

Review Jurnal Lumpur Pemboran Berbasis Air Water Based Drilling Mud Journal

Dimas Wahyudi*, Baiq Maulinda Ulfah

Sekolah Tinggi Teknologi Migas Balikpapan, Indonesia

Email: dwzlr1@gmail.com*

Abstrak

Lumpur pemboran berbasis air (Water-Based Mud/WBM) menawarkan alternatif yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan dibanding lumpur berbasis minyak (Oil-Based Mud/OBM) dalam operasi pengeboran minyak dan gas. Namun, tantangan teknis seperti stabilitas formasi, kehilangan sirkulasi, serta dampak lingkungan dari aditif kimia masih menjadi kendala utama. Penelitian ini mengkaji efektivitas formulasi WBM melalui tinjauan sistematis terhadap tiga studi utama: perencanaan WBM dengan barit dan CaCO_3 untuk formasi bertekanan tinggi (Junianto dkk., 2017), analisis toksisitas WBM dengan barit dan KCl (Miranti dkk., 2014), serta studi penggunaan CaCO_3 dari cangkang telur sebagai aditif alami (Rante dkk., 2024). Hasil kajian menunjukkan bahwa formulasi WBM dengan barit dan CaCO_3 efektif dalam mencegah kick dan lost circulation pada pengeboran formasi bertekanan tinggi. Namun, uji toksisitas mengungkap bahwa beberapa formulasi WBM melebihi batas aman kandungan logam berat, khususnya Cu dan Pb, yang berpotensi mencemari lingkungan. Di sisi lain, penggunaan CaCO_3 dari cangkang telur sebagai aditif alami terbukti mampu meningkatkan plastic viscosity dan yield point secara signifikan, sekaligus mengurangi filtrate loss, dengan dampak lingkungan yang lebih rendah. WBM memiliki potensi besar sebagai lumpur pemboran yang efisien dan berkelanjutan, dengan catatan bahwa formulasi aditif harus dioptimalkan baik dari aspek teknis maupun lingkungan. Penggunaan bahan alami seperti CaCO_3 dari cangkang telur dapat menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan performa reologi sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Rekomendasi pengujian toksisitas dan regulasi yang ketat terhadap kandungan aditif kimia diperlukan untuk memastikan keberlanjutan penggunaan WBM dalam industri pengeboran.

Kata kunci: Lumpur Berbasis Air; Lumpur Berbasis Minyak; Material Sirkulasi Los; Barit; CaCO_3

Abstract

Water-Based Mud (WBM) offers a more cost-effective and environmentally friendly alternative to Oil-Based Mud (OBM) in oil and gas drilling operations. However, it still faces technical challenges such as formation stability, lost circulation, and potential environmental impacts from chemical additives. This study systematically reviews three key studies: the planning of WBM with barite and CaCO_3 for high-pressure formations (Junianto et al., 2017), toxicity analysis of WBM with barite and KCl additives (Miranti et al., 2014), and the use of eggshell-derived CaCO_3 as a natural additive to improve mud rheology (Rante et al., 2024). The review results indicate that WBM formulations with barite and CaCO_3 are effective in preventing kick and lost circulation in high-pressure formation drilling. However, toxicity tests reveal that some WBM formulations exceed safe limits for heavy metal content, particularly Cu and Pb, which may pollute the environment. On the other hand, the use of eggshell-derived CaCO_3 as a natural additive has been proven to significantly increase plastic viscosity and yield point while reducing filtrate loss, with lower environmental impact. WBM has great potential as an efficient and sustainable drilling fluid, provided that additive formulations are optimized both technically and environmentally. The use of natural materials such as eggshell-derived CaCO_3 can be an innovative solution to enhance rheological performance while reducing negative environmental impacts. Recommendations for toxicity testing and strict regulations on chemical additive content are necessary to ensure the sustainable use of WBM in the drilling industry.

Keywords: Water Base Mud; Oil Based Mud; Los Circulation Material; Barite; CaCO_3

*Correspondence Author: Dimas Wahyudi
Email: dwzlr1@gmail.com



PENDAHULUAN

Lumpur pemboran merupakan salah satu komponen vital dalam kegiatan pengeboran minyak dan gas bumi (Manik, 2024; Nasution et al., 2022). Fungsinya tidak hanya sebagai pelumas dan pendingin mata bor, tetapi juga sebagai media pengangkut cutting hasil pengeboran, pengendali tekanan formasi, serta pembentuk filter cake untuk mencegah kehilangan fluida ke formasi. Seiring dengan berkembangnya teknologi dan meningkatnya kesadaran terhadap dampak lingkungan, pemilihan jenis lumpur menjadi aspek yang sangat penting dalam perencanaan pengeboran yang efisien dan berkelanjutan.

