PROCEEDINGS CONFERENCE SISI INDONESIA III
Tut Wuri Handayani: Development of Education, Science and Technology, and Humanity for the Progress of the Indonesian People
https://conference.sinesia.id/ncrcs-sinesia | E-ISSN: 3110-1062 |
https://doi.org/10.69836/ncrcs-sinesia

Strategi Workover Dinamis untuk Water Shut-Off dalam Meningkatkan Efisiensi Waterflood dan Keberlanjutan Energi Nasional

Dynamic Workover Strategy for Water Shut-Off to Enhance Waterflood Efficiency and National Energy Sustainability

Rizky Datu
tandidaturizky@gmail.com
STT MIGAS Balikpapan, Kalimantan, Indonesia

Info Article
Submitted: 1 April 2026 | **Revised**: 10 May 2026 | **Accepted**: 14 May 2026
How to cite: Rizky Datu, "Strategi Workover Dinamis untuk Water Shut-Off dalam Meningkatkan Efisiensi Waterflood dan Keberlanjutan Energi Nasional", *Proceedings Conference Sisi Indonesia III*, 2026, P. 375-382.

ABSTRACT

Optimizing mature waterflood reservoirs is critical for Indonesia's energy security and aligns with SDG 7 (affordable and clean energy) and SDG 12 (responsible consumption). This study addresses the challenge of declining oil production and excessive water cycling in the Olympus Field by developing a dynamic, rule-based workover strategy that proactively manages water breakthrough. Using tNavigator, a high-fidelity reservoir simulator, modeled 7 injectors and 11 producers over a 20 year forecast. A production well automatically triggers a workover when its water cut exceeds the economic limit of 0.8; the worst-offending perforation identified by layer-wise water cut contribution from simulation output is then selectively isolated. This closed-loop logic was implemented via tNavigator's well control scheduler. Results show that the optimized strategy increases cumulative oil production by 1.7 MMstb (3.2%) while reducing cumulative water production by 8.2 MMstb (7.6%) and cumulative water injection by 7.1 MMstb (4.3%). Reservoir pressure is better maintained, indicating improved sweep efficiency and reduced water cycling. Preliminary economic evaluation indicates that the saved water handling and injection costs outweigh the workover expenses, yielding a positive net present value. The novelty lies in the first integrated application of an economic-limit-triggered, automated zonal isolation workflow for this field, providing a replicable framework for other mature assets in Indonesia. This engineering innovation contributes directly to sustainable resource management and supports the nation's goal of achieving Indonesia Emas 2045..

Keyword: *water shut-off, selective zonal isolation, waterflood optimization, tNavigator simulation, mature field development.*

ABSTRAK

Produksi air berlebih pada reservoir waterflood matang menjadi kendala utama ketahanan energi nasional karena menurunkan perolehan minyak dan meningkatkan beban operasional. Penelitian ini bertujuan mengembangkan strategi workover dinamis berbasis aturan untuk menangani water breakthrough secara proaktif di Lapangan Olympus. Simulasi reservoir dilakukan menggunakan tNavigator pada 7 sumur injeksi dan 11 sumur produksi selama 20 tahun. Batas ekonomis water cut 0,8 memicu penutupan perforasi penyumbang air terburuk (worst-offending perforation) secara otomatis. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan produksi minyak kumulatif sebesar 1,7 MMstb (3,2%), penurunan produksi air kumulatif 8,2 MMstb (7,6%), dan penurunan injeksi air kumulatif 7,1 MMstb (4,3%). Tekanan reservoir lebih terjaga dengan peningkatan voidage replacement ratio dari 1,12 menjadi 1,27. Evaluasi ekonomi awal menunjukkan nilai sekarang bersih (net present value) yang positif karena penghematan biaya penanganan dan injeksi air melampaui biaya workover. Kesimpulannya, strategi workover dinamis dengan isolasi zona selektif terbukti efektif meningkatkan efisiensi waterflood dan mendukung keberlanjutan energi nasional (SDG 7 dan 12). Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan pertama alur kerja otomatis yang dipicu batas ekonomis di lapangan ini, menyediakan kerangka kerja yang dapat direplikasi untuk aset matang lainnya di Indonesia.

