

OPTIMASI BERAT LUMPUR DAN REKOMENDASI KEDALAMAN DENGAN PENDEKATAN SAFE MUD WINDOW UNTUK PENGEBORAN YANG AMAN PADA SUMUR SINGHULUNG-X DI SUB-CEKUNGAN MADURA

Muhamad Said Lutfi¹, Mochamad Kamal Katulistiwa¹, Boy Yoseph Cahya Sunan Sakti Syah Alam¹, Yusi Firmansyah¹, Sena Warman Reksalegora¹

Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Jatinangor

*Email Korespondensi: muhamad21037@mail.unpad.ac.id

ABSTRAK

Sub-Cekungan Madura memiliki potensi hidrokarbon, namun menghadapi tantangan berupa *overpressure* akibat laju pengendapan cepat dan tektonik kompresional, yang dapat memicu masalah pengeboran. Penelitian ini bertujuan untuk merekomendasikan kedalaman yang aman dan optimasi berat lumpur untuk pengeboran pada Sumur Singhulung-x. Data yang digunakan mencakup *wireline log* dan data pengeboran. Penelitian dilakukan menggunakan metode semi-kuantitatif, seperti rekonstruksi NCT, prediksi tekanan pori Eaton (1975), dan penerapan konsep *safe mud window*. Hasil penelitian menunjukkan sumur memiliki *top of transition pressure* pada kedalaman 3097 ft dan *top of hard overpressure* pada kedalaman 4136 ft. Berdasarkan kondisi tekanan pori, terbagi zona aman di kedalaman 924–3097 ft, zona rawan pada kedalaman 3097–4136 ft, dan zona sangat rawan pada kedalaman 4136–8474 ft. Rekomendasi kedalaman yang aman untuk pengeboran berada pada rentang 924–3097 ft. Optimasi berat lumpur yang disarankan untuk kedalaman 924–3097 ft sebesar 8,8–10,6 ppg, untuk kedalaman 3097–4136 ft sebesar 10,7–10,8 ppg, dan untuk kedalaman 4136–8474 ft sebesar 12,3–15,4 ppg.

Kata Kunci: Sub-Cekungan Madura, *overpressure*, berat lumpur, *safe mud window*

ABSTRACT

The Madura Sub-Basin has hydrocarbon potential, but is challenged by overpressure due to rapid deposition rates and compressional tectonics, which can trigger drilling problems. This study aims to recommend safe depth and mud weight optimization for drilling at Singhulung-x Well. The data used includes wireline logs and drilling data. The research was conducted using semi-quantitative methods, such as NCT reconstruction, Eaton (1975) pore pressure prediction, and application of the safe mud window concept. The results showed that the well had a top of transition pressure at a depth of 3097 ft and a top of hard overpressure at a depth of 4136 ft. Based on the pore pressure conditions, the safe zone is divided into 924–3097 ft depth, the vulnerable zone at 3097–4136 ft depth, and the very vulnerable zone at 4136–8474 ft depth. The recommended safe depth for drilling is in the range of 924–3097 ft. The recommended mud weight optimization is for a depth of 924–3097 ft at 8.8–10.6 ppg, for a depth of 3097–4136 ft at 10.7–10.8 ppg, and for a depth of 4136–8474 ft at 12.3–15.4 ppg.

Keywords: Madura Sub-Basin, overpressure, mud weight, safe mud window

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki beberapa cekungan yang memiliki potensi hidrokarbon, seperti Cekungan Jawa Timur (Wijaya, 2022). Di balik potensi hidrokarbonnya, Cekungan Jawa Timur memiliki tantangan berupa kondisi *overpressure* (Surjaudaja dkk, 2017). Berdasarkan prediksi hubungan antara kecepatan gelombang seismik dan tegangan efektif rata-rata, fenomena *overpressure* ini juga ditemukan pada Sub-Cekungan Madura (Reksalegora et al., 2022). Sub-Cekungan Madura adalah bagian dari Cekungan Jawa Timur dengan lapisan sedimen yang tebal (Setiadi et al., 2019). Cekungan ini teridentifikasi sebagai sumber hidrokarbon (Darmawan, dkk, 2018).