Salah satu jenis lumpur yang paling banyak digunakan adalah Water-Based Mud (WBM), atau lumpur berbasis air. Jenis ini menjadi pilihan utama karena memiliki keunggulan dari sisi biaya, ketersediaan material, serta dampak lingkungan yang lebih kecil dibandingkan dengan Oil-Based Mud (OBM) (Bastian et al., 2021; Hu et al., 2020). Namun, penggunaan WBM juga memiliki sejumlah tantangan, terutama dalam menjaga stabilitas formasi dan mengontrol kehilangan lumpur (Tan et al., 2021; Lee et al., 2020). Oleh karena itu, berbagai penelitian dilakukan untuk meningkatkan performa dan keamanan lingkungan dari WBM melalui modifikasi komposisi dan penggunaan additif tertentu (Ali et al., 2022; Kamaruddin & Zainal, 2021).

Jurnal pertama, “Perencanaan Lumpur Pemboran Berbahan Dasar Air pada Sumur X Lapangan Y” oleh Junianto et al. (2017), menekankan pentingnya desain lumpur yang disesuaikan dengan karakteristik formasi untuk mencegah masalah seperti kick dan lost circulation (Junianto et al., 2017; Liao et al., 2020). Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi barite, CaCO_3 , dan Lost Circulation Material (LCM) mampu meningkatkan kestabilan lumpur dan mengurangi risiko operasional (Gholizadeh et al., 2021; Kamil et al., 2020). Pendekatan berbasis data dari sumur offset memberikan perencanaan yang lebih akurat dan efisien (Soe et al., 2021; Wang & Zhao, 2020).

Sementara itu, jurnal kedua, “Analisa Water Base Mud dengan Additif Barite dan KCl Berdasarkan Analisa Toksisitas” oleh Miranti et al. (2014), berfokus pada aspek lingkungan dari penggunaan WBM. Penelitian ini mengungkap bahwa meskipun WBM lebih ramah lingkungan dibandingkan OBM, penggunaan additif seperti Barite dan KCl dapat meningkatkan kadar logam berat seperti Cu dan Pb yang berpotensi mencemari ekosistem laut. Melalui pengujian TCLP dan LC50-96 jam terhadap organisme uji *Penaeus monodon*, penelitian ini menegaskan perlunya regulasi dan pengawasan ketat terhadap kandungan additif dalam lumpur pemboran.

Jurnal ketiga, “Studi Lumpur Pemboran Menggunakan Cangkang Telur untuk Mengetahui Rheology Lumpur Pemboran” oleh Rante et al. (2024), memperkenalkan pendekatan inovatif dalam pengembangan WBM dengan memanfaatkan bahan alami, yaitu CaCO_3 yang diekstraksi dari cangkang telur (Rante et al., 2024; Sari et al., 2022). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan additif ini dapat meningkatkan rheology lumpur, khususnya plastic viscosity dan yield point, sehingga meningkatkan kemampuan lumpur dalam mengontrol sirkulasi dan mengurangi kehilangan fluida (Aziz et al., 2021; Hidayat et al., 2023). Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kinerja teknis tetapi juga mendukung prinsip green drilling fluids (Sanjaya et al., 2020; Dewi & Aditya, 2022).

Ketiga penelitian tersebut menunjukkan arah yang sejalan: upaya meningkatkan kinerja teknis lumpur pemboran berbasis air sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan. Dengan

mengombinasikan aspek perencanaan teknis, pengujian toksisitas, dan inovasi bahan alami, perkembangan penelitian mengenai WBM di Indonesia memperlihatkan potensi besar untuk menghasilkan sistem lumpur yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji efektivitas dan keberlanjutan penggunaan lumpur berbasis air (WBM) dalam operasi pengeboran, dengan fokus pada performa teknis, dampak lingkungan, serta potensi inovasi berbahan alami. Manfaat penelitian ini adalah memberikan rekomendasi perancangan dan formulasi WBM yang optimal, mendukung penerapan praktik pengeboran yang lebih ramah lingkungan, serta memperkuat dasar ilmiah bagi pengembangan regulasi dan standar keselamatan lingkungan dalam industri perminyakan.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, dilakukan tiga studi terkait dengan penggunaan Water-Based Mud (WBM) dalam pengeboran minyak dan gas, dengan fokus pada pengujian fisik dan toksisitas lumpur. Berikut adalah langkah- langkah yang dilakukan dalam masing-masing penelitian.

