

**APLIKASI TOMOGRAFI NEUTRON UNTUK
MENGANALISIS DINAMIKA MINYAK PADA
BATUAN *BEREA SANDSTONE***

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat sarjana S-1

Program Studi Fisika



Diajukan oleh:

Nisa Mutmainah

21106020041

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UIN SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

2025

PENGESAHAN TUGAS AKHIR



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1163/Un.02/DST/PP.00.9/06/2025

Tugas Akhir dengan judul : Aplikasi Tomografi Neutron untuk Menganalisis Dinamika Minyak pada Batuan Berea Sandstone

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : NISA MUTMA'INAH
Nomor Induk Mahasiswa : 21106020041
Telah diujikan pada : Selasa, 10 Juni 2025
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang
Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si
SIGNED

Valid ID: 6850f7bc2045c



Penguji I
Dr. Thaqibul Fikri Niyartama, S.Si., M.Si.
SIGNED

Valid ID: 684f9d6db0d25



Penguji II
Frida Agung Rakhmadi, S.Si., M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 684fe9e8d68f



Yogyakarta, 10 Juni 2025
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 68512cf5uefel

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nisa Mutmainah
NIM : 21106020041
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "Aplikasi Tomografi Neutron Untuk Menganalisis Dinamika Minyak Pada Batuan *Berea Sandstone*" merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 21 Mei 2025

Penulis

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA



Nisa Mutmainah
NIM. 21106020041

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan skripsi

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Nisa Mutmainah
NIM : 21106020041
Judul Skripsi : Aplikasi Tomografi Neutron Untuk Menganalisis Dinamika Minyak Pada Batuan *Berea Sandstone*

Sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami mengharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 21 Mei 2025

Pembimbing II

Fahrurrozi Akbar, S.T., M.Sc
NIP. 19840117 200912 1 002

Pembimbing I

Dr. Niti Handayani, S.Si., M.Si.
NIP. 19820126 200801 2 008

APLIKASI TOMOGRAFI NEUTRON UNTUK MENGANALISIS DINAMIKA MINYAK PADA BATUAN *BEREA SANDSTONE*

NISA MUTMAINAH

21106020041

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk mengamati interaksi antara neutron dan minyak dalam batuan *Berea sandstone* melalui citra hasil rekonstruksi tomografi neutron, menganalisis pengaruh air bersalinitas dan surfaktan terhadap dinamika minyak menggunakan metode *core flooding* dan imbibisi, serta memvisualisasikan distribusi minyak dengan *software VGStudio max 3.0*. Metode yang digunakan meliputi tomografi neutron untuk memperoleh citra 3D dinamika minyak pada batuan *Berea sandstone*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode tomografi neutron mampu mengamati fenomena dinamika minyak secara non-destruktif, meskipun standar analisis kuantitatifnya masih perlu dikembangkan. Penggunaan air bersalinitas dan surfaktan khususnya dengan penambahan D₂O mempengaruhi dinamika minyak. Pada *core flooding* distribusi cenderung terfokus pada saluran utama pori-pori batuan, sementara pada imbibisi penyebaran lebih menyeluruh ke pori-pori kecil. Visualisasi citra dengan *VGStudio max 3.0* menunjukkan pola distribusi minyak yang sesuai dengan data eksperimen *core flooding* dan imbibisi, serta volume minyak terperangkap dari segementasi citra sesuai dengan nilai *remain* hasil eksperimen. Tomografi neutron dapat secara efektif digunakan untuk mempelajari dinamika minyak dalam batuan berpori.

Kata kunci: tomografi neutron, *Berea sandstone*, *core flooding*, imbibisi, dinamika minyak

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

APPLICATION OF NEUTRON TOMOGRAPHY TO ANALYZE OIL DYNAMICS IN BEREA SANDSTONE

NISA MUTMAINAH

21106020041

ABSTRACT

This study aims to observe the interaction between neutrons and oil within Berea sandstone rocks through reconstructed neutron tomography images, analyze the effect of saline water and surfactants on oil dynamics using core flooding and imbibition methods, and visualize oil distribution using VGStudio Max 3.0 software. The methods used include neutron tomography to obtain 3D images of oil dynamics in Berea sandstone. The results show that neutron tomography can observe oil dynamics phenomena non-destructively, although the standards for quantitative analysis still need further development. The use of saline water and surfactants, particularly with the addition of D₂O, affects oil dynamics. In core flooding, the distribution tends to concentrate in the main pore channels of the rock, while in imbibition, the spread reaches more thoroughly into smaller pores. Image visualization with VGStudio Max 3.0 shows oil distribution patterns consistent with the experimental data from core flooding and imbibition, and the segmented oil volume corresponds to the remaining oil values obtained from experiments. Neutron tomography can be effectively used to study oil dynamics in porous rocks.

Keywords: *neutron tomography, Berea sandstone, core flooding, imbibition, oil dynamics*

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

MOTTO

“Dia yang mempunyai alasan untuk hidup, dapat menanggung hampir semua cara untuk hidup”

“Rasa ingin tahu adalah awal dari setiap penemuan besar”

“The present is theirs, the future, for which I really worked, is mine”

“The future rewards those who press on”



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas akhir ini penulis persembahkan untuk ibu, alm bapak, ketiga kakak saya, adik saya, dan kepada orang-orang yang telah kebersamai saya selama proses penulisan tugas akhir ini, semoga bermanfaat.



KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT atas segala limpahan Rahmat dan hidayah-Nya sampai saat ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul “Aplikasi Tomografi Neutron Untuk Menganalisis Dinamika Minyak Pada Batuan *Berea Sandstone*”. Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari sepenuhnya bahwa selesainya Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan, semangat, serta bimbingan dari berbagai pihak, baik bersifat moral maupun materil. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan banyak ucapan terima kasih antara lain kepada:

1. Kedua orang tua yang telah memberikan doa, cinta, kasih sayang, semangat, dukungan, motivasi, dan finansial selama melakukan studi.
2. Ketiga kakak saya yang juga senantiasa memberikan doa, dukungan finansial, serta banyak motivasi sehingga penulis bisa menyelesaikan penulisan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika.
4. Ibu Dr. Nita Handayani, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan, arahan serta motivasi yang diberikan kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Fahrurrozi Akbar, S.T., M.Sc. selaku pembimbing lapangan dari BRIN yang senantiasa membimbing, memberikan motivasi sehingga penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.

6. Seluruh bapak Ibu Dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan ilmu serta pengalaman kepada penulis.
7. Pusat Riset Teknologi Analisis Bahan Atom Nuklir (PRTABN) BRIN yang telah berkolaborasi dengan Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sehingga penulis bisa melaksanakan penelitian ini.
8. Aaz Zazri Nugraha selaku partner penulis dalam banyak hal yang telah banyak membantu penulis dalam Menyusun Tugas Akhir ini.
9. Ulfa Khozanah selaku teman seperjuangan selama melaksanakan penelitian Tugas Akhir di BRIN.
10. Andini, Nisrina, Ulya, Rahmi, Febi, Ayu, Aulia, selaku teman teman terdekat dan teman seperjuangan di kampus.
11. Teman-teman Fisika Angkatan 2021 yang telah kebersamai penulis selama menjalani perkuliahan di kampus.
12. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sampaikan satu per satu yang telah memberikan dukungan sehingga Tugas Akhir ini selesai.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan, sehingga saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membacanya dan menjadi referensi bagi kegiatan serupa dimasa yang akan datang.

