

Kajian Pengaruh Kandungan Lempung Terhadap Permeabilitas Dan Porositas Batuan Reservoir di Laboratorium

Study Of The Effect Of Clay Content On The Permeability And Porosity Of Reservoir Rocks In The Laboratory

Aisyah Indah Irmaya^{(1,a)*}, Rena Juwita Sari⁽¹⁾ dan Enda Apriani⁽²⁾

⁽¹⁾Jurusan Teknik Perminyakan, Universitas Proklamasi 45, Yogyakarta, Indonesia

⁽²⁾Jurusan Teknik Mesin, Universitas Proklamasi 45, Yogyakarta, Indonesia

⁽³⁾Jurusan Teknik Industri, Universitas Proklamasi 45, Yogyakarta, Indonesia

Email : ^(a*)aisyahirmaya@up45.ac

Diterima (06 Desember 2025), Direvisi (29 Desember 2025)

Abstract. *The quality of rock reservoirs is greatly influenced by petrophysical properties, particularly porosity and permeability, which often exhibit non-linear relationships due to the presence of clay minerals. In carbonate rocks such as the Sambipitu Formation, the relatively good porosity potential due to the presence of porous fossil fragments is not always accompanied by high permeability, so the role of the type and distribution of clay minerals needs to be studied in greater depth. This study aims to analyse the effect of clay mineral content on the petrophysical properties of reservoir rocks, particularly porosity and permeability, using outcrop samples from the Sambipitu Formation and Oyo Formation in Gunungkidul Regency as analogues. The methods used include petrographic analysis, X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM) with EDS mapping, as well as porosity and permeability tests. The conclusions of this study indicate that the quality of carbonate rock reservoirs in the Sambipitu Formation and Oyo Formation is predominantly controlled by the type and distribution of clay minerals, with illite and smectite playing a major role in reducing permeability due to pore filling mechanisms, bridging between grains, and expansive properties when interacting with fluids. while kaolinite relatively maintains effective porosity because it tends not to obstruct flow paths. Integrative analysis shows that the Sambipitu Formation, which is dominated by kaolinite and porous fossil fragments, has better reservoir quality than the Oyo Formation, which is rich in micrite, carbonate cement, and illite. The porosity values obtained ranged from 7.03 to 20.80% and permeability from 33.57 to 298.16 mD, with a relationship that was not always linear due to the influence of clay distribution.*

Keywords: *Oyo Formation, Sambipitu Formation, Clay Minerals, Permeability, Porosity.*

Abstrak. Kualitas reservoir batuan sangat dipengaruhi oleh sifat petrofisika, terutama porositas dan permeabilitas, yang kerap menunjukkan hubungan tidak linier akibat keberadaan mineral lempung. Pada batuan karbonat seperti Formasi Sambipitu, potensi porositas yang relatif baik akibat keberadaan fragmen fosil berpori tidak selalu diikuti oleh permeabilitas yang tinggi, sehingga peran jenis dan distribusi mineral lempung perlu dikaji lebih mendalam. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kandungan mineral lempung terhadap sifat petrofisika batuan reservoir, khususnya porositas dan permeabilitas, dengan memanfaatkan sampel singkapan Formasi Sambipitu dan Formasi Oyo di Kabupaten Gunungkidul sebagai analogi. Metode yang digunakan meliputi analisis petrografi, X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM) dengan EDS mapping, serta uji porositas dan permeabilitas. Simpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa kualitas reservoir batuan karbonat pada Formasi Sambipitu dan Formasi Oyo secara dominan dikontrol oleh jenis dan distribusi mineral lempung, dengan illite dan smectite berperan utama dalam menurunkan permeabilitas akibat mekanisme pengisian pori, bridging antarbutir, dan sifat ekspansif saat berinteraksi dengan fluida, sedangkan kaolinite relatif mempertahankan porositas efektif karena cenderung tidak menghalangi jalur alir. Analisis integratif menunjukkan Formasi Sambipitu yang didominasi kaolinit dan fragmen fosil berpori memiliki kualitas reservoir lebih baik dibanding Formasi Oyo yang kaya mikrit, semen

karbonat, serta illit. Nilai porositas yang diperoleh berkisar antara 7,03–20,80% dan permeabilitas 33,57–298,16 mD, dengan hubungan yang tidak selalu linier akibat pengaruh distribusi lempung.

Kata Kunci: Formasi Oyo, Formasi Sambipitu, Mineral Lempung, Permeabilitas, Porositas

PENDAHULUAN

Batuan reservoir merupakan komponen utama dalam sistem petroleum karena berfungsi menyimpan dan mengalirkan hidrokarbon dari satu tempat ke tempat lain [1, 2]. Kualitas reservoir batuan sangat dipengaruhi oleh sifat petrofisika, terutama porositas dan permeabilitas, yang kerap menunjukkan hubungan tidak linier akibat keberadaan mineral lempung. Pada batuan karbonat seperti Formasi Sambipitu, potensi porositas yang relatif baik akibat keberadaan fragmen fosil berpori tidak selalu diikuti oleh permeabilitas yang tinggi, sehingga peran jenis dan distribusi mineral lempung perlu dikaji lebih mendalam.

Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa lempung dapat hadir dalam berbagai bentuk, sebagai matriks, pengisi pori, maupun pelapis butir dan setiap bentuk keberadaan lempung memberikan dampak berbeda terhadap karakteristik petrofisika [1, 3, 4]. Kaolinit umumnya lebih inert secara kimia, illit cenderung berasosiasi dengan pori-pori halus, sementara smektit memiliki sifat ekspansif yang dapat menyebabkan penyumbatan pori saat berinteraksi dengan fluida, sehingga menurunkan permeabilitas secara signifikan. Distribusi lempung dalam bentuk diskrit, pelapis butir, atau struktural juga berperan dalam mengontrol hubungan antara kandungan lempung dan sifat petrofisika batuan [1, 5].

Penelitian terbaru menegaskan bahwa hubungan antara kandungan lempung dengan porositas dan permeabilitas tidak selalu linier, karena dipengaruhi oleh faktor lain seperti ukuran butir, tekstur, distribusi pori, serta proses diagenesis. Namun, sebagian besar studi dilakukan menggunakan data sumur dan *core* reservoir [2, 3]. Kajian dengan pendekatan eksperimental laboratorium berbasis sampel singkapan masih relatif terbatas, padahal studi ini dapat memberikan pemahaman mendasar mengenai mekanisme pengaruh lempung terhadap parameter petrofisika.

Penelitian ini menawarkan pendekatan eksperimental laboratorium untuk menguji secara langsung pengaruh kandungan lempung terhadap porositas dan permeabilitas batuan reservoir dengan memanfaatkan sampel singkapan sebagai analogi. Walaupun sampel singkapan tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi reservoir bawah permukaan, penelitian ini memberikan gambaran fundamental mengenai hubungan kuantitatif antara variasi kandungan lempung dan perubahan sifat petrofisika [5, 6]. Dengan demikian, hasil penelitian dapat dijadikan dasar untuk validasi model petrofisika, serta sebagai referensi awal dalam mengantisipasi potensi masalah formasi akibat interaksi fluida-lempung pada tahap eksplorasi dan produksi.

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis pengaruh kandungan lempung terhadap nilai porositas dan permeabilitas batuan reservoir.

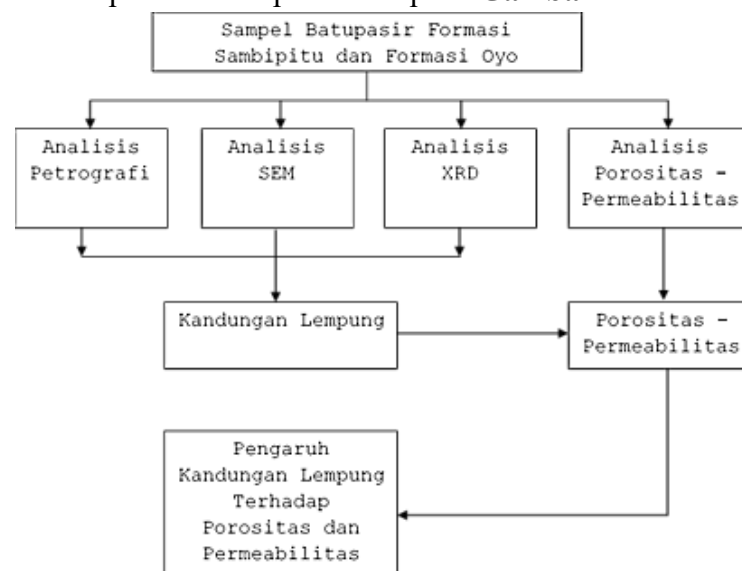
2. Mengidentifikasi jenis lempung yang memiliki pengaruh paling signifikan terhadap penurunan kualitas reservoir.
3. Mengevaluasi hubungan antara distribusi lempung dalam matriks batuan dengan sifat petrofisika.
4. Menilai sejauh mana hasil eksperimen laboratorium berbasis sampel singkapan dapat digunakan sebagai analogi untuk memahami perilaku batuan reservoir di lapangan.

Manfaat penelitian ini adalah memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami peran mineral lempung terhadap kualitas reservoir, mendukung strategi mitigasi kerusakan formasi akibat interaksi fluida-lempung, serta menjadi dasar bagi pengembangan teknik pengendalian produksi hidrokarbon yang lebih efektif.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan eksperimen laboratorium menggunakan sampel batuan hasil pengambilan dari singkapan Formasi Sambipitu (SP) dan Formasi Oyo (OY) yang tersingkap di Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Sebanyak 15 sampel dianalisis, terdiri dari 9 sampel Formasi SP dan 6 sampel Formasi OY.

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan eksperimen laboratorium menggunakan sampel batuan hasil pengambilan dari singkapan yang merepresentasikan batuan reservoir. Tahapan penelitian meliputi persiapan sampel, analisis petrografi, *Scanning Electron Microscope* (SEM), *X-Ray Diffraction* (XRD), serta pengukuran sifat fisik berupa porositas dan permeabilitas. Alur penelitian dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Alur Penelitian

Alat dan Bahan Penelitian

Bahan utama penelitian berupa sampel batuan reservoir dari singkapan Formasi Sambipitu dan Oye yang dipilih berdasarkan keterwakilan litologi dan kondisi geologi setempat. Peralatan laboratorium yang digunakan meliputi:

- Mikroskop petrografi untuk analisis tekstur, mineralogi, dan keberadaan mineral lempung.
- *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan EDS untuk mengamati morfologi pori dan distribusi mineral lempung pada skala mikroskopis, namun analisisnya bersifat lokal, dua dimensi, dan semi-kuantitatif sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan heterogenitas batuan. Oleh karena itu, hasil SEM–EDS dalam penelitian ini diinterpretasikan secara terintegrasi dengan analisis petrografi, XRD, serta pengukuran porositas dan permeabilitas untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif terhadap kualitas reservoir.
- *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk menentukan jenis dan persentase kandungan mineral lempung (kaolinit, illit, smektit, dan klorit).
- Helium Porosimeter untuk pengukuran porositas.
- Gas Permeameter atau Liquid Permeameter untuk pengukuran permeabilitas.