Sub-Cekungan Madura memiliki sedimen tersier yang tebal (Reksalegora et al., 2022). Sedimen tebal sebagai akibat cepatnya laju pengendapan yang cepat dapat menyebabkan terjadinya *overpressure* yang disebabkan oleh *disequilibrium compaction* (Nifuku et al., 2021). Selain itu, cekungan ini juga mengalami tektonik kompresional pada masa Plio-Pleistosen (Luan et al., 2024). Tektonik kompresional dapat mengakibatkan *overpressure* yang lebih besar dibandingkan yang diakibatkan oleh laju pengendapan yang cepat (Shaoxuan, 2022). Keberadaan *overpressure* seringkali menjadi masalah utama dalam kegiatan pengeboran migas. Apabila tidak ditangani dengan baik, *overpressure* dapat menyebabkan masalah seperti *blow-out*, *tight hole*, dan *mud loss* yang berimbas pada peningkatan biaya (Nwamaioha et al., 2023).

Oleh karena itu, diperlukan strategi yang tepat untuk menangani kondisi *overpressure* di Sub-Cekungan Madura.

Salah satu solusi adalah menentukan penggunaan berat lumpur pengeboran. solusi ini dapat meminimalkan serta mengantisipasi masalah yang timbul akibat *overpressure*, sehingga kegiatan pengeboran sumur migas dapat berjalan lebih efektif dan efisien.

Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada satu sumur eksplorasi yang berada di Sub-Cekungan Madura, Jawa Timur yang bernama Singhulung-x. Lokasi Sumur terdapat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Daerah Penelitian

Sumur Singhulung-x pertama kali dilakukan pengeboran pada 2 November 1994. Sumur Singhulung-x memiliki total kedalaman 8659 ft (MD). Sumur ini dibor untuk mengevaluasi potensi hidrokarbon di batuan gamping Formasi Prupuh berumur Miosen Awal, yang diperkirakan berada di kedalaman 8767 ft. Selain itu, sumur ini juga bertujuan mempelajari keberadaan batuan pasir dangkal di bawah kedalaman 5555 ft yang berada dibawah *trap* dangkal di sekitarnya.

Geologi Regional

Secara regional, Daerah penelitian merupakan daerah yang terletak di Jawa Timur. Struktur Cekungan Jawa Timur dikendalikan oleh dua arah utama yaitu, Meratus (timur laut-barat daya) dan Sakala (barat-timur) (Sribudiyani dkk., 2003). Struktur Sakala dikenal sebagai zona sesar geser RMKS (Rembang-Madura-Kangean-

Sakala) (Satyana dkk., 2004). Struktur Sakala awalnya adalah graben yang mengalami inversi pada Miosen Awal. (Brandsen dan Matthews, 1992). Pulau Madura muncul akibat inversi struktur yang terjadi pada Miosen Awal.

Stratigrafi daerah penelitian terdiri atas keseimbangan antara pengendapan batuan karbonat dan klastik di lingkungan laut (Brandsen dan Matthews, 1992). Kedua hal tersebut dipengaruhi oleh kondisi tektonik, perubahan muka air laut dan *input* sedimen.

AGE	ONSHORE	OFFSHORE
	LITHOSTRATIGRAPHY	
PLEISTOCENE		LIDAH + MIT
PLOCIENE	KAWENGAN	GL, UPPER KAREN, PACIRAN, MUNDO
MIOCENE	OK	UPPER OK, WONOCOLO, LOWER KAREN, CUPU, UPPER CUPU
	OK	LOWER OK, TAWUN, TUBAN, WANGAS, LOWER CUPU, CUPU
OLIGOCENE	KUJUNG	KUJUNG I, KUJUNG CARBONATE, NORTH MADURA PLATFORM, KRANIS, UPPER PRUPUH, LOWER PRUPUH, PRUPUH
	KUJUNG II, KUJUNG III	KUJUNG SHALE, CD, POLENG
EOCENE	PRE KUJUNG	PRE CD, NGIMBANG SHALE, NGIMBANG ELASTIC, NGIMBANG CARBONATE
	PRE KUJUNG	PRE NGIMBANG
CRETACEOUS	BASEMENT	

Gambar 2. Data stratigrafi Cekungan Jawa Timur (Modifikasi Pertamina BPPKA, 1966)

Melalui penelitian Mudjiono dan Pireno (2001) di cekungan ini membagi sedimentasi menjadi 6 siklus yang mengikuti stratigrafi daerah penelitiannya, yaitu:

1. Siklus Ngimbang (Eosen - Oligosen Awal) merupakan endapan transgresi-regresi dari Formasi Ngimbang. Formasi yang berada tidak selaras di atas batuan dasar dan terdiri atas perselingan batupasir kuarsa dan serpih karbonatan sedikit endapan batubara yang terendapkan pada lingkungan lakustrin hingga delta yang tertutupi oleh endapan laut klastik dan karbonat.

