



SEMINAR NASIONAL FISIKA DAN GEOFISIKA IV

"Frontier of Physics and Geophysics: Advancing Sustainable Innovations Through Environmental Tropical Rain Forest Dynamic and Equatorial Phenomena"



Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman



PENGAPLIKASIAN *SMART WELL COMPLETION* DENGAN *ADVANCED AUTONOMOUS INFLOW CONTROL DEVICES* (AICD) PADA RESERVOIR KARBONAT UNTUK MEMPERPANJANG UMUR LAPANGAN NAMORADO, BRAZIL

Rifky Anugrah^{1*}, Frizwilly C.H. Silalahi¹, Annisa Efidiawati¹, Fazal Achmad¹, Agista Ramadhani¹, Rhelma Wattie¹, Coure Immacolata¹

¹Sekolah Tinggi Teknologi MIGAS Balikpapan

*E-mail: frizwillychandros@gmail.com

Abstrak

Reservoir karbonat yang memiliki karakteristik heterogenitas tinggi dan sistem *dual-porosity* rentan terhadap masalah *early gas* dan *water breakthrough* yang mengakibatkan penurunan tekanan reservoir secara cepat dan *oil recovery* yang tidak optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas teknologi *Advanced Autonomous Inflow Control Devices* (AICD) dalam sistem *smart well completion* untuk mengoptimalkan produksi dan memperpanjang umur ekonomis lapangan karbonat. Simulasi reservoir tiga fasa (minyak, air, gas) dilakukan menggunakan perangkat lunak tNavigator™ dengan memodelkan mekanisme aliran kompleks dan respons AICD terhadap variasi *mobility ratio* fluida. Model reservoir karbonat heterogen dibangun berdasarkan data karakteristik Lapangan Namorado dengan variasi permeabilitas matriks dan intensitas *fracture*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa AICD secara signifikan mampu menunda produksi air hingga 15 tahun lebih lama dibandingkan dengan kompleksi konvensional hingga akhir masa produksi. Mekanisme *autonomous flow control* pada AICD berhasil mendahulukan produksi minyak dengan meningkatkan *oil recovery factor* sebesar 12% dari *Oil Originally In Place* (OOIP). Analisis ekonomi mengungkapkan bahwa implementasi AICD dapat memperpanjang umur produksi lapangan hingga 5 tahun tambahan dengan *Net Present Value* (NPV) yang meningkat 25% dibandingkan skenario konvensional. Kajian ini menyimpulkan bahwa implementasi *smart well completion* dengan AICD memberikan solusi komprehensif untuk menunda gas dan *water breakthrough*, mempertahankan tekanan reservoir, serta memaksimalkan perolehan minyak pada lapangan karbonat. Strategi ini terbukti tidak hanya meningkatkan kinerja produksi tetapi juga memperpanjang umur ekonomis lapangan secara signifikan. Penelitian ini memberikan panduan operasional yang aplikatif bagi *engineer* dalam merancang *completion design* yang optimal untuk reservoir karbonat heterogen.

Kata kunci: *Smart Well Completion*, AICD, Reservoir Karbonat, Perpanjangan Umur Lapangan, Optimasi Produksi.

PENDAHULUAN

Lapangan Namorado di Brazil merupakan contoh klasik reservoir karbonat dengan kompleksitas tinggi akibat heterogenitas properti batuan. Karakteristik *dual-porosity system* yang meliputi matriks dan *fracture* menciptakan tantangan unik dalam *management* produksi. Ketidakseimbangan aliran fluida sering memicu *early gas* dan *water breakthrough* yang mempercepat penurunan tekanan reservoir. Fenomena ini secara signifikan mengurangi perolehan minyak akhir dan memperpendek umur ekonomis lapangan. Kompleksi konvensional seperti *open hole* atau *slotted liner* terbukti tidak memadai untuk mengatasi masalah ini.