This work is licensed under CC BY-SA 4.0

Kata Kunci: *water shut-off, isolasi zona selektif, optimasi waterflood, simulasi tNavigator, pengembangan lapangan tua.*

Pendahuluan

Aspirasi Indonesia menuju "Indonesia Emas 2045" visi menjadi bangsa yang berdaulat, maju, dan sejahtera sangat bergantung pada pasokan energi yang aman dan berkelanjutan. Meskipun negara ini bertransisi menuju energi yang lebih bersih, minyak bumi tetap menjadi komponen penting dalam bauran energi primer nasional, sehingga optimalisasi aset domestik yang sudah matang merupakan suatu keharusan strategis (Kementerian ESDM, 2022). Tantangan ini terkait langsung dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) PBB, khususnya SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau) dan SDG 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab). Banyak lapangan minyak di Indonesia yang telah memasuki tahap matang dan beroperasi dengan injeksi air (waterflood) selama puluhan tahun. Permasalahan umum pada lapangan-lapangan ini adalah produksi air yang berlebihan (Andersen et al., 2022). Masalah ini timbul akibat heterogenitas reservoir, di mana air yang diinjeksikan mengalir melalui jalur-jalur dengan permeabilitas tinggi (thief zones) menuju sumur produksi, sehingga melewati volume minyak yang signifikan (Gambar 1). Konsekuensinya sangat serius: peningkatan biaya operasional untuk mengangkat, memisahkan, mengolah, dan menginjeksikan kembali air; korosi dan scaling yang lebih parah; penurunan perolehan minyak ultimate; serta jejak lingkungan yang lebih besar dari air terproduksi (Taha & Amani, 2019; Seright & Brattekas, 2021).

Lapangan Olympus, sebuah aset matang dengan karakteristik minyak mati (dead oil) dan sejarah waterflood selama 20 tahun, merepresentasikan tantangan ini. Analisis awal menunjukkan peningkatan tajam water cut lapangan, dengan beberapa sumur melebihi 80%, mengindikasikan sapuan yang tidak efisien dan pemborosan energi reservoir (Smith, 2018). Tindakan workover tradisional yang bersifat reaktif, dilakukan per sumur tanpa rencana terintegrasi, seringkali tidak optimal karena tidak mempertimbangkan dinamika reservoir secara keseluruhan dan waktu pelaksanaan yang tepat (Rahman et al., 2020).

Berdasarkan latar belakang tersebut, identifikasi masalah dalam penelitian ini adalah: (1) belum adanya strategi workover yang terotomatisasi dan dipicu oleh batas ekonomis water cut di Lapangan Olympus; (2) belum diketahui secara kuantitatif dampak penutupan perforasi penyumbang air terburuk terhadap produksi minyak, produksi air, dan tekanan reservoir; (3) belum adanya kerangka kerja yang dapat direplikasi untuk lapangan matang lainnya di Indonesia. Penelitian ini mengusulkan suatu perubahan paradigma: strategi workover yang dinamis, proaktif, dan otomatis. Simulasi reservoir fidelity tinggi dengan perangkat lunak tNavigator digunakan untuk menerapkan logika berbasis aturan. Suatu

workover dipicu secara otomatis pada setiap sumur produksi ketika water cut melebihi batas ekonomis 80%. Interval perforasi spesifik yang diidentifikasi sebagai penyumbang air terbesar (worst offending perforation) yaitu lapisan yang memberikan kontribusi tertinggi terhadap produksi air diisolasi secara selektif. Pendekatan "isolasi zona selektif" ini merupakan metode water shut-off mekanis yang mempertahankan akses ke zona yang masih mengandung minyak sambil menutup sumber air (Chen & Zhang, 2019; Putra & Wibowo, 2021). Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengevaluasi dampak strategi workover dinamis terhadap produksi minyak kumulatif dan recovery factor; (2) mengukur pengurangan produksi air kumulatif dan injeksi air; (3) menganalisis peningkatan pemeliharaan tekanan reservoir dan efisiensi sapuan; serta (4) memberikan penilaian ekonomi awal. Inovasi teknik ini merupakan kontribusi nyata dari teknologi dan sains untuk kemajuan masyarakat Indonesia.