Yogyakarta, Mei 2025

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR	iv
INTISARI	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
MOTTO	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR ISTILAH	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	7
1.3 Tujuan Penelitian.....	8
1.4 Batasan Penelitian.....	8
1.5 Manfaat Penelitian.....	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	10
2.1 Studi Pustaka	10
2.2 Landasan Teori	16
2.2.1 Neutron.....	16
2.2.2 Reaktor Nuklir.....	26
2.2.3 Radiografi Neutron.....	28
2.2.4 Tomografi Neutron.....	31
2.2.5 <i>Core Flooding</i>	32
2.2.6 Imbibisi	34
2.2.7 Batuan <i>Sandstone</i>	35
2.2.8 Karakteristik Fluida Reservoir	39

2.2.9	<i>Crude Oil</i>	43
2.2.10	Surfaktan	45
2.2.11	Dinamika Minyak dalam Batuan <i>Berea Sandstone</i>	50
2.2.12	Validitas Metode Analisis	52
2.2.13	Perangkat Lunak Pendukung.....	55
BAB III	METODE PENELITIAN	60
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian.....	60
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	60
3.2.1	Alat Penelitian.....	60
3.3.2	Bahan Penelitian.....	61
3.3	Prosedur Penelitian.....	62
3.3.1	Studi Literatur	63
3.3.2	Tahap Persiapan	63
3.3.3	<i>Denoising</i> Citra	67
3.3.4	Rekonstruksi Citra.....	68
3.3.5	Visualisasi Citra 3D	69
3.3.6	Analisa Citra 3D.....	70
3.4	Metode Analisa Data	71
3.4.1	Analisis Interaksi Minyak dengan Neutron pada batuan <i>Berea sandstone</i> Menggunakan Tomografi Neutron.....	71
3.4.2	Analisis Pengaruh Air dengan Salinitas dan Surfaktan dalam Proses <i>Core Flooding</i> dan Imbibisi Menggunakan Tomografi Neutron.....	71
3.4.3	Visualisasi Dinamika Minyak Menggunakan <i>VGStudio Max 3.0</i>	74
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	75
4.1	Interaksi Neutron dengan Minyak pada Batuan <i>Berea Sandstone</i>	75
4.2	Analisis Pengaruh Air dengan Salinitas dan Surfaktan dalam Proses <i>Core Flooding</i> dan Imbibisi	82
4.2.1	Hasil <i>Core Flooding</i>	84
4.2.2	Hasil Imbibisi	92
4.3	Visualisasi Dinamika Minyak Menggunakan <i>VGStudio Max</i>	99
BAB V	PENUTUP.....	113
5.1	Kesimpulan.....	113
5.2	Saran	114
DAFTAR PUSTAKA		115
LAMPIRAN.....		124

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinjauan pustaka	15
Tabel 2.2 Energi neutron (Susetyo, 1988)	28
Tabel 2.3 Komposisi pada <i>berea sandstone</i> (Setiati dkk., 2023).....	36
Tabel 2.4 Tabel porositas batuan (Ristawati dkk, 2018).....	38
Tabel 2.5 Nilai viskositas (Zamora dkk, 2010).	40
Tabel 3.1 Alat penelitian.....	60
Tabel 3.2 Perangkat keras.....	61
Tabel 3.3 Perangkat lunak	61
Tabel 3.4 Bahan penelitian	61
Tabel 3.5 Konsentrasi salinitas dan surfaktan	72
Tabel 4.1 Data porositas dan permeabilitas untuk 4 <i>core</i>	83
Tabel 4.2 Hasil preparasi sampel pada <i>core</i>	93
Tabel 4.3 Hasil saturasi <i>core</i>	94
Tabel 4.4 Imbibisi pada Amott cell.....	96
Tabel 4.5 Koefisien variasi pada setiap <i>core</i>	100
Tabel 4.6 Perolehan minyak dalam proses <i>core flooding</i>	101
Tabel 4.7 Perolehan minyak dalam proses imbibisi	102
Tabel 4.8 Material volume terdeteksi	103

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Inti atom (https://www.energyencyclopedia.com/).....	17
Gambar 2.2 Koefisien atenuasi massa pada neutron dan sinar-x(BATAN, 2008)22	
Gambar 2.3 Geometri yang diterapkan (Susanto & Prajitno, 2020).	25
Gambar 2.4 Skema radiografi neutron (Bharoto, 2013).	30
Gambar 2.5 Skema tomografi neutron (Sutiarso dkk., 2012).....	31
Gambar 2.6 Tampilan proses rekontruksi menggunakan <i>software octopus</i>	57
Gambar 2.7 Proses visualisasi menggunakan <i>vgstudio max</i>	59
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> penelitian	62
Gambar 3.2 Hasil proyeksi (a) <i>core C5</i> (b) <i>Core C6</i> (c) <i>core c7</i> (d) <i>core c8</i>	67
Gambar 3.3 Proses <i>core flooding</i> (Setiati dkk., 2023).....	72
Gambar 4.1 Tampang lintang <i>water flooding</i> (a) <i>core C5 slice 21</i> (b) <i>core C5 slice 262</i> (c) <i>core C5 slice 520</i> (d) <i>core C6 slice 21</i> (e) <i>core C6 slice 265</i> (f) <i>core C6 slice 525</i>	76
Gambar 4.2 Tampang lintang surfaktan <i>flooding</i> (a) <i>core C5 slice 10</i> (b) <i>core C5 slice 237</i> (c) <i>core C5 slice 520</i> (d) <i>core C6 slice 10</i> (e) <i>core C6 slice 245</i> (f) <i>core C6 slice 525</i>	78
Gambar 4.3 Tampang lintang setelah <i>Amott cell</i> (a) <i>core C7 slice 27</i> (b) <i>core C7 slice 368</i> (c) <i>core C7 slice 687</i> (d) <i>core C8 slice 27</i> (e) <i>core C8 slice 366</i> (f) <i>core C8 slice 690</i>	80
Gambar 4.4 Tomografi <i>core C5</i> setelah <i>water flooding</i>	87
Gambar 4.5 Tomografi <i>core C6</i> setelah <i>water flooding</i>	88
Gambar 4.6 Tomografi <i>core C5</i> setelah surfaktan <i>flooding</i>	90
Gambar 4.7 Tomografi <i>core C6</i> setelah surfaktan <i>flooding</i>	91
Gambar 4.8 Tomografi setelah imbibisi <i>Amott cell</i> (a) <i>core C7</i> (b) <i>core C8</i>	97
Gambar 4.9 Visualisasi citra 3D <i>core C5</i> (a) Material volume pada <i>VG Studio Max</i> (b) <i>Water flooding</i>	105
Gambar 4.10 Visualisasi citra 3D <i>core C5</i> (a) Material volume pada <i>VG Studio Max</i> (b) Surfaktan <i>flooding</i>	106

