

# ANALISIS DAN OPTIMASI LAJU PENETRASI PEMBORAN BERBASIS MECHANICAL SPECIFIC ENERGY PADA SUMUR YN-01

Yudit Sirupang<sup>1</sup>, Joko Wiyono<sup>2</sup>, Rohima Sera Afifah<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Sekolah Tinggi Teknologi Migas Balikpapan

Corresponding e-mail: [yuditsirupang@gmail.com](mailto:yuditsirupang@gmail.com)

Copyright © 2026 The Author



This is an open access article

Under the Creative Commons Attribution Share Alike 4.0 International License

DOI: [10.53866/jimi.v6i2.1268](https://doi.org/10.53866/jimi.v6i2.1268)

## Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi dan mengoptimalkan parameter operasi pemboran yang memengaruhi laju penetrasi (ROP) dengan metode Mechanical Specific Energy (MSE) pada Sumur YN-01 Lapangan XN. ROP merupakan indikator penting yang menentukan efisiensi waktu dan biaya pemboran, namun data lapangan menunjukkan penurunan signifikan terutama pada interval shale-sandstone kedalaman 4.973,75 hingga 6.961,94 ft. Penelitian ini menggunakan data operasi pemboran (WOB, RPM, torsi, laju alir), interpretasi litologi, serta perhitungan MSE untuk menilai efisiensi mekanik proses pemboran dan mengidentifikasi penyebab slow ROP. Hasil menunjukkan nilai MSE tinggi (hingga 2.197.126 psi) yang menandakan inefisiensi energi akibat keausan bit, pemilihan parameter yang kurang tepat, serta kecenderungan shale menyebabkan bit balling. Optimasi berdasarkan MSE menunjukkan peningkatan ROP yang signifikan: dari 30,54 menjadi 53,84 ft/hr; 59,77 menjadi 76,92 ft/hr; 20,99 menjadi 49,52 ft/hr; 20,01 menjadi 62,34 ft/hr; 9,32 menjadi 85,51 ft/hr; dan 11,25 menjadi 81,39 ft/hr. Temuan ini membuktikan bahwa kombinasi WOB, RPM, dan kondisi hidraulika yang tepat dapat mengurangi inefisiensi mekanik serta meningkatkan kinerja pemboran. Penelitian ini memberikan panduan aplikatif untuk optimasi parameter pemboran pada kondisi geologi serupa.

**Kata Kunci:** Laju Penetrasi, Optimasi Pemboran, *Mechanical Specific Energy*, WOB, RPM

## *Analysis And Optimization Of Drilling Rate Of Penetration Based On Mechanical Specific Energy In Well YN-01*

### Abstract

*This study evaluates and optimizes drilling operation parameters that affect the rate of penetration (ROP) using the Mechanical Specific Energy (MSE) method at the YN-01 Well in the XN Field. ROP is an important indicator that determines drilling time and cost efficiency, but field data shows a significant decline, especially in the shale-sandstone interval at a depth of 4,973.75 to 6,961.94 ft. This study uses drilling operation data (WOB, RPM, torque, flow rate), lithological interpretation, and MSE calculations to assess the mechanical efficiency of the drilling process and identify the causes of slow ROP. The results show high MSE values (up to 2,197,126 psi), which indicate energy inefficiency due to bit wear, inappropriate parameter selection, and a tendency for shale to cause bit balling. Optimization based on MSE showed a significant increase in ROP: from 30.54 to 53.84 ft/hr; 59.77 to 76.92 ft/hr; 20.99 to 49.52 ft/hr; 20.01 to 62.34 ft/hr; 9.32 to 85.51 ft/hr; and 11.25 to 81.39 ft/hr. These findings prove that the right combination of WOB, RPM, and hydraulic conditions can reduce mechanical inefficiency and improve drilling performance. This study provides practical guidance for optimizing drilling parameters in similar geological conditions.*