2. Siklus Kujung (Oligosen Akhir-Miosen Awal) terdiri endapan laut klastik dan karbonat dan tidak selaras di atas Formasi Ngimbang. Siklus ini dimulai dari batupasir

konglomerat (Formasi Kujung III) di bagian dasarnya yang kemudian diikuti oleh endapan batugamping dan serpih (Formasi Kujung II & Formasi Prupuh). Ditutup oleh batugamping terumbu tebal (Formasi Kujung I).

3. Siklus Tuban (Miosen Awal) terdiri dari endapan laut yang mencakup serpih, batupasir, dan napal di bagian bawah (Formasi Tuban), dengan batugamping terumbu (Formasi Rancak) yang tumbuh di bagian atasnya.

4. Siklus Ngrayong (Miosen Tengah) merupakan endapan laut yang terletak di atas Formasi Tuban, dengan dominasi batupasir kuarsa.

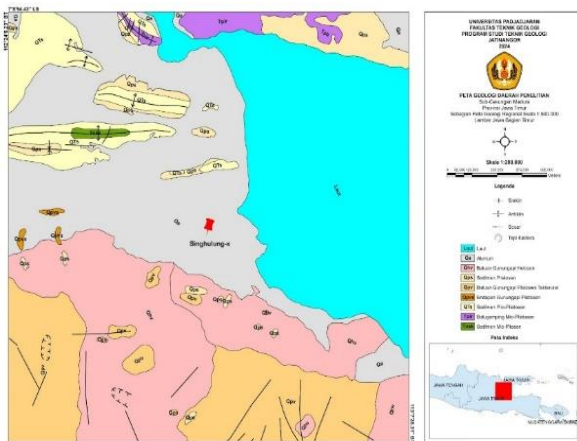
5. Siklus Wonocolo (Miosen Tengah - Miosen Akhir) adalah endapan laut dalam yang terdiri dari serpih, napal, dan sisipan batupasir, serta batugamping terumbu dan paparan yang terbentuk di perairan dangkal. Formasi Wonocolo muncul pada Miosen Akhir.

6. Siklus Kawengan dan Lidah (Miosen Akhir - Pliosen) mencakup endapan klastik dari daratan dan pantai yang meliputi Formasi Ledok, Mundu, dan Kalibeng. Sedimentasi lautnya terdiri atas batupasir, napal, batugamping *Globigerina*, batugamping terumbu, dan batupasir vulkanik klastik. Zona overpressure mulai terbentuk di kedalaman setelah siklus ini berakhir.

Kondisi Geologi Daerah Penelitian

Sumur Singhulung-x merupakan sumur yang terletak di darat Jawa Timur. Berdasarkan data hasil laporan akhir pengeboran oleh *Huffco Brantas, Inc.* Januari 1994 prospek sumur ini ialah *reef build up* dari Formasi Prupuh berumur Miosen Awal. Berdasarkan hasil laporan paleontologi, dilakukan analisis Sumur Singhulung-x pada kedalaman 0-8478 ft. Pada kedalaman 0-4600 ft Sumur Singhulung-x berumur Pleistosen dengan

lingkungan *outer-mid neritik* yang menunjukkan tren regresif dan mengindikasikan adanya reservoir yang baik. Pada kedalaman 4600-8481 ft, lapisan ini berumur Pliosen Akhir dengan lingkungan *outer neritik*. Sementara itu, pada kedalaman lebih dari 8481 ft, ditemukan batuan gamping terumbu berumur Miosen Awal yang dibuktikan oleh temuan fosil-fosil seperti fragmen *Lepidocyclina* dan nannofossil. Analisis isotop strontium pada alga merah dari Sumur Singhulung-x menunjukkan umur absolut 16-18 juta tahun, yang mengindikasikan umur Miosen Awal.



Gambar 3. Peta Geologi Regional Daerah Penelitian

METOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode semi-kuantitatif yang terdiri dari pengolahan data *wireline log* dengan rumus-rumus yang berkaitan dengan prediksi tekanan pori dari Eaton (1975) dan penerapan konsep *safe mud window* untuk penentuan kedalaman yang aman dan optimasi berat lumpur pengeboran terhadap data-data hasil pengeboran dari daerah penelitian.

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang didapat dari Kementerian ESDM. Tahap pengolahan data diawali

dengan penentuan tekanan hidrostatik dengan gradien tekanan 0.433 psi/ft dan penentuan *vertical stress* menggunakan interpolasi data densitas dengan *trendline power* untuk mendapatkan gradien *vertical stress*, *plotting* data pengukuran langsung (RFT dan LOT) dan tidak langsung (*mud weight*), perhitungan *Normal Compaction Trend* menggunakan rumus Chapman (1983), prediksi tekanan pori menggunakan metode Eaton (1975), penentuan *top of overpressure*, dan analisis *safe mud window* terhadap data pengeboran.

Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik merupakan tekanan yang disebabkan oleh kolom fluida terbuka yang terhubung dengan atmosfer (Ramdhan, 2022). Tekanan hidrostatik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan :

- P_h = tekanan hidrostatik (Pa)
- ρ = densitas rata-rata air ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- g = percepatan gravitasi ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
- h = Kedalaman (ft)

Vertical Stress

Tegasan Litostatik merupakan tegasan yang memiliki arah vertikal, serta timbul akibat adanya beban di atasnya (*overburden*), adapun beban tersebut berupa sedimen (Ramdhan, 2022) (Gambar 2.11). Besaran tekanan litostatik dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$S_v = \rho_b \cdot g \cdot h \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan :

- S_v = tegasan litostatik/ *overburden* (Pa)
- ρ_b = densitas batuan ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- g = percepatan gravitasi ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
- h = kedalaman (ft)

Prediksi Tekanan Pori Eaton

Metode Eaton (1975) merupakan salah satu pendekatan yang digunakan untuk meramalkan tekanan pori. Data yang diterapkan dalam metode ini berasal dari *wireline log*. Beberapa data *wireline log* yang digunakan adalah data log resistivitas dan log sonik (Ramdhan, 2022). Metode Eaton (1975) memiliki persamaan berikut:

$$P = \sigma_v - (\sigma_v - P_h) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^3 \quad \text{log}$$

sonik.....(3)

$$P = \sigma_v - (\sigma_v - P_h) \left(\frac{R}{R_n} \right)^{1.2} \quad \text{log}$$

resistivitas.(4)

Keterangan:

- P = tekanan pori Eaton
 σ_v = tegasan litostatik / *vertical stress*
 P_h = tekanan pori saat hidrostatik
 n = kondisi saat hidrostatik
 Δt = nilai-nilai dari transit time / log sonik
 R = nilai dari resistivitas

Metode Eaton (1975) mengandalkan data transit time untuk mendapatkan *Normal Compaction Trend* (NCT). Untuk nilai transit time dapat menggunakan persamaan Chapman (1983) yang menentukan besaran NCT dari data sonik, seperti dibawah ini:

$$\Delta t_n = (\Delta t_0 - \Delta t_m) \cdot e^{-bz} + \Delta t_m \dots (5)$$

Keterangan:

- Δt_n = nilai pada kondisi NCT
 Δt_m = nilai matriks batuan
 Δt_0 = nilai di permukaan
 z = kedalaman
 b = konstanta

Safe Mud Window

Safe Mud Window merupakan pendekatan untuk menentukan rentang berat lumpur yang aman selama pengeboran sumur minyak dan gas (Mohiuddin, 2005). Konsep ini menyoroti

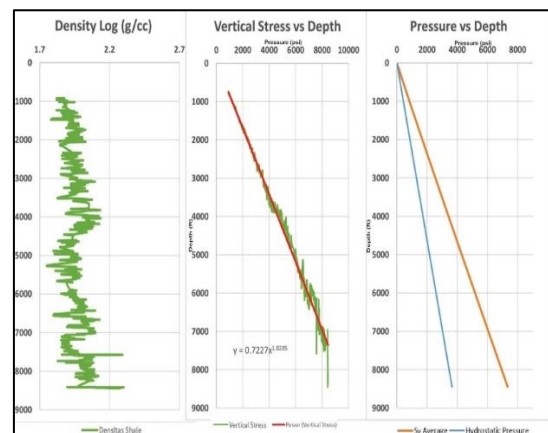
pentingnya tekanan pori, tegangan *in-situ*, dan sifat mekanik batuan untuk mencegah kejadian seperti *blowout* dan *mud loss*.

Secara khusus, konsep ini harus memenuhi syarat: tekanan pori < berat lumpur < *minimum horizontal stress* (σ_{hmin}) < tegangan vertikal untuk stabilitas (Wood, D. A. 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tekanan Hidrostatik dan Vertical Stress

Tekanan *hydrostatic* pada sumur Singhulung-x menggunakan gradien 0.433 psi/ft sedangkan *vertical stress* didapat dari analisis log densitas pada litologi shale untuk mendapatkan tren yang utuh dengan menggunakan interpolasi *trendline power* sehingga didapat persamaan $y = 0,7227 \cdot x^{1.0205}$. Dari hasil perhitungan tersebut kemudian didapat grafik tekanan sebagai berikut (Gambar 4).