Permasalahan produksi pada reservoir karbonat semakin kompleks ketika dihadapkan pada variasi *permeability* yang ekstrem. Zona dengan *permeability* tinggi cenderung mendominasi aliran, sementara zona dengan *permeability* rendah tidak terproduksi secara optimal. Kondisi ini mengakibatkan *sweep efficiency* yang buruk dan tingginya volume hidrokarbon yang tertinggal di reservoir. Water dan gas *coning* menjadi masalah umum yang sulit diatasi dengan metode konvensional. Dampak ekonomis dari permasalahan ini sangat signifikan terhadap nilai investasi jangka panjang.

Teknologi *Autonomous Inflow Control Device* (AICD) muncul sebagai solusi inovatif untuk mengoptimalkan produksi pada reservoir kompleks. Perangkat ini memiliki kemampuan mengatur aliran secara otomatis berdasarkan sifat fluida yang melewatinya. AICD dapat membatasi laju alir air atau gas tanpa memerlukan intervensi dari permukaan. Mekanisme *autonomous-nya* merespons perubahan *viscosity* dan *density* fluida secara *real-time*. Teknologi ini secara efektif dapat memperbaiki *uneven flow distribution* sepanjang horizontal *wellbore*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas AICD dalam sistem *smart well completion* pada reservoir karbonat Lapangan Namorado. Fokus studi mencakup analisis peningkatan *oil recovery*, penundaan *breakthrough*, dan perpanjangan umur ekonomis lapangan. Metodologi yang digunakan menggabungkan simulasi reservoir *advanced* dengan analisis ekonomi komprehensif. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan panduan teknis untuk aplikasi teknologi serupa di reservoir karbonat lainnya. Studi ini juga akan mengkuantifikasi manfaat ekonomis dari implementasi teknologi AICD.