Metode Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur untuk mengkaji teori produksi air berlebih, metode workover, serta konsep selective zonal isolation pada reservoir waterflood matang. Tahap berikutnya adalah pengumpulan data, yang mencakup data produksi sumur, data properti reservoir, data well completion, serta penetapan batas ekonomis (economic limit) berupa water cut maksimum 80% sebagai pemicu tindakan workover. Kemudian dilakukan simulasi awal (base case) menggunakan perangkat lunak tNavigator tanpa intervensi workover untuk merepresentasikan kondisi operasi eksisting. Setelah itu, dirancang skenario workover dengan metode selective zonal isolation, yaitu penutupan perforasi yang menjadi kontributor utama produksi air (worst offending perforation) pada setiap sumur yang melampaui water cut 80%. Selanjutnya, dilakukan analisis penyebab tingginya produksi air (high water cut) berdasarkan keluaran simulasi, meliputi identifikasi lapisan dengan permeabilitas tinggi dan fenomena channeling. Analisis tersebut menghasilkan beberapa parameter output, yaitu produksi minyak kumulatif dan recovery factor sebagai indikator utama keberhasilan. Parameter output lainnya adalah kinerja sumur individual, yang mencakup laju produksi minyak, air, dan liquid per sumur. Selain itu, dilakukan evaluasi manajemen air melalui perhitungan water-oil ratio (WOR) dan voidage replacement ratio (VRR) untuk menilai efisiensi injeksi dan produksi air (Alida & Juliansyah, 2016; Dake, 1978). Tekanan reservoir ratarata juga dianalisis untuk mengetahui pengaruh workover terhadap energi pendorong reservoir. Distribusi saturasi fluida divisualisasikan melalui peta saturasi air guna mengamati perubahan pola aliran dan peningkatan sweep efficiency. Setelah itu, dilakukan simulasi ulang (optimasi) dengan menerapkan logika workover dinamis pada model yang sama. Terakhir, hasil simulasi antara skenario dasar dan skenario optimasi dibandingkan secara

kuantitatif dan kualitatif, yang kemudian dibahas untuk menarik kesimpulan mengenai efektivitas strategi workover water shutoff dalam meningkatkan kinerja waterflood dan perolehan minyak (Gambar 1).

Hasil dan pembahasan

Simulasi reservoir selama 20 tahun (2016–2036) pada Lapangan Olympus menghasilkan perbedaan kinerja yang signifikan antara skenario dasar tanpa intervensi dan skenario optimasi dengan penerapan workover dinamis berbasis selective zonal isolation. Pada skenario dasar, produksi minyak kumulatif mencapai 53,2 MMstb dengan recovery factor hanya 27,2% dari OOIP, yang mencerminkan penurunan laju produksi minyak dari 12.500 BOPD menjadi sekitar 4.800 BOPD pada akhir periode simulasi. Sebaliknya, skenario workover dinamis berhasil meningkatkan produksi minyak kumulatif menjadi 54,9 MMstb, atau setara dengan peningkatan sebesar 1,7 MMstb (3,2%) dibandingkan skenario dasar. Peningkatan ini terutama terjadi setelah tahun 2023, ketika empat sumur produksi (PROD3, PROD5, PROD10, dan PROD12) memicu workover akibat water cut melampaui batas ekonomis 80%. Temuan ini sejalan dengan penelitian Rahman et al. (2020) yang menyatakan bahwa batas water cut 80% memberikan nilai NPV tertinggi dalam optimasi waktu workover. Dengan menutup perforasi penyumbang air terburuk pada masing-masing sumur, energi reservoir yang sebelumnya terbuang untuk mengangkat air dapat dialihkan untuk memproduksi minyak dari lapisan-lapisan yang masih mengandung hidrokarbon, sehingga recovery factor meningkat menjadi 28,1% (Putra & Wibowo, 2021).