**Keywords:** Rate of Penetration, Drilling Optimization, *Mechanical Specific Energy*, WOB, RPM

## 1. Pendahuluan

Laju penetrasi atau *Rate of Penetration* (ROP) merupakan salah satu parameter utama dalam operasi pemboran yang sangat berpengaruh terhadap efisiensi waktu dan biaya kegiatan pengeboran. Semakin tinggi nilai ROP yang dapat dicapai secara optimal, maka waktu pemboran dapat dipersingkat sehingga biaya operasional dapat ditekan. Dalam praktiknya, ROP sering mengalami fluktuasi akibat pengaruh berbagai faktor, baik yang berasal dari parameter operasi pemboran maupun karakteristik formasi batuan yang ditembus. Apabila nilai ROP lebih rendah dari yang diharapkan, maka durasi pemboran menjadi lebih lama dan berpotensi meningkatkan risiko operasional serta biaya kegiatan pengeboran. Oleh karena itu, analisis terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi ROP menjadi sangat penting untuk meningkatkan efisiensi operasi pemboran (Chen et al., 2025; Mazen et al., 2021).

Berbagai metode telah digunakan untuk menganalisis dan memprediksi kinerja pemboran, salah satunya adalah model Bourgoyne dan Young yang menggunakan pendekatan regresi untuk memperkirakan laju penetrasi (Bourgoyne, 1991). Namun model tersebut membutuhkan data yang cukup lengkap sehingga tidak selalu mudah diterapkan pada kondisi lapangan dengan keterbatasan data. Upaya optimasi pemboran melalui pendekatan yang mempertimbangkan efisiensi penembusan formasi juga ditunjukkan oleh studi sebelumnya, di mana pengaturan parameter desain dan sistem *completion* yang tepat terbukti mampu meningkatkan kinerja pemboran dan produksi pada formasi dengan karakteristik kompleks (Afifah et al., 2020). Oleh karena itu, metode *Mechanical Specific Energy* (MSE) menjadi alternatif yang efektif untuk mengevaluasi efisiensi energi mekanik selama proses pemboran. Nilai MSE menggambarkan jumlah energi yang diperlukan untuk menghancurkan satu satuan volume batuan, sehingga semakin rendah nilai MSE maka semakin efisien proses pemboran yang terjadi. Analisis MSE juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi berbagai permasalahan operasional seperti keausan mata bor (*bit wear*), terbentuknya *bit balling*, serta perubahan karakteristik formasi yang sedang dibor (Chen et al., 2018; Hegde et al., 2017; Shokry et al., 2023).

Pada kegiatan pemboran Sumur YN-01 di Lapangan XN ditemukan beberapa permasalahan yang berkaitan dengan penurunan laju penetrasi pada interval kedalaman tertentu. Penurunan ROP terutama terjadi pada interval kedalaman 4973.75 ft hingga 6961.94 ft pada section 12.25 inci dan 8.5 inci yang didominasi oleh litologi *shale* tebal dan *interbedded sandstone* pada Formasi Bunyu. Kondisi tersebut menyebabkan nilai ROP yang dicapai relatif rendah sehingga berpotensi menurunkan efisiensi operasi pemboran secara keseluruhan. Permasalahan ini menunjukkan adanya ketidaksesuaian antara parameter operasi pemboran yang digunakan dengan karakteristik formasi yang ditembus (Suppes et al., 2019; Zhou et al., 2017).

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu evaluasi terhadap parameter operasi pemboran yang mempengaruhi laju penetrasi serta analisis efisiensi energi mekanik selama proses pemboran. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter operasi pemboran seperti WOB dan RPM terhadap nilai ROP pada Sumur YN-01, mengidentifikasi parameter yang paling dominan dalam pencapaian ROP optimum, serta mengevaluasi kejadian *slow ROP* menggunakan metode *Mechanical Specific Energy* (MSE). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi parameter operasi yang lebih optimal sehingga efisiensi kegiatan pemboran dapat ditingkatkan.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Objek, waktu dan Tempat

Objek penelitian dalam studi ini adalah operasi pemboran pada Sumur YN-01 di Lapangan XN yang bertujuan untuk mengevaluasi dan mengoptimasi parameter operasi pemboran terhadap laju penetrasi (*Rate of Penetration* / ROP) menggunakan metode *Mechanical Specific Energy* (MSE). Penelitian ini dilaksanakan pada 1 Agustus – 30 November 2025. Kegiatan penelitian meliputi tahap orientasi lapangan, pengumpulan data pemboran, pengolahan data, serta penyusunan laporan hasil analisis. Lokasi penelitian berada di PT Pertamina Hulu Kalimantan Timur (PHKT) yang beralamat di Jl. Pasir Ridge, Telaga Sari, Balikpapan Kota, Kalimantan Timur.