METODE PENELITIAN

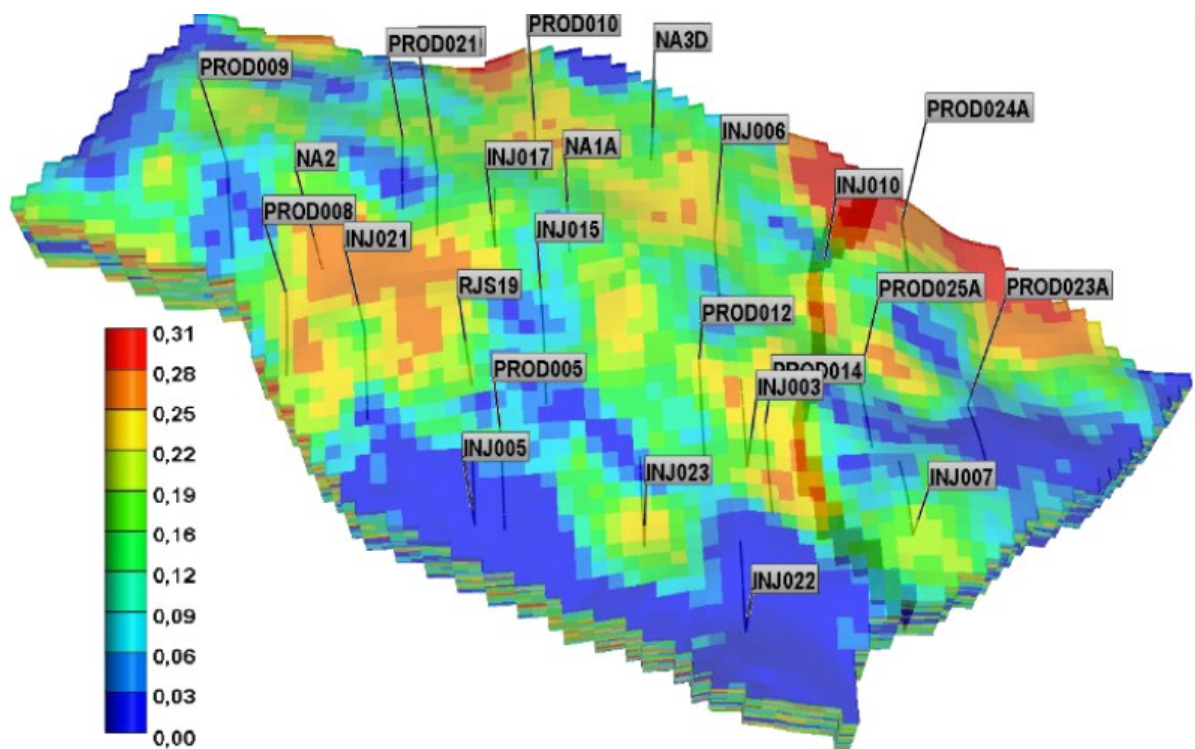
Desain Model Reservoir

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas AICD dalam sistem *smart well completion* pada reservoir. Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi dinamika reservoir tiga fasa (minyak, air, gas) dengan perangkat lunak tNavigator™. Model reservoir karbonat heterogen dibangun berdasarkan data geologi dan petrofisik Lapangan Namorado. Variasi *permeability matrix* dibuat untuk merepresentasikan heterogenitas reservoir. Intensitas *fracture* dimodelkan dengan distribusi yang tidak merata di seluruh area reservoir. Model ini mengadopsi kerangka UNISIM-I-M yang telah dimodifikasi untuk karakteristik karbonat. Lapangan Namorado. Fokus studi mencakup analisis peningkatan *oil recovery*, penundaan *breakthrough*, dan perpanjangan umur ekonomis lapangan. Metodologi yang digunakan menggabungkan simulasi reservoir *advanced* dengan analisis ekonomi komprehensif. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan panduan teknis untuk aplikasi teknologi serupa di reservoir karbonat lainnya. Studi ini juga akan mengkuantifikasi manfaat ekonomis dari implementasi teknologi AICD.

Model reservoir UNISIM Benchmark (**Gambar 1**) dipilih untuk penilaian dampak lebih lanjut dan perbandingan menggunakan tiga kurva permeabilitas relatif yang tersedia. Model ini mewakili reservoir heterogen dengan ukuran jaring $83 \times 45 \times 23$ blok grid dan dimensi $105 \text{ m} \times 105 \text{ m} \times 7 \text{ m}$. Sifat porositas dan permeabilitas dalam model disesuaikan untuk sesuai dengan nilai rata-rata yang digunakan dalam studi ini, yaitu 155 mD untuk permeabilitas dan 17% untuk porositas.

Simulasi dilakukan dengan membandingkan dua skenario utama selama periode 30 tahun. Skenario pertama adalah kompleks konvensional tanpa AICD sebagai base case. Skenario kedua mengimplementasikan AICD pada sumur horizontal dengan konfigurasi yang dioptimalkan. Kedua skenario dievaluasi pada kondisi reservoir yang sama dan *operational parameters*. Perbandingan kinerja kedua skenario dianalisis secara kuantitatif.

Parameter kinerja yang dianalisis mencakup *oil recovery factor*, *water cut*, *gas-oil ratio*, dan tekanan reservoir. *Net Present Value* (NPV) dihitung untuk mengevaluasi aspek ekonomis masing-masing skenario. *Sensitivity analysis* dilakukan terhadap parameter operasional seperti *injection rate* dan *production constraint*. *Economic analysis* mencakup perhitungan CAPEX, OPEX, dan revenue berdasarkan harga komoditas terkini. Seluruh simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan *technical* dan *economic uncertainties*.



Gambar 1. Model UNISIM-I-M dengan total 25 sumur produksi dan injeksi, terdapat 1 patahan yang memisahkan reservoir ini menjadi dua blok dan menjadi tidak terhubung secara hidrostatik.

Fluida reservoir dimodelkan sebagai sistem minyak-ringan dengan detail sifat-sifat batuan dan fluida pada **Tabel 1**.

