

**PENERAPAN TEKNIK *NEUTRON COMPUTED*  
*TOMOGRAPHY* DENGAN RESOLUSI SPASIAL 200  
MIKRON SEBAGAI METODE PENGUKURAN  
POROSITAS PADA *BEREA SANDSTONE***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana S-1

Program Studi Fisika



Diajukan oleh:  
Ulfa Khozanah  
21106020015

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

**PROGRAM STUDI FISIKA**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

**UIN SUNAN KALIJAGA**

**YOGYAKARTA**

**2025**

## HALAMAN PENGESAHAN



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-1099/Un.02/DST/PP.00.9/06/2025

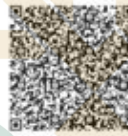
Tugas Akhir dengan judul : Penerapan Teknik Neutron Computed Tomography dengan Resolusi Spasial 200 Mikron sebagai Metode Pengukuran Porositas Pada Berea Sandstone

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : ULFA KHOZANAH  
Nomor Induk Mahasiswa : 21106020015  
Telah diujikan pada : Kamis, 05 Juni 2025  
Nilai ujian Tugas Akhir : A

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

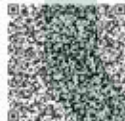
### TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

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

Valid ID: 664034693562



Penguji I

Dr. Thaqibul Fikri Niyartama, S.Sc., M.Si.  
SIGNED

Valid ID: 6640796461827



Penguji II

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

Valid ID: 664075943366



Yogyakarta, 05 Juni 2025  
UIN Sunan Kalijaga  
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi  
Prof. Dr. Dra. Hj. Khumil Wardati, M.Si.  
SIGNED

Valid ID: 664046370707

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

### SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ulfa Khozanah  
NIM : 21106020015  
Program Studi : Fisika  
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "*Penerapan Teknik Neutron Computed Tomography dengan Resolusi Spasial 200 Mikron Sebagai Metode Pengukuran Porositas pada 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, 14 Juni 2025

Penulis



Ulfa Khozanah  
21106020015

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

## SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

### SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hai : 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 : Ulfa Khozanah

NIM : 21106020015

Judul Skripsi : Penerapan Teknik Neutron Computed Tomography dengan Resolusi Spasial 200 mikron Sebagai Metode Pengukuran Porositas pada 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 berharap 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.ST., M.Sc.  
NIP. 19840117 200912 1 002

Pembimbing I

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

**PENERAPAN TEKNIK *NEUTRON COMPUTED***  
***TOMOGRAPHY* DENGAN RESOLUSI SPASIAL 200 MIKRON**  
**SEBAGAI METODE PENGUKURAN POROSITAS PADA**  
***BEREA SANDSTONE***

**Ulfa Khozanah**

**21106020015**

**INTISARI**

Porositas merupakan ruang kosong dalam batuan yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan hidrokarbon, seperti minyak dan gas, sehingga menjadi parameter utama dalam menentukan potensi suatu batuan sebagai reservoir. Salah satu jenis batuan reservoir yang sering dijumpai untuk analisis porositas adalah *Berea sandstone*. Penelitian ini menggunakan teknik *neutron computed tomography* (NCT) untuk mengukur dan menganalisis porositas pada batuan, dengan keunggulan teknik ini yaitu mampu memberikan visualisasi 3D distribusi porositas dalam batuan, tanpa harus merusak sampel (*non-destructive*). Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui efektivitas penerapan teknik *neutron computed tomography* (NCT) dengan resolusi spasial 200  $\mu\text{m}$  dalam pengukuran porositas pada *Berea sandstone*. Tahap rekonstruksi citra dilakukan menggunakan perangkat lunak *Octopus Reconstruction 8.9* yang menghasilkan sekumpulan citra 2D berupa tampang lintang sampel *Berea sandstone* dalam skala keabuan (*gray level*). Pengukuran porositas dilakukan dengan dua metode segmentasi citra yaitu *automatic* dan manual. Hasil porositas menggunakan metode segmentasi manual memperoleh nilai porositas dari keempat *core Berea sandstone* masing-masing sebesar 20,03%; 20,36%; 20,50%; 20,04%, dimana nilai-nilai tersebut mendekati nilai pengukuran porositas hasil uji laboratorium menggunakan *porosimeter*. Rata-rata ketepatan nilai porositas menggunakan metode segmentasi *automatic* terhadap data uji laboratorium yaitu sebesar 45,10%, sedangkan dengan menggunakan metode segmentasi manual mencapai 98,86%. Tingginya tingkat ketepatan yang diperoleh dengan menggunakan metode manual menunjukkan metode ini lebih valid karena berada dalam batas nilai ketepatan yang dapat diterima sesuai standar SNI ISO 17025:2017.

**Kata kunci:** Porositas, *Berea sandstone*, *neutron computed tomography* (NCT), metode segmentasi, citra

# **APPLICATION OF NEUTRON COMPUTED TOMOGRAPHY TECHNIQUE WITH 200 MICRON SPATIAL RESOLUTION AS A POROSITY MEASUREMENT METHOD IN BERE SANDSTONE**

**Ulfa Khozanah**

**21106020015**

## **ABSTRACT**

*Porosity is the empty space in rocks that functions as a storage place for hydrocarbons, such as oil and gas, making it a key parameter in determining the potential of a rock as a reservoir. One type of reservoir rock that is often encountered for porosity analysis is Berea sandstone. This study employs neutron computed tomography (NCT) to measure and analyze porosity in rocks, with the advantage of this technique being its ability to provide 3D visualization of porosity distribution within rocks without damaging the sample (non-destructive). The objective of this study is to determine the effectiveness of applying the neutron computed tomography (NCT) technique with a spatial resolution of 200  $\mu\text{m}$  in measuring porosity in Berea sandstone. The image reconstruction stage was performed using Octopus Reconstruction 8.9 software, which produced a set of 2D images in the form of cross-sections of Berea sandstone samples in gray scale. Porosity measurements were performed using two image segmentation methods, namely automatic and manual. The porosity results using the manual segmentation method yielded porosity values for the four Berea sandstone cores of 20.03%, 20.36%, 20.50%, and 20.04%, respectively, which are close to the porosity measurement values obtained from laboratory tests using a porosimeter. The average accuracy of porosity values using the automatic segmentation method compared to laboratory test data was 45.10%, while using the manual segmentation method reached 98.86%. The high accuracy obtained using the manual method indicates that this method is more valid as it falls within the acceptable accuracy range according to SNI ISO 17025:2017 standards.*

**Keywords:** *porosity, Berea sandstone, neutron computed tomography (NCT), segmentation methods, imaging*

## MOTTO

Pada akhirnya akan selalu ada batas dalam setiap perjalanan. Dan selalu ada kata selesai untuk sesuatu yang dimulai.