Alat Pengujian

- Mikroskop petrografi digunakan untuk mengamati sayatan tipis batuan dengan ketebalan $\pm 30 \mu\text{m}$ guna mengidentifikasi komposisi mineral dan tekstur batuan.
- SEM-EDS memungkinkan pengamatan permukaan sampel dengan perbesaran tinggi, sehingga dapat diketahui bentuk butir, struktur pori, serta hubungan mineral lempung dengan matriks.
- Analisis XRD dilakukan pada sampel serbuk untuk mendeteksi fase kristalin mineral penyusun, khususnya jenis-jenis lempung.
- Pengukuran porositas dilakukan dengan prinsip displacement gas helium, sedangkan permeabilitas diukur dengan metode aliran fluida melalui sampel batuan silinder.

Metode Penelitian

Metode penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

- Persiapan sampel
Batuan singkapan dipilih, dibersihkan, kemudian dibuat dalam bentuk sayatan tipis (untuk petrografi) dan sampel silinder (untuk uji fisik).
- Analisis petrografi
Identifikasi komposisi mineral, tekstur batuan, dan keberadaan mineral lempung dalam matriks.
- Analisis SEM-EDS
Observasi bentuk dan distribusi pori serta karakter permukaan mineral lempung.
- Analisis XRD
Penentuan jenis dan proporsi mineral lempung dalam sampel.
- Pengujian porositas dan permeabilitas
Pengukuran parameter fisik batuan sebagai indikator kualitas reservoir.

- Analisis hubungan kandungan lempung dengan sifat petrofisika
Integrasi hasil petrografi, SEM, XRD dengan data porositas dan permeabilitas untuk memahami pengaruh lempung terhadap kualitas reservoir.

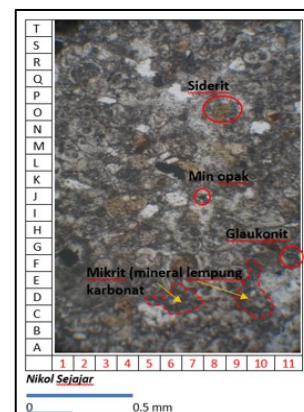
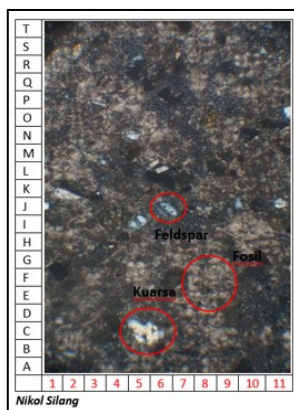
Metodologi ini dipilih untuk memastikan keterhubungan antara aspek mineralogi, tekstural, dan sifat fisik batuan dapat dianalisis secara komprehensif. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih jelas mengenai pengaruh kandungan lempung terhadap karakteristik porositas dan permeabilitas batuan reservoir..

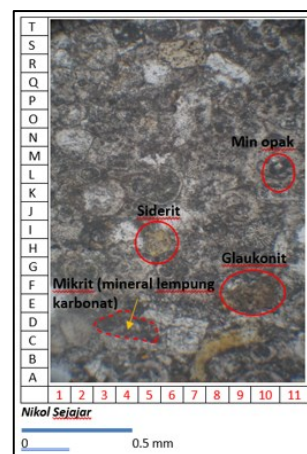
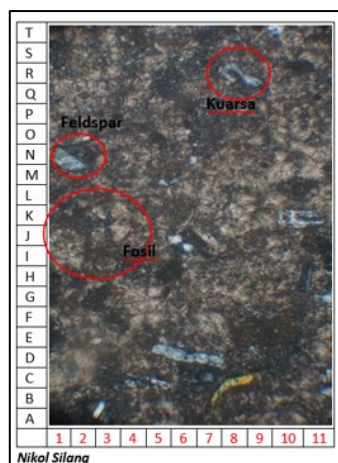
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Petrografi

Analisis petrografi pada sampel Formasi Sambipitu menunjukkan bahwa batuan umumnya termasuk ke dalam batugamping klastik dengan tekstur grain-supported. Komponen utama penyusun terdiri dari fosil planktonik dan bentonik dengan proporsi relatif tinggi (50–60%). Selain itu, hadir pula butiran kuarsa (5%), feldspar (10–15%), serta mineral aksesori seperti siderit (3–8%), glaukonit (1–2%), dan mineral opak ($\pm 1\%$). Matriks berupa mikrit (5–15%) mendominasi rongga antarbutir, sementara sparit (10–15%) hadir sebagai semen karbonat yang mengisi pori-pori intergranular. Batuan pada Formasi Sambipitu umumnya diklasifikasikan sebagai Packstone–Grainstone dan Biomicrite–Biosparite.

