500*, menunjukkan adanya perubahan kecepatan gelombang yang sangat signifikan yang disebabkan asosiasi rembesan gas dangkal dengan rekahan dalam Sistem Patahan Poligonal (PFS). Sistem patahan ini terbentuk sebagai akibat diagenesa sedimen yang didominasi oleh butiran berukuran halus dan penurunan kekuatan geser sedimen akibat pembebanan sedimen di atasnya. Rembesan gas dangkal sendiri merupakan gas umum dijumpai pada sedimen dasar laut kaya organik dan biasanya tersusun oleh metana.

Kata kunci: Sifat Fisik Sedimen, Delta Cimanuk, Strata Box

PENDAHULUAN

Delta Cimanuk saat ini merupakan delta yang berkembang di bagian barat akibat normalisasi Sungai Cimanuk pada 1980-an. Sebelumnya,

aktivitas pembentukan delta terkonsentrasi di bagian timur. Secara fisiografi kawasan delta ini terletak pada lajur dataran rendah pantai utara P. Jawa,¹ dan berada pada ketinggian 0–6 m di

atas muka laut.² Pola aliran sungai dendritik dan anastomatik dengan beberapa percabangan di sekitar muara. Sungai Cimanuk bercabang dua sebelum memasuki Kota Indramayu, yaitu Sungai Cimanuk yang mengalir ke timur laut dan Kali Anyar yang mengalir ke barat laut. Pada dekade 1980-an aliran air ke Sungai Cimanuk di bagian timur dimatikan sehingga delta saat ini hanya berkembang ke arah barat.

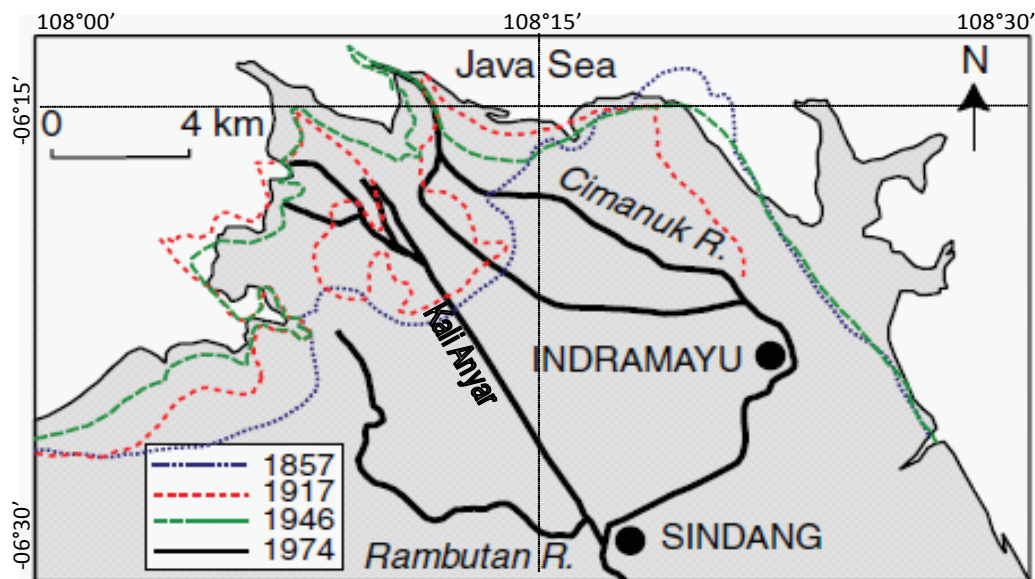
Perubahan garis pantai di daerah penelitian diketahui berhubungan dengan perubahan aliran S. Cimanuk, Hehanussa, dan Hehuwat,³ serta Lavigne dan Gunnell⁴ merekonstruksi garis pantai Delta Cimanuk tahun 1857 hingga 1974 lihat Gambar 1.

Peningkatan asupan sedimen akibat perubahan muara sungai menjadi satu muara telah menyebabkan pepadatan terlalu cepat dan perubahan sifat fisik sedimen. Cartwright dan Lonergan⁵ memperlihatkan pepadatan sedimen oleh penumpukan sedimen di atasnya akan membentuk sistem patahan poligonal (PFS). Sedangkan Watterson⁶ dan Nicol. et al⁷ menyatakan perubahan kepadatan sedimen secara cepat akan mempercepat pembentukan PFS, dan diperkuat oleh Gouly⁸ yang menyatakan perkembangan *fault growth* dan akumulasi *strain* dalam sedimen sangat dikontrol oleh kelakuan pergeseran residual dari bidang patahan minor di bawah tekanan gravitasi.

Perubahan sifat fisik sedimen juga dapat terjadi akibat keberadaan gas dalam sedimen, di mana tingginya sedimen kaya organik akan mempercepat pembentukan gas metana dalam sedimen. Berdasarkan percobaan laboratorium,⁹ menyatakan gas dalam sedimen akan melemahkan kondisi fisik sedimen (kekuatan geser sedimen). Peralatan *sub-bottom profiles* (SBP) dapat melihat adanya konsentrasi gas (~0.1% kadar gas bebas), yaitu dengan melihat naiknya atenuasi tekanan, dan turunnya kecepatan energi akustik.^{10,11} Selain itu lapisan sedimen kaya gas juga dapat melemahkan energi akustik dan mengakibatkan hilangnya penetrasi gelombang suara, yang akhirnya akan membentuk area penutup (*acoustic blanking zone*).^{12,13}

Penggunaan peralatan *Sub-Bottom Profiler tipe ODEC StrataBox* 10 kHz dan *Bathy* 1500 3,5 kHz ditujukan untuk memperoleh hasil rekaman dengan penetrasi dangkal dan resolusi tinggi. Sehingga sesuai untuk melihat perkembangan Delta Cimanuk saat ini, keberadaan patahan dangkal, dan rembesan gas sekitar muara sungai.