(Narendera Diaskara)

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”

(Q.S. Al-Insyiroh:5)

“Hidup bukan saling mendahului, bermimpilah sendiri-sendiri”

(Baskara Putra)

“Pada akhirnya, ini semua hanyalah permulaan”

(Nadin Amizah)

“Ikhtiar, doa, tawakal”

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

Tugas akhir ini penulis persembahkan kepada ayah dan ibu, Ahmad Nasirin dan Sri Setiyani, kakak Muhammad Khozin serta keluarga yang selalu kebersamai walau terkadang lelah.

Terimakasih atas segala doa berkat dan dukungannya sampai detik ini. Sehat selalu, tolong hidup lebih lama lagi.



## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillah* rabbi 'alamin, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala kelimpahan rahmat, anugerah, dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tugas akhir ini, dengan judul “Penerapan Teknik *Neutron Computed Tomography* dengan Resolusi Spasial 200 Mikron Sebagai Metode Pengukuran Porositas pada *Berea Sandstone*“. Penyusunan tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam memperoleh gelar Sarjana Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Selama penyusunan tugas akhir ini, penulis menyadari sepenuhnya bahwa selesainya penulisan ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, arahan serta saran dari berbagai pihak, baik secara moral maupun materiil. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih sebesar-besarnya antara lain kepada:

1. Bapak, Ibu, kakak dan keluarga yang selalu memberikan doa, dukungan, serta motivasi tanpa kenal lelah.
2. Ibu Dr. Widayanti, S.Si, M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika Fakultas Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Ibu Dr. Nita Handayani S.Si, M.Si. selaku Dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, serta motivasi yang telah diberikan.
4. Bapak Fahrurrozi Akbar M.Sc selaku Dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan motivasi yang telah diberikan kepada penulis.
5. Seluruh dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan bimbingan serta ilmu yang bermanfaat.

6. Nisa Muthmainnah, teman seperjuangan dalam melaksanakan penelitian tugas akhir yang selalu kebersamai hingga akhir penyusunan laporan.
7. Seluruh teman-teman seperjuangan, terutama: Febi, Ayu, Andin, Nisrina, Rahmi, Ulya, dan Aulia yang telah kebersamai penulis dalam menempuh studi di UIN Sunan Kalijaga.
8. Seluruh teman-teman angkatan 2021 Program Studi Fisika yang telah berjuang bersama selama perkuliahan ini.
9. BRIN KST BJ Habibie, Serpong yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk bisa ikut melaksanakan penelitian tugas akhir.
10. Keluarga JPPI Minhajul Muslim Yogyakarta yang menjadi rumah dalam perjalanan studi ini.
11. Serta semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu yang telah banyak membantu dan mendukung penulisan dalam serangkaian proses penyusunan tugas akhir.

Semoga Allah SWT memberikan balasan yang lebih besar atas kebaikan dan dukungan yang telah pihak-pihak terkait berikan. Akhir kata, penulis sampaikan permohonan maaf atas kekurangan dan ketidaksempurnaan dalam penyusunan tugas akhir ini. Dengan demikian, segala saran, masukan dan kritik yang bersifat membangun dari semua pihak sangat diharapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis dan pembaca pada umumnya. Amiin.

Yogyakarta, Juni 2025

Penulis

## DAFTAR ISI

|                                                      |             |
|------------------------------------------------------|-------------|
| <b>HALAMAN JUDUL .....</b>                           | <b>i</b>    |
| <b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>                       | <b>ii</b>   |
| <b>SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI .....</b>       | <b>iii</b>  |
| <b>SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR.....</b>    | <b>iii</b>  |
| <b>INTISARI .....</b>                                | <b>v</b>    |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                | <b>vi</b>   |
| <b>MOTTO .....</b>                                   | <b>vii</b>  |
| <b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>                     | <b>viii</b> |
| <b>KATA PENGANTAR.....</b>                           | <b>ix</b>   |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>                               | <b>xi</b>   |
| <b>DAFTAR GAMBAR.....</b>                            | <b>xiii</b> |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>                            | <b>xiv</b>  |
| <b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>                         | <b>xv</b>   |
| <b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>                        | <b>1</b>    |
| 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           |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>                  | <b>10</b>   |
| 2.1 Studi Pustaka.....                               | 10          |
| 2.2 Landasan Teori.....                              | 15          |
| 2.2.1 Neutron.....                                   | 15          |
| 2.2.2 Interaksi Neutron dengan Bahan .....           | 19          |
| 2.2.3 <i>Neutron Computed Tomography</i> (NCT) ..... | 24          |
| 2.2.4 <i>Imaging Processing</i> .....                | 26          |
| 2.2.5 Batupasir ( <i>Sandstone</i> ).....            | 34          |
| 2.2.6 Porositas dan Karakteristik Batuan .....       | 37          |
| 2.2.7 Perangkat Lunak Pendukung.....                 | 39          |
| 2.2.8 Validitas Metode Pengukuran .....              | 43          |
| <b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>               | <b>47</b>   |