### 2.2. Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan memanfaatkan data sekunder yang diperoleh dari kegiatan operasi pemboran di lapangan. Data yang digunakan berasal dari laporan operasi pemboran dan data *mud logging* yang mencatat parameter operasi secara real-time selama proses pengeboran

berlangsung. Data operasional pemboran mencakup parameter seperti *Weight on Bit* (WOB), *Rotary Speed* (RPM), *Rate of Penetration* (ROP), laju aliran lumpur (*flow rate*), torsi (*torque*), *standpipe pressure* (SPP), waktu penggunaan mata bor (*bit run time*), serta total kedalaman pemboran (Abdul-Rani et al., 2014; Chen et al., 2016; Gan et al., 2025).

### 2.3. Teknik Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan mengolah data operasi pemboran untuk mengevaluasi hubungan antara parameter operasi dan laju penetrasi pemboran. Tahap pertama dilakukan dengan melakukan pengolahan dan interpretasi data pemboran untuk mengidentifikasi variasi nilai ROP pada berbagai interval kedalaman serta kondisi formasi yang ditembus. Selanjutnya dilakukan analisis menggunakan metode *Mechanical Specific Energy* (MSE) untuk mengevaluasi efisiensi energi mekanik selama proses pemboran. Metode ini digunakan untuk menghitung energi yang diperlukan dalam menghancurkan satu satuan volume batuan, sehingga dapat diketahui tingkat efisiensi proses pemboran. Perhitungan MSE dilakukan menggunakan parameter operasi seperti WOB, RPM, torsi, luas penampang mata bor, dan nilai ROP yang diperoleh dari data pemboran (Alshahrani & Ayadiuno, 2021; Darwesh et al., 2020; Khalilidermani & Knez, 2022).

## 3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil penelitian yang diperoleh dari pengolahan data operasi pemboran pada Sumur YN-01 di Lapangan XN. Data yang telah dikumpulkan dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh parameter operasi pemboran terhadap laju penetrasi (*Rate of Penetration* / ROP) serta tingkat efisiensi energi mekanik menggunakan metode *Mechanical Specific Energy* (MSE). Hasil penelitian disajikan secara sistematis yang meliputi pemaparan temuan penelitian, analisis hasil yang diperoleh, serta keterkaitannya dengan tujuan penelitian yang telah dirumuskan sebelumnya.

### 3.1. Hasil Penelitian

Hasil penelitian diperoleh dari pengolahan data operasi pemboran pada Sumur YN-01 Lapangan XN yang meliputi parameter operasi seperti *Weight on Bit* (WOB), *Rotary Speed* (RPM), torsi, serta *Rate of Penetration* (ROP). Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan metode *Mechanical Specific Energy* (MSE) untuk mengevaluasi efisiensi energi mekanik selama proses pemboran.

Berdasarkan hasil evaluasi data pemboran, ditemukan beberapa interval kedalaman yang mengalami penurunan laju penetrasi (*slow ROP*), khususnya pada interval 4973.75 ft hingga 6961.94 ft. Pada interval ini terjadi penurunan nilai ROP secara signifikan dibandingkan interval sebelumnya. Ringkasan hasil perhitungan MSE pada beberapa interval kedalaman ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Perhitungan *Mechanical Specific Energy* (MSE)

No Data	Depth (ft)	Bit Type	ROP (ft/hr)	MSE (psi)
1	1476.38	TCB 26"	30.54	19290
2	4429.13	PDC 17.5"	59.77	47233
3	4973.75	PDC 12.25"	20.99	247238
4	5646.32	PDC 12.25"	20.01	341740
5	6377.95	PDC 8.5"	9.32	2197126
6	6961.94	PDC 8.5"	11.25	1768589

Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa nilai MSE meningkat secara signifikan seiring bertambahnya kedalaman pemboran, terutama pada interval di atas 4973.75 ft. Pada interval tersebut nilai MSE mencapai lebih dari 100.000 psi, yang menunjukkan adanya ketidakefisienan energi mekanik selama proses pemboran.

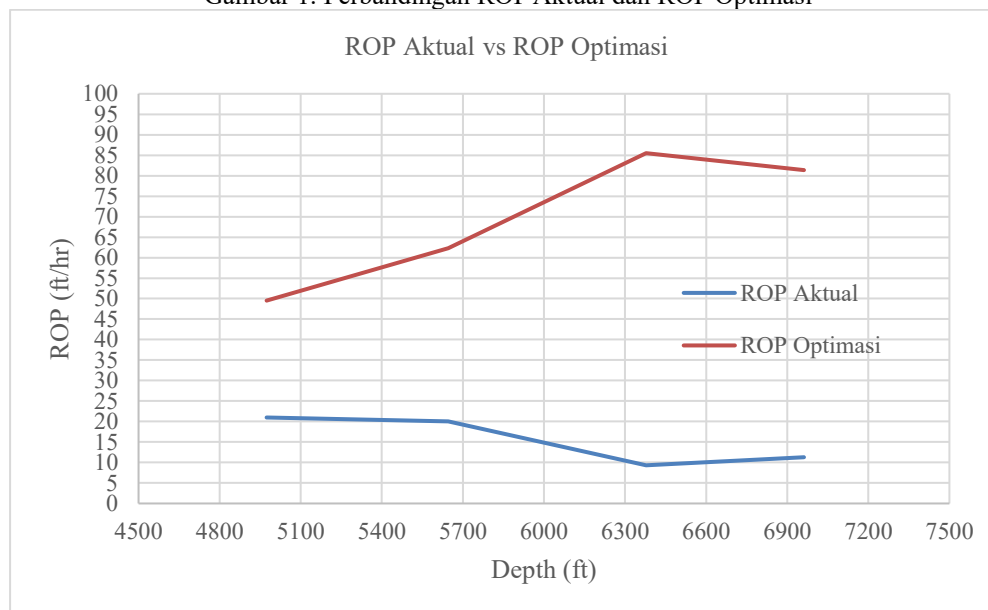
Selain itu dilakukan perhitungan ROP optimasi berdasarkan nilai target MSE untuk mengetahui potensi peningkatan laju penetrasi apabila parameter operasi disesuaikan (Sun, 2025; Teale, 2001). Hasil perbandingan antara ROP aktual dan ROP hasil optimasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan ROP Aktual dan ROP Optimasi

No Data	Depth (ft)	Jenis Bit	ROP aktual (ft/hr)	ROP prediksi (ft/hr)
1	1476.38	TCB 26"	30.54	53.84
2	4429.13	PDC 17.5"	59.77	76.92
3	4973.75	PDC 12.25"	20.99	49.52
4	5646.32	PDC 12.25"	20.01	62.34
5	6377.95	PDC 8.5"	9.32	85.51
6	6961.94	PDC 8.5"	11.25	81.39

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan parameter operasi yang lebih optimal berpotensi meningkatkan nilai ROP secara signifikan, terutama pada interval kedalaman yang sebelumnya mengalami kondisi *slow ROP* (Song et al., 2024; Zhou et al., 2017). Untuk mempermudah interpretasi hasil penelitian, hubungan antara ROP aktual dan ROP optimasi juga dapat disajikan dalam bentuk grafik perbandingan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Gambar 1. Perbandingan ROP Aktual dan ROP Optimasi



Gambar 1 menunjukkan perbandingan antara nilai ROP aktual dan ROP hasil optimasi pada setiap interval kedalaman. Terlihat bahwa seluruh interval mengalami peningkatan ROP setelah dilakukan optimasi berbasis nilai MSE. Peningkatan paling signifikan terjadi pada kedalaman 6377.95 ft, di mana ROP meningkat dari 9.32 ft/hr menjadi 85.51 ft/hr. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter operasi sebelumnya belum optimal dan masih terdapat potensi besar untuk peningkatan efisiensi pemboran.