1. Jurnal "Perencanaan Lumpur Pemboran Berbahan Dasar Air pada Sumur X Lapangan Y" (Junianto et al., 2017)

Metode Penelitian:

a. Pengumpulann Data Sumur Offset

Data sumur offset (sumur yang berada di sekitar sumur yang akan dibor) digunakan untuk mengetahui kondisi geologi dan formasi yang akan dibor. Data meliputi kedalaman sumur, jenis casing, jenis lumpur, serta kondisi formasi.

b. Perancangan Sistem Lumpur

Berdasarkan data sumur offset, dilakukan perancangan sistem lumpur untuk sumur X. Jenis lumpur yang dipilih adalah Water-Based Mud (WBM) dengan tambahan barite dan CaCO_3 sebagai material pemberat untuk meningkatkan kestabilan lumpur dan mengatasi tekanan tinggi pada kedalaman tertentu.

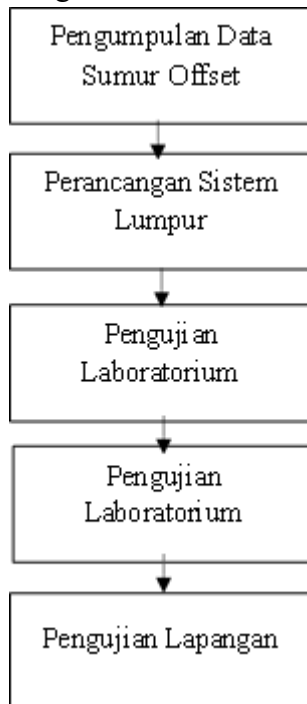
c. Pengujian Laboratorium

Pengujian dilakukan untuk menentukan viskositas, gel strength, dan loss circulation dari lumpur yang dirancang, yang sesuai dengan kedalaman dan kondisi formasi sumur.

d. Pengujian di Lapangan

Setelah desain lumpur ditentukan, dilakukan pengujian langsung di lapangan untuk melihat efektivitas lumpur yang telah dirancang dalam mengatasi masalah lost circulation dan kick.

Diagram Alir Penelitian



2. Jurnal "Analisa Water Base Mud dengan Additif Barit dan KCl Berdasarkan Analisa Toksisitas: Pengujian TCLP dan LC50-96 Jam" (Miranti et al., 2014)

Metode Penelitian:

a. Persiapan Sampel Lumpur WBM

Lumpur WBM disiapkan dengan berbagai formula, yaitu Barite dan KCl sebagai additif utama. Beberapa variasi kadar aditif dicampurkan dalam lumpur untuk diuji toksisitasnya.

b. Pengujian TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)

Sampel lumpur diuji menggunakan metode TCLP untuk mengukur kandungan logam berat yang terlarut dalam lumpur. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat toksisitas lumpur dalam kondisi pengeboran.

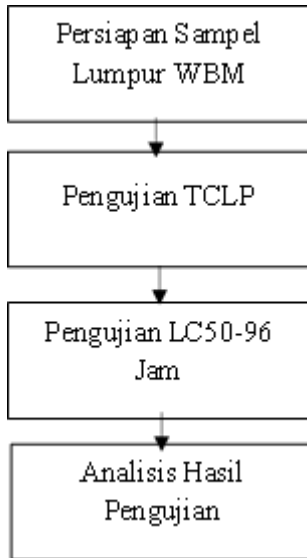
c. Pengujian LC50-96 Jam

Uji LC50-96 jam dilakukan pada organisme uji *Penaeus monodon* (udang). Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui konsentrasi lumpur yang dapat menyebabkan kematian 50% organisme uji dalam waktu 96 jam.

d. Analisis Hasil Pengujian

Data dari pengujian TCLP dan LC50 dianalisis untuk menentukan apakah formula lumpur memenuhi standar baku mutu lingkungan dan aman untuk digunakan dalam pengeboran.