Karya tulis ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi perubahan sifat fisik sedimen sekitar muara S. Cimanuk sesudah dilakukan normalisasi, dan (2) mengetahui sistem progradasi endapan deltaik saat ini.



Gambar 1. Perubahan garis pantai Delta Cimanuk berdasarkan.^{3,4}

METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian berada dalam Kecamatan Eretan, Kabupaten Indramayu dan merupakan bagian delta baru dari sistem Delta Cimanuk dapat dilihat pada Gambar 2. Secara geografis berada pada $6^{\circ}10' - 6^{\circ}17' \text{ LS}$ dan $108^{\circ}10' - 108^{\circ}20' \text{ BT}$, dengan waktu penelitian dilaksanakan selama 21 hari pada bulan November 2011.

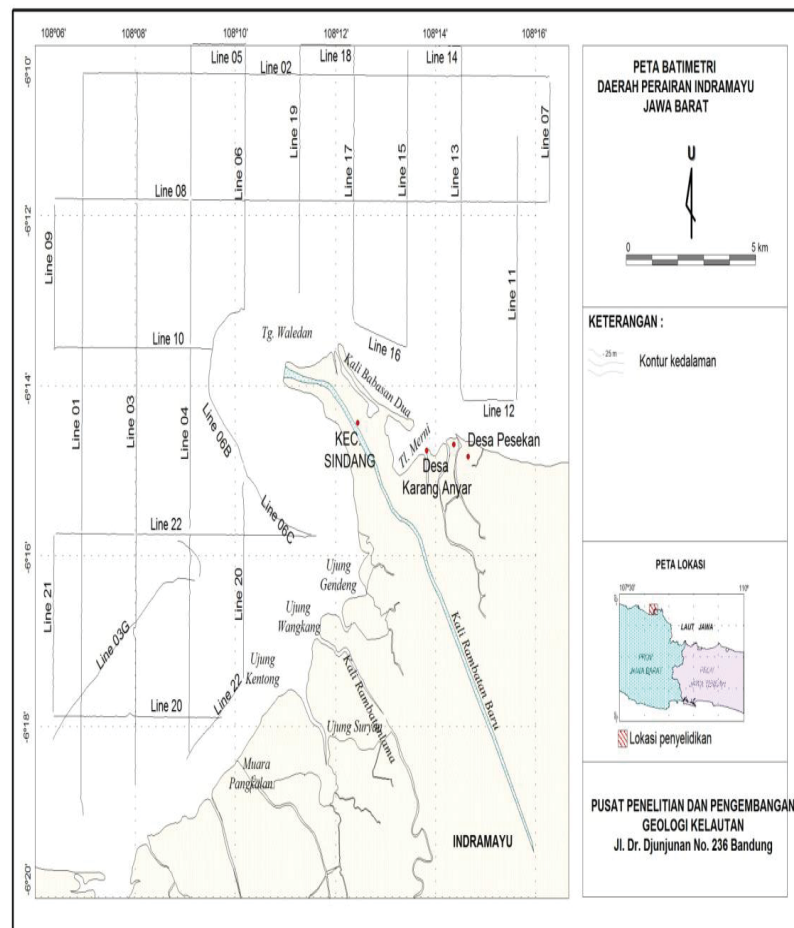
Penentuan posisi kapal ditentukan dengan Sistem GPS *short range* Trimble DSM 132 dengan *software* navigasi *HydroPro*. Panjang lintasan survei mencapai 182,2 km. Dengan perekaman data dilakukan persatu detik sesuai dengan perencanaan yang telah dipersiapkan. *Plotting* lintasan dilakukan dalam *software* navigasi, dengan *monitoring* terhadap lintasan dapat dilakukan secara *real-time* pada layar monitor.

Sub-Bottom Profiler (SBP) *Strata Box* dan echosounder *Bathy 1500* menggunakan prinsip gelombang akustik frekuensi tunggal 10kHz

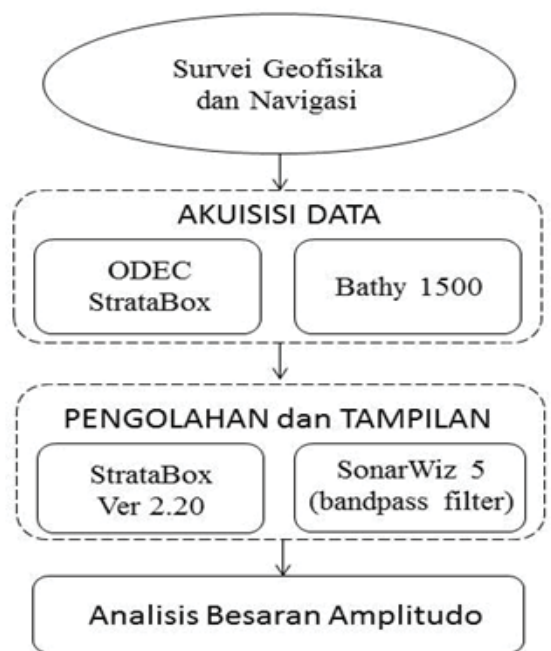
dan 3.5kHz sehingga energi yang diteruskan ke dasar laut dapat menembus lapisan sedimen fraksi halus, di mana waktu dan kekuatan pantulan akan merefleksikan peralihan sedimen.