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....                       | 47        |
| 3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....                          | 47        |
| 3.2.1 Perangkat Keras.....                                  | 47        |
| 3.2.2 Perangkat Lunak.....                                  | 48        |
| 3.2.3 Alat Penelitian .....                                 | 48        |
| 3.2.4 Bahan penelitian .....                                | 49        |
| 3.3 Prosedur Penelitian.....                                | 50        |
| 3.3.1 Studi Literatur .....                                 | 51        |
| 3.3.2 Tahap Persiapan .....                                 | 52        |
| 3.3.3 <i>Denoising</i> Citra .....                          | 55        |
| 3.3.4 Rekonstruksi Citra.....                               | 56        |
| 3.3.5 Penentuan Rentang Densitas .....                      | 57        |
| 3.3.6 Visualisasi 3D .....                                  | 61        |
| 3.3.7 Membandingkan hasil pengukuran porositas batuan ..... | 61        |
| 3.4 Metode Analisa Data.....                                | 62        |
| 3.4.1 Rekonstruksi Citra.....                               | 62        |
| 3.4.2 Pengukuran Porositas .....                            | 63        |
| 3.4.3 Ketepatan Hasil Pengukuran Porositas.....             | 65        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>                    | <b>66</b> |
| 4.1 Hasil Penelitian .....                                  | 66        |
| 4.1.1 Hasil Citra Rekonstruksi .....                        | 66        |
| 4.1.2 Hasil Pengukuran Porositas.....                       | 68        |
| 4.1.3 Nilai Ketepatan (Akurasi) .....                       | 69        |
| 4.2 Pembahasan.....                                         | 70        |
| 4.2.1 Rekonstruksi Citra.....                               | 70        |
| 4.2.2 Analisis Porositas .....                              | 74        |
| 4.2.3 Nilai Ketepatan (Akurasi) .....                       | 82        |
| <b>BAB V PENUTUP .....</b>                                  | <b>85</b> |
| 5.1 Kesimpulan .....                                        | 85        |
| 5.2 Saran .....                                             | 86        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>                                 | <b>87</b> |
| <b>LAMPIRAN.....</b>                                        | <b>94</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gambar 1.1</b> Pemetaan wilayah cadangan migas di Indonesia (Setyono & Kiono, 2021) .....                                                                                                                       | 1  |
| <b>Gambar 2.1</b> Struktur atomik (Kurniawan, 2012).....                                                                                                                                                           | 16 |
| <b>Gambar 2.2</b> Spektrum energi neutron reaktor (Glascock, 2003).....                                                                                                                                            | 18 |
| <b>Gambar 2.3</b> Skema (a) hamburan elastis (b) hamburan inelastis (Hosseini dkk., 2021) .....                                                                                                                    | 21 |
| <b>Gambar 2.4</b> Probabilitas interaksi hamburan dan penangkapan neutron (Akyurek dkk., 2016) .....                                                                                                               | 23 |
| <b>Gambar 2.5</b> Ilustrasi citra tomografi batuan menggunakan neutron (kiri) dan sinar-X (kanan) (Yehya dkk., 2018) .....                                                                                         | 24 |
| <b>Gambar 2.6</b> Koefisien atenuasi neutron termal dan sinar-X (Tang, 2025).....                                                                                                                                  | 24 |
| <b>Gambar 2.7</b> Contoh ilustrasi cara kerja NCT (Akbar dkk., 2011a).....                                                                                                                                         | 26 |
| <b>Gambar 2.8</b> Proses rekonstruksi citra (Susanto dkk., 2020).....                                                                                                                                              | 33 |
| <b>Gambar 2.9</b> Contoh sampel <i>Berea sandstone</i> (Setiati dkk., 2021).....                                                                                                                                   | 36 |
| <b>Gambar 2.10</b> Skema perbedaan porositas efektif dan non-efektif (Rosiyanti, 2023) .....                                                                                                                       | 39 |
| <b>Gambar 2.11</b> Tampilan <i>software Octopus Reconstruction 8.9</i> .....                                                                                                                                       | 40 |
| <b>Gambar 2.12</b> Tampilan <i>software VGStudio Max 3.0</i> .....                                                                                                                                                 | 42 |
| <b>Gambar 3.1</b> Fasilitas radiografi neutron di RSG-GA Siwabessy Serpong.....                                                                                                                                    | 48 |
| <b>Gambar 3.2</b> Diagram alir penelitian .....                                                                                                                                                                    | 50 |
| <b>Gambar 3.3</b> <i>Porosimeter</i> (Fattahanisa, 2018).....                                                                                                                                                      | 53 |
| <b>Gambar 3.4</b> Tampilan tombol ' <i>surface determination</i> ' .....                                                                                                                                           | 58 |
| <b>Gambar 3.5</b> Tampilan pengaturan histogram <i>automatic</i> (kiri) dan manual (kanan) .....                                                                                                                   | 59 |
| <b>Gambar 3.6</b> Analisis porositas pada <i>software VGStudio Max</i> (VGDefX) .....                                                                                                                              | 59 |
| <b>Gambar 3.7</b> Pengaturan parameter untuk analisis porositas (VGDefX) .....                                                                                                                                     | 60 |
| <b>Gambar 3.8</b> Hasil statistik analisis porositas (VGDefX).....                                                                                                                                                 | 61 |
| <b>Gambar 4.1</b> Citra proyeksi <i>Berea sandstone</i> menggunakan teknik NCT .....                                                                                                                               | 67 |
| <b>Gambar 4.2</b> Citra tampang lintang sampel A1, A2, C1, dan C2 secara beurutan, (a) <i>slice</i> bagian atas, (b) <i>slice</i> bagian tengah, dan (c) <i>slice</i> bagian bawah .....                           | 67 |
| <b>Gambar 4.3</b> Citra proyeksi sampel <i>empty</i> (atas) & citra tampang lintang sampel <i>empty</i> (bawah): (a) <i>slice</i> bagian atas, (b) <i>slice</i> bagian tengah, (c) <i>slice</i> bagian bawah ..... | 68 |
| <b>Gambar 4.4</b> Citra distribusi porositas: (a) sampel A1, (b) sampel A2, (c) sampel C1 dan (d) sampel C2, menggunakan metode segmentasi <i>automatic</i> (kiri) dan manual (kanan) .....                        | 78 |
| <b>Gambar 4.5</b> Citra visualisasi analisis sampel <i>empty</i> .....                                                                                                                                             | 81 |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabel 2.1</b> Studi pustaka .....                                                       | 14 |
| <b>Tabel 2.2</b> Komposisi <i>Berea sandstone</i> (Setiati dkk., 2023) .....               | 36 |
| <b>Tabel 2.3</b> Klasifikasi nilai porositas (Abi dkk., 2018) .....                        | 38 |
| <b>Tabel 2.4</b> Batas keberterimaan akurasi metode menurut AOAC (Faridah dkk., 2018)..... | 44 |
| <b>Tabel 3.1</b> Perangkat keras penelitian.....                                           | 47 |
| <b>Tabel 3.2</b> Perangkat lunak penelitian .....                                          | 48 |
| <b>Tabel 3.3</b> Alat penelitian .....                                                     | 48 |
| <b>Tabel 3.4</b> Rincian <i>core</i> sampel penelitian .....                               | 49 |
| <b>Tabel 4.1</b> Hasil pengukuran porositas menggunakan teknik NCT.....                    | 69 |
| <b>Tabel 4.2</b> Hasil nilai ketepatan pengukuran porositas.....                           | 69 |

## DAFTAR LAMPIRAN

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Lampiran 1</b> Parameter instrument akuisisi data .....                              | 94 |
| <b>Lampiran 2</b> Perhitungan porositas <i>core</i> sampel <i>Berea sandstone</i> ..... | 94 |
| <b>Lampiran 3</b> Perhitungan ketepatan.....                                            | 95 |
| <b>Lampiran 4</b> Dokumentasi .....                                                     | 97 |

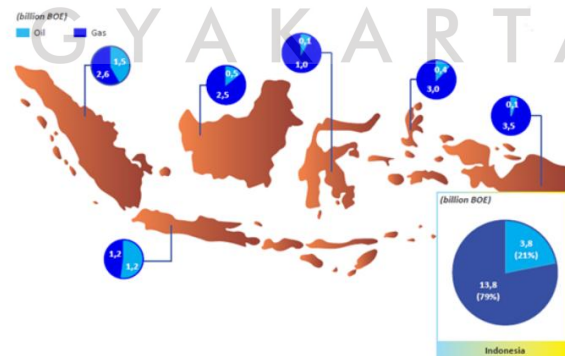


## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara produsen minyak dan gas bumi terbesar di dunia, dengan cadangan yang tersebar hampir diseluruh wilayah negara seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.1. Keberadaan sumber daya ini memberikan kontribusi yang signifikan terhadap perekonomian negara, baik melalui eksplorasi maupun produksi. Akan tetapi, dalam kurun waktu sekitar 10 tahun terakhir, produksi minyak dan gas bumi di Indonesia mengalami penurunan hampir setiap tahunnya (Setyono & Kiono, 2021). Dalam pemenuhan kebutuhan ini, industri minyak dan gas di Indonesia mulai mencari cara untuk eksplorasi minyak sebagai langkah kritis dalam memastikan ketersediaan minyak dan gas bumi di masa mendatang. Langkah ini melibatkan berbagai strategi, salah satunya dengan metode *oil recovery* yaitu mengoptimalkan produksi dan memaksimalkan pemulihan cadangan minyak lama. Hal ini dilakukan karena cadangan minyak pada ladang lama masih memungkinkan untuk diesktraksi lebih lanjut hingga 40% (Witasta, 2020).