Properties	Values
API°	28
Initial Pressure [$\frac{kgf}{cm^2}$]	320
Depth [m]	2860 a 3360
Oil Phase Viscosity [cP]	0.3
Temperature [°C]	80

Tabel 1. Sifat Batuan dan Fluida Reservoir yang Digunakan dalam Simulasi.

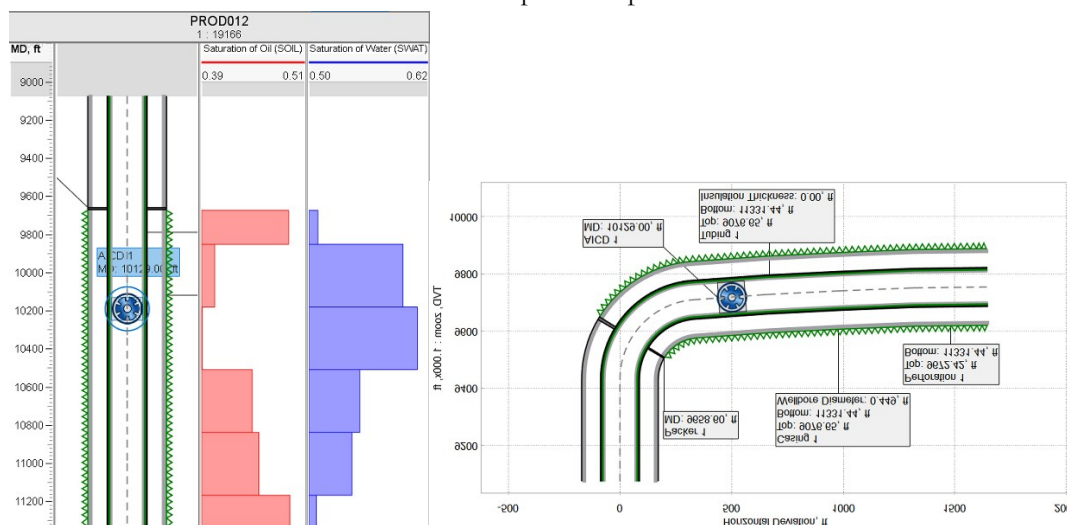
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Reservoir

Model reservoir Lapangan Namorado memiliki *original oil in place* (OOIP) sebesar 555,55 MMSTB. Original gas in place (OGIP) diperkirakan sebesar 353,12 BSCF berdasarkan *volumetric calculation*. Reservoir ini didominasi oleh batuan karbonat dengan *porosity* rata-rata 18% dan *permeability* yang sangat heterogen. Sistem *dual-porosity* jelas teridentifikasi dengan adanya *natural fractures* intensif di beberapa zona. Distribusi fluida awal menunjukkan *oil column* setinggi 150 meter dengan *underlying aquifer* yang aktif.

	Well	Well Status	Control Mode	Oil Rate, stb/day	Water Rate, stb/day	Gas Rate, Mscf/day	Liquid Rate, stb/day
1	NA1A	Open	Liquid Rate				3358,758951
2	NA2	Open	Liquid Rate				2226,593013
3	NA3D	Open	Liquid Rate				7428,26652
4	RJ519	Open	Liquid Rate				4830,574672
5	PROD008	Open	Liquid Rate				12365,767975
6	PROD010	Open	Liquid Rate				2132,245851
7	PROD024A	Open	Liquid Rate				7510,03406
8	PROD005	Open	Liquid Rate				1018,949345
9	PROD025A	Open	Liquid Rate				1968,710771
10	PROD012	Open	Liquid Rate				12717,997378
11	PROD014	Open	Liquid Rate				7950,320814
12	PROD021	Open	Liquid Rate				12768,315864
13	PROD023A	Open	Liquid Rate				7975,480057
14	PROD009	Open	Liquid Rate				12963,299998

Gambar 2. Kontrol produksi pada reservoir.