Dalam pelaksanaan survei, *transducer Strata Box* dan *echosounder Bathy 1500* diletakkan di sisi kapal pada kedalaman 1,2 meter di bawah permukaan air. Pada bagian atas *transducer* dipasang antena navigasi untuk menghilangkan kesalahan *offset*. Data echosounder *Bathy 1500* langsung dikoreksi dengan data pasang surut dan digunakan untuk mendapatkan data kedalaman laut sebagai bahan pembuatan peta batimetri, mengetahui morfologi dasar laut.

Pemrosesan dan analisis data SBP tipe *Strata Box* dan *Bathy 1500* memanfaatkan *software SonarWiz 5*, yang diperlihatkan oleh diagram alir pada Gambar 3. Pengamatan data SBP dilakukan secara visual terhadap penerusan reflektor (*reflector continuity*), kekuatan amplitudo, dan kontras perubahan sifat bidang refleksi.



Gambar 2. Lokasi penelitian dan lintasan pengambilan data di muara S. Cimanuk



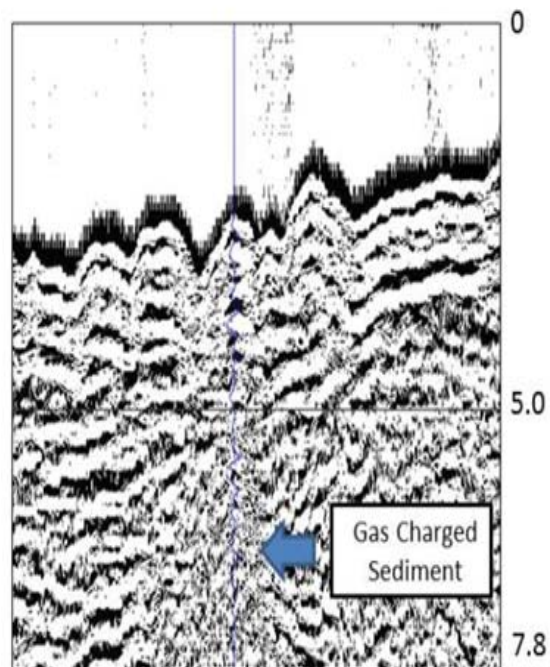
Gambar 3. Diagram alir yang dipergunakan dalam pengambilan data, pemrosesan dan analisis data *Sub-Bottom Profiler* tipe *StrataBox* dan *Bathy 1500*.

Interpretasi rekaman SBP didasarkan pada parameter refleksi pantulan gelombang akustik, selanjutnya disebut dengan Runtunan Stratigrafi (*Stratigraphic Unit*), yaitu penentuan atau pengenalan batas runtunan berdasarkan sifat reflektor tegas dan menerus atau suatu bidang ketidakselarasan, di mana batas runtunan pengendapannya ditandai oleh identifikasi internal reflektor, seperti *onlap*, *downlap*, *toplap*, dan *truncation*.¹⁴

Data *Bathy 1500* harus melalui proses konversi data hasil rekaman (.odc) menjadi data (.seg), selanjutnya di proses dengan *Software SonarWiz 5* dengan melakukan *filtering* dan penguatan sinyal dengan penambahkan *gain*, sehingga akan dapat diketahui besaran amplitudonya, lihat Gambar 4.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Informasi kondisi geologi bawah permukaan memiliki peranan penting dalam pekerjaan geoteknik, khususnya perencanaan bangunan lepas pantai. Korelasi batimetri dan morfologi dasar laut dengan interpretasi penampang SBP (*sub bottom profiling*) dapat memberikan informasi secara



Gambar 4. Contoh hasil rekaman *Bathy 1500* 3.5kHz Lintasan # 05 setelah melalui *filtering* dan penguatan *gain*, memperlihatkan hancurnya perlapisan sedimen oleh *gas charged sediment*.

komprensif runtunan stratigrafi dan penurunan sifat fisik sedimen.

Batimetri dan Morfologi Dasar Laut

Daerah penelitian memiliki kedalaman laut maksimum 31 m di bagian utara, berjarak sekitar 5,3 km dari garis pantai. Gambar 5 memperlihatkan Peta Kontur Batimetri dengan pola kontur bagian utara dan barat mulut sungai mengikuti bentuk garis pantai, dengan kemiringan lereng paling terjal dijumpai di muka Kali Baru yaitu terjadi perubahan signifikan kedalaman dari 5 m menjadi 20 m sekitar 1,2 km dari garis pantai. Kontur dengan kemiringan landai dijumpai di bagian utara dan barat daya muara

sungai, di mana untuk mencapai kedalaman 5 m berada sekitar 2.4 km dari garis pantai. Berdasarkan pola dan kerapatan konturnya dapat diperkirakan bahwa pengendapan utama sedimen dari S. Cimanuk berada di bagian barat daya–selatan muara sungai.