**Gambar 1.1** Pemetaan wilayah cadangan migas di Indonesia (Setyono & Kiono, 2021)

Penentuan potensi hidrokarbon pada reservoir sebagai metode eksplorasi minyak, tentunya membutuhkan inovasi teknologi yang sangat canggih. Para ahli dan ilmuwan terus berupaya untuk menciptakan inovasi-inovasi baru dalam memenuhi kebutuhan masyarakat secara berkelanjutan dengan memperhatikan pengelolaan sumber daya alam yang telah dimiliki. Hal tersebut seiring dengan perintah dan ajaran agama Islam, yang tertuang di dalam Al-Quran bahwa sebagai manusia diberikan tanggung jawab sebagai khalifah di bumi, sebagaimana diamanahkan oleh Allah SWT dalam QS. Al-Baqarah ayat 30, yang berbunyi:

وَإِذْ قَالَ رَبُّكَ لِلْمَلَائِكَةِ إِنِّي جَاعِلٌ فِي الْأَرْضِ خَلِيفَةً قَالُوا أَتَجْعَلُ فِيهَا مَنْ يُفْسِدُ فِيهَا وَيَسْفِكُ الدِّمَاءَ وَنَحْنُ نُسَبِّحُ بِحَمْدِكَ وَنُقَدِّسُ لَكَ قَالَ إِنِّي أَعْلَمُ مَا لَا تَعْلَمُونَ

*Artinya: Ingatlah ketika Tuhanmu berfirman kepada para Malaikat: "Sesungguhnya Aku hendak menjadikan seorang khalifah di muka bumi". Mereka berkata: "Mengapa Engkau hendak menjadikan (khalifah) di bumi itu orang yang akan membuat kerusakan padanya dan menumpahkan darah, padahal kami senantiasa bertasbih dengan memuji Engkau dan mensucikan Engkau?" Tuhan berfirman: "Sesungguhnya Aku mengetahui apa yang tidak kamu ketahui".*

Pada ayat tersebut, menyebutkan bahwa manusia diberi tanggung jawab untuk mengelola dan menjaga bumi. Sebagai khalifah, manusia tidak hanya memiliki hak untuk memanfaatkan sumber daya alam, tetapi juga berkewajiban untuk memeliharanya demi kebaikan seluruh makhluk dan generasi mendatang. Selanjutnya, kesadaran akan fungsi manusia sebagai hamba Allah yang menjaga dan pemelihara alam semesta juga mengilhami inovasi teknologi yang ramah lingkungan. Manusia sebagai makhluk yang diberi kecerdasan dan kreativitas oleh Sang Pencipta, memiliki potensi besar untuk mengembangkan solusi-solusi inovatif dalam menjaga keberlanjutan alam semesta.

Penafsiran ayat Al-Qur'an tersebut menegaskan pentingnya kemajuan ilmu pengetahuan, terutama dalam pengelolaan ketersediaan sumber daya alam di bumi. Perkembangan teknologi saat ini menjadi bukti nyata penerapan tafsiran ayat tersebut. Efisiensi cadangan sumber daya alam dengan mempertimbangkan keberlanjutan dan kelestarian lingkungan menjadi tantangan yang hanya dapat diatasi melalui kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi. Seperti halnya dalam metode eksplorasi dan karakterisasi reservoir minyak dan gas bumi, kini mulai berkembang dari metode konvensional berbasis pengukuran langsung di lapangan menjadi metode modern yang memanfaatkan teknologi pemodelan digital, pencitraan geofisika, dan analisis berbasis komputer. Keunggulan dari metode modern yaitu menghasilkan citra visual internal sampel guna pemahaman yang akurat mengenai karakteristik reservoir minyak dan gas bumi tanpa harus merusak atau mengubah struktur fisiknya. Metode konvensional yang mengandalkan pengeboran uji sering kali bersifat destruktif, memakan biaya besar, serta berpotensi merusak lingkungan. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, teknologi modern berbasis *non-destructive testing* (NDT) semakin dikembangkan sebagai alternatif yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Adapun beberapa metode NDT yang telah dilakukan penelitian sebelumnya untuk analisis karakteristik reservoir diantaranya yaitu *scanning electron microscopy* (SEM), *transmission electron microscopy* (TEM), *atom force microscopy* (AFM), *helium ion microscopy* (HIM), dan *X-ray micro-computed tomography* (micro-CT) (Hu dkk., 2023).

Selain itu, teknik lain yang dapat digunakan untuk analisis karakteristik reservoir secara *non-destructive* adalah *neutron computed tomography* (NCT).

*Neutron computed tomography* (NCT) merupakan salah satu teknik uji tak merusak berbasis komputer yang berguna untuk mengamati struktur internal sampel dengan penggunaan neutron sebagai bahan radiasi pencitraan. NCT dapat dianggap sebagai metode baru dalam teknik pencitraan tak merusak (*non-destructive*). Perkembangan teknologi yang berlaku dalam NCT ini sama dengan metode tomografi lainnya, terutama *Xray-CT*. Secara umum, teknik NCT masih belum menyaingi popularitas *Xray-CT* karena keterbatasan sumber neutron dalam kinerja tinggi. Hal ini disebabkan oleh tingginya biaya pembangunan reaktor nuklir. Namun, dalam satu dekade terakhir, pemanfaatan terhadap teknik *neutron computed tomography* (NCT) terus meningkat, terutama di negara-negara maju seperti Eropa, Jepang, dan Amerika Serikat. Perkembangan dalam teknologi deteksi neutron serta kemajuan komputasi turut berkontribusi dalam meningkatkan potensi dan efektivitas teknik *neutron computed tomography* (NCT) di masa depan.

Salah satu keunggulan utama NCT adalah kemampuannya dalam mencitrakan bahan yang tidak dapat ditembus oleh metode tomografi lain. Keunggulan ini menjadikan teknik NCT semakin dikenal dan digunakan sebagai pelengkap teknik pencitraan lainnya. Saat ini, teknik NCT banyak dimanfaatkan untuk pencitraan material industri di berbagai bidang seperti industri penerbangan, otomotif, analisis material biologi serta pelestarian artefak sejarah. Hal ini dijelaskan dalam penelitian oleh Zambrano, dkk. (2019), yang menyebutkan beberapa contoh penelitian sebelumnya yang menggunakan NCT untuk karakterisasi berbagai material industri umum diantaranya pada batu lempung oleh (Stavropoulou dkk., 2019), beton (Yehya dkk., 2018), baja (Zawisky dkk., 2010), batu bangunan (Dewanckele dkk.,

2014), aspal berpori (Lal dkk., 2014), batupasir (Hall, 2013), pasir cetakan (Schillinger dkk., 2011) dan artefak warisan budaya (Schillinger dkk., 2018).