Secara petrografis, keberadaan mineral lempung karbonat (mikrit) serta kandungan siderit dan glaukonit berpotensi mempengaruhi sifat petrofisika batuan, terutama dalam menurunkan permeabilitas akibat berkurangnya konektivitas pori. Namun, dominasi fragmen fosil berpori memberikan kontribusi positif terhadap porositas. Temuan ini sejalan dengan kajian terbaru yang menekankan bahwa distribusi kaolinit dan illit berperan besar dalam mengontrol konektivitas aliran dibandingkan batuan dengan lempung non-swelling. Selain itu, heterogenitas pori dan throat pada karbonat juga menjadi faktor kunci dalam variasi kualitas reservoir. Hasil analisis dari sampel Formasi Sambipitu dapat dilihat pada **Gambar 2** dan **Gambar 3**.



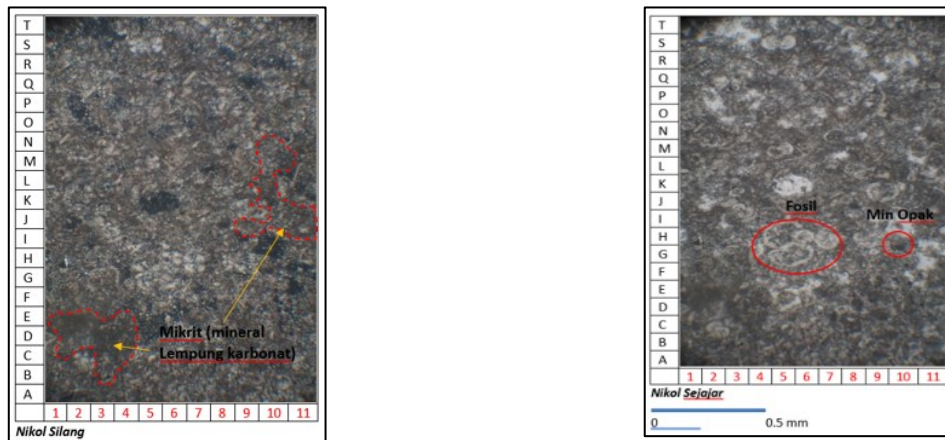
Gambar 2. Hasil Sayatan Tipis (Sampel SP 01; Perbesaran 30 x)**Gambar 3.** Hasil Sayatan Tipis (Sampel SP 04; Perbesaran 30 x)

Sampel dari Formasi Oyo memperlihatkan tekstur mud-supported, sehingga umumnya termasuk dalam Wackestone. Komponen utama penyusunnya adalah fosil planktonik dan bentonik dengan kisaran 40–50%. Matriks didominasi oleh mikrit (25–35%), sedangkan sparit (20%) berperan sebagai semen karbonat.

Mineral aksesori yang ditemukan antara lain siderit (2–3%), glaukonit (2%), serta mineral opak (1%). Komposisi ini menunjukkan bahwa batuan Oyo lebih kaya matriks dibandingkan dengan Sambipitu, sehingga sifat reservoirnya relatif kurang baik. Berdasarkan klasifikasi, batuan ini dapat diidentifikasi sebagai Wackestone dan Biomicrite. Dari segi kualitas reservoir, dominasi mikrit dan semen karbonat cenderung mengurangi porositas efektif, sementara hadirnya fosil berongga tetap memberi kontribusi pada porositas primer. Namun, kandungan mineral lempung karbonat yang cukup tinggi menjadi faktor penghambat utama aliran fluida, yang sejalan dengan hasil kajian terbaru mengenai pengaruh illit dan smektit pada penurunan permeabilitas. Hasil analisis sayatan tipis dua sampel OY dapat dilihat pada **Gambar 4.**

Secara umum, sampel Formasi Sambipitu memperlihatkan kualitas reservoir yang relatif lebih baik dibandingkan sampel Formasi Oyo. Hal ini ditunjukkan oleh:

- Tekstur, sampel Formasi Sambipitu lebih dominan grain-supported (Packstone–Grainstone), sedangkan sampel Formasi Oyo lebih mud-supported (Wackestone).
- Komposisi, sampel Formasi Sambipitu memiliki kandungan fosil lebih tinggi dan lebih sedikit matriks mikrit dibanding sampel Formasi Oyo.
- Dampak petrofisika, sampel Formasi Sambipitu berpotensi memiliki porositas dan permeabilitas lebih baik, sementara sampel Formasi Oyo cenderung berpermeabilitas rendah akibat dominasi mikrit.



Gambar 4. Hasil Sayatan Tipis (Sampel OY 01; Perbesaran 30 x)

Hasil Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD)

Hasil XRD menunjukkan bahwa mineral lempung utama pada kedua formasi adalah kaolinit, illit, smektit, dan klorit dengan variasi proporsi antar sampel. Formasi Sambipitu umumnya memperlihatkan komposisi kaolinit 4–17%, illit 39–56%, smektit 12–36%, dan klorit 3–5%. Sementara itu, Formasi Oyo menunjukkan kecenderungan kaolinit lebih dominan dibanding mineral lempung lainnya. Secara umum, kaolinit yang hadir dalam bentuk diskrit relatif tidak terlalu merusak porositas karena cenderung mengendap di ruang antarbutir. Sebaliknya, smektit berpotensi menurunkan permeabilitas akibat sifat *swelling*-nya ketika berinteraksi dengan fluida formasi [7]. Illit sering hadir mengisi pori mikro sehingga mengurangi aliran fluida, sedangkan klorit cenderung menempel pada dinding butir sebagai lapisan tipis [8]. Hasil XRD Sampel Formasi Sambipitu dan Sampel Formasi Oyo dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil XRD Sampel Formasi Sambipitu dan Formasi Oyo