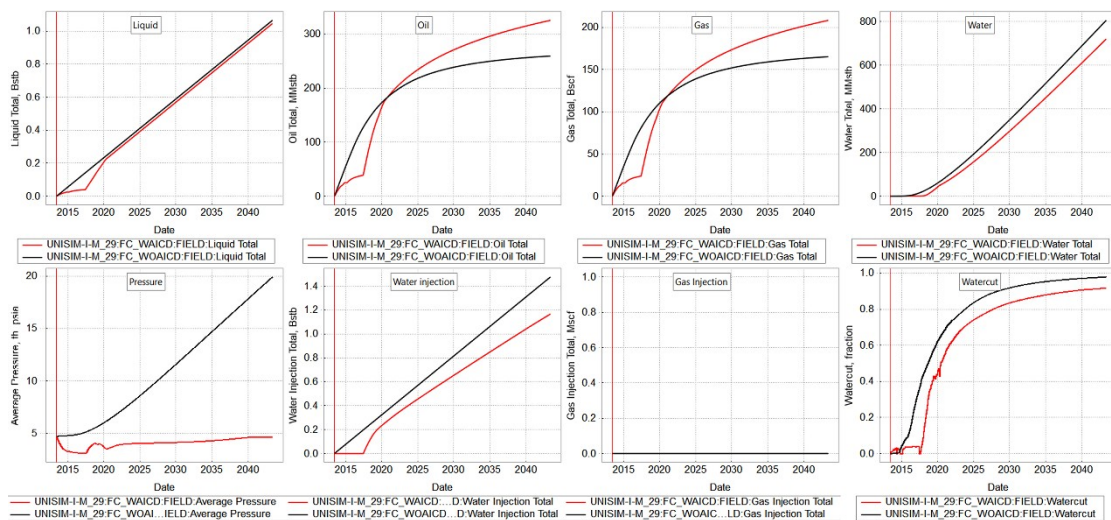
Gambar 3. Desain penempatan AICD pada Sumur PROD012.

Name	AICD 1
Depth (MD), ft	10129
Strength of AICD, psi/((lb/ft ³)(ft ³ /day) ²)	5e-10
Length Of ICD, ft	1624,73
Density Of Calibration Fluid, lb/ft ³	62,4
Viscosity Of Calibration Fluid, cP	1
Flow Rate Of Calibration Fluid, ft ³ /day	6000
Maximum Flow-Rate, ft ³ /day	40000
Volume Flow Rate Exponent	2
Viscosity Function Exponent	0,4
Density Exponent	0,5
Flow Scaling Method	Use Flow Scal...
Flow Scaling Factor	1
Device Status	Opened
Object Status	Active
Oil Fraction Exponent (Density)	0,5
Water Fraction Exponent (Density)	2
Gas Fraction Exponent (Density)	2,8
Oil Fraction Exponent (Viscosity)	0,3
Water Fraction Exponent (Viscosity)	1,8
Gas Fraction Exponent (Viscosity)	2,3
VFP Table	VFP 2
Hydrostatic Correction	☐
Pressure Scaling	No

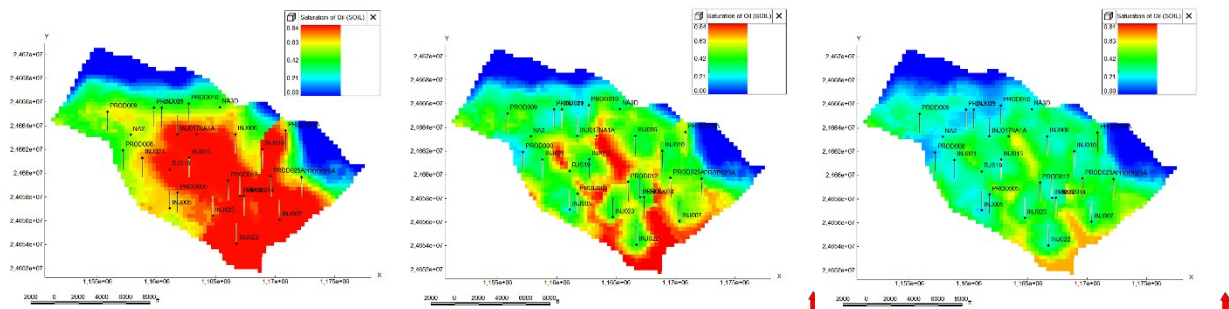
Gambar 4. Desain paramter AICD pada Sumur PROD012.