Perkembangan penggunaan teknik NCT semakin meluas terutama dalam industri perminyakan, hal ini digunakan sebagai metode eksplorasi minyak pada batuan reservoir yang merupakan tempat akumulasi hidrokarbon baik berupa minyak maupun gas. Batuan reservoir umumnya terdiri dari batuan sedimen, yang berupa batupasir, batuan karbonat, dan kadang-kadang *shale* atau batuan vulkanik. Batupasir (*sandstone*) menjadi salah satu batuan reservoir yang dapat menyimpan kandungan minyak dan gas. Sebagai reservoir minyak dan gas, batupasir memiliki karakteristik yang menjadi parameter penting dalam menentukan potensi hidrokarbon di dalam suatu reservoir, salah satunya yaitu porositasnya. Porositas adalah ruang atau rongga yang tersedia di dalam batuan untuk menyimpan minyak dan gas. Apabila nilai porositasnya sekitar 20% hingga 30%, maka reservoir tersebut sangat potensial untuk diekstrak minyak (Akbar dkk., 2021).

Pengukuran porositas batuan merupakan aspek penting dalam karakterisasi reservoir hidrokarbon dan studi geologi. Beberapa metode standar yang umum digunakan dalam pengukuran porositas batuan yaitu meliputi analisis batuan inti atau *core* (uji laboratorium), *logging* sumur atau *well logging*, dan uji sumur atau *well testing*. Uji laboratorium biasa menggunakan teknik seperti *helium porosimeter* dan *mercury intrusion porosimeter* (MIP) untuk mengukur volume pori batuan secara langsung di laboratorium. Sementara *logging* sumur dan uji sumur memberikan data *realtime* tentang karakteristik reservoir secara *in-situ* selama atau setelah pengeboran (bersifat destruktif). Namun, metode tersebut tidak

secara langsung mengukur porositas, sehingga estimasi porositas dari data seismik memerlukan kombinasi dengan metode lain, untuk mendapatkan informasi yang lebih akurat mengenai karakteristik batuan dan potensi hidrokarbon. Sebagai pelengkap metode konvensional, *neutron computed tomography* (NCT) menawarkan pendekatan *non-destructive* yang mampu menghasilkan citra 3D hasil visualisasi distribusi porositas pada sampel batuan. Teknik ini memiliki keunggulan dalam mendeteksi hidrokarbon dalam pori-pori batuan karena sensitivitas neutron terhadap unsur hidrogen, sehingga dapat memberikan informasi tambahan yang lebih komprehensif dalam analisis karakteristik pada reservoir (Kumalasari dkk., 2018; Rahman, 2022; Yunita, 2024).

Adapun beberapa penelitian serupa telah dilakukan sebelumnya untuk mengkaji karakteristik porositas pada reservoir. Berdasarkan penelitian Akbar, dkk (2021), dapat dilihat mengenai perbandingan hasil visualisasi dan nilai porositas reservoir jenis batu kapur (*limestone*) yang dilakukan menggunakan beberapa metode diantaranya metode sinar-X *imaging*, *neutron imaging*, dan metode konvensional. Sedangkan pada penelitian oleh Setiati, dkk (2021), mengungkapkan hasil visualisasi dan nilai porositas dari suatu reservoir jenis *Berea sandstone* menggunakan teknik NCT. Namun, dalam penelitian tersebut masih belum menjelaskan mengenai penentuan perhitungan porositas batuan *sandstone* menggunakan teknik NCT serta tidak membandingkan dengan metode standar lainnya. Berdasarkan celah penelitian tersebut, pada penelitian ini akan dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai penentuan dan analisis porositas pada *Berea*

*sandstone* menggunakan teknik NCT, guna menyempurnakan hasil dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

Selain sumber radiasi yang digunakan, kualitas citra juga dipengaruhi oleh resolusi yang bergantung pada teknologi detektor. Pada penelitian ini, teknologi detektor yang digunakan memiliki nilai resolusi spasial yaitu 200  $\mu\text{m}$ . Sementara, jenis sampel uji yang digunakan yaitu batuan *sandstone* standard *Berea* memiliki ukuran porositas yang relatif kecil sehingga memerlukan adanya resolusi tinggi ( $<1 \mu\text{m}$ ) dalam pengukurannya. Pada resolusi spasial 200  $\mu\text{m}$  yang dapat dikatakan cukup tinggi, masih memiliki keterbatasan dalam hal kemampuan untuk mengidentifikasi pori-pori dengan ukuran yang sangat kecil, sehingga dibutuhkan penyesuaian pada teknik pemrosesan data untuk menghasilkan data yang akurat. Keterbatasan ini dapat diatasi dengan memanfaatkan data porositas menggunakan *porosimeter* yang merupakan metode standar laboratorium dalam pengukuran porositas batuan. Berdasarkan permasalahan tersebut, maka penelitian ini dilakukan untuk menjadikan standar adanya kemampuan teknik *neutron computed tomography* (NCT) dengan resolusi spasial 200  $\mu\text{m}$  dalam pengukuran porositas pada *Berea sandstone*. Oleh karena itu, dari hasil perhitungan porositas batuan yang diperoleh dapat digunakan untuk mengetahui seberapa akurat dan efisien teknik *neutron computed tomography* (NCT) dalam pengukuran porositas pada *Berea sandstone*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil citra rekonstruksi *Berea sandstone* dengan teknik *neutron computed tomography* (NCT)?
2. Bagaimana menghitung nilai porositas pada *Berea sandstone* menggunakan teknik *neutron computed tomography* (NCT) dengan resolusi spasial 200  $\mu\text{m}$ ?
3. Berapakah ketepatan nilai porositas pada *Berea sandstone* berbasis teknik *neutron computed tomography* (NCT) dibandingkan dengan nilai porositas yang diperoleh dari alat standar *porosimeter*?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan latar belakang dan rumusan masalah yang sudah diuraikan diatas, maka penelitian ini bertujuan untuk:

1. Merekonstruksi citra *Berea sandstone* dengan teknik *neutron computed tomography* (NCT).
2. Menghitung dan menganalisis hasil porositas pada *Berea sandstone* menggunakan teknik *neutron computed tomography* (NCT) dengan resolusi spasial 200  $\mu\text{m}$ .
3. Menghitung ketepatan dari nilai hasil pengukuran porositas pada *Berea sandstone* menggunakan teknik *neutron computed tomography* (NCT) terhadap nilai porositas dari alat standar *porosimeter*.

### 1.4 Batasan Penelitian

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Resolusi spasial pada penelitian ini yaitu 200  $\mu\text{m}$ .

2. Tomografi neutron menggunakan neutron dari hasil reaksi fisi di RSG GA Siwabessy Serpong.
3. Pemindaian sampel pada penelitian ini menggunakan energi *thermal* dengan daya 15MW, tidak memvariasikan jenis *scintillator*, menggunakan *fix time*, dan L/D yang digunakan  $<100$ .
4. Sampel yang digunakan adalah sampel batuan *sandstone* standard *Berea*, dengan kandungan material homogen dan porositas dari laboratorium  $\pm 20\%$ .