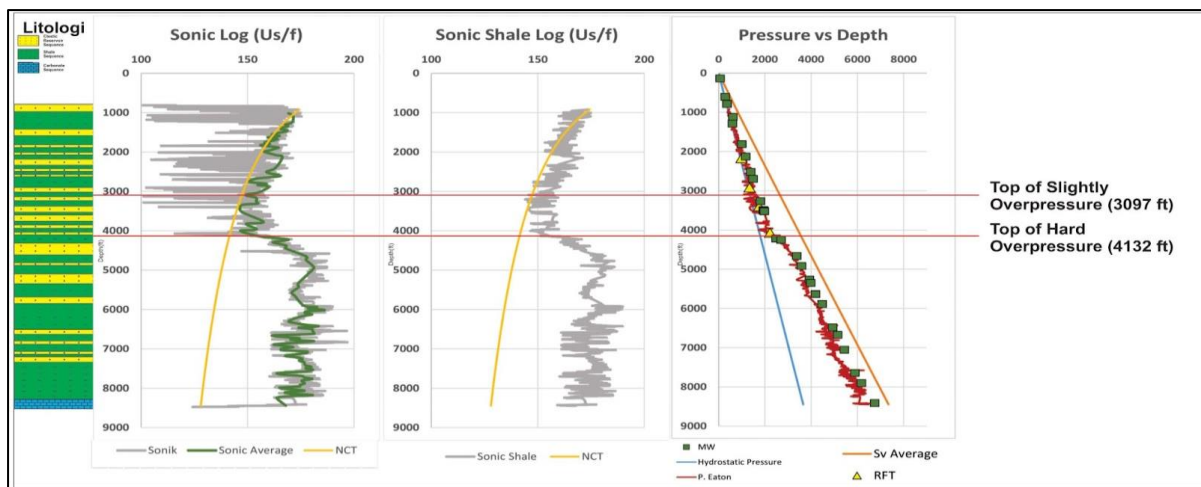
Gambar 4. Hasil analisis *vertical stress* dari log densitas *shale* dan grafik tekanan terhadap kedalaman Sumur Singhulung-x

Tekanan Pori

Prediksi tekanan pori dilakukan diawali dengan merekonstruksi *Normal Compaction Trend* (NCT) yang didapat dari rumus Chapman (1983), kemudian melakukan prediksi tekanan pori dengan Metode Eaton (1975). Hasil prediksi dicocokkan dengan hasil pengukuran

tekanan pori RFT dan *mud weight*. Pada Sumur ini, koefisien Eaton yang digunakan

sebesar 5 sehingga didapat grafik *pressure vs depth* sebagai berikut (Gambar 5).



Gambar 5. Interpolasi NCT pada log sonik Sumur Singhulung-x dan prediksi tekanan pori menggunakan Metode Eaton (1975) dengan koefisien eaton 5

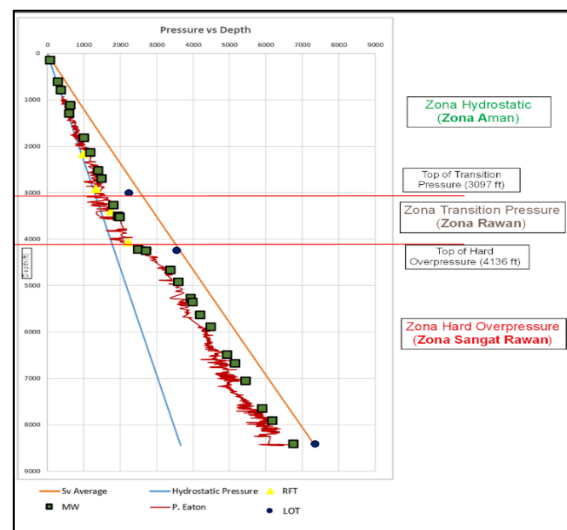
Pemodelan grafik *pressure vs depth* dari Sumur Singhulung-x pada Gambar 5 memperlihatkan beberapa variabel pengukuran tekanan pori mulai dari RFT, *mud weight* dan prediksi tekanan pori menggunakan Metode Eaton (1975). Pada awalnya nilai *mud weight* relatif menunjukkan *equivalent* dengan tekanan hidrostatik namun pada pengukuran RFT terdapat kenaikan perlahan terhadap tekanan hidrostatik yang dimulai pada kedalaman 3097 ft dan kenaikan signifikan pada kedalaman 4132 ft. Sehingga berdasarkan konsep *overpressure* dapat diasumsikan bahwa pada Sumur Singhulung-x memiliki *top of slightly overpressure* pada kedalaman 3097 ft dan *top of hard overpressure* pada kedalaman 4132 ft yang sama-sama pada litologi *shale* (Gambar 5).