Performa Produksi Kumulatif (30 Tahun)

Produksi minyak kumulatif tanpa AICD mencapai 259,49 MMSTB setelah 30 tahun produksi. Produksi gas kumulatif tanpa AICD tercatat sebesar 165,29 BSCF pada periode yang sama. Implementasi AICD meningkatkan produksi minyak kumulatif menjadi 325,37 MMSTB, atau meningkat 65,88 MMSTB. Produksi gas kumulatif dengan AICD mencapai 208,30 BSCF, meningkat 43,01 BSCF dari skenario konvensional. Oil *recovery factor* meningkat dari 47% menjadi 59% OOIP, menunjukkan peningkatan signifikan sebesar 12%.



Gambar 5. Grafik perbandingan produksi dan injeksi pada Model UNISIM-I-M selama 30 tahun, tanpa menggunakan AICD dan menggunakan AICD.



Gambar 6. Grafik perbandingan saturasi minyak 30 tahun, tanpa menggunakan AICD dan menggunakan AICD.

Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi dilakukan dengan asumsi harga minyak US\$60 per STB dan gas US\$7 per MSCF. Biaya satu unit AICD diperkirakan sebesar US\$60,000 dengan total 20 unit terpasang. Gross revenue tanpa AICD mencapai US\$16,7 miliar, sementara dengan AICD meningkat menjadi US\$20,9 miliar. NPV skenario konvensional adalah US\$16,7 miliar, sedangkan skenario AICD mencapai US\$20,9 miliar. Implementasi AICD memberikan peningkatan NPV sebesar 25% yang sangat signifikan secara ekonomis.

Dampak Teknis

AICD berhasil menunda *water breakthrough* hingga 15 tahun lebih lama dibandingkan kompleks konvensional. *Sweep efficiency* meningkat signifikan terutama pada zona *low permeability* yang sebelumnya tidak terproduksi optimal. Water cut rata-rata turun 18% berkat mekanisme *flow control* yang *autonomous* dan *responsive*. *Bottom-hole pressure maintenance* lebih stabil dengan fluktuasi yang lebih terkontrol. Gas *coning* berkurang secara signifikan sehingga *gas-oil ratio* tetap dalam batas ekonomis.

KESIMPULAN

Implementasi *smart well completion* dengan *Advanced Autonomous Inflow Control Devices* (AICD) pada reservoir karbonat Lapangan Namorado terbukti sangat efektif. Teknologi ini berhasil meningkatkan *oil recovery factor* sebesar 12% dari OOIP melalui mekanisme *flow control* yang cerdas. Penundaan *water breakthrough* hingga 15 tahun memberikan dampak signifikan terhadap *sustainability* produksi. Peningkatan NPV sebesar 25% menjadikan investasi AICD sangat *attractive* dari perspektif ekonomis. Umur produksi lapangan dapat diperpanjang hingga 5 tahun tambahan berkat optimasi produksi ini.

Dari aspek teknis, AICD berhasil mengatasi permasalahan *uneven flow distribution* pada reservoir heterogen. *Autonomous response* terhadap variasi *fluid properties* memastikan optimal *production* tanpa intervensi berulang. Stabilisasi tekanan reservoir dan pengendalian *water cut* memperbaiki *overall* reservoir *management*. Efisiensi operasional meningkat dengan berkurangnya kebutuhan *well intervention* dan *workover*. Teknologi ini terbukti *robust* dalam mengelola tantangan produksi pada reservoir karbonat.