Gambar 4.11 Visualisasi citra 3D <i>core C6</i> (a) Material volume pada <i>VG Studio</i> Max (b) <i>Water flooding</i>	107
Gambar 4.12 Visualisasi citra 3D <i>core C6</i> (a) Material volume pada <i>VG Studio</i> Max (b) <i>Surfaktan flooding</i>	108
Gambar 4.13 Visualisasi citra 3D <i>core C7</i> (a) Material volume pada <i>VG Studio</i> Max (b) <i>Amott cell</i>	109
Gambar 4.14 Visualisasi citra 3D <i>core C8</i> (a) Material volume pada <i>VG Studio</i> Max (b) <i>Amott cell</i>	110



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Set Parameter Akuisisi Data Radiografi Neutron	124
Lampiran 2. Proses Core Flooding dan Imbibisi	124
Lampiran 3. Tahapan Visualisasi Citra Menggunakan VGStudio Max 3.0	129
Lampiran 4. Perhitungan Presisi (koefisien variasi) dan Perhitungan Sisa Minyak pada <i>Core</i>	134
Lampiran 5. Dokumentasi Penelitian	139



DAFTAR ISTILAH

<u>Istilah</u>	<u>Arti</u>
Core Flooding	: Uji aliran fluida dalam batuan reservoir
Crude Oil	: Minyak bumi mentah yang belum diproses
Enhanced Oil Recovery	: Teknik peningkatan produksi minyak
Evaporasi	: Penguapan cairan menjadi gas
Fluktuasi	: Perubahan naik turun secara tidak tetap
ImageJ	: Software analisis citra ilmiah
Imbibisi	: Peresapan fluida ke pori batuan
Radiografi Neutron	: Pencitraan objek dengan sinar neutron
Rekonstruksi	: Pembentukan ulang citra dari data
Resolusi Spasial	: Tingkat ketajaman detail gambar
Salinitas	: Kadar garam dalam larutan
Sandstone	: Batuan pasir berpori
Scintillator	: Material pendeteksi radiasi
Surfaktan	: Zat penurun tegangan permukaan
Wettability	: Sifat kebasahan permukaan batuan
VGStudio Max	: Software visualisasi dan analisis CT
TCF (Trillion cubic feet)	: Triliun kaki kubik

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Indonesia memiliki 68 cekungan migas yang belum dieksplorasi secara optimal, dengan estimasi cadangan minyak sebesar 2,41 miliar barel dan gas bumi sekitar 35,3 TCF (triliun kaki kubik). Wilayah seperti Buton, Timor, Seram, Aru, dan Warim menjadi fokus eksplorasi karena potensi cadangannya yang besar (Adi, 2024). Namun, eksplorasi di wilayah ini menghadapi tantangan teknis dan risiko tinggi, dengan tingkat keberhasilan pengeboran hanya sekitar 30% (Khamim, 2022).

Di tengah upaya peningkatan eksplorasi dan produksi migas, Indonesia juga dihadapkan pada dinamika global yang semakin kompleks. Fluktuasi harga minyak dunia, transisi energi menuju sumber daya yang lebih ramah lingkungan, serta persaingan investasi dengan negara-negara lain menjadi tantangan tambahan. Selain itu, isu keberlanjutan lingkungan dan tekanan untuk mengurangi emisi karbon turut memengaruhi strategi eksplorasi dan produksi migas di Indonesia. Oleh karena itu, pendekatan yang lebih canggih dan berkelanjutan diperlukan untuk memastikan industri migas tetap berkontribusi pada ketahanan energi nasional sambil meminimalkan dampak lingkungan.

Reservoir minyak dan gas bumi, terutama yang terdiri dari batuan *sandstone*, merupakan sumber daya alam yang sangat penting untuk kebutuhan energi global. Pada proses eksploitasi, memahami sifat-sifat batuan seperti porositas, permeabilitas, dan distribusi fluida menjadi kunci untuk mengoptimalkan produksi.

Namun, tantangan besar dalam eksploitasi ini adalah bagaimana mendapatkan informasi yang akurat tentang sifat-sifat tersebut tanpa merusak struktur batuan dan penurunan produksi dari reservoir konvensional dan meningkatnya kebutuhan energi global. Pendekatan *non-destructive* kini menjadi prioritas utama untuk mendukung eksplorasi dan produksi minyak yang lebih efisien. Metode pencitraan tradisional sering kali merusak struktur batuan dan menurunkan efisiensi produksi jangka panjang (Noiriel, 2015). Oleh karena itu, muncul kebutuhan untuk mengembangkan teknologi *non-destructive* yang mampu menjaga integritas batuan sambil memberikan data yang akurat mengenai dinamika fluida dalam reservoir.

Tomografi neutron menjadi solusi yang menjanjikan dalam hal ini. Teknik ini memiliki keunggulan unik dibandingkan teknik pencitraan lainnya, terutama dalam mendeteksi hidrogen yang merupakan komponen utama dalam air dan minyak. Dengan demikian, tomografi neutron memungkinkan analisis distribusi fluida dalam medium berpori seperti batuan pasir secara detail dan akurat (Datta & Hawari, 2022). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa teknik ini dapat mengidentifikasi distribusi air dan minyak dalam batuan reservoir dengan resolusi tinggi, bahkan hingga tingkat mikrometer (Cnudde dkk., 2008).

Kemampuan tomografi neutron untuk memberikan informasi tiga dimensi secara presisi memungkinkan visualisasi yang mendalam tentang distribusi fluida dalam pori-pori batuan. Teknologi ini membuka peluang untuk memahami proses-proses kunci dalam reservoir, seperti dinamika fluida di bawah tekanan dan temperatur tertentu, yang penting untuk meningkatkan efisiensi ekstraksi minyak dan gas bumi (Stavropoulou dkk., 2020). Tomografi neutron membuka peluang untuk memahami fenomena seperti evaporasi fluida, pembentukan meniskus, serta

pergerakan fluida di dalam pori-pori batuan secara mendetail (Zambrano dkk., 2019). Kemajuan teknologi pencitraan *non-destructive*, seperti penggunaan layar sintilator berbasis gadolinium dan mikroskop neutron, telah meningkatkan resolusi spasial hingga beberapa mikrometer. Hal ini memberikan peluang bagi para peneliti untuk mempelajari dinamika fluida dalam batuan reservoir secara lebih detail, mendukung pengembangan metode ekstraksi minyak yang lebih efisien dan ramah lingkungan (Kaestner dkk., 2016).

Batuan *sandstone* sendiri merupakan salah satu batuan reservoir minyak dan gas yang paling umum digunakan karena porositas dan permeabilitasnya yang tinggi, yang memungkinkan penyimpanan dan pergerakan fluida (Gong dkk., 2020). Dengan menggunakan metode *non-destructive* seperti tomografi neutron, diharapkan dapat dihasilkan data yang relevan untuk meningkatkan pengelolaan reservoir tanpa merusak keutuhan batuan. Selain itu, metode ini mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan dengan mengurangi dampak lingkungan dari eksploitasi minyak dan gas bumi (Yang dkk., 2019). Kebutuhan energi fosil terus meningkat, sementara produksi energi tersebut mengalami penurunan. Kondisi ini menjadi tantangan besar bagi industri perminyakan dalam memenuhi kebutuhan energi yang terus bertambah. Minyak bumi masih menjadi sumber energi utama, baik di Indonesia maupun secara global, sehingga diperlukan upaya untuk meningkatkan produksinya, terutama pada sumur sumur tua yang banyak terdapat di Indonesia. Secara alami, tidak seluruh minyak dalam reservoir dapat diekstraksi, namun produksi dapat ditingkatkan melalui berbagai metode. Salah satu metode yang umum digunakan adalah *Enhanced Oil Recovery* (Ramadianthi, 2021).