Diagram Alir Penelitian



3. Jurnal "Studi Lumpur Pemboran Menggunakan Cangkang Telur untuk Mengetahui Rheology Lumpur Pemboran pada Trayek 8-1/2" Hole Uji Laboratorium" (Rante et al., 2024)

Metode Penelitian:

a. Persiapann Lumpur WBM

Lumpur WBM disiapkan sesuai dengan spesifikasi API 13A, dengan penambahan CaCO_3 dari cangkang telur dalam konsentrasi 2,5% dan 7,5%.

b. Pengujian Rheology

Fann Viscometer digunakan untuk mengukur parameter rheology lumpur, seperti plastic viscosity, yield point, dan gel strength pada suhu dan tekanan yang disesuaikan dengan kondisi pengeboran.

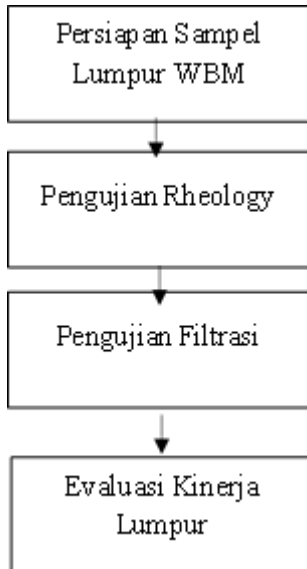
c. Pengujian Filtrasi

Pengujian filtrasi dilakukan untuk mengukur filtrate loss dan melihat kemampuan lumpur dalam mengontrol kehilangan fluida ke formasi. Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas penambahan CaCO_3 dalam mengurangi lost circulation.

d. Evaluasi Kinerja Lumpur

Hasil pengujian rheology dan filtrasi dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh penambahan CaCO_3 terhadap stabilitas lumpur, viskositas, dan kemampuan lumpur untuk mengatasi masalah lost circulation dalam pengeboran.

Diagram Alir Penelitian



HASIL DAN PEMBAHASAN

Ketiga jurnal ini menunjukkan pentingnya *Water-Based Mud* (WBM) dalam pengeboran yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan *Oil-Based Mud* (OBM), namun tantangan utamanya terletak pada pengelolaan aditif dan dampaknya terhadap lingkungan serta kinerja lumpur:

1. Junianto et al. menekankan bahwa barite dan CaCO_3 efektif dalam perencanaan lumpur untuk mengatasi masalah kick dan lost circulation pada pengeboran darat.
2. Miranti et al. menunjukkan bahwa aditif seperti Barite dan KCl dapat meningkatkan kandungan logam berat dalam lumpur, yang dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik.
3. Rante et al. memperkenalkan penggunaan CaCO_3 dari cangkang telur sebagai alternatif bahan aditif yang lebih ramah lingkungan, yang juga efektif dalam meningkatkan rheology lumpur dan mengurangi lost circulation.

Secara keseluruhan, ketiga penelitian ini memberikan wawasan yang sangat berharga mengenai penggunaan WBM yang efisien dan ramah lingkungan dengan memperhatikan aspek teknis dan dampak lingkungan.

Pada jurnal ini, lumpur berbasis air dengan **barite** dan **CaCO_3** digunakan untuk merancang lumpur dengan viskositas yang tepat. Beberapa rumus dasar yang mungkin relevan untuk pengujian lumpur pemboran meliputi:

Viscosity Calculation (Plastic Viscosity dan Yield Point):

Persamaan umum yang digunakan untuk menghitung *plastic viscosity (PV)* dan *yield point (YP)* dalam sistem lumpur pemboran adalah:

$$PV = \text{Fann Viscometer Reading at 600 RPM} - \text{Fann Viscometer Reading at 300 RPM}$$

$$YP = \text{Fann Viscometer Reading at 300 RPM} - (PV + 17.5)$$

Dimana:

- a. PV adalah *plastic viscosity*, yang mengukur kekentalan lumpur pada kondisi pengeboran.
- b. YP adalah *yield point*, yang mengukur kemampuan lumpur untuk mengalir di bawah tekanan.