### 3.2. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai *Mechanical Specific Energy* (MSE) memiliki hubungan yang erat dengan performa laju penetrasi pemboran (*Rate of Penetration* / ROP). Secara teoritis, MSE merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur jumlah energi mekanik yang dibutuhkan untuk menghancurkan satu satuan volume batuan selama proses pemboran. Konsep ini menyatakan bahwa nilai MSE yang mendekati kekuatan batuan menunjukkan kondisi pemboran yang efisien, sedangkan nilai MSE yang jauh lebih tinggi mengindikasikan adanya inefisiensi energi dalam proses penghancuran batuan (Mantegazini et al., 2025).

Berdasarkan hasil analisis pada Sumur YN-01, terlihat bahwa beberapa interval kedalaman menunjukkan nilai MSE yang sangat tinggi, terutama pada interval di atas 4973.75 ft. Kondisi ini berkorelasi dengan rendahnya nilai ROP yang dihasilkan pada interval tersebut. Tingginya nilai MSE menunjukkan bahwa energi mekanik yang diberikan melalui parameter operasi pemboran seperti *Weight on Bit* (WOB) dan *Rotary Speed* (RPM) tidak sepenuhnya digunakan untuk menghancurkan batuan, sehingga efisiensi pemboran menjadi menurun.

Temuan ini sejalan dengan konsep optimasi pemboran yang menyatakan bahwa peningkatan parameter operasi pemboran tidak selalu menghasilkan peningkatan laju penetrasi apabila tidak disesuaikan dengan karakteristik formasi batuan yang ditembus. Ketidaksiharian antara parameter operasi dan kondisi formasi dapat menyebabkan sebagian energi mekanik terbuang dalam bentuk gesekan, getaran, maupun deformasi pada sistem pemboran (Alshahrani & Ayadiuno, 2021; Hassan et al., 2020; Zhou et al., 2017).

Selain itu, tingginya nilai MSE pada beberapa interval pemboran juga dapat dipengaruhi oleh faktor lain, seperti kondisi mata bor yang mulai mengalami keausan, perubahan karakteristik formasi batuan menjadi lebih keras, serta kurang optimalnya sistem hidraulik dalam proses pembersihan *cutting* di dasar lubang bor. Kondisi tersebut dapat menghambat proses penghancuran batuan dan menyebabkan penurunan nilai ROP meskipun parameter operasi telah ditingkatkan.

Selain itu, peningkatan ROP hasil optimasi yang signifikan menunjukkan bahwa pendekatan berbasis MSE tidak hanya berfungsi sebagai alat evaluasi, tetapi juga sebagai dasar pengambilan keputusan operasional secara kuantitatif. Dengan menargetkan nilai MSE yang lebih mendekati kekuatan batuan, operator dapat menghindari penggunaan energi berlebih yang tidak efektif.

Secara praktis, hasil ini menegaskan bahwa optimasi parameter seperti WOB dan RPM harus dilakukan secara dinamis mengikuti perubahan karakteristik formasi. Pada interval *shale* yang cenderung menyebabkan *bit balling*, peningkatan RPM yang diimbangi dengan pengaturan hidraulika terbukti lebih efektif dibandingkan hanya meningkatkan WOB. Dengan demikian, pendekatan berbasis MSE memberikan keunggulan dalam mengintegrasikan aspek mekanik dan kondisi formasi secara simultan.

Sebaliknya, pada interval pemboran yang memiliki nilai MSE lebih rendah, performa pemboran menunjukkan hasil yang lebih efisien dengan nilai ROP yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa energi mekanik yang diberikan oleh sistem pemboran dapat dimanfaatkan secara optimal dalam proses penghancuran batuan. Dengan demikian, pemantauan nilai MSE selama proses pemboran dapat digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi efisiensi operasi serta menentukan penyesuaian parameter operasi yang lebih optimal.