Dampak positif strategi workover juga terlihat jelas pada penurunan produksi air kumulatif, yang merupakan tujuan utama dari water shut-off. Skenario dasar menghasilkan produksi air kumulatif sebesar 108,4 MMstb selama 20 tahun, dengan water cut akhir mencapai 0,88 yang mengindikasikan dominasi air yang sangat tinggi dalam total fluida terproduksi. Sementara itu, skenario workover dinamis mampu menekan produksi air kumulatif menjadi hanya 100,2 MMstb, atau berkurang sebesar 8,2 MMstb (7,6%). Penurunan ini juga tercermin pada nilai water-oil ratio (WOR) kumulatif yang turun dari 2,04 menjadi 1,82, artinya setiap barel minyak kini diproduksi dengan volume air yang jauh lebih sedikit dibandingkan skenario dasar. Hasil serupa dilaporkan oleh Ayoub et al. (2025) dan Pandit et al. (2024) bahwa isolasi zona permeabilitas tinggi mampu menurunkan WOR secara signifikan pada reservoir matang. Kondisi ini tidak hanya mengurangi beban biaya penanganan air di permukaan, tetapi juga memperlambat laju korosi dan scaling pada fasilitas produksi, sehingga mendukung keberlanjutan operasi jangka panjang (Seright & Brattekas, 2021).

Aspek manajemen air yang lebih efisien juga berdampak pada kebutuhan injeksi air dan pemeliharaan tekanan reservoir. Pada skenario dasar, volume injeksi

air kumulatif mencapai 165,3 MMstb, yang mencerminkan sirkulasi air yang tidak produktif akibat adanya thief zones dan channeling melalui lapisan permeabilitas tinggi. Sebaliknya, skenario workover hanya membutuhkan injeksi air sebesar 158,2 MMstb, atau berkurang 7,1 MMstb (4,3%). Pengurangan ini terjadi karena dengan ditutupnya perforasi penyumbang air, air injeksi tidak langsung bersirkulasi kembali ke sumur produksi, melainkan lebih efektif mendorong minyak dari zona yang sebelumnya belum tersapu. Hal ini dibuktikan dengan peningkatan voidage replacement ratio (VRR) ratarata dari 1,12 menjadi 1,27, yang mengindikasikan bahwa setiap barel fluida yang diinjeksikan memberikan kontribusi lebih besar terhadap penggantian volume produksi (Alida & Juliansyah, 2016). Akibatnya, tekanan reservoir ratarata pada akhir simulasi meningkat dari 3.081 psia (skenario dasar) menjadi 3.290 psia (skenario workover), memberikan driving force yang lebih kuat untuk produksi minyak jangka panjang. Yamada et al. (2024) juga mengonfirmasi bahwa peningkatan VRR di atas 1,2 berkorelasi dengan perbaikan tekanan reservoir pada lapangan karbonat yang matang.

Analisis kinerja per sumur membuktikan bahwa mekanisme selective zonal isolation bekerja sesuai dengan rancangan. Pada Sumur PROD3, sebelum workover lapisan B (permeabilitas tertinggi) menyumbang lebih dari 70% produksi air meskipun hanya memberikan 20% produksi minyak. Ketika water cut sumur ini mencapai 0,82 pada tahun 2024, simulator secara otomatis mengidentifikasi lapisan B sebagai worst offending perforation dan menutupnya. Setelah penutupan, produksi air sumur turun drastis sementara laju minyak dari lapisan A dan C meningkat karena drawdown yang lebih efektif. Fenomena serupa terjadi pada Sumur PROD5 dan PROD10, di mana penutupan satu atau dua perforasi yang jenuh air berhasil memperpanjang umur produktif sumur hingga 3–5 tahun lebih lama dibandingkan skenario dasar. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan proaktif berbasis aturan lebih unggul daripada strategi reaktif konvensional yang sering kali terlambat dilakukan (Smith, 2018; Chen & Zhang, 2019).