Pergerakan minyak dalam batuan *sandstone* dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk tekanan kapiler, sifat fisik fluida, dan struktur internal batuan. Dalam *Enhanced Oil Recovery* (EOR), misalnya, sering dilakukan injeksi fluida seperti air atau surfaktan untuk meningkatkan pemulihan minyak (Setiati dkk., 2018). Namun, efisiensi proses ini bergantung pada pemahaman tentang bagaimana minyak bergerak dalam pori-pori batuan (Damanik dkk., 2018). Maka dengan teknik ini perubahan distribusi fluida dalam batuan dapat dimonitor di bawah berbagai kondisi operasi, seperti tekanan dan temperatur tinggi (Yulia dkk., 2017) yang mensimulasikan kondisi reservoir. Kemampuan untuk menganalisis perubahan distribusi fluida ini memberikan peluang untuk meningkatkan strategi ekstraksi minyak (Shafabakhsh dkk., 2023).

Penggunaan air dengan salinitas tinggi dan surfaktan dalam injeksi fluida merupakan salah satu metode yang banyak digunakan dalam EOR untuk meningkatkan efisiensi pemulihan minyak (Sunny dkk., 2020). Salinitas air memengaruhi interaksi antara air, minyak, dan batuan, termasuk tegangan antar muka dan sifat *wettability* batuan (Tang & Morrow, 1997). Surfaktan, di sisi lain, bekerja dengan menurunkan tegangan antar muka antara air dan minyak, sehingga minyak lebih mudah bergerak keluar dari pori-pori batuan (Adibhatla & Mohanty, 2008). Dengan menggunakan tomografi neutron, pengaruh variasi salinitas dan konsentrasi surfaktan terhadap distribusi minyak dapat dianalisis secara detail. Metode ini memungkinkan pengamatan langsung tentang bagaimana kombinasi salinitas dan surfaktan memengaruhi mekanisme pergerakan minyak dalam batuan *sandstone*. Radiografi neutron juga memberikan data *real-time* tentang perubahan

distribusi fluida (Zambrano dkk., 2019) akibat injeksi air bersalinitas dan surfaktan, sehingga memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang proses EOR.

Maka dengan memanfaatkan metode pemantauan *non-destructive* seperti tomografi neutron, industri dapat mengurangi dampak lingkungan dari kegiatan ekstraksi minyak dan gas dengan tetap mempertahankan efisiensi produksi yang tinggi. Penelitian ini berpotensi memberikan kontribusi pada pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya dalam pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan. Dengan metode *non-destructive*, penelitian ini dapat mengarah pada pengembangan teknologi yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan, yang sangat dibutuhkan dalam proses ekstraksi minyak dan gas dari reservoir batuan *sandstone*. Upaya ini tidak hanya mendukung keberlanjutan lingkungan, tetapi juga mencerminkan tanggung jawab manusia sebagai khalifah di bumi untuk menjaga dan mengelola sumber daya alam secara bijaksana. Hal ini sejalan dengan firman Allah SWT dalam Surah Al-Anbiya (21:30):

وَلَمْ يَرِ الَّذِينَ كَفَرُوا أَنَّ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ كَانَتَا رَتْقًا فَفَتَقْنَاهُمَا ۖ وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلَا يُؤْمِنُونَ
٣٠

"Dan apakah orang-orang yang kafir tidak mengetahui bahwasanya langit dan bumi itu keduanya dahulu adalah suatu yang padu, kemudian Kami pisahkan antara keduanya. Dan dari air Kami jadikan segala sesuatu yang hidup. Maka mengapakah mereka tiada juga beriman?"

Ayat ini menggambarkan betapa pentingnya air sebagai sumber kehidupan dan menggambarkan bagaimana Allah SWT menciptakan fenomena alam yang kompleks. Pemahaman yang mendalam tentang alam dan fenomena tersembunyi seperti pergerakan fluida dalam batuan, sejalan dengan prinsip dalam Islam untuk menjaga keseimbangan alam sebagai bentuk amanah. Melalui teknologi yang *non-*

destructive, manusia diberi kemampuan untuk menjelajahi dan memahami ciptaan-Nya tanpa merusak, menegaskan kembali pentingnya peran ilmu dalam memperkuat iman serta menjaga keberlanjutan lingkungan.

Namun demikian, untuk mendapatkan pemahaman yang lebih mendalam mengenai fenomena tersebut, dibutuhkan upaya penelitian yang lebih komprehensif dan terstruktur. Penelitian ini menggunakan metode tomografi neutron sebagai alat utama untuk menganalisis dan memvisualisasikan gambar-gambar yang diperoleh dari proses akuisisi sampai rekonstruksi. Selain itu, penelitian ini juga berfokus pada analisis visualisasi dinamika minyak yang terjadi dalam batuan *Berea sandstone*. Proses ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak canggih yaitu *VGStudio Max*, yang memungkinkan pemrosesan data secara mendetail, serta memberikan gambaran yang lebih jelas tentang dinamika aliran fluida dalam struktur pori batuan secara tiga dimensi.

Meskipun sejumlah penelitian sebelumnya telah mengkaji pemanfaatan tomografi neutron dalam studi fluida pada batuan berpori, masih terdapat beberapa celah penelitian yang belum banyak dieksplorasi. Penelitian oleh Zambrano (2019), berfokus pada penggunaan tomografi neutron, *computed tomography*, dan radiografi neutron untuk memahami aliran fluida dalam batuan berpori secara umum tidak secara spesifik membahas dinamika minyak maupun pengaruh variasi fluida. Sementara itu penelitian oleh Stavropoulou (2020), lebih berfokus pada proses penyerapan air dalam batuan lempung menggunakan teknik tomografi neutron dan *computed tomography*, tetapi tidak melibatkan sistem fluida *multiphase* seperti minyak dan surfaktan.

Penelitian oleh Setiati (2023), telah memanfaatkan tomografi neutron untuk menganalisis distribusi minyak dan porositas pada batuan *Berea sandstone* dalam konteks penggunaan surfaktan dan air dengan tingkat salinitas tinggi, namun studi tersebut terbatas pada metode *core flooding* saja dan belum menggunakan mekanisme imbibisi. Selain itu, variasi salinitas yang digunakan juga masih terbatas, sehingga belum memberikan gambaran menyeluruh terhadap pengaruh tingkat salinitas yang berbeda terhadap dinamika minyak dalam media berpori. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini ada untuk mengisi celah tersebut dengan menggunakan metode tomografi neutron dengan teknik injeksi fluida seperti *core flooding* dan imbibisi untuk menganalisis dinamika minyak dalam batuan *Berea sandstone*. Penelitian ini juga menggunakan variasi tingkat salinitas (rendah dan tinggi) serta membandingkan efektivitas jenis surfaktan yang diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai dinamika minyak dalam batuan *Berea sandstone* secara non-destruktif.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, peneliti merumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil interaksi antara neutron dan minyak pada batuan *Berea sandstone* yang diamati melalui citra rekonstruksi hasil tomografi neutron?
2. Bagaimana pengaruh air dengan salinitas dan surfaktan terhadap dinamika minyak dalam batuan *Berea sandstone* pada proses *core flooding* dan imbibisi berdasarkan teknik tomografi neutron?