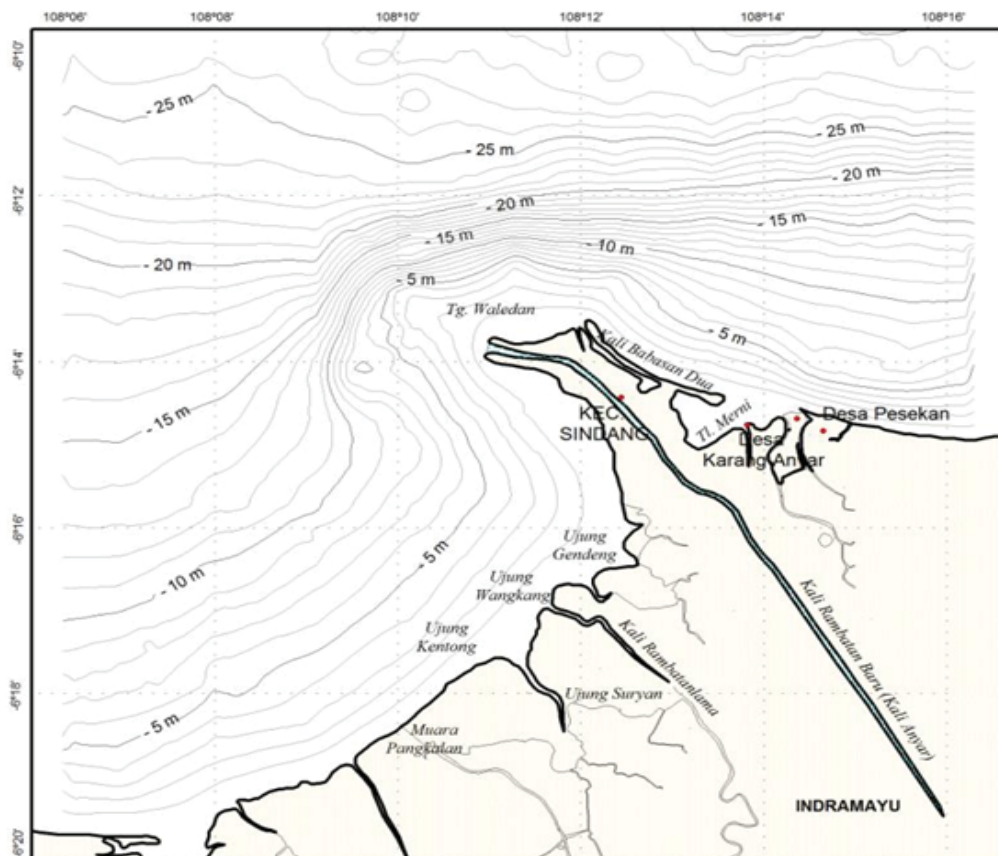
Runtunan Stratigrafi

Hasil rekaman SBP *StrataBox* dapat mengidentifikasi runtunan stratigrafi sedimen berumur Resen-Holosen dari Delta Cimanuk dengan sangat baik. Walaupun terdapat beberapa faktor pembatas, yaitu: kedalaman air relatif dangkal, dan keberadaan *acoustic blanking zone*. Sehingga penulis sulit melihat perkembangan sedimentasi (endapan deltaik) berumur Resen di sekitar muara S. Cimanuk.

Terdapat 3 tiga runtunan stratigrafi endapan delta Cimanuk, lihat Gambar 6, 7 dan 8, yaitu sedimen deltaik muda berumur Resen setelah normalisasi disebut sebagai Runtunan-1, sedimen deltaik sebelum dilakukan normalisasi disebut

Runtunan-2, dan *acoustic basement* berupa endapan *paleochannel* sebagai bagian dari endapan *fluviatil* sebagai Runtunan-3; serta sejumlah patahan normal minor sebagai bagian Sistem Patahan Poligonal (PFS), *acoustic blanking zone* dan *gas charged sediment*.

Runtunan-1 memiliki ketebalan 10,7 meter di bagian barat dan menipis hingga 0,5 meter di bagian timur muara sungai. Bagian atas runtunan dicirikan oleh reflektor transparan-subparalel, dan beramplitudo sedang. Bagian bawah oleh reflektor paralel-menerus hingga transparan, beramplitudo rendah-sedang, kontinuitas cukup baik, dan bentuk luar berupa lembaran (*sheet*), dengan kemiringan landai sehingga bagian atas runtunan diperkirakan tersusun atas sedimen fraksi halus-lunak dengan media sedimentasi rendah dan berubah menjadi perselingan fraksi halus-sedang (*coarsening downward*). Sementara itu, bagian bawahnya tersusun atas sedimen fraksi halus-sedang dominasi fraksi halus, dan menghalus ke arah bawah (*fining downward*). Fasies runtunan berbentuk *prograding low*