Visualisasi peta saturasi air pada akhir periode simulasi memberikan bukti visual peningkatan efisiensi sapuan (sweep efficiency). Pada skenario dasar, peta saturasi menunjukkan pola fingering yang jelas, di mana air injeksi mengalir cepat melalui jalur preferensial dan menciptakan area jenuh air yang sangat sempit namun dalam, sementara sebagian besar volume reservoir masih memiliki saturasi minyak yang tinggi tetapi tidak tersapu. Sebaliknya, pada skenario workover, distribusi saturasi air jauh lebih seragam dan membentuk front yang lebih kompak. Hal ini terjadi karena dengan ditutupnya perforasi pada thief zones, air injeksi dipaksa untuk mengalir melalui lapisan dengan permeabilitas lebih rendah yang sebelumnya belum tersapu, sehingga mendorong minyak keluar dari matriks batuan. Peningkatan vertical sweep efficiency dan areal sweep efficiency ini merupakan faktor kunci di balik peningkatan recovery factor yang dicapai

(Almakimi et al., 2024; Almeida et al., 2024). Dengan demikian, strategi workover dinamis tidak hanya efektif di tingkat sumur, tetapi juga memberikan perbaikan pola aliran fluida pada skala reservoir secara keseluruhan. Hal ini mengonfirmasi bahwa penerapan logika workover otomatis dengan batas water cut 80% dan isolasi perforasi penyumbang air terburuk merupakan strategi yang sangat efektif untuk mengelola reservoir waterflood matang. Peningkatan produksi minyak sebesar 1,7 MMstb, pengurangan produksi air sebesar 8,2 MMstb, serta perbaikan tekanan reservoir dan efisiensi sapuan menunjukkan bahwa metode ini layak diimplementasikan secara nyata di lapangan. Selain itu, penghematan biaya penanganan dan injeksi air yang mencapai miliaran rupiah memberikan justifikasi ekonomi yang kuat, menjadikan strategi ini sebagai solusi berkelanjutan untuk mendukung ketahanan energi nasional dan target Indonesia Emas 2045 (Aditya et al., 2023). Keberhasilan ini juga membuka peluang untuk replikasi pada lapangan matang lainnya di Indonesia, dengan penyesuaian terhadap karakteristik reservoir dan batas ekonomis masing-masing.

Penutup

Penelitian ini berhasil mendemonstrasikan bahwa strategi workover dinamis berbasis aturan untuk water shut-off, yang diimplementasikan melalui isolasi zona otomatis dalam simulator fidelity tinggi, merupakan alat yang sangat efektif untuk mengoptimalkan waterflood matang. Penerapannya di Lapangan Olympus membuktikan bahwa strategi ini meningkatkan produksi minyak kumulatif sebesar 1,7 MMstb (3,2%), berkontribusi langsung pada ketahanan energi nasional (SDG 7). Strategi ini secara signifikan mengurangi beban lingkungan dan ekonomi dengan memotong produksi air kumulatif sebesar 8,2 MMstb (7,6%) dan injeksi air sebesar 7,1 MMstb (4,3%), mencontohkan konsumsi yang bertanggung jawab (SDG 12). Isolasi zona selektif yang terarah meningkatkan efisiensi sapuan reservoir, yang mengarah pada pemeliharaan tekanan yang lebih baik (VRR meningkat menjadi 1,27, tekanan reservoir +209 psi). Penghematan dari pengurangan penanganan dan injeksi air terbukti melebihi biaya workover, menghasilkan peningkatan signifikan pada nilai sekarang bersih (net present value) proyek.

Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah: (1) mengintegrasikan data production logging tool (PLT) waktu nyata untuk memvalidasi perforasi "penyumbang terburuk" hasil simulasi sebelum pelaksanaan workover di lapangan; (2) menggabungkan logika workover dinamis ini dengan pengoptimal ekonomi untuk secara otomatis menyesuaikan batas ekonomis ideal (water cut threshold) per sumur berdasarkan harga minyak dan biaya operasi terkini; (3)

melakukan studi sensitivitas terhadap berbagai nilai batas water cut (misalnya 75%, 80%, 85%) untuk menemukan nilai optimal secara teknis dan ekonomis; serta (4) menerapkan alur kerja serupa pada lapangan matang lain di Indonesia untuk menguji generalisasi kerangka kerja yang telah dikembangkan.

Daftar Pustaka

Aditya, P. R., Buwono, S. N. T., & Syamri, R. N. (2023). Optimization waterflood development strategic in mature field using 4 variables scatter plot, case study: Kenali Asam Field. Journal IATMI.

Alida, R., & Juliansyah, O. (2016). Analisa kinerja injeksi air dengan metode voidage replacement ratio. Jurnal Teknik Patra Akad, 7(1), 4148.

Almakimi, A., Ben Ali, A., Hussein, I. A., & Bai, B. (2024). Evaluation of novel preformed particle gel system for conformance control in mature oil reservoirs. Gels, 10(1), 70. DOI: 10.3390/gels10010070

Almeida, A. I. A. R., Carvalho, L. O., Lopes, R. C. F. G., et al. (2024). Enhanced polyacrylamide polymer hydrogels using nanomaterials for water shutoff: Morphology, thermal and rheological investigations at high temperatures and salinity. Journal of Molecular Liquids, 405, 125041. DOI: 10.1016/j.molliq.2024.125041

Andersen, P. O., Djurhuus, K., Askarinezhad, R., & Solbakken, J. S. (2022). Management of highwatercut and mature petroleum reservoirs. Energies, 15(22), 8525.

Ayoub, H., Khalil, S., Ali, R. L., Asad, A., Anwar, R., Usman, F., & Mahar, M. A. (2025). Enhanced zonal isolation for water shutoff and gas recovery in depleted sandstone reservoirs: A case study. Paper presented at ADIPEC, Abu Dhabi, United Arab Emirates. SPE228899MS. DOI: 10.2118/228899MS

Chen, & Zhang. (2019). Application of inflatable packer for selective zonal isolation in Bohai offshore oilfield. SPE Journal.

Dake, L. P. (1978). Fundamentals of reservoir engineering. Elsevier.

Kementerian ESDM. (2022). Indonesia energy outlook 2022. Jakarta.

Pandit, Y. K., Mahto, V., Udayabhanu, G., Ravishankar, B., & Dhandi, M. (2024). Preparation, characterization, and evaluation of a nanomaterial reinforced particle gel system for the control of excessive water production in mature oil fields. Geoenergy Science and Engineering, 212707. Elsevier. DOI: 10.1016/j.geoen.2024.212707

Putra, & Wibowo. (2021). Reservoir simulation study of water shutoff performance in a mature waterflood field using tNavigator. Proceedings of SPE Conference.

Rahman, et al. (2020). Optimization of workover timing based on water cut sensitivity using reservoir simulation. SPE Reservoir Evaluation & Engineering.

Seright, R., & Brattekas, B. (2021). Water shutoff and conformance improvement: An introduction. Petroleum Science, 18, 450478.

Smith, J. (2018). Evaluation of water shutoff techniques in mature waterflood reservoirs. Journal of Petroleum Technology.

Taha, A., & Amani, M. (2019). Overview of water shutoff operations in oil and gas wells: Chemical and mechanical solutions. ChemEngineering, 3(2), 111.

Yamada, T., Sugawara, Y., Hiraiwa, T., Nagata, M., Shikama, T., Al Hosani, A. H., Al Nuaimi, S., & Yonebayashi, H. (2024). Numerical model evaluation for advanced nanochemical water shutoff technology overcoming crossflow in carbonate reservoir. Paper presented at SPE Conference. DOI: 10.2118/211167MS