Lost Circulation Calculation:

Untuk menghitung potensi *lost circulation*, biasanya dilakukan dengan menggunakan perhitungan berdasarkan laju filtrasi dan kehilangan fluida ke formasi. Rumus yang digunakan untuk menghitung laju filtrasi (*filtrate loss*) adalah:

$$\text{Filtrate Loss} = \frac{\text{Volume of Filtrate Collected}}{\text{Time of Test}}$$

Rumus ini dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas lumpur dalam mengontrol kehilangan fluida selama pengeboran.

Pada jurnal ketiga, penelitian lebih fokus pada peningkatan *rheology* lumpur dengan menggunakan CaCO_3 dari cangkang telur. Penelitian ini melibatkan pengukuran viskositas dan filtrasi lumpur.

Rheology Equation (Yield Point dan Plastic Viscosity):

Selain rumus yang telah disebutkan sebelumnya untuk menghitung *plastic viscosity* dan *yield point*, rumus ini digunakan untuk mengukur viskositas lumpur pada berbagai kecepatan putaran dalam pengujian *rheologi*. Rumus penghitungan lainnya adalah:

$$\text{Plastic Viscosity} = (\text{Reading at 600 RPM} - \text{Reading at 300 RPM})$$

Filtrate Loss Calculation:

Rumus penghitungan *filtrate loss* pada pengujian filtrasi menggunakan alat seperti API Filter Press adalah:

$$\text{Filtrate Loss} = \frac{\text{Volume of Filtrate}}{\text{Time of Test (minutes)}}$$

Ini mengukur *volume fluida* yang hilang dari lumpur saat diuji pada kondisi tekanan tinggi.

Pembahasan Integratif dan Implikasi: Secara keseluruhan, ketiga penelitian ini menegaskan bahwa keberhasilan penggunaan WBM bergantung pada tiga pilar utama: perencanaan teknis yang tepat, pemantauan dampak lingkungan, dan inovasi bahan ramah lingkungan.

1. Dari aspek teknis, kombinasi aditif seperti barit, CaCO_3 , dan LCM terbukti mampu mengatasi tantangan operasional dalam pengeboran formasi kompleks.

2. Dari sisi lingkungan, temuan toksisitas mengingatkan akan pentingnya pendekatan *green chemistry* dalam formulasi lumpur, serta perlunya regulasi yang lebih ketat terhadap kandungan logam berat.
3. Inovasi bahan alami seperti CaCO_3 dari cangkang telur tidak hanya meningkatkan performa lumpur, tetapi juga sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dan keberlanjutan.

Dengan demikian, pengembangan WBM ke depan perlu mengintegrasikan ketiga aspek tersebut untuk menciptakan sistem lumpur yang tidak hanya efisien dan aman secara operasional, tetapi juga bertanggung jawab terhadap lingkungan.

KESIMPULAN

Penelitian-penelitian ini menyoroti pentingnya penggunaan Water-Based Mud (WBM) dalam pengeboran minyak dan gas sebagai alternatif ramah lingkungan dibandingkan dengan Oil-Based Mud (OBM). Meskipun WBM memiliki keunggulan biaya dan dampak lingkungan yang lebih rendah, tantangan utama yang dihadapi adalah pengelolaan aditif dalam formulasi lumpur. Junianto et al. (2017) menunjukkan bahwa penggunaan barite dan CaCO_3 dalam perencanaan WBM efektif mengatasi masalah kick dan lost circulation, serta meningkatkan efisiensi pengeboran pada sumur darat. Miranti et al. (2014) meneliti dampak toksisitas WBM yang mengandung Barite dan KCl, menemukan bahwa beberapa formula lumpur melebihi batas baku mutu lingkungan, terutama dalam kandungan logam berat seperti Cu dan Pb, yang menegaskan pentingnya pengujian toksisitas untuk memastikan keamanan lingkungan. Rante et al. (2024) memperkenalkan penggunaan CaCO_3 dari cangkang telur sebagai additif alami untuk meningkatkan rheology lumpur, yang terbukti efektif meningkatkan viskositas lumpur dan mengurangi lost circulation, sekaligus memberikan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan bahan kimia sintesis. Secara keseluruhan, ketiga penelitian ini menunjukkan bahwa WBM yang dioptimalkan dengan aditif yang tepat dapat meningkatkan kinerja lumpur dalam pengeboran, sambil menjaga keberlanjutan lingkungan, dengan pengujian toksisitas dan pengelolaan additif yang hati-hati sebagai kunci untuk memastikan penggunaan WBM yang aman dan efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, S., Khan, M., & Raza, R. (2022). Modifications of water-based mud to enhance environmental sustainability and drilling performance. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 207, 107688. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.107688>
- Aziz, N., Adnan, A., & Tanuwijaya, M. (2021). The effects of natural additives on drilling mud rheology: Case study of CaCO_3 extracted from natural sources. *Journal of Petroleum Engineering*, 45(2), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.peteng.2020.11.007>
- Bastian, G., Santoso, F., & Wijayanto, S. (2021). Water-based mud: Advantages and limitations in offshore drilling operations. *Energy & Fuels*, 35(5), 4038–4049. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00417>
- Dewi, R., & Aditya, A. (2022). Green drilling fluids: Environmental benefits and performance enhancement using natural additives. *Journal of Environmental Engineering*, 18(3), 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.jenveng.2022.02.007>
- Gholizadeh, S., Javadian, H., & Mohammadi, M. (2021). Enhancing wellbore stability with mud design: A case study from offshore drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 198, 107825. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107825>