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Menambah khasanah atau pengetahuan dalam pengembangan metode pengukuran porositas pada sampel pada *Berea Sandstone*.
2. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi penelitian selanjutnya yang berkaitan.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, dapat diambil beberapa kesimpulan diantaranya sebagai berikut:

1. Tahap rekonstruksi citra sampel *Berea sandstone* dilakukan menggunakan *software Octopus Reconstruction 8.9* yang menghasilkan sekumpulan irisan tampang lintang sampel *Berea* berupa citra *gray level* berbentuk 2D. Area gelap menunjukkan keberadaan pori-pori dalam *Berea* yang telah terisi  $H_2O$ , yang menyebabkan atenuasi neutron tinggi akibat probabilitas interaksi terhadap neutron yang lebih besar sehingga tampak lebih gelap pada citra. Sementara, area terang menunjukkan keberadaan material penyusun *Berea* seperti kuarsa ( $SiO_2$ ), yang memiliki atenuasi neutron lebih rendah akibat probabilitas interaksi neutron yang lebih kecil sehingga tampak lebih terang pada citra.
2. Teknik *neutron computed tomography* (NCT) mampu digunakan untuk menghitung dan mengidentifikasi besaran porositas dari batuan. Pengukuran porositas dapat menggunakan metode segmentasi *automatic* dan manual berbasis histogram *gray level* pada citra batuan *Berea sandstone*. Hasil porositas dengan metode *automatic* kurang sesuai dan jauh dari nilai porositas hasil uji laboratorium menggunakan *porosimeter*, dikarenakan keterbatasan resolusi spasial yang digunakan

(200  $\mu\text{m}$ ). Sedangkan, metode segmentasi manual memperoleh nilai porositas dari keempat core *Berea sandstone* yaitu sebesar 20,03%; 20,36%; 20,50%; 20,04%, dimana hasil tersebut mendekati nilai porositas hasil uji laboratorium menggunakan *porosimeter*.

3. Ketepatan nilai porositas pada *Berea sandstone* berdasarkan pengukuran menggunakan teknik *neutron computed tomography* (NCT) dibandingkan dengan nilai porositas dari hasil uji laboratorium menggunakan alat standar *porosimeter*, dihitung melalui perbandingan dua metode segmentasi citra yaitu *automatic* dan manual. Nilai porositas yang diperoleh dari metode segmentasi *automatic* memiliki rerata ketepatan sebesar 44,96%, sedangkan rerata ketepatan dari nilai porositas menggunakan metode segmentasi manual sebesar 98,86%. Besaran nilai ketepatan menggunakan metode manual dinilai lebih baik dan valid dikarenakan berada dalam batas nilai keberterimaan ketepatan (akurasi) yaitu  $>98\%$ .

## 5.2 Saran

Penelitian selanjutnya diharapkan dapat mempertimbangkan peningkatan kualitas instrumen radiografi neutron yang digunakan seperti dengan memperkecil rasio L/D, resolusi kamera yang lebih tinggi, serta dapat mempertahankan kondisi sampel uji sampai dengan tahap akuisisi, agar citra tertampil dengan optimal. Selain itu, penelitian dapat dikembangkan untuk mengevaluasi sifat permeabilitas dan tortuositas (kompleksitas aliran fluida) pada batuan, disertai dengan pengembangan metode yang ada.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abi, R. R., Firmansyah, Y., Wahyudiono, J., & Sunardi, E. 2018. Porositas Reservoir Karbonat Formasi Manusela Berdasarkan Analisis Petrofisika. *Padjadjaran Geoscience Journal*, **Vol.2 No.6**: 441–451.
- Akbar, F., Ramadhani, A., Gabriel, P. K., Bharoto, & Sulistioso, G. S. 2021. Porosity Measurement and Petrophysical Properties Of The Indonesian Limestone as Reservoir Rock by Using X-Ray and Neutron Imaging Technique. *AIP Conference Proceedings*: 2381. <https://doi.org/10.1063/5.0066369>
- Akbar, F., Sutiarto, Setiawan, & Juliyani. 2011a. *Prosiding Seminar Nasional Hamburan Neutron dan Sinar-X ke 8 Serpong*.
- Akbar, F., Sutiarto, Setiawan, & Juliyani. 2011b. Rekonstruksi Tiga Dimensi Tomografi Neutron pada Regulator Tekanan Udara. *Seminar Nasional SDM Teknologi Nuklir VII Yogyakarta* : 303–307.
- Akyurek, T., Tucker, L. P., Liu, X., & Usman, S. 2016. Portable Spectroscopic Fast Neutron Probe and  $^3\text{He}$  Detector Dead-Time Measurements. *Progress in Nuclear Energy*, **Vol.92**: 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.06.007>
- Alzahrani, J. S., Alrowaili, Z. A., Alqahtani, M. S., Adam, M., Olarinoye, I. O., durmaz, U., & Al-Buriahi, M. S. 2023. Neutron Attenuation Features and Elastic Properties of Silicate Glasses Containing  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , and  $\text{Li}_2\text{O}$ . *Applied Radiation and Isotopes*, **Vol.199**: 110896. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110896>
- Barnassitah, T. 1997. *Analisis Daya Serap Beton dengan Agregat Limbah Terak Tanur Tinggi Terhadap Radiasi Neutron*. Univeritas Islam Indonesia.
- Bharoto, B., Ramadhani, A., Akbar, F., Sukaryo, S. G., Priyanto, T. H., Kurniati, M., & Fadhila, F. A. (2020). Characterization of Porosity Inside Limestone as a Reservoir of Oil Using Neutron Tomography. *Journal of Physics: Conference Series*, **Vol.1436 No.1**: 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012007>
- Churchel, P. L., French, P. B., Shaw, J. C., & Schramm, L. L. 1991. *Rock Properties of Berea Sandstone, Baker Dolomite, and Indiana Limestone*: 431–446. <https://doi.org/10.2118/21044-ms>
- Dewanckele, J., De Kock, T., Fronteau, G., Derluyn, H., Vontobel, P., Dierick, M., Van Hoorebeke, L., Jacobs, P., & Cnudde, V. 2014. Neutron Radiography and X-Ray Computed Tomography for Quantifying Weathering