Safe Mud Window untuk penanganan Overpressure

Penentuan berat lumpur berdasarkan konsep Safe Mud Window, diawali dengan windowing, yaitu pembuatan zona-zona kedalaman berdasarkan tren kondisi tekanan

pori yang kemudian menghasilkan zona kedalaman yang aman untuk pengeboran. Setelah itu, dilakukan penentuan berat lumpur.

Penentuan kedalaman untuk pengeboran yang aman



Gambar 6. Grafik Zona Kondisi Tekanan Pori

Penentuan kedalaman yang aman bertujuan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya hal-hal yang tidak diinginkan saat

pengeboran. Mengacu pada kondisi *overpressure* di Sumur Singhulung-X, teridentifikasi pada kedalaman 3097 ft sebagai *top of transition pressure* dan 4132 ft sebagai *top of hard overpressure*.

Transition pressure merupakan kondisi meningkatnya tekanan pori melebihi tekanan hidrostatik secara relatif perlahan, dimana masih memungkinkan untuk dilakukan pengeboran dengan tetap melakukan tindakan preventif dalam pengeboran (Lecante et al., 2011). Selain itu, *Hard overpressure* merupakan peningkatan tekanan pori melebihi tekanan hidrostatik secara relatif signifikan, sehingga pada kondisi ini diperlukan perhatian lebih untuk melakukan pengeboran. Berdasarkan hal ini, pengeboran yang aman adalah pada kedalaman 924-3097 ft, rawan pada kedalaman 3097-4136 ft dan sangat rawan pada kedalaman lebih dari 4136-8474 ft.

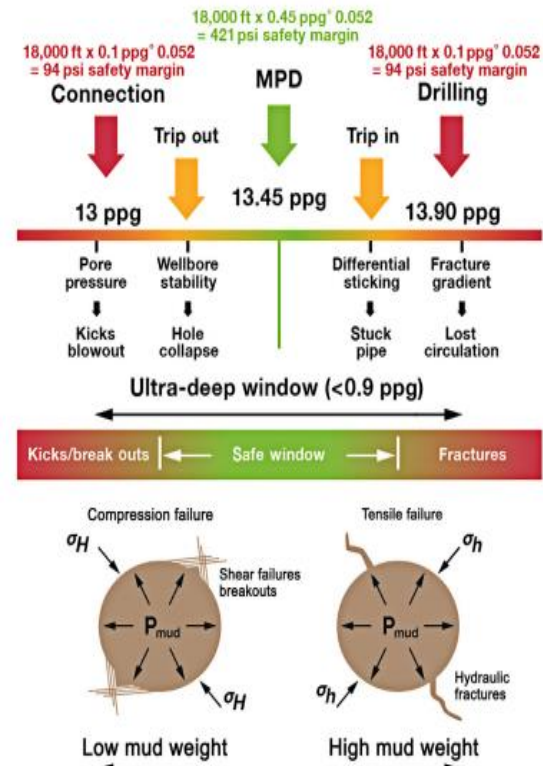
Optimasi Berat Lumpur Pengeboran

Optimasi berat lumpur pengeboran diperlukan apabila diinginkan untuk tetap melakukan pengeboran pada kedalaman rawan pada Sumur Singhulung-X. Jika berat lumpur pengeboran kurang dari tekanan pori pada formasi maka akan terjadi *kicking* hingga *blow-out*, sedangkan jika berat lumpur lebih besar dari tekanan rekah (Shmin dan vertical stress) pada formasi maka akan terjadi *mud loss*. (Wood, D. A. 2024) . Sehingga dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Pore\ Pressure < Mud\ Weight < Shmin < Sv$$

Penentuan Berat lumpur pada setiap zona dilakukan dengan pendekatan *safe mud window* dilakukan dengan mengacu pada data prediksi tekanan pori eaton (1975) sebagai batas bawah, *in-situ stress* (vertical stress dan shmin) sebagai batas atas, dan

mud weight yang digunakan selama pengeboran (Gambar 7).