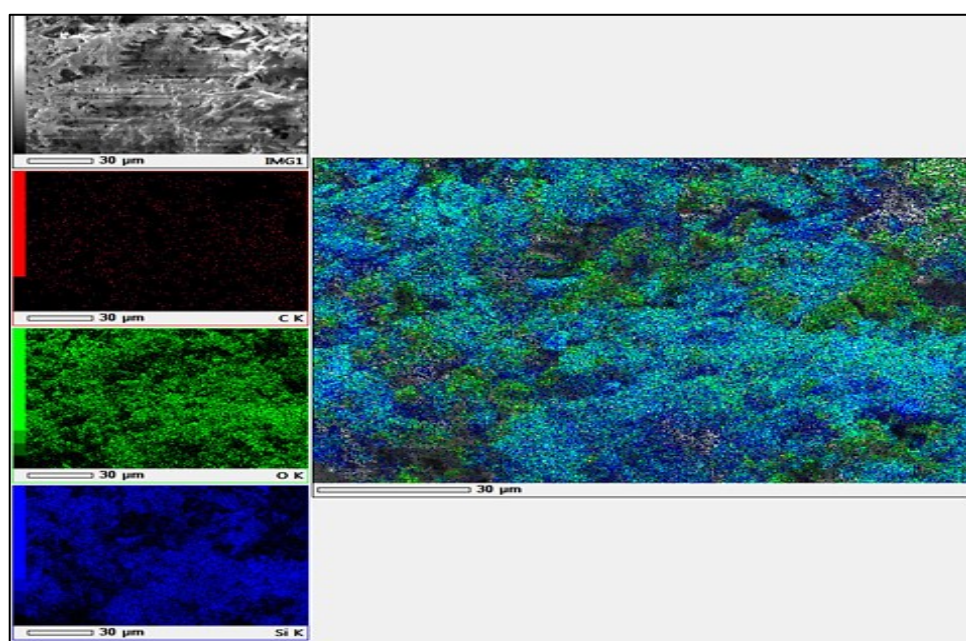
Sampel	Kaolinite	Illite	Smectite	Chlorite	Mixed Layer		Total
					I/S R1	I/S R1	
SP 01	6,79	56,50	12,20	5,42	9,88	9,20	100,00
SP 04	4,41	39,53	36,30	3,75	7,60	8,40	100,00
SP 07	17,18	45,36	26,54	0,00	10,91	0,00	100,00
OY 01	18,80	36,74	25,78	0,00	9,03	9,66	100,00
OY 04	76,19	5,76	18,05	0,00	0,00	0,00	100,00

Hasil analisis petrografi dan XRD memberikan gambaran awal mengenai peran tekstur, komposisi mineral, dan kandungan lempung terhadap kualitas reservoir pada Formasi Sambipitu dan Formasi Oyo. Namun, kedua metode ini masih bersifat makroskopis dan mineralogis umum sehingga belum dapat memperlihatkan secara detail morfologi butiran, distribusi mineral lempung, serta hubungan antarpori pada skala mikroskopis. Oleh karena itu, analisis *Scanning Electron Microscope* (SEM) digunakan sebagai tahap lanjutan untuk

mengamati bentuk butiran, keberadaan mineral lempung di dalam pori, serta tekstur mikroskopis yang mempengaruhi porositas dan permeabilitas. Dengan kombinasi antara petrografi, XRD, dan SEM, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh kandungan lempung terhadap sifat fisik batuan reservoir.

Hasil Analisis SEM dan EDS Mapping

Hasil analisis SEM yang dipadukan dengan pemetaan EDS pada sampel Formasi Sambipitu (SP 01, SP 04, SP 07) dan Formasi Oyo (OY 01) menunjukkan pola tekstur dan distribusi mineral yang konsisten dengan data petrografi dan XRD, serta memperkuat interpretasi pengaruh mineral lempung terhadap sifat petrofisika. Pada sampel SP 01, citra SEM memperlihatkan pori antarbutir yang sebagian tertutup mineral halus, dengan peta EDS yang didominasi oleh unsur Si dan K, mengindikasikan keberadaan illite dan kemungkinan lapisan campuran illite–smectite. Distribusi lempung ini cenderung menyumbat jalur pori halus sehingga meskipun ruang pori ada, permeabilitas relatif rendah. Hasil SEM Formasi Sambipitu sampel SP 01 dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Hasil SEM Sampel SP 01

Berbeda dengan SP 01, sampel SP 04 menunjukkan struktur butiran yang lebih tegas dan rongga antarbutir yang masih jelas, namun peta EDS memperlihatkan kombinasi Si + K (illite) serta Ca yang merepresentasikan semen karbonat. Kehadiran karbonat ini turut mengisi ruang pori dan mempersempit konektivitas, sehingga meskipun porositas moderat masih terbentuk, permeabilitas mengalami penurunan. Sementara itu, sampel SP 07 menampilkan tekstur yang lebih heterogen dengan rongga relatif lebih terbuka. Peta unsur menunjukkan dominasi silikat (Si–O) dan kontribusi K yang mengindikasikan illite. Kondisi ini menyebabkan porositas antarbutir lebih berkembang, namun keberadaan partikel