Implikasi dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode MSE dapat digunakan sebagai alat evaluasi yang efektif dalam kegiatan optimasi pemboran. Dengan melakukan analisis terhadap nilai MSE, operator pemboran dapat mengidentifikasi kondisi pemboran yang tidak efisien dan melakukan penyesuaian parameter operasi secara lebih tepat. Penerapan metode ini tidak hanya berpotensi meningkatkan laju penetrasi pemboran, tetapi juga dapat mengurangi waktu operasi serta menekan biaya pemboran secara keseluruhan.

### 3.3. Kaitan dengan Tujuan Penelitian

Tujuan utama penelitian ini adalah menganalisis pengaruh parameter operasi pemboran terhadap laju penetrasi serta mengevaluasi efisiensi energi mekanik menggunakan metode *Mechanical Specific Energy* (MSE) pada operasi pemboran Sumur YN-01 Lapangan XN. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa nilai MSE dapat digunakan sebagai indikator untuk mengidentifikasi kondisi pemboran yang tidak efisien. Interval pemboran yang memiliki nilai MSE tinggi menunjukkan adanya ketidaksiharian parameter operasi sehingga menghasilkan nilai ROP yang rendah.

Melalui analisis MSE, penelitian ini juga berhasil mengidentifikasi kombinasi parameter operasi pemboran yang lebih optimal sehingga dapat meningkatkan efisiensi energi mekanik dan laju penetrasi pemboran. Dengan demikian, hasil penelitian ini secara langsung menjawab tujuan penelitian yaitu mengevaluasi serta mengoptimasi parameter operasi pemboran untuk meningkatkan performa ROP.

## 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan pada operasi pemboran Sumur YN-01 Lapangan XN, dapat disimpulkan bahwa parameter operasi pemboran memiliki pengaruh yang signifikan terhadap laju

penetrasi (*Rate of Penetration / ROP*) dan efisiensi energi mekanik selama proses pemboran. Analisis menggunakan metode *Mechanical Specific Energy* (MSE) menunjukkan bahwa interval pemboran yang memiliki nilai MSE tinggi cenderung menghasilkan nilai ROP yang lebih rendah, yang menandakan adanya ketidakefisienan energi mekanik dalam proses penghancuran batuan. Melalui evaluasi nilai MSE, penelitian ini berhasil mengidentifikasi kombinasi parameter operasi yang lebih optimal, seperti pengaturan *Weight on Bit* (WOB), *Rotary Speed* (RPM), dan *flow rate*, yang berpotensi meningkatkan efisiensi pemboran serta meningkatkan nilai ROP dibandingkan dengan kondisi operasi sebelumnya. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode MSE dapat digunakan sebagai alat evaluasi yang efektif dalam kegiatan optimasi pemboran untuk meningkatkan efisiensi waktu dan biaya operasi. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena hanya menggunakan data pemboran dari satu sumur dengan interval kedalaman tertentu, sehingga hasil yang diperoleh belum tentu mewakili seluruh kondisi formasi di lapangan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan data dari lebih banyak sumur serta mempertimbangkan parameter tambahan seperti karakteristik formasi batuan dan kondisi hidrolik pemboran agar analisis optimasi pemboran dapat dilakukan secara lebih komprehensif.