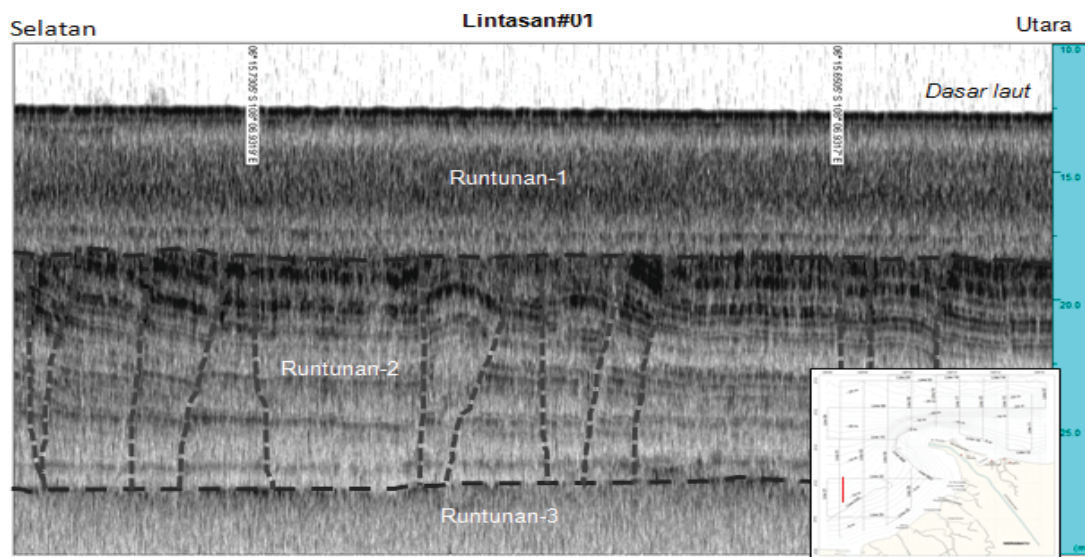


Gambar 5. Peta kontur batimetri perairan muara S. Cimanuk

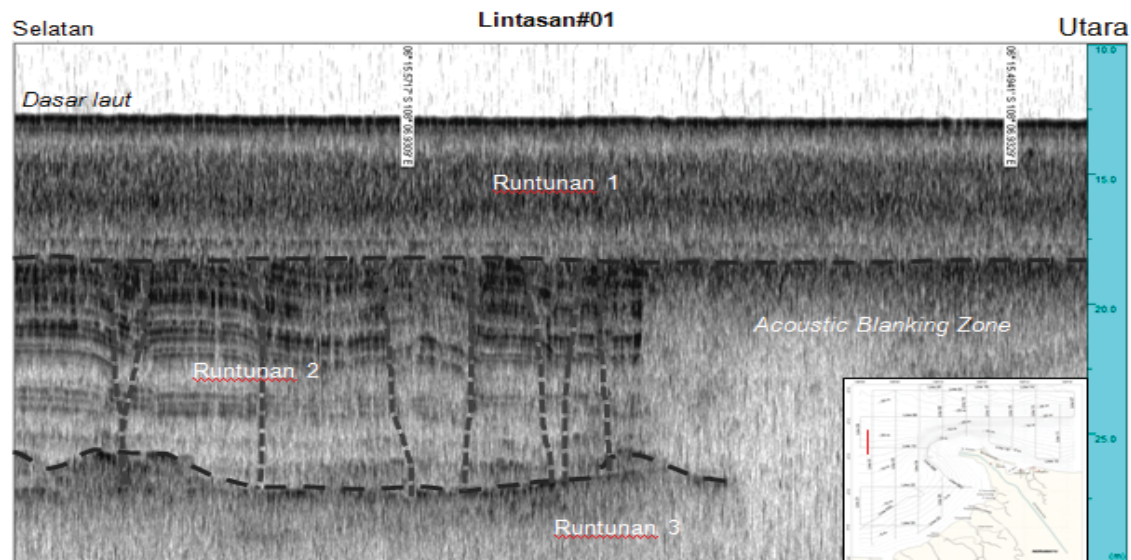
angle tangential oblique^{15,16,17} dari endapan muda Delta Cimanuk berumur Resen sehingga dapat diinterpretasikan bahwa telah terjadi perubahan kekuatan pengendapan akibat *longshore current* dari endapan delta Cimanuk dari arah timur ke barat, yang ditunjukkan oleh perubahan dominasi perselingan fraksi halus-sedang dijumpai cukup tebal di bagian timur dan menjadi dominasi sedimen fraksi halus, sangat lunak-lunak di bagian barat.

Runtunan-2 merupakan endapan Delta Cimanuk sebelum dilakukan normalisasi, dengan ketebalan maksimum 10,5 meter di

bagian barat, dan menipis hingga 2,3 meter di bagian utara muara sungai. Bidang batas dengan Runtunan-1 di atasnya berupa bidang erosi (*erosional truncation*). Runtunan ini dicirikan oleh reflektor paralel-menerus dan menjadi sub-paralel-transparan di bagian bawahnya, beramplitudo rendah-sedang, kontinuitas cukup baik, dan bentuk luar berupa lembaran (*sheet*) serta memiliki kemiringan landai. Pola dan sifat reflektornya berupa *low tangential oblique* dalam urutan refleksi yang sama, dengan fasies bentuk luar berbentuk *prograding low angle tangential oblique*.^{15,16,17} Maka dapat diketahui bahwa



Gambar 6. Rekaman Strata Box, Lintasan #01 di bagian barat laut muara S. Cimanuk yang memperlihatkan Sistem Patahan Poligonal (PFS) dalam sedimen Runtunan 2 akibat pembeban sedimen di atasnya (Runtunan-1).



Gambar 7. Rekaman Strata Box Lintasan #01 di bagian utara, yang memperlihatkan Sistem Patahan Poligonal (PFS) dan *Acoustic Blanking Zone* dalam sedimen Runtunan-2, dengan -1 sebagai lapisan penutup (*caprock*).

runtunan ini tersusun atas sedimen fraksi halus-sedang dominasi fraksi sedang, energi sedimentasi rendah-sedang, serta mengkasar ke arah bawah (*coarsening downward*).