lempung halus tetap mengurangi efektivitas jalur alir fluida. Adapun sampel OY 01 memperlihatkan permukaan yang paling padat dan kompak dibandingkan sampel SP, dengan distribusi unsur didominasi Si dan Ca yang mencerminkan dominasi semen karbonat. Akibatnya, sebagian besar pori antarbutir tertutup sehingga porositas sangat terbatas dan permeabilitas hampir tidak ada. Temuan ini menegaskan bahwa variasi tekstur, distribusi mineral lempung, serta peran semen karbonat berpengaruh signifikan terhadap kualitas petrofisika pada kedua formasi yang diteliti. Hal ini sejalan dengan studi terbaru yang menegaskan bahwa kandungan illite dan smectite secara signifikan menurunkan permeabilitas meskipun porositas relatif konstan. Morfologi illite (berupa lembaran tipis/film antarbutir) berperan penting dalam menghambat aliran fluida [8-10].

Hasil Analisis Porositas dan Permeabilitas

Nilai porositas berkisar 7,03–20,80% dan permeabilitas 33,57–298,16 mD. Variasi ini menunjukkan pengaruh signifikan dari jenis mineral lempung. Sampel dengan dominasi kaolinite cenderung mempertahankan porositas efektif, sedangkan smectite dan illite berperan dalam menurunkan permeabilitas akibat mekanisme pengisian pori dan penyumbatan jalur alir.

Integrasi Hasil Analisis

Hasil integrasi petrografi, XRD, SEM, serta uji porositas–permeabilitas menunjukkan bahwa kualitas reservoir pada Formasi Sambipitu dan Oyo tidak hanya dikontrol oleh besaran porositas, tetapi juga oleh tipe dan distribusi mineral lempung (**Tabel 2**).

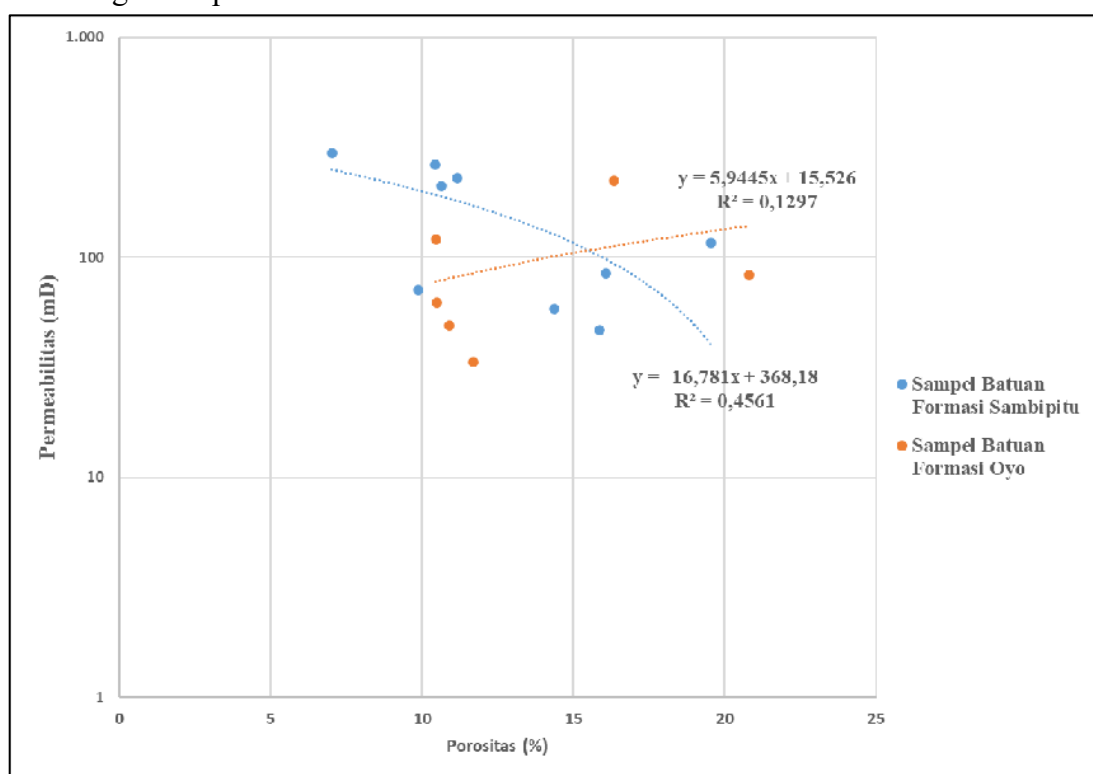
Tabel 2. Hasil Integrasi Analisis Petrografi, XRD, SEM, dan Uji Porositas–Permeabilitas

Metode Analisis	Hasil Analisis	Dampak terhadap Reservoir
Petrografi	Sambipitu: Packstone–Grainstone, kaya fragmen fosil berpori. Oyo: Wackestone, kaya mikrit & semen karbonat.	Sambipitu relatif lebih baik kualitas reservoirnya. Oyo cenderung berporositas rendah.
XRD	Oyo didominasi Illite (5 - 36%). Sambipitu bervariasi: Kaolinite (4–17%), Smectite (12–36%).	Illite & Smectite menurunkan permeabilitas. Kaolinite lebih mendukung porositas efektif.
SEM	SP 01: pori sebagian tertutup illite; SP 04: pori diisi semen karbonat (Ca); SP 07: rongga terbuka tapi diisi lempung halus; OY 01: pori hampir tertutup total karbonat.	Distribusi illite & smectite menyumbat pori. Semen karbonat memperburuk kualitas reservoir.
Porositas–Permeabilitas	Porositas 7,03–20,80%. Permeabilitas 33,57–298,16 mD.	Nilai porositas tidak selalu berbanding lurus dengan permeabilitas. Jenis & distribusi lempung menjadi faktor pengontrol utama.
Integrasi	Fragmen fosil meningkatkan porositas; Illite & Smectite menutup jalur aliran; Kaolinite mempertahankan kapasitas simpan & alir.	Mineral lempung terbukti sebagai pengontrol utama kualitas reservoir.

Secara umum, Formasi Sambipitu lebih prospektif dibanding Formasi Oyo karena tekstur grain-supported, kandungan fosil berlimpah, serta distribusi kaolinite yang mendukung porositas efektif. Sebaliknya, Formasi Oyo didominasi mikrit dan semen karbonat dengan kandungan illite tinggi, sehingga kualitas reservoirnya cenderung lebih rendah.

Analisis Hubungan Porositas dan Permeabilitas

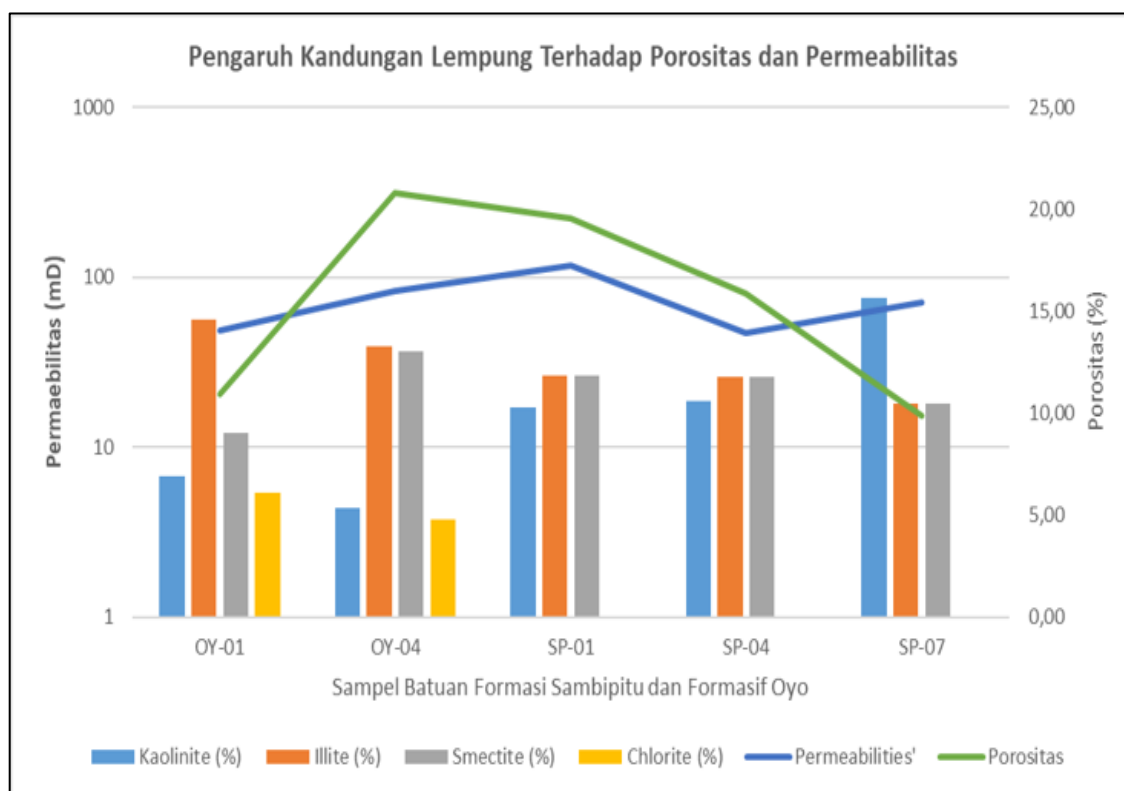
Scatter plot hubungan porositas–permeabilitas (**Gambar 6**) menunjukkan tren berbeda antarformasi. Pada Formasi Sambipitu, terlihat tren negatif ($R^2 = 0,4561$), di mana peningkatan porositas tidak selalu diikuti peningkatan permeabilitas akibat penyumbatan pori oleh illite dan smectite. Sebaliknya, Formasi Oyo menunjukkan tren positif lemah ($R^2 = 0,1297$), menandakan litologi dan semen karbonat lebih dominan dibanding porositas dalam mengontrol permeabilitas.



Gambar 6. Grafik Hubungan Porositas dan Permeabilities'

Grafik berikutnya (**Gambar 7**) memperlihatkan hubungan antara kandungan mineral lempung (kaolinite, illite, smectite, chlorite) dengan porositas–permeabilitas. Grafik ini memperlihatkan hubungan antara kandungan mineral lempung (kaolinite, illite, smectite, chlorite) dengan porositas–permeabilitas. Hasil analisis menunjukkan bahwa kandungan mineral lempung pada sampel dari Formasi Oyo dan Sambipitu memiliki variasi yang signifikan dan berpengaruh terhadap sifat petrofisika batuan. Sampel dari Formasi Oyo (OY-01 dan OY-04) cenderung didominasi oleh illite (39–56%), dengan nilai porositas sedang (10,90–20,80%) dan permeabilitas antara 48,81–83,53 mD. Pada Formasi Sambipitu,

sampel SP-01 dan SP-04 menunjukkan kombinasi illite–smectite dengan nilai porositas dan permeabilitas yang relatif tinggi, terutama pada SP-01 ($\phi = 19,55\%$; $k = 116,67$ mD) yang merepresentasikan kualitas reservoir terbaik. Sebaliknya, sampel SP-07 yang sangat didominasi oleh kaolinit (76,19%) menunjukkan porositas terendah (9,89%) meskipun permeabilitasnya masih berada pada kisaran menengah (71,28 mD). Secara umum, keberadaan smektit dalam kadar moderat hingga tinggi berasosiasi dengan meningkatnya porositas dan permeabilitas, sedangkan dominasi illite maupun kaolinit cenderung menurunkan kualitas reservoir. Temuan ini menegaskan bahwa variasi jenis dan distribusi mineral lempung berperan penting dalam mengontrol heterogenitas sifat petrofisika pada Formasi Oyo dan Sambipitu.



Gambar 7. Pengaruh Kandungan Lempung Terhadap Porositas dan Permeabilitas

Indikator Keberhasilan dan Kendala Penelitian

Hasil integrasi analisis petrografi, XRD, SEM, serta uji petrofisika berhasil menjawab tujuan penelitian, yaitu membuktikan bahwa jenis dan distribusi mineral lempung merupakan pengontrol utama kualitas reservoir karbonat. Kendala yang ditemui adalah jumlah sampel yang terbatas dan sebagian mengalami alterasi, sehingga hasil interpretasi mungkin belum sepenuhnya merepresentasikan variasi mineralogi formasi secara regional. Namun demikian, pendekatan multi-metode yang digunakan tetap mampu menghasilkan gambaran yang representatif terhadap pengaruh mineral lempung pada kualitas reservoir.

KESIMPULAN

Jenis dan distribusi mineral lempung terbukti berperan signifikan terhadap kualitas reservoir. Illite menurunkan permeabilitas melalui mekanisme bridging antar butir, smectite yang bersifat ekspansif menutup jalur pori, sedangkan kaolinite relatif mendukung porositas dengan tidak sepenuhnya menghambat aliran fluida. Integrasi analisis petrografi, XRD, SEM, serta uji porositas–permeabilitas berhasil mengonfirmasi hubungan antara kandungan lempung dengan sifat petrofisika. Pada Formasi Sambipitu, dominasi kaolinite dan chlorite memungkinkan jalur alir tetap berkembang, sementara pada Formasi Oyo, tingginya illite dan smectite menurunkan permeabilitas secara signifikan. Sebagai keberlanjutan, disarankan penelitian lanjutan dengan pendekatan eksperimental (misalnya core flooding test) guna memperdalam pemahaman mekanisme interaksi lempung dengan fluida formasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada **Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi (Kemenristekdikti) Republik Indonesia** atas dukungan pendanaan melalui **Program Penelitian Dosen Pemula (PDP)** yang telah memfasilitasi terlaksananya penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Universitas Proklamasi 45, serta seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, masukan, dan dukungan selama proses penelitian hingga penyusunan naskah ini.

REFERENSI

- [1] R. H. Worden and S. Morad, "Clay minerals in sandstones: controls on formation, distribution and evolution," *Clay mineral cements in sandstones*, pp. 1-41, 1999.
- [2] D. Tiab and E. C. Donaldson, *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Elsevier, 2024.
- [3] R. Wang *et al.*, "Clay mineral content, type, and their effects on pore throat structure and reservoir properties: Insight from the Permian tight sandstones in the Hangjinqi area, north Ordos Basin, China," *Marine and Petroleum Geology*, vol. 115, p. 104281, 2020.
- [4] Y. Bai, D. Zhao, H. Zhang, and Y. Fu, "Pore structure and its control on reservoir quality in tight sandstones," *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11/17 2020, doi: 10.1007/s13202-020-01042-9.
- [5] M. Risha, H. Tsegab, O. Rahmani, and J. Douraghi, "The impact of clay minerals on the porosity distribution of clastic reservoirs: a case study from the Labuan Island, Malaysia," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 6, p. 3427, 2023.
- [6] M. Usman *et al.*, "Linking the influence of diagenetic properties and clay texture on reservoir quality in sandstones from NW Borneo," *Marine and Petroleum Geology*, vol. 120, p. 104509, 2020.
- [7] P. N. Ardebili, G. Jozanikohan, and A. Moradzadeh, "The characterization of clay minerals in the Kashafrud Formation in a gas field in northeast Iran," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 9000, 2025.

- [8] A. M. Abudeif, N. Alarifi, F. Abdalla, S. Bellucci, and F. A. Tawfik, "Clay impact on reservoir quality in the Nubia Formation of Saqqara field, Gulf of Suez, Egypt," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 26911, 2025.
- [9] D. A. Martyushev, S. Davoodi, A. D. Anickaeva, and Z. Zhi, "Clay mineral content and their impact on reservoir quality: Insight into the carbonate reservoirs oil fields, Central-Eastern Russia," *Petroleum Research*, 2025.
- [10] M. Karami, B. Sedaee, and A. Nakhaee, "Investigating different fluids and injection patterns on the effect of reservoir rock quality alteration due to swelling and migration of clay minerals at carbonate reservoirs," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 145, no. 10, p. 103501, 2023.