- and Water Uptake Processes Inside Porous Limestone Used as Building Material. *Materials Characterization*, **Vol.88**: 86–99. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.12.007>
- Dierick, M., Masschaele, B., & Van Hoorebeke, L. 2004. Octopus, a Fast and User-Friendly Tomographic Reconstruction Package Developed in Labview. *Measurement Science and Technology*, **Vol.15 No.7**: 1366–1370. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/7/020>
- Dijaya, R. 2023. *Buku Ajar Pengolahan Citra Digital* (pp. 1–81). UmsidaPress.
- Fadhila, F. A. 2015. *Penentuan Porositas pada Batuan Pasir (Sandstones) dengan Teknik Tomografi Neutron* [Skripsi]. Institut Pertanian Bogor.
- Faridah, D. N., Erawan, D., Sutriah, K., Hadi, A., & Budiantara, F. 2018. *Implementasi SNI ISO/IEC 17025:2017 Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian dan Laboratorium* (1st ed.). Badan Standarisasi Nasional.
- Fathoni, A. M., Cahyono, E., Arman, & Ransi, N. 2023. Analisis Median Filter Terhadap Reduksi Noise pada Citra Digital. *Jurnal Jurusan Matematika FMIPA*, **Vol.3 No.3**: 491–499. <http://jmks.uho.ac.id/index.php/JMKS>
- Fattahanisa, A. 2018. *Optimization of Bagasse NaLS Surfactant Injection at Low Salinity to Increase Recovery Factor*. Universitas Trisakti.
- Glascok, M. D. 2003. *An Overview of Neutron Activation Analysis*. <https://www.researchgate.net/publication/228643668>
- Gonzales, R. C., & Woods, R. E. 2008. *Digital Image Processing Third Edition*. Pearson Prentice Hall.
- Hall, S. A. 2013. Characterization of Fluid Flow in a Shear Band in Porous Rock Using Neutron Radiography. *Geophysical Research Letters*, **Vol.40 No.11**: 2613–2618. <https://doi.org/10.1002/grl.50528>
- Heacock, B., Sarenac, D., Cory, D. G., Huber, M. G., MacLean, J. P. W., Miao, H., Wen, H., & Pushin, D. A. 2018. *Sub-Micrometer Resolution Neutron Tomography*. <https://doi.org/10.1107/S2052252520010295>
- Hosseini, M., Arif, M., Keshavarz, A., & Iglauer, S. 2021. Neutron Scattering: a Subsurface Application Review. *Earth-Science Reviews*, **Vol.221**: 1–31. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103755>
- 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*, **Vol.13 No.3**. <https://doi.org/10.3390/min13030360>

- Igathinathane, C., Pordesimo, L. O., Columbus, E. P., Batchelor, W. D., & Methuku, S. R. 2008. Shape Identification and Particles Size Distribution from Basic Shape Parameters Using Imagej. *Computers and Electronics in Agriculture*, **Vol.63** **No.2**: 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.02.007>
- Irham N, M., Yustiana, M., & Widada, S. 2006. Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Porositas Dan Permeabilitas Pada Batupasir (Studi Kasus: Formasi Ngrayong, Kerek, Ledok dan Selorejo). *Berkala Fisika*, **Vol.9** **No.4**: 191–195.
- Kathon, B., Hartoyo, P., & Samsun, S. 2022. Uji Resolusi Spasial dan Slice Thickness pada CT Scan 128 dan 16 Slice dengan Menggunakan Phantom QUART DVT-ap. *Jurnal Pembelajaran Fisika*, **Vol.11** **No.3**: 123–136. <https://jurnal.unej.ac.id/index.php/JPF/article/view/33956>
- Kim, F. H., Penumadu, D., & Hussey, D. S. 2012. Water Distribution Variation in Partially Saturated Granular Materials Using Neutron Imaging. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **Vol.138** **No.2**: 147–154. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000583](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000583)
- Kurniawan, R. 2012. *Pemetaan Fluks Neutron Pada Pusat Teras Pasca Pergantian Bahan Bakar Reaktor Kartini*. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Lal, S., Poulikakos, L. D., Sedighi Gilani, M., Jerjen, I., Vontobel, P., Partl, M. N., Carmeliet, J. C., & Derome, D. 2014. Investigation of Water Uptake in Porous Asphalt Concrete Using Neutron Radiography. *Transport in Porous Media*, **Vol.105** **No.2**: 431–450. <https://doi.org/10.1007/s11242-014-0376-6>
- Leitner, M. 2017. *Physics with neutrons*.
- Listiyowati, L. N. 2018. Perbandingan Analisis Porositas Porites Menggunakan Teknik Mikro-CT dan Optik. *RISET Geologi Dan Pertambangan*, **Vol.28** **No.1**: 91. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2018.v28.635>
- Malik, Y. 2023. Akurasi dan Presisi Analisis Kadar Nikel (Ni) pada Sampel Nikel Laterit Menggunakan X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF). *Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia*, **Vol.12** **No.2**; 87–94. <http://sains.uho.ac.id/index.php/journal>
- Marpaung, T. S. 2021. *Karakteristik Surfaktan NaLS Ampas Tebu Ditambah CO-Surfactant pada Salinitas Tinggi dengan Intermediate Oil Serta Vsualisasi Pori Sandstone Menggunakan Tomografi Neutron*. Universitas Trisakti.
- Ningtias, D. R., Suryono, S., & Susilo, S. 2016. Pengukuran Kualitas Citra Digital Computed Radiography Menggunakan Program Pengolah Data. *Jurnal*

- Pendidikan Fisika Indonesia*, **Vol.12 No.2**: 161–168.  
<https://doi.org/10.15294/jpfi.v12i2.5950>
- Nur Kumalasari, I., Dewanto, O., & Sapto Mulyanto, B. 2018. *Identifikasi Persebaran dan Sumur Usulan Menggunakan Metode Well Logging, Petrofisika Inversi, Seismik Simultan dan pemodelan 3D Geometri Reservoir*, **Vol.1, No.16**.
- Oktaviani, A., dan Yarhojan. 2016. Perbandingan Resolusi Spasial, Temporal dan Radiometrik Serta Kendalanya. *Jurnal Enggano*, **Vol.1 No.2**; 74–79.
- Olevsky, L. M., Jacques, M. G., & Hixon, K. R. 2025. PoreVision: A Program for Enhancing Efficiency and Accuracy in SEM Pore Analyses of Gels and Other Porous Materials. *Gels*, **Vol.11 No.2**. <https://doi.org/10.3390/gels11020132>
- Purwamargapratala, Y., Sudaryanto, & Akbar, dan F. 2020. Neutron tomography study of a lithium-ion coin battery. *Journal of Physics: Conference Series*, **Vol.1436 No.1**. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012029>
- Rahman, A. 2022. Routine Core Analysis (RCAL) Untuk Menentukan Porositas, Permeabilitas, dan Saturasi Pada Batupasir (Sandstone). *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, **Vol.3 No.11**: 1248–1259.  
<https://doi.org/10.36418/jist.v3i11.548>
- Reggy, A. C. S. 2021. *Analisa Reservoir Batupasir Menggunakan Metode Atribut Root Mean Square (RMS) di Cekungan Jawa Tengah Utara*. UIN Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Rosiyanti, D. 2023. Analisis Petrofisika Menggunakan Python Pada Reservoir Batupasir Formasi Hugin, North Sea. *UNISTEK*, **Vol.10 No.1**: 31–40.  
<https://doi.org/10.33592/unistek.v10i1.3313>
- Safitri, E. 2006. Beton Sebagai Perisai Radiasi Neutron Cepat. *Media Teknik Sipil*, **Vol.6 No.1**: 1–6.
- Satria, D. 2018. *Karakteristik Distribusi Paparan Radiasi Neutron pada Fasilitas In Vitro In Vivo Beamport Tembus Radial Reaktor Kartini*. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Schillinger, B., Beaudet, A., Fedrigo, A., Grazzi, F., Kullmer, O., Laaß, M., Makowska, M., Werneburg, I., & Zanolli, C. 2018. Neutron Imaging in Cultural Heritage Research at The FRM II Reactor of The Heinz Maier-Leibnitz Center. In *Journal of Imaging*, **Vol.4 No.1**. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/jimaging4010022>
- Schillinger, B., Calzada, E., Eulenkamp, C., Jordan, G., & Schmahl, W. W. 2011. Dehydration of Moulding Sand in Simulated Casting Process Examined with