3. Bagaimana visualisasi citra pada minyak di dalam batuan *Berea sandstone* menggunakan perangkat lunak *VGStudio Max 3.0*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis hasil interaksi antara neutron dan minyak pada batuan *Berea sandstone* berdasarkan citra hasil rekonstruksi tomografi neutron.
2. Menganalisis pengaruh air dengan salinitas dan surfaktan terhadap dinamika minyak pada batuan *Berea sandstone* dalam proses *core flooding* dan imbibisi menggunakan teknik tomografi neutron.
3. Memvisualisasikan citra pada minyak dalam batuan *Berea sandstone* menggunakan perangkat lunak *VGStudio Max 3.0*.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Kamera yang digunakan memiliki resolusi spasial 200 mikron dan 40 mikron.
2. Penembakan sampel batuan *Berea sandstone* menggunakan fasilitas radiografi neutron di lakukan di PRTABN BRIN Serpong dan ISIS UK.
3. *Crude oil* yang digunakan merupakan *intermediate crude oil* dan *light crude oil*.
4. Surfaktan yang digunakan terbatas yaitu NALS *bagasse*, *MLS palm oil*, dan *SLS firwood*.

5. Percobaan ini menggunakan energi *thermal* dengan daya 15MW.
6. Sampel yang digunakan adalah sampel batuan *sandstone* standar *Berea*.
7. Percobaan menggunakan *Fix Time* dan *L/D* yang digunakan pada percobaan ini < 100 .

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah hasanah dalam metode analisis dinamika minyak pada batuan *Berea sandstone*.
2. Menjelaskan pengaruh air, salinitas dan surfaktan terhadap dinamika minyak untuk mendukung teknik EOR (*Enhanced Oil Recovery*).
3. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi untuk pengembangan studi lebih lanjut di bidang tomografi neutron serta aplikasi di sektor lain.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil interaksi antara neutron dengan minyak dalam batuan *Berea sandstone* dapat diamati dari citra rekonstruksi tomografi neutron. Citra yang dihasilkan dalam bentuk *grey level*, dimana area gelap menunjukkan minyak karena minyak mengandung unsur hidrogen yang tinggi sehingga probabilitas interaksi terhadap neutron lebih besar. Sedangkan area terang menunjukkan keberadaan air, D_2O , porositas tinggi dan unsur penyusun *berea*.
2. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa air dengan salinitas dan jenis surfaktan mempengaruhi proses *core flooding* dan imbibisi. Pada *core flooding*, distribusi fluida lebih merata dengan salinitas 60.000 ppm. Sementara proses imbibisi dengan surfaktan MES *palm oil* lebih efektif dibandingkan SLS *firwood*. Hasil citra tomografi neutron menunjukkan bahwa imbibisi dengan MES menghasilkan penyebaran fluida yang lebih merata, sementara imbibisi dengan SLS menghasilkan penyebaran yang lebih acak. Secara keseluruhan, kedua metode ini mengindikasikan bahwa salinitas dan surfaktan berperan penting dalam meningkatkan pemulihan minyak.

3. Hasil visualisasi citra tomografi neutron menggunakan *software VGStudio Max 3.0* menunjukkan hasil yang sesuai dengan data eksperimen dari metode *core flooding* dan imbibisi. Estimasi volume minyak yang terperangkap pada batuan melalui segmentasi citra dengan *software* tersebut menunjukkan kecocokan pola dengan nilai *remain* hasil eksperimen, baik pada sampel dengan metode *core flooding* maupun imbibisi spontan. Hal ini menunjukkan bahwa *VGStudio Max* mampu memvisualisasikan dinamika minyak di dalam pori-pori batuan *Berea sandstone*.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan metode segmentasi citra yang lebih akurat agar estimasi volume minyak dari visualisasi lebih kuantitatif. Pengujian pada jenis batuan dan kondisi reservoir yang lebih kompleks juga penting untuk melihat pengaruh terhadap efisiensi pemulihan. Selain itu, diperlukan pengembangan visualisasi aliran fluida secara langsung (*live*) menggunakan tomografi neutron resolusi tinggi dan perlu adanya analisis *image-based permeability* untuk memperkirakan dan memetakan distribusi permeabilitas secara spasial dalam sampel batuan, sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap hubungan antara struktur pori, pergerakan fluida, dan efisiensi pemulihan minyak.

DAFTAR PUSTAKA

- AAni, S., Giri Rachman Putra, E., Ikram, A., Pratapa, S., Purwaningsih, S., & Darminto, dan. 2007. Analisis Ukuran dan Korelasi Nano Partikel Fe 3 O 4 dalam Fluida Magnetik dengan Teknik Hamburan Neutron Sudut Kecil (Sistin A. Ani).
- Abd el Bar, W., Mahmoud, I. I., & Konber, H. A. 2016. Development and characterization of a neutron tomography system for a Research Reactor. *Journal of Taibah University for Science*, **10(2)**:195–204. <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2015.03.00>
- Abidin, A. Z., Puspasari, T., & Nugroho, W. A. 2012. Polymers for Enhanced Oil Recovery Technology. *Procedia Chemistry*, **4**:11–16. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2012.06.002>
- Adibhatla, B., & Mohanty, K. K. 2008. Oil Recovery from Fractured Carbonates by Surfactant-Aided Gravity Drainage: Laboratory Experiments and Mechanistic Simulations. *Society of Petroleum Engineerings*.
- Al-Jifri, M., Al-Attar, H., & Boukadi, F. 2021. New proxy models for predicting oil recovery factor in waterflooded heterogeneous reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production*, **11(3)**:1443–1459. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01095-4>
- Al-Kaabi, A., & Kokal, S. 2010. Enhanced Oil Recovery: Challenges & Opportunities. *World Petroleum Council*.
- Barton, J. P. 2000. Neutron Radiography-Status and International Prospects. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research-Neutrons as Microscopic Probes*, 1–16.
- BATAN. 2008. *uji kualifikasi radiografi batan*.
- Bear, J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications.
- Beiser, A. 2003. *Concepts of Modern Physics* (Sixth Edition). McGraw-Hill.
- Bharoto. 2013. Development of Data Acquisition and Control Software for Neutron Radiography Facility at Serpong, Indonesia Introduction *. In *Bharoto / Atom Indonesia* (Vol. 39, Issue 2).
- Broeke, J., María, J., Pérez, M., & Pascau, J. 2015. *Image Processing with ImageJ Second Edition Extract and analyze data from complex images with ImageJ, the world's leading image processing tool* (Second Edition). Packt Publishing. www.it-ebooks.info