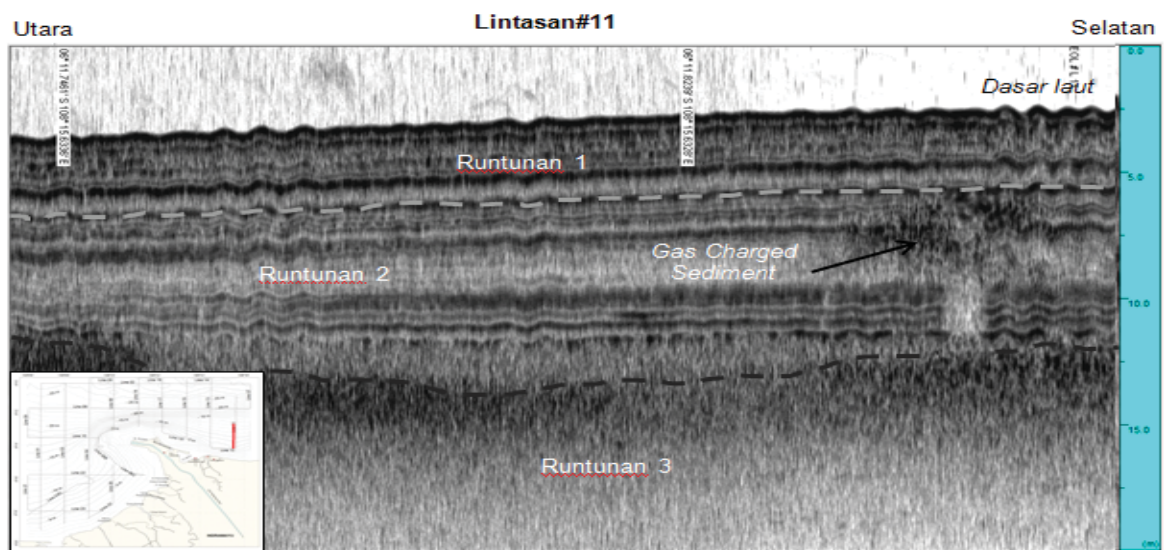
Runtunan-3 merupakan *basement acoustic*, berupa endapan *nearshore* bercampur endapan *channel* bagian dari endapan *fluvial*, ketebalan maksimum 10 meter di bagian tengah dan menipis hingga 2,8 meter di bagian barat muara sungai. Bidang batas dengan runtunan di atasnya berupa ketidakselarasan dan *erosional truncation*. Runtunan ini dicirikan oleh reflektor transparan-paralel-subparalel, beramplitudo rendah-sedang dengan kontinuitas cukup baik. Hal ini memperlihatkan sedimen terendapkan pada lingkungan laut dangkal (*nearshore*), tersusun atas sedimen fraksi halus dan berubah menjadi perselingan fraksi sedang-halus dominasi fraksi sedang di bagian bawahnya. Di bagian timur muara secara setempat dijumpai endapan *fluvial* (*channeling*) dan *overbank*,^{15,16,17} dengan pola internal beramplitudo rendah-sedang, dengan bentuk luar berupa *erosional base* dari sedimen fraksi halus-sedang endapan *channel fill*. Endapan *overbank* dicirikan oleh reflektor paralel-subparalel, beramplitudo sedang, dan kontinuitas buruk di bagian bawahnya, yang menunjukkan endapan tersusun atas perselingan fraksi halus-sedang sehingga dapat diketahui bahwa bagian timur muara sungai merupakan suatu tinggian (daratan), yaitu dengan terendapkannya

endapan *fluvial* berupa endapan *channel fill*, dan *overbank*; sedangkan bagian barat-utara berupa genang laut dengan terendapkannya endapan laut dangkal (*nearshore sediment*). Berdasarkan kesebandingan dengan geologi darat, diketahui bahwa Runtunan-3 sebanding dengan endapan *fluvial-nearshore* berumur Resen-Holosen berupa perselingan lempung lunak-liat, lanau, dan pasir halus.²

Penurunan Sifat Fisik Sedimen

Sifat fisik (*geotechnical properties*) sedimen dapat ditentukan oleh beberapa faktor, antara lain: rata-rata-distribusi ukuran-bentuk butir, komposisi-jenis material/ mineral, tingkat kerapatan meliputi porositas dan kandungan cairan/gas dalam pori, tingkat kepejalan/kompaksi, permeabilitas serta kekuatan geser dalam sedimen.¹⁸ Dalam rekaman SBP, perubahan perubahan sifat fisik dapat diidentifikasi dengan baik dengan melihat anomali karakter seismik,^{19,12} antara lain: perubahan kecepatan gelombang, frekuensi-amplitudo, bentuk internal-eksternal reflektor, serta kontinuitas perlapisan.

Sejumlah patahan normal minor sebagai bagian sistem patahan poligonal (PFS) telah terekam dengan baik dalam Runtunan-2 di bagian barat muara S. Cimanuk lihat gambar 6 dan 7. Patahan minor ini dicirikan oleh peningkatan kecepatan, penurunan frekuensi dan terhentinya



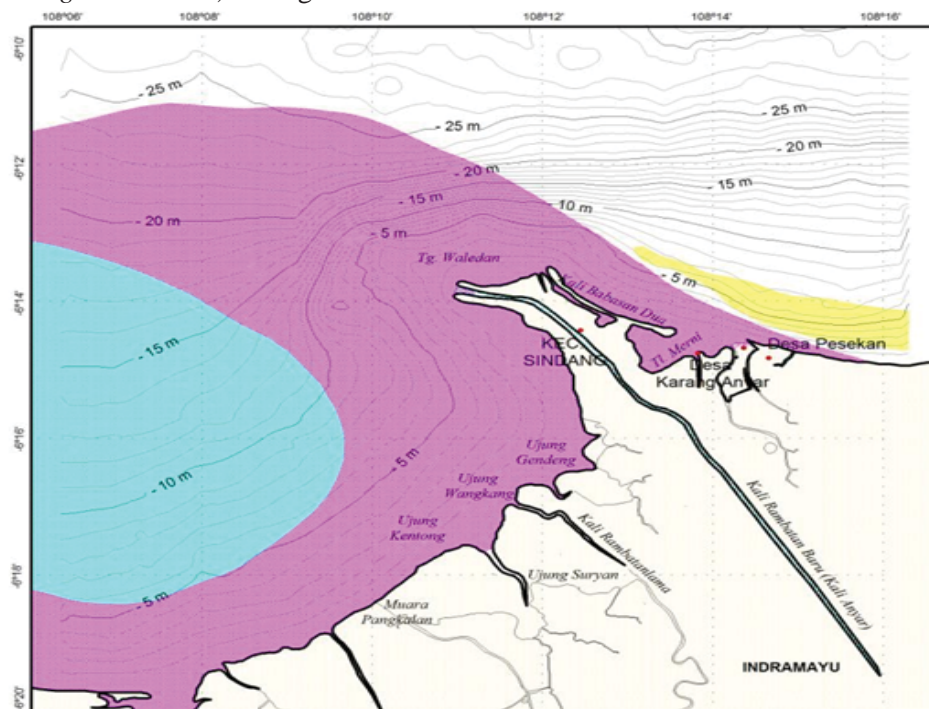
Gambar 8. Rekaman Strata Box Lintasan #11 di bagian timur muara S. Cimanuk yang memperlihatkan hancurnya perlapisan sedimen dalam Runtunan-2 akibat *gas charged sediment*.