### Bibliografi

- Abdul-Rani, A. M., Ismail, M. Z., Zaky, M. A., Noor, M. H. M., Zhun, Y. Y., Ganesan, K., Rao, T. V. V. L. N., Kamal, S., & Ginta, T. L. (2014). Improving Rate of Penetration for PDC Drill Bit Using Reverse Engineering. *Applied Mechanics and Materials*, 607, 153–160. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.607.153>
- Afifah, R. S., Karmila, K., Adhiksana, A., & Jumardi, A. (2020). Optimasi Produksi Sumur CBM dengan Radial Jet Drilling (RJD). *JST (Jurnal Sains Terapan)*, 6(1). <https://doi.org/10.32487/jst.v6i1.748>
- Alshahrani, S., & Ayadiuno, C. (2021, September 15). *Estimating Formation Tops while Drilling Using Rate of Penetration ROP and Mechanical Specific Energy MSE*. <https://doi.org/10.2118/206093-MS>
- Bourgoyne, A. T. . (1991). *Applied drilling engineering*. Society of Petroleum Engineers.
- Chen, X., Gao, D., Guo, B., & Feng, Y. (2016). Real-time optimization of drilling parameters based on mechanical specific energy for rotating drilling with positive displacement motor in the hard formation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 686–694. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.09.019>
- Chen, X., Wang, R., Yang, J., Gao, D., Li, G., & Li, P. (2025). A new intelligent optimization method for drilling parameters of extended reach wells based on mechanical specific energy and machine learning. *Petroleum Research*, 10(3), 485–500. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2025.03.002>
- Chen, X., Yang, J., & Gao, D. (2018). Drilling Performance Optimization Based on Mechanical Specific Energy Technologies. In *Drilling*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75827>
- Darwesh, A. K., Rasmussen, T. M., & Al-Ansari, N. (2020). Controllable drilling parameter optimization for roller cone and polycrystalline diamond bits. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10(4), 1657–1674. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-00823-1>
- Gan, C., Wang, Y., Cao, W.-H., Liu, K.-Z., & Wu, M. (2025). Real-time formation drillability sensing-based hybrid online prediction method for the rate of penetration (ROP) and its industrial application for drilling processes. *Control Engineering Practice*, 164, 106487. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2025.106487>
- Hassan, A., Elkhatny, S., & Al-Majed, A. (2020). Coupling rate of penetration and mechanical specific energy to Improve the efficiency of drilling gas wells. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83, 103558. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103558>
- Hegde, C., Daigle, H., Millwater, H., & Gray, K. (2017). Analysis of rate of penetration (ROP) prediction in drilling using physics-based and data-driven models. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 159, 295–306. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.020>
- Khalilidermani, M., & Knez, D. (2022). A Survey of Application of Mechanical Specific Energy in Petroleum and Space Drilling. *Energies*, 15(9), 3162. <https://doi.org/10.3390/en15093162>
- Mantegazini, D. Z., Nascimento, A., Mathias, M. H., Romero Guzman, O. J., & Reich, M. (2025). Optimization of Rate of Penetration and Mechanical Specific Energy Using Response Surface Methodology and Multi-Objective Optimization. *Applied Sciences*, 15(3), 1390. <https://doi.org/10.3390/app15031390>

- Mazen, A. Z., Rahmanian, N., Mujtaba, I. M., & Hassanpour, A. (2021). Effective mechanical specific energy: A new approach for evaluating PDC bit performance and cutters wear. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *196*, 108030. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108030>
- Shokry, A., Elkhatny, S., & Abdurraheem, A. (2023). Real-time rate of penetration prediction for motorized bottom hole assembly using machine learning methods. *Scientific Reports*, *13*(1), 14496. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41782-2>
- Song, X. Z., Zhang, R., Zhu, Z. P., Wu, Y., Pang, Z. Y., Li, G. S., & Zhang, C. K. (2024, September 20). Enhancing Real-Time Drilling Efficiency: Mechanism of ROP Prediction Models and Novel Optimization Strategies in Chinese Oilfields. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. <https://doi.org/10.2118/221074-MS>
- Sun, Y. (2025). Mechanical specific energy-based optimization of drilling operations in Changning: Methodology and practical implications. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*. <https://doi.org/10.1177/14727978251369194>
- Suppes, R., Ebrahimi, A., & Krampe, J. (2019). Optimising casing milling Rate Of Penetration (ROP) by applying the concept of Mechanical Specific Energy (MSE): a justification of the concept's applicability by literature review and a pilot study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *180*, 918–931. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.06.008>
- Teale, R. (2001). The concept of specific energy in rock drilling. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* *1965*, *2*, 57–73.
- Zhou, Y., Zhang, W., Gamwo, I., & Lin, J.-S. (2017). Mechanical specific energy versus depth of cut in rock cutting and drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *100*, 287–297. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.11.004>