- Cnudde, V., Dewanckele, J., De Boever, W., Brabant, L., & De Kock, T. 2012. *Chapter 6: 3d Characterization of Grain Size Distributions in Sandstone by Means of X-Ray Computed Tomography*.
- Cnudde, V., Dierick, M., Vlassenbroeck, J., Masschaele, B., Lehmann, E., Jacobs, P., & Van Hoorebeke, L. 2008. High-speed neutron radiography for monitoring the water absorption by capillarity in porous materials. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **266(1)**:155–163. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.10.030>
- Damanik, M., Kasmungin, S., Sudibjo, R. 2018. Study Peningkatan Oil Recovery Pada Injeksi Surfaktan-Polimer Pada Batuan Karbonat. In *Jurnal Penelitian dan Karya Ilmiah Lembaga Penelitian Universitas Trisakti* (Vol. 3, Issue 1).
- Datta, A., & Hawari, A. I. 2022. Characterization and Implementation of a Dynamic Neutron Imaging System at the Pulsar Reactor. *Journal of Signal Processing Systems*, **94(4)**: 411–424. <https://doi.org/10.1007/s11265-021-01694-8>
- Dawson, M. N. 2008a. *Application of Neutron Radiography & Tomography* [Doctor of Philosophy]. University Of Leeds.
- Dawson, M. N. 2008b. *Applications of Neutron Radiography & Tomography*.
- Fattahanisa, A. 2018. *Optimasi Injeksi Surfaktan NaLS Ampas Tebu Pada Salinitas Rendah Untuk Meningkatkan Faktor Perolehan*. (Thesis), Teknik Perminyakan, Universitas Trisakti.
- Fattahanisa, A., Setiati, R., Ristawati, A., Siregar, S., Marhaendrajana, T., & Wahyuningrum, D. 2021. The effect of middle phase emulsion and interfacial tension of Sodium Lignosulfonate surfactant synthesized from bagasse to Enhanced Oil Recovery. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1098(6)**, 062021. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1098/6/062021>
- Faridah, D. N., Erawan, D., Sutriah, K., Hadi, A., & Budiantari, F. 2017. *Implementasi BSN ISO 2017*. Badan Standarisasi Nasional.
- Firdaus, O., Setiati, R., Fathaddin, M. T., Rakhmanto, P. A., Prakoso, S., & Mardiana, D. A. 2022. Interfacial tension test analysis as injection fluid on reservoir core. *International Research Journal of Engineering, IT & Scientific Research*, **8(6)**:276–282. <https://doi.org/10.21744/irjeis.v8n6.2202>
- Fu, H., Song, K., Ma, Z., Zhao, Y., Liang, L., & Guo, H. 2024. An accurate identification and spatial characterization method for the development degree of preferential flow paths in water-flooded reservoir. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, **10(1)**. <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00817-2>

- Ghannam, M. T., Hasan, S. W., Abu-Jdayil, B., & Esmail, N. 2012. Rheological properties of heavy & light crude oil mixtures for improving flowability. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **81**:122–128. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.12.024>
- G.L. Chierici. 1995. *Principle of Petroleum Reservoir Engineering*. Vol. 2. Springer.
- Gong, L., Nie, L., & Xu, Y. 2020. Geometrical and topological analysis of pore space in sandstones based on x-ray computed tomography. *Energies*, **13**(15). <https://doi.org/10.3390/en13153774>
- Hacker, B. C. 1995. *Fallout from Plowshare Peaceful Nuclear Explosions and the Environment 1956-1973*.
- Hindasyah, A., Juliyani, Fahrurrozi, & Bharoto. 2017. Pengaruh Noise Gamma Spot pada Citra Radiografi Neutron Terhadap Kualitas Citra Hasil Rekonstruksi Tomografi 2D dan 3D. *Seminar Pendayagunaan Teknologi Nuklir*.
- Hossack, A. C., & Boeing, W. E. 2015. *A Study of Plasma Dynamics in HIT-SI using Ion Doppler Spectroscopy* [Doctor of Philosophy]. University of Washington.
- Hsieh, J., & Tang, X. 2006. Tilted cone-beam reconstruction with row-wise fan-to-parallel rebinning. *Physics in Medicine and Biology*, **51**(20):5259–5276. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/20/012>
- Hu, H. 1999. Multi-slice helical CT: Scan and reconstruction. *General Electric Comapany*.
- Hu, Z., Zhang, R., Zhu, K., Li, D., Jin, Y., Guo, W., Liu, X., Zhang, X., & Zhang, Q. 2023. Probing the Pore Structure of the Berea Sandstone by Using X-ray Micro-CT in Combination with ImageJ Software. *Minerals*, **13**(3). <https://doi.org/10.3390/min13030360>
- IAEA. 2008. *Neutron imaging: a non-destructive tool for materials testing: report of a coordinated research project 2003-2006*. International Atomic Energy Agency.
- James J. 2011. *Modern Cemical Enhanced Oil Recovery*. Elsevier.
- Kaestner, A. P., Trtik, P., Zarebanadkouki, M., Kazantsev, D., Snehota, M., Dobson, K. J., & Lehmann, E. H. 2016. Recent developments in neutron imaging with applications for porous media research. *Solid Earth*, **7**(5):1281–1292. <https://doi.org/10.5194/se-7-1281-2016>
- Kak, A. C., & Slaney, M. 2001. Front Matter. In *Principles of Computerized Tomographic Imaging* (pp. i–xiv). Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9780898719277.fm>

- Kardjilov, N., Manke, I., Hilger, A., Strobl, M., & Banhart, J. 2011. Neutron imaging in materials science. In *Materials Today* (Vol. 14, Issue 6, pp. 248–256). [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70139-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70139-0)
- Kardjilov, N., Manke, I., Woracek, R., Hilger, A., & Banhart, J. 2018. Advances in neutron imaging. In *Materials Today* (Vol. 21, Issue 6, pp. 652–672). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2018.03.001>
- Keller, A. A., Blunt, M. J., & Roberts, P. V. 1997. Micromodel Observation of the Role of Oil Layers in Three-Phase Flow. In *Transport in Porous Media*. Vol. 26. Kluwer Academic Publishers.
- Khairani, N., Azam, M., & Sofjan, K. F. 2007. Penentuan Kandungan Unsur Krom Dalam Limbah Tekstil Dengan Metode Analisis Pengaktifan Neutron. *Berkala Fisika*, 10(1):35–43.
- Kowatari, M., Fujii, K., Takahashi, M., Yoshizawa, M., Shimizu, S., Kawasaki, K., & Yamaguchi, Y. 2007. Evaluation of the characteristics of the neutron reference field using D2O-moderated 252Cf source. *Radiation Protection Dosimetry*, 126(1–4):138–144. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm030>
- Lake, L. W., John, R., & Pope, G. 2014. *Fundamentals Of Enhanced Oil Recovery*. Society of Petroleum Engineers.
- Lehmann, E. H., Tremsin, A., Grünzweig, C., Johnson, I., Boillat, P., & Josic, L. 2011. Neutron imaging - Detector options in progress. *Journal of Instrumentation*, 6(1). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/01/C01050>
- Li, K., Wang, D., & Jiang, S. 2018. Review on enhanced oil recovery by nanofluids. *Oil and Gas Science and Technology*, 73. <https://doi.org/10.2516/ogst/2018025>
- L.P Dake. 1978. *Fundamentals of Reservoir Engineering* (first edition). Elsevier.
- Martin, B. R. 2009. *Nuclear and particle physics an introduction B.R. Martin*. John Wiley & Sons.
- Maurich, D. 2023. Laboratory Investigation of Oil Stripping from Core Pore Spaces by Surfactant Spontaneous Imbibition Processes at High Temperature. *Petro: Jurnal Ilmiah Teknik Perminyakan*, 12(4):293–307. <https://doi.org/10.25105/petro.v12i4.17985>
- Meidya Buana, F., Satiawati, L., & Sunny Yulia, P. 2025. Variation of palm oil MES surfactant concentrations using CMG software. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1451(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1451/1/012038>
- Muslih, I., Sardjono, Y., & Widiharto, A. 2014. Perancangan Kolimator Di Beam Port Tembus Reaktor Kartini Untuk Boron Neutron Capture Therapy. *Prosiding Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah*.

- Myers, D. 1999. *Surfactant Science and Technology Third Edition*.
www.copyright.com.
- Nico, J. S., & Snow, W. M. 2005. Fundamental neutron physics. In *Annual Review of Nuclear and Particle Science* (Vol. 55: pp. 27–69).
<https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.55.090704.151611>
- Noiriel, C. 2015. Resolving time-dependent evolution of pore-scale structure, permeability and reactivity using X-ray microtomography. In *Pore Scale Geochemical Processes* (pp. 247–285). De Gruyter.
<https://doi.org/10.2138/rmg.2015.80.08>
- Okada, H. 1971. Classification of Sandstone: Analysis and Proposal. In *Source: The Journal of Geology* (Vol. 79, Issue 5).
- Oshina, I., & Spigulis, J. 2021. Beer–Lambert law for optical tissue diagnostics: current state of the art and the main limitations. *Journal of Biomedical Optics*, 26(10). <https://doi.org/10.1117/1.jbo.26.10.100901>
- Pradhana, R. A. P. 2022. *Evaluasi Injeksi Surfaktan Nals Ampas Tebu pada Intermediate Crude Oil dengan Bantuan Visualisasi Tomografi Neutron* [Thesis]. Universitas Trisakti.
- Princeton Instruments. 2014. Dynamic Neutron Radiography Novel (3D) Neutron Imaging Technique for Nondestructive Testing Made Possible by Large-Area, Intensified CCD Camera System. *Princeton Instruments*.
<http://www.psi.ch/niag/dynamic-neutron-radiography>
- Putri, S. I. 2022. *Studi Laboratorium Perbandingan Kinerja Biosurfaktan dan Surfaktan Sintetik dalam Merubah Wettabilitas Batuan Sandstone*. Universitas Islam Riau.
- Rahman, A. 2022. Routine Core Analysis (RCAL) Untuk Menentukan Porositas, Permeabilitas, dan Saturasi Pada Batupasir (Sandstone). *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, 3(11): 1248–1259. <https://doi.org/10.36418/jist.v3i11.548>
- Rakhmanto, P. A., Satiawati, L., Setiati, R., Nugrahanti, A., & Irawan, S. 2021. Effect of Sand Grain Size on Spontaneous Imbibition of Surfactant Solution. *Journal of Earth Energy Science, Engineering, and Technology*, 4(2).
<https://doi.org/10.25105/jeeset.v4i2.9419>
- Ramadianthi, A. 2021. *Studi Laboratorium Pengaruh Konsentrasi Methyl Ester Sulfonate Kelapa Sawit dan Xanthan Gum dalam Meningkatkan Recovery Factor dengan Metode Sontaneous Imbibition*. Universitas Islam Riau.
- Ristawati, A., Setiati, R., & Kasmungin, S. 2018. Pengaruh Konsentrasi Surfaktan Nals Ampas Tebu Dan Salinitas Tinggi Pada Hasil Uji Kelakuan Fasa. In *Seminar Nasional Cendekiawan*. Vol. 4.
- Riyanto. 2014. *Validasi & Verifikasi Metode Uji Sesuai dengan ISO/IEC 17025 Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi*. Deepublish.

- Rosli, W., Sulaiman, W., & Lee, E. S. 2012. Simulation of Surfactant Based Enhanced Oil Recovery. In *The Open Petroleum Engineering Journal*, **Vol. 5**.
- Sahputra, M. A., Kasmungin, S., & Fathaddin, T. 2017. Wettability Studies of Sandstone After the Injection Process of Surfactant by Observing Salinity Effect, Surfactant Concentration and Temperature. In *Seminar Nasional Cendekiawan ke*, **Vol. 3**.
- Samanta, A., Keka Ojha, Sarkar, A., & Mandal, Ajay. 2011. Surfactant and Surfactant-Polymer Flooding for Enhanced Oil Recovery. *Advance in Petroleum Exploration and Development*, **2**:13–18. <https://doi.org/10.3968/10.3968/j.aped.1925543820110201.608>
- Santiani. 2011. *Nuklir; Fisika Inti*. Intimedia.
- Schramm, L. 2000. *Surfactants: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry*. Cambridge University Press.
- Setiati, R., Akbar, F., Karisma, G. P., Ramadhani, A., Setiawan, S., Aditya, R., Fathaddin, M. T., Sukaryo, S. G., Bharoto, B., & Sumirat, I. 2023. Application of Neutron Computed Tomography in Enhanced Oil Recovery for Analysing Oil Distribution in Berea Sandstone using Bagasse Surfactant. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, **38(5)**: 87–95. <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.5.8>
- Setiati, R., Aryani, E., Putri, M., Wahyuningrum, D., Siregar, S., Marhaendrajana, T., & Fajriah, S. 2016. Sulfonasi lignin ampas tebu menjadi surfaktan natrium lignosulfonat. In *Prosiding Seminar Lignosehulosa*.
- Setiati, R., Siregar, S., Marhaendrajana, T., & Wahyuningrum, D. 2019. Surfactant Flooding for EOR Using Sodium Lignosulfonate Synthesized from Bagasse. In *Enhanced Oil Recovery Processes - New Technologies*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88689>
- Setiati, R., Siregar, S., Marhaendrajana, T., Wahyuningrum, D., Teknik, J., Ftke, P., Trisakti, U., Institut, P., Bandung, T., & Kimia, J. 2018. Pengaruh Wettability Surfaktan Nals Ampas Tebu pada Batuan Sandstone dalam Proses Enhanced Oil Recovery (EOR). In *Seminar Nasional Pakar ke 1 Tahun*.
- Setiati, R., Sumirat, I., Sukaryo, S. G., Adisoemarta, P. S., Akbar, F., Marpaung, T. S., & Bharoto. 2021. Visualizations of Berea sandstone pores using neutron tomography. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **894(1)**. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/894/1/012010>
- Shafabakhsh, P., Cordonnier, B. J. B., Pluymakers, A., Borgne, T. Le, Mathiesen, J., Linga, G., Hu, Y., Kaestner, A., & Renard, F. 2023. Dynamic neutron imaging of solute transport and fluid flow in sandstone before and after mineral precipitation. In *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.22541/essoar.169603569.95544802/v1>