bidang perlapisan. Anomali perubahan karakter seismik ini berhubungan erat dengan turunnya tingkat kerapatan sedimen, permeabilitas dan kekuatan geser sedimen sehingga mengakibatkan turunnya tekanan hidrostatik karena meningkatnya kandungan gas dalam jalur patahan.²⁰ Atau dapat dikatakan bahwa patahan PFS sendiri bertindak sebagai saluran permeabel untuk aliran gas sepanjang patahan dan secara berkala ke permukaan. Kontak ketidakselarasan dengan runtunan di atasnya, menunjukkan sistem PFS terbentuk oleh perubahan ketebalan dan kepadatan sedimen akibat pengendapan Runtunan-1 secara cepat pada saat runtunan di bawahnya belum mengalami kompaksi dan masih tersusun atas sedimen lunak-plastis.^{21,7} Alhasil, dapat ditentukan bahwa bidang batas antara ke-2 runtunan ini merupakan batas endapan deltaik sebelum dan sesudah normalisasi S. Cimanuk sekitar tahun 1980-an. Pada gambar 9, terlihat sebaran PFS relatif berbentuk *circular* di bagian barat muara sungai, pada kedalaman 6–12 meter di bawah dasar laut, tingkat kerapatan patahan minor berkisar antara 2,8–7,2 meter dan luas mencapai 49,06 km².

Perubahan sifat fisik sedimen juga terindikasi di tepian pantai bagian barat muara sungai berupa *acoustic blanking zone* dan rembesan gas (*gas charged sediment*) di bagian utara. Keberadaan

rembesan gas dalam rekaman sub-bottom profiles sudah banyak dijumpai pada lingkungan deltaik di Indonesia^{21, 22, 23, 24} dengan gas metana sering dijumpai sebagai gas dominan dalam sedimen laut dangkal.^{21, 22} Keberadaan *acoustic blanking zone* ditunjukkan oleh adanya variasi/gangguan gelombang akustik secara tidak teratur dan menyebarnya signal di bagian atas refleksi,²⁶ serta hilangnya reflektor dibawahnya. Keberadaan zona ini menunjukkan adanya pergerakan gas dalam sedimen berupa gelembung gas yang menyebar dan melemahkan bagian bawah akustik sinyal.¹³ *Acoustic blanking zone* dijumpai pada bidang batas antara Runtunan-1 dan -2 pada Gambar 8, dengan indikasi Runtunan-1 berfungsi sebagai lapisan tudung (*caprock*) yang tidak ditembus oleh gas dangkal. Sebaran *acoustic blanking* mencapai 111,7 km² sepanjang tepian pesisir utara dan barat muara S. Cimanuk dan berada pada kedalaman 1,4–6,8 meter di bawah dasar laut.

Rembesan gas dangkal dalam sedimen (*gas charged sediment*) juga terekam di bagian utara, dicirikan oleh penurunan kecepatan dan frekuensi gelombang akustik secara signifikan. Gwang²⁶ memperlihatkan variasi kecepatan suara berkisar pada 950–1.200 m/detik akibat rembesan gas. Adanya variasi kecepatan suara yang cukup besar



Gambar 9. Sebaran sistem patahan poligonal (PFS) warna biru, *acoustic blanking zone* warna merah muda dan *gas charged sediment* warna kuning di sekitar muara S. Cimanuk.

ini diperkirakan berasosiasi dengan kandungan dan variasi komposisi gas, serta porositas sedimen. Perubahan sedikit (~0.1%) kandungan gas dalam sedimen akan mengubah secara signifikan kecepatan suara dari *gas charged sediments*.²⁷ Berdasarkan rekaman SBP diperkirakan telah terjadi fase migrasi gas dari Runtunan-2 ke permukaan sebelum terjadi akumulasi, yang dapat diikuti oleh migrasi dan difusi gas secara vertikal ke permukaan dasar laut berupa *pockmark* (bercak lubang gas di dasar laut). Sebaran *gas charged sediment* hanya dijumpai di bagian utara dengan luas mencapai 4,6 km².

KESIMPULAN DAN SARAN

Identifikasi penurunan sifat fisik sedimen endapan Delta Cimanuk terlihat dengan baik dalam rekaman SBP *Strata Box* dan hasil analisis signal data *Bathy 1500*, yang diperlihatkan oleh turunnya kecepatan dan amplitudo gelombang akustik. Sementara itu, luas rembesan gas (*acoustic blanking zone* dan *gas charged sediment*) menunjukkan kompleks endapan deltaik S. Cimanuk kaya organik dan sangat memungkinkan sebagai tempat terakumulasinya gas, khususnya gas metana.

Terdapat dua runtunan kompleks endapan Delta Cimanuk sebelum dan sesudah normalisasi dengan bentuk fasies *low angle tangential oblique*, arah progradasi pengendapan saat ini ke arah barat dan dominasi sedimen fraksi halus-lunak. Serta *basement acoustic* berupa endapan *nearshore* bercampur endapan *fluvial*.

Untuk mengurangi dampak rusaknya konstruksi bangunan pantai atau konstruksi industri perminyakan, maka perlu dilakukan identifikasi dini terhadap kondisi fisik sedimen dasar laut di sekitar muara S. Cimanuk.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Rina Zuraida, M.Sc. sebagai kepala tim, serta seluruh personel Tim Survei Delta Cimanuk Tahun 2011 yang sudah bekerja keras, baik dalam melakukan studi literatur maupun penelitian lapangan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Dr. Cynthia Henny, M.Sc. Eng. yang telah membimbing penulis hingga memungkinkan terbitnya karya tulis ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹van Bemmelen, R.W. 1949. *The Geology of Indonesia*. Vol. 1A. Amsterdam: The Hague, Government Printing Office.
- ²Sudana, D, dan Achdan, A. 1992. *Peta Geologi Lembar Indramayu, Jawa Barat*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung: Kementerian ESDM.
- ³Hehanussa, P. E. dan Hehuwat, F. 1980. Morphogenesis of the northern coastal plain of west Java between Cirebon and Jakarta: Its implications for coastal zone management. In: Bird, Eric C. F. dan Soegiarto, A. *Proceedings of the Jakarta workshop on coastal resources management*. Tokyo: United Nations University Press.
- ⁴Lavigne, F. and Gunnell, Y. 2006. Recent land cover change and abrupt environmental impacts on Java volcanoes, Indonesia. *Regional Environmental Change* 6: 86–100.
- ⁵Cartwright, J.A. and Lonergan, L. 1996. Volumetric contraction during the compaction of mudrocks: a mechanism for the development of regional-scale polygonal fault systems. *Basin Research* 8: 183–193.
- ⁶Watterson, J. et al. 2000. Geometry and origin of a polygonal fault system. *Journal of the Geological Society of London* 157: 151–162.
- ⁷Nicol, A. et al. 2003. The geometry, growth and linkage of faults within a polygonal fault system from South Australia. In: Van Rensbergen, P., Hillis, R., Morley, C. Subsurface Sediment Mobilisation. *Geological Society of London Special Publication* 216: 245–262.
- ⁸Goult, N.J. 2002. Mechanics of layer-bound polygonal faulting in fine-grained sediments. *Journal of the Geological Society of London* 159: 239–246.
- ⁹Sills G.C. and Wheeler S.J. 1992. The significance of gas for offshore operations, *Continental Shelf Research* 12: 1239–1250.
- ¹⁰Yuan, F. Bennell, J.D. and Davis, A.M. 1992. Acoustic and physical characteristics of gassy sediments in the western Irish Sea. *Continental Shelf Research* 12: 1121–1134.
- ¹¹Wilkins, R.H. and Richardson, M.D. 1998. The influence of gas bubbles on sediment acoustic properties: in situ, laboratory, and theoretical results from Eckernförde Bay, Baltic Sea. *Continental Shelf Research* 18: 1859–1892.
- ¹²Hovland, M. et al. 1999. Seismic detection of shallow high pore pressure zones. *Offshore*, December. 94–96.
- ¹³Hovland, M. and Judd, A.G. 1988. *Seabed pockmarks and seepages*. Impact on Geology, Biology and

the Marine Environment. London: Graham & Trotman Ltd. 293 hlm.

- ¹⁴Ringis, J. 1986. Seismic Stratigraphy in Very High Resolution Shallow Seismic Data. *CCOP Tech. Pub* 17: 115–126.
- ¹⁵Vail, P.R. et.al. 1977. *Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level*, in Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration. *AAPG Memoir* 26: 49–212.
- ¹⁶Sangree, J.B. and J.M. Wiedmier. 1979. Interpretation of depositional Facies from Seismic Data. *Geophysics* 44(2): 131.
- ¹⁷Sherif, R.E. 1985. Seismic Stratigraphy II. Aspect of Seismic Resolution. *AAPG Memoir* 39: 1–12.
- ¹⁸Grabowski, R.C. Ian G. D. and Geraldene W. 2011. Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties. *Earth-Science Reviews* 105: 101–120.
- ¹⁹Schüler, F. 1952. Untersuchungen über die Mächtigkeit von Schlickschichten mit Hilfe des Echographen. *Dt. Hydrogr. Zeitung* 5: 220–231. In: Orange, D. A. García-García, A. Lorensen. T. Nittrouer. C. Milligan. T. Miserocchi. S. Langone. L. Correggiari. A. and Trincardi. F. 2005. Shallow gas and flood deposition on the Po Delta. *Marine Geology* 222–223: 159–177.
- ²⁰Chun-Ming Lin. et al. 2010. Features and sealing mechanism of shallow biogenic gas in incised valley fills (the Qiantang River, eastern China): A case study. *Marine and Petroleum Geology* 27: 909–922.
- ²¹Watterson, J. et al. 2000. Geometry and origin of a polygonal fault system. *Journal of the Geological Society of London* 157: 151–162.
- ²²Rahardiawan, R. dkk. 2003. *Eksplorasi Gas Biogenik Perairan Pamekasan dan Sekitarnya*. Laporan Penelitian. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan. Bandung: Kementerian ESDM.
- ²³Rahardiawan, R. dkk. 2004. *Eksplorasi Gas Biogenik Perairan Sampang dan Sekitarnya*. Laporan Penelitian. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan. Bandung: Kementerian ESDM.
- ²⁴Naibaho, T. dkk. 2009. *Penyelidikan Gas Biogenik Perairan S. Cimanuk, Indramayu dan Sekitarnya*. Laporan Penelitian. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan. Bandung: Kementerian ESDM.
- ²⁵Zuraida, R. dkk. 2011. *Penelitian Distribusi Kandungan Logam Berat Pada Sedimen Dasar Laut Pra-Industri di Perairan Delta Cimanuk, Indramayu*. Laporan Penelitian. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan. Bandung: Kementerian ESDM.