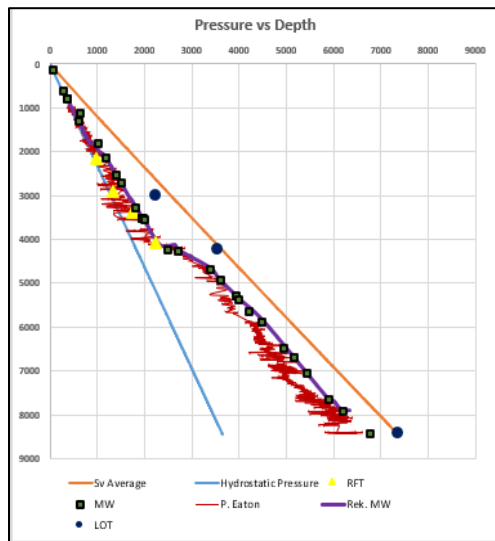


Gambar 7. *Safe mud window* dalam buku *Deepwater Pressure Management* (Aird, P., 2019)

Tabel 1 dan gambar 8 menunjukkan rekomendasi *mud weight* tertinggi pada zona *hard overpressure* (sangat rawan) di kedalaman 4136-8474 ft sebesar 12,3 ppg hingga 15.4 ppg, diikuti pada zona *transition pressure* (rawan) kedalaman 3097-4136 ft sebesar 10.6 ppg hingga 10.7 ppg, dan zona *hydrostatic* (aman) kedalaman 924-3097 ft sebesar 8.8 ppg hingga 10.6 ppg. Perbedaan berat lumpur disebabkan perbedaan kondisi tekanan pori yang terjadi setiap zona. Pada setiap kedalaman rekomendasi berat lumpur selalu lebih besar dari *pore pressure*, lebih kecil dari LOT/shimin serta memperhatikan berat lumpur pengeboran yang sebelumnya digunakan sehingga dapat menghindari masalah-masalah pengeboran.

Tabel 1. Rekomendasi berat lumpur pengeboran Sumur Singhulung-X berdasarkan data prediksi tekanan pori

Zona	Kedalaman	Pore Pressure (Psi)	Mud Weight yang digunakan (ppg)	Rekomendasi Mud Weight (ppg)	LOT (ppg)
Hydrostatic (Aman)	924 - 1286	400-555	8.8	8.8	14.3
	1287 - 1800	557-740	8.9	9	
	1811 - 2000	784.5-882	8.9	10	
	2125 - 3094.5	992-1339	10.6	10.6	
Transition Pressure (Rawan)	3097 - 3510	1502-1465	10.6	10.7	16.1
	3520 - 4129.5	1536-2093	10.7	10.8	
Hard Overpressure (Sangat Rawan)	4136 - 4248	2354-2660	11.3	12.3	16.8
	4662 - 4917	3115-3538	12.2	14	
	5264 - 5347	3679-3694	13.9	14.3	
	5885 - 7642	4166-5568	14.6	14.8	
	7700 - 7900	5575-6012	15	15	
	7915 - 8474	6171-6434	15.4	15.4	



Gambar 8. Grafik Plot Rekomendasi *Mud Weight*

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengolahan data untuk mengetahui rekomendasi kedalaman sumur yang aman dan optimasi berat lumpur saat pengeboran pada sumur eksplorasi Singhulung-X yang berada di Sub-Cekungan Madura, Jawa Timur dapat disimpulkan bahwa:

1. Rekomendasi kedalaman yang aman untuk pengeboran berada pada rentang 924-3097 ft, di mana tekanan pori masih berada dalam batas yang dapat dikendalikan dengan tindakan

preventif seperti penggunaan lumpur pengeboran yang sesuai. Kedalaman 3097-4136 ft teridentifikasi sebagai zona rawan, di mana terjadi transisi menuju *overpressure* yang membutuhkan perhatian ekstra. Sementara itu, kedalaman lebih dari 4136 ft hingga 8474 ft sangat rawan karena adanya *hard overpressure*, yang dapat menyebabkan peningkatan tekanan pori yang signifikan dan memerlukan perhatian lebih dalam pelaksanaan pengeboran untuk menghindari risiko yang tidak diinginkan.