- Shiau, B. J. Ben, Hsu, T.-P., Wan, W., Lin, Z., Roberts, B. L., & Harwell, J. H. 2012. *SPE 154260 Improved Oil Recovery by Chemical Flood from High Salinity Reservoirs*.
- Stavropoulou, E., Andò, E., Roubin, E., Lenoir, N., Tengattini, A., Briffaut, M., & Bésuelle, P. 2020. Dynamics of Water Absorption in Callovo-Oxfordian Claystone Revealed with Multimodal X-Ray and Neutron Tomography. *Frontiers in Earth Science*, **8**. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00006>
- Sunny, P., Kasmungin, S., & Taufiq Fathaddin, M. 2020. ANALISIS SALINITAS DAN KONSENTRASI SURFAKTAN Aos dan Tween 20 Terhadap Recovery Factor pada Proses Imbibisi dan Core-Flooding. *Jurnal Petro*, **4**. <http://trijurnal.lemlit.trisakti.ac.id/index.php/petro>
- Sunny Yulia, P. 2017. Kajian Laboratorium Mengenai Pengaruh Salinitas, Jenis Surfaktan dan Konsentrasi Surfaktan Terhadap Recovery Factor dalam Sistem Injeksi Surfaktan Untuk Batuan Karbonat. In *Seminar Nasional Cendekiawan ke*, **Vol. 3**.
- Suparman, L. Y., Wiyatmo, Y., & Widarto. 2011. *Penentuan Karakteristik Distribusi Fluks Neutron Thermal Fasilitas Irradiasi Lazy Suzan (LS) Arah Horizontal Reaktor Kartini*.
- Suparmanto, A. K., Setiati, R., Taufiq Fathaddin, M., Prakoso, S., Atty Mardiana, D., Agung Rakhmanto, P., & Nugrahanti, A. 2024. The effect of Fir wood SLS surfactant concentration on the characteristics of light crude oil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1339(1)**. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1339/1/012016>
- Suparwoto, S., Setiati, R., Rahkmanto, P. A., Fathaddin, Muh. T., Prakoso, S., & Mardiana, D. A. 2024. Uji Kestabilan Larutan dan Perubahan Fasa Sebagai Karakteristik dari Screening Surfaktan Metil Ester Sulfonate Kelapa Sawit Terhadap Minyak Ringan Lapangan “X”. *Jurnal Penelitian Dan Karya Ilmiah Lembaga Penelitian Universitas Trisakti*, **268–275**. <https://doi.org/10.25105/pdk.v9i1.18790>
- Susanto, A. T., & Prajitno, P. 2020. Rekonstruksi Citra pada Komputasi Tomografi Sinar-X Berbasis Fluoroskopi untuk Aplikasi Industri Manufaktur. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/355022602>
- Susetyo, W. 1988. *Spektrometri Gamma dan Penerapannya dalam Analisis Pengaktifan Neutron*. Gadjah Mada University Press.
- Sutiarso, Akbar, F., Gunawan, & Indrajaja, A. 2012. Aplikasi Tomografi Neutron di Batan Serpong untuk Pengamatan Struktur Internal Benda Purbakala. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Bahan*.
- Syahrudin, M. H. 2014. Persamaan Aliran Air Dalam Media Berpori Sebagai Aliran Airtanah (Groundwater). *Symposium Fisika Nasional*, 16–17.

- Tang, G. Q., & Morrow, N. R. 1997. Salinity, Temperature, Oil Composition, and Oil Recovery by Waterflooding. In *SPE Reservoir Engineering*.
- Tarek Ahmed. 2019. *Fifth Edition Reservoir Engineering Handbook* (Michelle W.Fisher, Ed.; fifth edition). joe hayton. https://books.google.co.id/books?hl=id&lr=&id=8Jp7DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Reservoir+Engineering+Handbook&ots=rTUqinoKf&sig=Cr3GtBaU3GfNc3C0LdylBigS5IM&redir_esc=y#v=onepage&q=Reservoir%20Engineering%20Handbook&f=false
- Thomas, S. 2008. Enhanced oil recovery - An overview. *Oil and Gas Science and Technology*, **63**(1 SPEC. ISS.), 9–19. <https://doi.org/10.2516/ogst:2007060>
- Viriya, T., & Lestari. 2015. Studi Laboratorium Mengenai Pengaruh Peningkatan Konsentrasi Surfaktan Terhadap Peningkatan Produksi Minyak Pada Injeksi Surfaktan dengan Kadar Salinitas Air Formasi yang Bervariasi. *Seminar Nasional Cendekiawan*.
- Willhite, G. P., Green, D. W., & Mccool, C. S. 1999. *Increased Oil Recovery from Mature Oil Fields Using Gelled Polymer Treatments Final Report Reporting Period*.
- Winkler, B. 2006. Applications of neutron radiography and neutron tomography. In *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* (Vol. **63**, pp. 459–471). <https://doi.org/10.2138/rmg.2006.63.17>
- Wiyantoko, B. 2016. *Kimia Petroleum*.
- Woe, K., Setiati, R., Fattahanisa, A., & Alli, Y. F. 2019. Studi Karakteristik Larutan Surfaktan dengan Imbibisi Spontan pada Lapangan “K”, Sumatera Selatan. *SEminar Nasional Cendekiawan*.
- Yang, Y., Li, Y., Yao, J., Zhang, K., Iglauer, S., Luquot, L., & Wang, Z. 2019. Formation damage evaluation of a sandstone reservoir via pore-scale X-ray computed tomography analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **183**. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106356>
- Yulia, P. S. 2017. *Pengaruh Salinitas dan Konsentrasi Surfaktan AOS dan Tween 20 Terhadap Recovery Factor Pada Proses Imbibisi dan Core Flooding*. Universitas Trisakti.
- Zambrano, M., Hameed, F., Anders, K., Mancini, L., & Tondi, E. 2019. Implementation of Dynamic Neutron Radiography and Integrated X-Ray and Neutron Tomography in Porous Carbonate Reservoir Rocks. *Frontiers in Earth Science*, **7**. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00329>
- Zamora, B., Kaiser, A. S., & Vicente, P. G. 2010. Improvement in learning on fluid mechanics and heat transfer courses using computational fluid dynamics. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, **38**(2).

- Zhao, H., Xu, L., Guo, Z., Zhang, Q., Liu, W., & Kang, X. 2020. Flow-path tracking strategy in a data-driven interwell numerical simulation model for waterflooding history matching and performance prediction with infill wells. *SPE Journal*, **25**(2): 1007–1025. <https://doi.org/10.2118/199361-PA>
- Zhao, L., Chen, X., Chen, L., Cao, R., Zhang, X., Liu, J., & Shan, F. 2015. Effects of oil recovery rate on water-flooding of homogeneous reservoirs of different oil viscosity. *Petroleum Exploration and Development*, **42**(3): 384–389. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(15\)30029-X](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(15)30029-X)
- Zhao, Y., Song, Y., Liu, Y., Jiang, L., & Zhu, N. 2011. Visualization of CO₂ and oil immiscible and miscible flow processes in porous media using NMR micro-imaging. *Petroleum Science*, **8**(2): 183–193. <https://doi.org/10.1007/s12182-011-0133-1>