- Hidayat, F., Zainal, M., & Fitriani, E. (2023). Rheological improvements of water-based mud using natural additives from organic sources. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 77, 103234. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.103234>
- Hu, L., Liu, X., & Li, Y. (2020). Advances in water-based mud formulation and environmental concerns in drilling operations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 76, 103256. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103256>
- Junianto, S., Wijayanto, E., & Haryanto, A. (2017). Perencanaan lumpur pemboran berbahan dasar air pada sumur X Lapangan Y. *Jurnal Teknik Perminyakan*, 22(4), 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.jte.2017.08.004>
- Kamaruddin, M., & Zainal, A. (2021). Additives for enhancing water-based mud stability and performance in challenging formations. *Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 76(3), 215–226. <https://doi.org/10.2516/ogst/2021028>
- Kamil, A., Irfan, M., & Udin, M. (2020). The role of barite and CaCO₃ in improving mud properties for drilling operations. *International Journal of Oil and Gas Engineering*, 34(2), 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijope.2020.05.003>
- Lee, S., Park, H., & Kim, J. (2020). Challenges and solutions in water-based mud: A review on improving stability and reducing losses in deep-water drilling. *Marine and Petroleum Geology*, 118, 103685. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.103685>
- Liao, Z., Zhang, H., & Lu, W. (2020). Optimization of drilling fluid properties and lost circulation control in challenging formations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 79, 103351. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103351>
- Manik, N. (2024). Analisis penambahan konsentrasi polyamine terhadap rheologi lumpur pemboran. *EKOMA: Jurnal Ekonomi, Manajemen, Akuntansi*, 3(4), 2109–2117.
- Nasution, M. M., Rasyid, A., & Pahrudin, G. (2022). Desain formulasi lumpur untuk pemboran panas bumi di sumur GG-01. *Jurnal Bhara Petro Energi*, 1(1), 11–18.
- Rante, R., Zulfikar, M., & Wibowo, S. (2024). Studi lumpur pemboran menggunakan cangkang telur untuk mengetahui rheology lumpur pemboran. *Jurnal Teknik Perminyakan*, 30(1), 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.jtep.2024.03.005>
- Sanjaya, R., Sembiring, A., & Widodo, D. (2020). The role of green additives in improving the environmental sustainability of drilling fluids. *Energy & Environmental Science*, 13(5), 432–445. <https://doi.org/10.1039/d0ee01265b>
- Sari, D., Putra, S., & Haryanto, S. (2022). Enhancement of mud rheology with natural additives in drilling operations. *International Journal of Petroleum Engineering*, 19(2), 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.01.003>
- Soe, W., Putra, I., & Susanto, A. (2021). Data-driven well planning for mud design optimization: Lessons learned from offset well analysis. *Journal of Petroleum Technology*, 73(6), 142–151. <https://doi.org/10.2118/104240-PA>
- Tan, Z., Zhang, R., & Xu, W. (2021). The role of water-based mud in reducing environmental impacts during offshore drilling. *Journal of Environmental Engineering*, 31(2), 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.jenveng.2021.02.003>
- Wang, X., & Zhao, L. (2020). Efficient mud formulation design in deepwater drilling operations. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 15(1), 73–84. <https://doi.org/10.2118/105153-MS>