2. Optimasi berat lumpur yang digunakan harus mempertimbangkan perbedaan tekanan pori di setiap zona. Untuk kedalaman 4136-8474 ft, berat lumpur yang disarankan adalah 13,5-15,3 ppg, untuk kedalaman 3097-4136 ft sebesar 10,6-13 ppg, dan untuk kedalaman 924-3097 ft sebesar 8,7-10,6 ppg. Rekomendasi berat lumpur ini memastikan bahwa tekanan lumpur tetap lebih tinggi dari tekanan pori namun lebih rendah dari batas tegasan vertikal (LOT) dan shmin, sehingga dapat mencegah masalah pengeboran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusdatin ESDM atas dukungan data yang diberikan selama penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Aird, P. (2019). Deepwater Pressure Management. Deepwater Drilling, 69–109. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102282-5.00003-x>
- Bransden, P. J. E., & Matthews, S. J. (1992). Structural and stratigraphic evolution of the East Java Sea, Indonesia. *Proceedings of the Indonesian Petroleum Association 21st Annual Convention*, Jakarta, 417–453.
- Chapman, R. E. (1983). *Petroleum Geology*. Elsevier.
- Darmawan, H., Santoso, A. B., & Widodo, T. (2018). Cekungan sedimentasi di Indonesia: Karakteristik dan potensi hidrokarbon. *Indonesian Geological Review*, 5(2), 123–140.
- Eaton, B. A. (1975). The equation for predicting pore pressure from resistivity logs. *Journal of Petroleum Technology*, 27(8), 929–934.
- Lecante, G., Wojciak, P., & Bianchi, N. (2011, July). Multi-disciplinary pore pressure prediction: Reconciliate geophysics and basin modeling to control risks and uncertainties in drilling operations. In PGCE 2011 (pp. cp-251). *European Association of Geoscientists & Engineers*.
- Luan, X., Lu, Y., Fan, G., & Lunt, P. (2024). Pockmark reservoir, a new carbonate reservoir type from the Madura Sub-Basin, Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 260, 105936.
- Mudjiono, R., & Pireno, G. E. (2001). Exploration of the North Madura Platform, Offshore East Java, Indonesia. *Proceedings of the Indonesian Petroleum Association 28th Annual Convention*, Jakarta, 707–726.
- Nifuku, K., Kobayashi, Y., Araki, Y., Ashida, T., & Taniwaki, T. (2021). Overpressure evolution controlled by spatial and temporal changes in the sedimentation rate: Insights from a basin modelling study in offshore Suriname. *Basin Research*, 33(2), 1293–1314.
- Nwamaioha, C. O., Tichelaar, B. W., & Anyaegbu, O. S. (2023, July). Analysis of drilling fluid losses, mitigation and recovery while transiting from depleted to overpressured zones. In *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition* (p. D031S017R003). SPE.
- Mohiuddin, M. A., Khan, K., Abdulraheem, A., Al-Majed, A., & Aurifullah, V. (2005, May). Field based criteria for the design of safe mud weight window. In *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition* (pp. SPE-106327). SPE.
- Pertamina BPPKA. (1996). *Petroleum geology of Indonesian basins: Principles, methods, and applications, IV: East Java Basin*.
- Pulunggono, A., & Martodjojo, S. (1994). Perubahan tektonik Paleogen–Neogen merupakan peristiwa tektonik terpenting di Jawa. *Proceedings of Geologi dan Geotek Pulau Jawa, Yogyakarta*, 37–49.
- Ramdhan, A. M. (2022). Analisis dan prediksi overpressure di cekungan sedimen. Bandung: *ITB Press*.

- Reksalegora, S. W., Hutasoit, L. M., Harsolumakso, A. H., & Ramdhan, A. M. (2022). Pore pressure prediction using velocity–mean effective stress relationship in Madura Sub-basin, East Java Basin – Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience*, 9(2), 247–262. <https://doi.org/10.17014/ijog.9.2.247-262>
- Satyana, A. H., Nugroho, D., & Surantoko, I. (1999). Tectonic controls on the hydrocarbon habitats of the Barito, Kutei, and Tarakan Basins, Eastern Kalimantan, Indonesia: Major dissimilarities in adjoining basins. *Journal of Asian Earth Sciences*, 99–122.
- Setiadi, I., Setyanta, B., Nainggolan, T. B., & Widodo, J. (2019). Delineation of sedimentary subbasin and subsurface interpretation East Java Basin in the Madura Strait and surrounding area based on gravity data analysis. *Bulletin of the Marine Geology*, 34(1), 380809.
- Shaoxuan, L. (2022). Evidence of formation overpressure caused by tectonic compression in Bohai Bay Basin.
- Sri Budiyani, E., de Vries, S. T., Sumintadireja, P., Djuhaeni, H., & Dam, M. A. C. (2003). The role of plate tectonics in the formation of the Banda Arc. *Proceedings of the Indonesian Petroleum Association 29th Annual Convention*, 455–467.
- Wijaya, A. (2022). Revealing new hydrocarbon potential in mature basin, a case study from North Madura Platform, East Java Basin, Indonesia. <https://doi.org/10.29118/ipa22-g-236>
- Wood, D. A. (2024). Wellbore stability and the establishment of a safe mud weight window. In *Sustainable Natural Gas Drilling* (pp. 135–168). *Elsevier*.