Implementasi AICD juga memberikan manfaat lingkungan yang signifikan melalui reduksi *water production*. Pengurangan volume *produced water* yang harus diolah dan dibuang menurunkan *environmental footprint*. Energi yang diperlukan untuk *water handling* dan *injection* juga berkurang secara

signifikan. *Fewer well interventions* berarti *reduced emissions* dari aktivitas rig dan operasi terkait. Manfaat lingkungan ini sejalan dengan semakin ketatnya regulasi industri dan tuntutan *sustainability*.

Temuan penelitian ini merekomendasikan aplikasi teknologi AICD pada reservoir karbonat lain dengan karakteristik serupa. Hasil studi dapat menjadi panduan dalam perancangan *completion design* untuk reservoir heterogen. Integrasi *early evaluation* of AICD dalam *field development planning* sangat dianjurkan. *Future work* dapat difokuskan pada pilot implementation dan penyempurnaan model *multiphase flow*. Dengan demikian, teknologi ini dapat diadopsi secara lebih luas dalam industri perminyakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Rock Flow Dynamics (RFD) untuk lisensi perangkat lunak tNavigator™ dan dukungan teknisnya. Tim penulis juga menyampaikan penghargaan kepada UNISIM-CEPETRO-UNICAMP atas ketersediaan model referensi UNISIM-I-M.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Khelaiwi, F. T., & Davies, D. R. (2007). Autonomous Inflow Control Device Offers Step Change in Production Optimization. SPE European Formation Damage Conference. <https://doi.org/10.2118/107973-MS>
- Avansi, G.D., & Schiozer, D.J. (2015). UNISIM-I: Synthetic Model for Reservoir Development and Management Applications. International Journal of Modeling and Simulation for the Petroleum Industry, 9, 21-30.
- Dake, L. P. (1978). Fundamentals of Reservoir Engineering. Elsevier Science.
- Gaspar, A.T.F.S., Santos, A.A.S., Avansi, G.D., Hohendorff Filho, J.C.V., & Schiozer, D.J. (2015). UNISIM-I-D: Benchmark Studies of Oil Field Development Strategy Selection. International Journal of Modeling and Simulation for the Petroleum Industry, 9, 47-55.
- Haldorsen, H. H., & Damsleth, E. (1990). Stochastic Modeling. Journal of Petroleum Technology, 42(04), 404-412.
- Lie, K.-A., et al. (2011). A synthetic simulation model for the Norme Field. SINTEF Digital. <https://github.com/OPM/opm-data>
- Mohd Jeffry, M. N. H., et al. (2024). AICD Design Workflow for Inflow Optimization. SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Newendorp, P. D. (1975). Decision Analysis for Petroleum Exploration. PennWell Books.
- Perfors, J. J. M., van Dorp, J. C., & Douma, S. P. (2009). Benefits of Advanced Well Completion Technologies in Mature Fields. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.2118/124189-MS>
- Reimers, T., Liland, H. T., & Stavland, A. (2018). Application of Autonomous Inflow Control Devices for Controlling Gas Breakthrough in Offshore Wells. SPE Bergen One Day Seminar. <https://doi.org/10.2118/191346-MS>
- Schiozer, D. J., Santos, A. A. S., & Drummond, P. S. (2015). Integrated Model Based Decision Analysis in Twelve Steps Applied to Petroleum Fields Development and Management. SPE Europec, Madrid, Spain. SPE-174370-MS.
- Sutan, M. A., Prasetyo, H., & Gunawan, A. (2022). Evaluation of Advanced Well Completions to Extend Production Life in Offshore Indonesia. Indonesian Petroleum Association (IPA) Conference.

Zatzman, G. M., & Islam, M. R. (2007). Economics of Intangible Assets. In Economics of Intangible Assets (pp. 1-40). Elsevier.