- Neutron Radiography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **Vol.651** **No.1:** 312–314.  
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.02.103>
- 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*, **Vol.38** **No.5:** 87–95.  
<https://doi.org/10.17794/rgn.2023.5.8>
- 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., 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*, **Vol.894** **No.1.** <https://doi.org/10.1088/1755-1315/894/1/012010>
- Setyono, A. E., & Kiono, B. F. T. 2021. Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan: Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020 – 2050. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, **Vol.2** **No.3:** 154–162.  
<https://doi.org/10.14710/jebt.2021.11157>
- Shafabakhsh, P., Cordonnier, B., Pluymakers, A., Le Borgne, T., Mathiesen, J., Linga, G., Hu, Y., Kaestner, A., & Renard, F. 2024. 4D Neutron Imaging of Solute Transport and Fluid Flow in Sandstone Before and After Mineral Precipitation. *Water Resources Research*, **Vol.60** **No.3.**  
<https://doi.org/10.1029/2023WR036293>
- Shah, S. M., Gray, F., Crawshaw, J. P., & Boek, E. S. 2016. Micro-Computed Tomography Pore-Scale Study of Flow in Porous Media: Effect of Voxel Resolution. *Advances in Water Resources*, **Vol.95:** 276–287.  
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.07.012>
- Stavropoulou, E., Andò, E., Tengattini, A., Briffaut, M., Dufour, F., Atkins, D., & Armand, G. 2019. Liquid Water Uptake in Unconfined Callovo Oxfordian Clay-Rock Studied with Neutron and X-Ray Imaging. *Acta Geotechnica*, **Vol.14** **No.1:** 19–33. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0639-4>
- Sudin, A., Muhlisin dan Hendri Widiyandari Jurusan Fisika, Z., Sains dan Matematika, F., Diponegoro Jl Soedarto, U. H., Tembalang, S., & Penulis, K.

2015. Studi Pengaruh Ukuran Pixel Imaging Plate Terhadap Kualitas Citra Radiograf. *Berkala Fisika*, **Vol.18 No.3**: 89–94. [https://ejournal.undip.ac.id/index.php/berkala\\_fisika/article/download/10834/8569](https://ejournal.undip.ac.id/index.php/berkala_fisika/article/download/10834/8569)
- Sulistiyanti, S. R., Setyawan, F. A., & Komarudin, M. 2016. *Pengolahan Citra Dasar dan Contoh Penerapannya* (Warsito, Ed.; pp. 1–144). TEKNOSAIN.
- Susanto, A. T., Prajitno, P., & Kurnianto, K. 2020. *Rekonstruksi Citra pada Komputasi Tomografi Sinar-X Berbasis Fluoroskopi untuk Aplikasi Industri Manufaktur*. <https://www.researchgate.net/publication/355022602>
- Sutiarso, Akbar, F., Bharoto, Setiawan, & Juliyani. 2011. *Tomografi Neutron 3D di Reaktor RSG-GAS untuk Uji Tak Rusak Komponen Industri*.
- Sutton, M. D. 2008. Tomographic Techniques for The Study of Exceptionally Preserved Fossils. In *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **Vol.275 No.1643**: 1587–1593. Royal Society. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.0263>
- Tang, Y. 2025. Optimization and Miniaturization of a Thermal Neutron Radiography System Using Neutron Tube Technology and Machine Learning Algorithms. *Applied Radiation and Isotopes*, **Vol.220**: 111792. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2025.111792>
- Thomson, P. R., Ellis, R., Chiarella, D., & Hier-Majumder, S. 2020. Microstructural Analysis From X-Ray CT Images of the Brae Formation Sandstone, North Sea. *Frontiers in Earth Science*, **Vol.8**. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00246>
- Törnquist, E., Le Cann, S., Tengattini, A., Helfen, L., Kok, J., Hall, S. A., & Isaksson, H. 2022. The Hydration State of Bone Tissue Affects Contrast in Neutron Tomographic Images. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **Vol.10**. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.911866>
- Volume Graphics GMBH. n.d.. *Application Software For Analysis and Visualization of Industrial Computer Tomography/ Voxel Data*.
- Witasta, N. 2020. Electrical Enhanced Oil Recovery, Meningkatkan Produksi Minyak Menggunakan Metoda Direct Current. *Jurnal Teknik*, **Vol.21 No.2**: 1–12. <https://journal.unpak.ac.id/index.php/jurnalteknik/article/viewFile/3231/2213>
- Yanu F, M., Yuwono, B., & Boedi P, D. 2022. *Dasar Pengolahan Digital Edisi 2022*. UPN Veteran Yogyakarta.

- Yehya, M., Andò, E., Dufour, F., & Tengattini, A. 2018. Fluid-Flow Measurements in Low Permeability Media with High Pressure Gradients Using Neutron Imaging: Application to Concrete. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **Vol.890**: 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.02.039>
- Yunita, L. 2024. *Penentuan Rock Region berdasarkan Porositas dan Permeabilitas Batuan dalam Simulasi Reservoir Migas*: 194–198. <http://journal.itny.ac.id/index.php/ReTII>
- Yuwanto, S. H., Zulvi, D. M., Institut, R., Adhi, T., & Surabaya, T. 2022. *Analisis Porositas dan Permeabilitas Satuan Batupasir Formasi Ledok sebagai Potensi Batuan Reservoir Daerah Kedewan dan Sekitarnya Bojonegoro, Jawa Timur*, **Vol.5 No.3**.
- 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*, **Vol.7**. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00329>
- Zawisky, M., Hameed, F., Dyrnjaja, E., Springer, J., & Rohatsch, A. 2010. Digitized Neutron Imaging with High Spatial Resolution at a Low Power Research Reactor: Applications to Steel And Rock Samples. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **Vol.268 No.15**: 2446–2450. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.04.020>
- Zhang, J., & Li, J. 2023. Spacecraft. In *Spatial Cognitive Engine Technology*: 129–162. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95107-4.00004-4>
- Ziesche, R. F., Kardjilov, N., Kockelmann, W., Brett, D. J. L., & Shearing, P. R. 2022. Neutron Imaging of Lithium Batteries. In *Joule*, **Vol.6 No.1**: 35–52. Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.12.007>

SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA