

KARAKTERISASI MINERALOGI LUMPUR BOR DI DESA KUFAR MENGUNAKAN XRF DAN XRD BERBASIS METODE RIETVELD

Sufilman Ely*, Ruth Meisye kaloari, Frandy Akyuwen, Mirtha Yunitha Sari Risakotta

Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pattimura, Jl. Ir. Putuhena, Ambon, 97233, Indonesia

*email: sufilmanelly@gmail.com

ABSTRAK

Lumpur di Desa Kufar, Maluku, Indonesia, merupakan lumpur hasil pengeboran minyak yang berpotensi sebagai sumber mineral sekunder bernilai ekonomi. Penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi komposisi unsur, struktur kristal, dan fasa mineral lumpur tersebut melalui pendekatan terpadu X-Ray Fluorescence (XRF) dan X-Ray Diffraction (XRD), yang dianalisis menggunakan perangkat lunak Match 3!, Rietica, dan MAUD berbasis metode Rietveld refinement. Analisis XRF menunjukkan dominasi kalsium (Ca, 57,9 wt.%), diikuti oleh besi (Fe, 21 wt.%) dan silikon (Si, 12 wt.%), dengan unsur minor seperti Cr, V, Ba, dan Mn masing-masing <1 wt.% jauh di bawah ambang toksisitas lingkungan. Analisis XRD mengidentifikasi lima fasa mineral utama: kalsit (CaCO_3), kuarsa (SiO_2), aluminium oksida, ulvoespinel, dan grimaldi deuterate. Refinement kuantitatif dengan Rietica mengungkap dominasi kalsit sebesar 81,63%, diikuti kuarsa (6,62%), aluminium oksida (4,49%), ulvoespinel (3,89%), dan grimaldi deuterate (3,37%), dengan nilai Goodness of Fit (GoF) = 1,27 yang menunjukkan kesesuaian tinggi antara model dan data eksperimen. Analisis ukuran kristal menggunakan MAUD menghasilkan kristal kalsit berukuran 137 nm dan kuarsa 94 nm, sedangkan fasa minor tidak dapat dikuantifikasi akibat intensitas difraksi yang rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa lumpur bor di Desa Kufar merupakan sumber CaCO_3 alami yang aman dan berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam industri.

Kata Kunci: Lumpur; XRF; XRD; Metode Rietveld; Kalsit

ABSTRACT

[Title: Mineralogical Characterization Of Drilling Mud In Kufar Village Using Xrf And Xrd Based On The Rietveld Method] The mud deposits in Kufar Village, Maluku, Indonesia, originate from oil-drilling activities and represent a potentially valuable source of secondary minerals. This study aims to characterize the elemental composition, crystal structure, and mineral phases of the material through an integrated approach combining X-Ray Fluorescence (XRF) and X-Ray Diffraction (XRD), analyzed using Match 3!, Rietica, and MAUD software based on the Rietveld refinement method. XRF analysis reveals a strong dominance of calcium (Ca, 57.9 wt.%), followed by iron (Fe, 21 wt.%) and silicon (Si, 12 wt.%), while minor elements such as Cr, V, Ba, and Mn occur at concentrations <1 wt.%—well below environmental toxicity thresholds. XRD analysis identifies five principal mineral phases: calcite (CaCO_3), quartz (SiO_2), aluminum oxide, ulvöspinel, and grimaldi deuterate. Quantitative refinement using Rietica indicates that calcite constitutes the majority phase (81.63%), followed by quartz (6.62%), aluminum oxide (4.49%), ulvöspinel (3.89%), and grimaldi deuterate (3.37%), with a Goodness of Fit (GoF) value of 1.27, confirming excellent agreement between the refined model and experimental data. Crystallite size analysis performed with MAUD yields average crystallite sizes of 137 nm for calcite and 94 nm for quartz; minor phases could not be quantified due to low diffraction intensities. Overall, these findings demonstrate that the drilling-derived mud from Kufar Village constitutes a safe and promising natural source of CaCO_3 with potential applications as an industrial raw material.

Keywords: Mud; XRF; XRD; Rietveld method; Calcite

PENDAHULUAN

Lumpur hasil aktivitas pengeboran, khususnya lumpur bor yang terbentuk dari interaksi fluida bor dengan material geologi bawah permukaan, merupakan salah satu sumber potensial mineral sekunder yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Di berbagai wilayah Indonesia, termasuk di Desa Kufar, proses pengeboran minyak menghasilkan endapan lumpur

dengan komposisi kimia yang kompleks dan beragam. Material ini tidak hanya muncul sebagai produk samping operasi pengeboran, tetapi juga berpotensi menjadi sumber bahan baku industri bernilai tambah apabila kandungan mineralnya dikarakterisasi secara komprehensif dan dimanfaatkan dengan tepat. Karakterisasi mineral merupakan tahapan penting dalam menentukan komposisi unsur, struktur kristal, serta potensi pemanfaatan material terutama untuk

mendukung pengelolaan sumber daya alam berbasis material lokal (Ciptawati dkk., 2022; Ciula dkk., 2024).

Dalam konteks ini, metode X-Ray Fluorescence (XRF) dan X-Ray Diffraction (XRD) menjadi dua teknik analisis utama yang saling melengkapi. XRF berperan dalam mengidentifikasi unsur kimia penyusun sampel secara kuantitatif dengan sensitivitas tinggi dan sifat analisis yang tidak merusak (González dkk., 2024). Sementara itu, XRD digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal dan fasa mineral yang terbentuk dalam sampel sehingga memungkinkan interpretasi komprehensif terhadap sifat kristalin dan keteraturan atomik material (Ely dkk., 2023). Kombinasi kedua metode ini mampu memberikan informasi lengkap mengenai komposisi elemental sekaligus struktur material yang sangat penting dalam menentukan nilai ekonomis serta arah pemanfaatannya.

Dalam analisis difraksi sinar-X, penggunaan perangkat lunak Match 3!, Rietica, dan MAUD berbasis metode Rietveld memiliki peran penting dalam meningkatkan ketepatan hasil interpretasi. Perangkat lunak Match 3! berfungsi untuk melakukan identifikasi awal terhadap puncak-puncak difraksi dengan membandingkan pola difraksi sampel terhadap basis data kristal standar seperti *Crystallography Open Database (COD)* atau *ICDD PDF-2* (Lutterotti dkk., 2019). Selanjutnya, Rietica dan MAUD digunakan untuk melakukan *refinement* kuantitatif menggunakan metode Rietveld yang mempertimbangkan seluruh profil difraksi bukan hanya intensitas puncak utama (Purwaningsih dkk., 2019). Pendekatan ini memungkinkan penentuan proporsi fasa mineral, parameter kisi kristal, serta ukuran kristalit dan tingkat mikrostrain secara presisi. Kombinasi ketiga perangkat lunak tersebut tidak hanya memberikan hasil identifikasi fasa yang akurat tetapi juga menghasilkan analisis kuantitatif yang komprehensif terhadap struktur kristal dan komposisi mineral.

Hasil penelitian sebelumnya dari berbagai lokasi di Indonesia menunjukkan bahwa lumpur hasil pegeboran tersusun atas campuran mineral oksida logam, silikat, dan karbonat yang bervariasi tergantung pada kondisi geologi dan lingkungan pengendapannya. Komposisi mineral utama yang sering ditemukan meliputi kuarsa (SiO_2), feldspar, kalsit (CaCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), serta berbagai oksida besi seperti hematit (Fe_2O_3) dan magnetit (Fe_3O_4) (Aditio dkk., 2018; Ciptawati dkk., 2022). Variasi kandungan mineral tersebut mencerminkan proses pembentukan dan pelapukan batuan asal yang berbeda-beda serta menunjukkan

potensi pemanfaatan lumpur sedimen sebagai sumber bahan baku mineral anorganik.

Meskipun demikian, hingga saat ini belum tersedia data karakterisasi mengenai mineralogi lumpur bor di Desa Kufar baik dari segi komposisi unsur maupun struktur kristalnya. Ketiadaan data ini menjadi fokus dalam penelitian ini karena karakteristik geologi setempat, proses pembentukan endapan, serta potensi fasa mineral yang terbentuk kemungkinan berbeda dengan lokasi-lokasi lain yang telah diteliti. Selain itu, belum ada kajian yang secara simultan mengintegrasikan analisis XRF dan XRD berbasis metode Rietveld untuk mengungkap potensi pemanfaatan lumpur tersebut sehingga dapat membuka peluang pemanfaatan material lokal dalam bidang industri, lingkungan, atau lainnya. Beberapa penelitian juga melaporkan bahwa lumpur dari wilayah pesisir dan danau memiliki karakteristik fisikokimia yang mendukung penggunaannya dalam bidang industri, lingkungan, dan material, seperti dalam pembuatan bahan adsorben, campuran semen, serta bahan pengisi (Cosentino dkk., 2020; Peng dkk., 2021). Namun, belum diketahui apakah lumpur dari Desa Kufar memiliki potensi serupa atau bahkan berbeda.

Pada penelitian ini, karakterisasi mineral dari lumpur bor di Desa Kufar dilakukan menggunakan XRF dan XRD yang diolah melalui perangkat lunak Match 3!, Rietica, dan MAUD dengan pendekatan metode Rietveld guna memperoleh hasil yang kuantitatif dan akurat. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman ilmiah tentang karakteristik mineral lumpur di Desa Kufar tetapi juga membuka prospek pemanfaatan lumpur di Desa Kufar.

METODE

Preparasi Sampel

Tahap awal penelitian ini dimulai dengan pengambilan sampel lumpur dari lapisan permukaan tepat di area semburan yang merupakan hasil aktivitas pengeboran. Pengambilan sampel dilakukan pada satu titik lokasi yang mewakili sumber semburan dengan kedalaman $\pm 10\text{--}30$ cm (lapisan permukaan). Proses pengambilan dilakukan secara hati-hati untuk menghindari kontaminasi dari material eksternal. Sampel yang diperoleh kemudian dibersihkan menggunakan akuades guna menghilangkan kotoran dan partikel pengotor yang dapat memengaruhi hasil karakterisasi. Setelah proses pembersihan, lumpur dikeringkan di dalam oven pada temperatur 100°C hingga seluruh kandungan airnya menguap sempurna sehingga diperoleh sampel dalam kondisi kering.

Selanjutnya, proses penghalusan sampel dilakukan menggunakan mortar untuk menghasilkan

ukuran butiran yang seragam dan meningkatkan homogenitas material. Tahapan preparasi ini dilakukan di Laboratorium Geofisika, Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi (FST). Setelah diperoleh serbuk lumpur yang homogen, sampel dikarakterisasi menggunakan dua metode utama, yaitu X-Ray Fluorescence (XRF) untuk menganalisis komposisi unsur, dan X-Ray Diffraction (XRD) untuk menentukan struktur kristal dan komposisi fasa mineral.

Analisis Komposisi Unsur

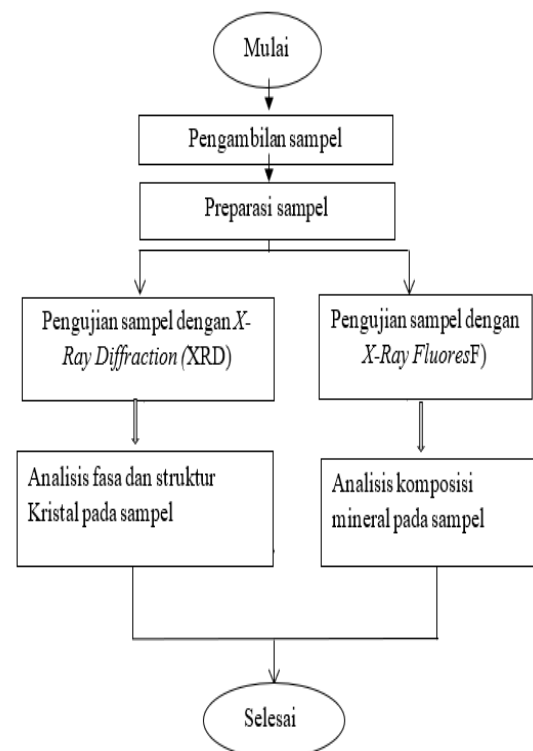
Sampel lumpur yang sudah dikeringkan kemudian dianalisis menggunakan XRF untuk menentukan komposisi unsur kimia pada sampel lumpur. Sampel yang dianalisis dipilih secara representatif dari titik semburan sehingga dapat memberikan gambaran umum kandungan unsur dalam lumpur. Mengingat penelitian ini bersifat eksploratif awal yang bertujuan memperoleh gambaran dasar komposisi material, pengukuran XRF dilakukan sebanyak satu kali (*single measurement*) terhadap sampel. Teknik ini dipilih karena memiliki keunggulan dalam mendeteksi unsur mayor maupun minor secara kuantitatif dengan tingkat presisi tinggi tanpa merusak sampel. Instrumen XRF yang digunakan memiliki sensitivitas deteksi lebih baik dari 1 ppm (0,0001%) hingga 100%, sehingga mampu memberikan karakterisasi elemental yang komprehensif terhadap sampel yang dianalisis.

Analisis Struktur dan Ukuran Kristal

Sebanyak 1 gram sampel lumpur dianalisis menggunakan XRD untuk mengidentifikasi fasa, komposisi fasa, dan ukuran kristalin pada sampel lumpur dari Desa Kufar. Pengujian ini dilakukan menggunakan XRD dengan spesifikasi alat yaitu *X-Ray Diffractometer Philips Binary X'pert PRO, PANalytical*. Pengukuran XRD dilakukan pada sudut theta 10° - 60° dengan *step size* $0,0170^{\circ}$ dan menggunakan radiasi $\text{Cu}\alpha$ ($\lambda=1,54056 \text{ \AA}$).

Selanjutnya, pola difraksi dari fasa yang terbentuk berdasarkan hasil pengukuran XRD dianalisis menggunakan perangkat lunak Match 3! dan kemudian dilakukan analisis kuantitatif dengan perangkat lunak Rietica menggunakan metode *Rietveld*. Metode ini merupakan teknik penghalusan yang membandingkan pola difraksi hasil perhitungan teoretis (model) dengan pola difraksi hasil eksperimen untuk memperoleh informasi mengenai struktur kristal. Selain itu, estimasi ukuran kristal zirkonia didapatkan berdasarkan hasil analisis data XRD dengan bantuan perangkat lunak MAUD.

Dalam analisis menggunakan metode *Rietveld*, terdapat dua jenis data yang digunakan yaitu pola difraksi hasil perhitungan yang diperoleh dari fasa-fasa yang teridentifikasi dan pola difraksi hasil eksperimen. Prinsip kerja metode ini adalah mencocokkan kedua pola difraksi tersebut dengan cara menyesuaikan berbagai parameter pada model perhitungan hingga diperoleh kesesuaian optimal dengan pola difraksi hasil eksperimen. Data perhitungan model diperoleh dari berkas *Crystallography Information File (.cif)* yang dapat diakses melalui *Crystallography.net* atau *Inorganic Crystal Structure Database (ICSD)*.



Gambar 1. Diagram Alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kandungan mineral atau unsur sampel lumpur Bor di Desa Kufar dikarakterisasi menggunakan XRF sedangkan bentuk fasa, komposisi fasa, dan ukuran kristal dikarakterisasi menggunakan data XRD yang dianalisis menggunakan perangkat lunak Match 3!, Rietica dan Maud dengan metode *Rietveld*. Dalam menganalisis mineral, uji XRF sering digunakan karena pengujianya cepat, akurat, tidak merusak, dan hanya melakukan persiapan sampel yang minimal (Wahab dkk., 2025). XRF bekerja dengan prinsip interaksi antara sinar-X dengan material yang digunakan untuk menganalisis unsur beserta senyawa oksida. Sedangkan XRD bekerja dengan prinsip mendifraksi cahaya yang melalui celah kristal akibat interaksi antara sinar-X dengan

material. Hasil uji XRD digunakan untuk menentukan fasa, komposisi fasa, dan struktur kristal.



Gambar 2. Lumpur yang telah dibersihkan dan dikeringkan

Komposisi Unsur

Kandungan unsur dalam lumpur bor di Desa Kufar hasil pengujian XRF ditunjukkan pada Tabel 1. Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa kandungan unsur dalam lumpur Bor Desa kufar didominasi oleh Kalsium (Ca) dengan persentasi 58%, Besi (Fe) 21 %, dan Silika (Si) 12%. Unsur lain yang terdapat di dalamnya adalah Aluminium (Al), Potassium (K), Titanium (Ti), Vanadium (V), Chromium (Cr), Manganese (Mn), Coper (Cu), Zinc (Zn), Rubidium (Rb), Strontium (Sr), Zirconium (Zr), Rhenium (Re), Barium (Ba), dan Molybdenum (Mo).

Tabel 1. Hasil karakterisasi kandungan unsur dalam Lumpur Bor di Desa Kufar menggunakan XRF

Unsur	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	lain nya
Persentase (wt.%)	4	12	2	58	2	21	<1

Berdasarkan hasil karakterisasi X-Ray Fluorescence (XRF), sejumlah unsur minor seperti vanadium (V), kromium (Cr), mangan (Mn), tembaga (Cu), stronsium (Sr), dan barium (Ba) terdeteksi dalam sampel lumpur bor Desa Kufar

Tabel 2. Hasil identifikasi struktur kristal pada sampel lumpur di Desa Kufar berdasarkan analisis data XRD menggunakan software Match 3!

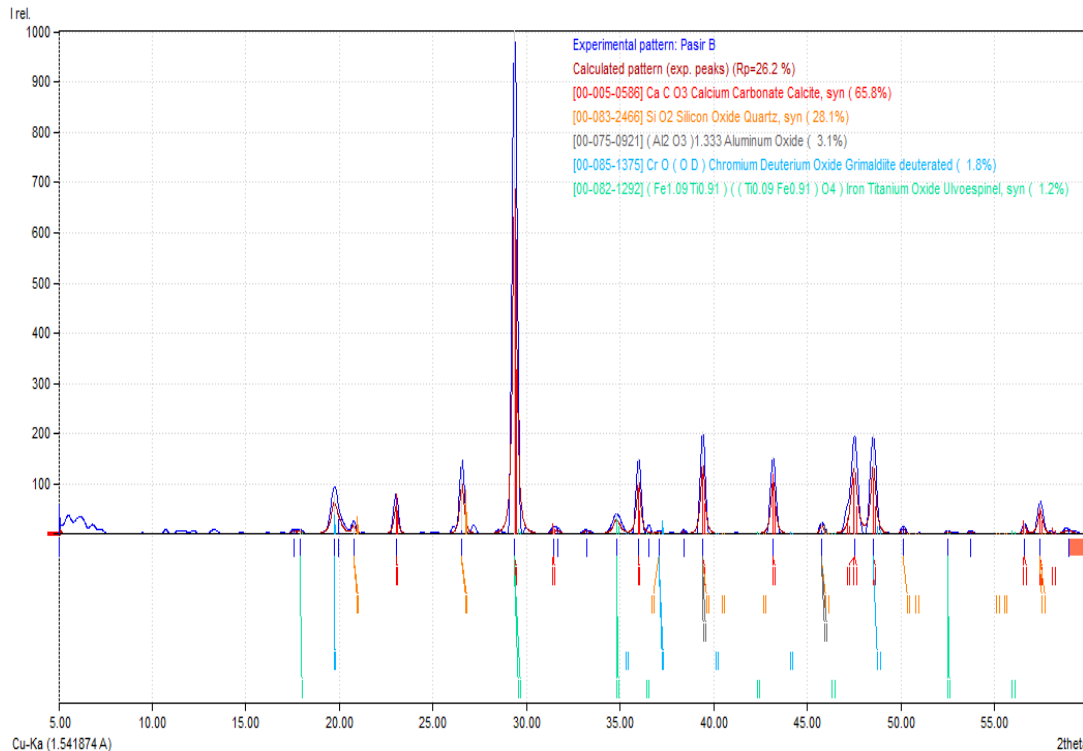
No	Fasa	Rumus Kimia	Sudut 2θ (°)	Puncak Utama (°)
1	Kalsit	CaCO ₃	23,20, 29,37, 31,42, 35,99, 39,41, 43,17, 47,51, 48,52, 56,60, 57,45	29,37
2	Kuarsa	SiO ₂	20,76, 26,55, 35,99, 37,07, 39,41, 45,78, 47,51, 50,13, 56,60, 57,45	26,55
3	Aluminium Oksida	(Al ₂ O ₃) _{1.333}	29,41, 45,78	45,78
4	Ulvoespinel	(Fe _{1.09} Ti _{0.91})(Ti _{0.09} Fe _{0.91})O ₄	17,89, 29,37, 34,81, 52,53	34,81
5	Grimaldi Deuterate	CrO(OD)	19,71, 37,07, 48,52	19,71

dengan konsentrasi relatif rendah, yaitu kurang dari 1% (<1 wt.%). Unsur-unsur tersebut dikenal memiliki potensi toksik terhadap lingkungan dan organisme hidup jika berada pada konsentrasi tinggi atau dalam bentuk senyawa yang mudah larut (Alloway, 2013; Qi dkk., 2024). Namun demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa keberadaan unsur-unsur ini masih berada jauh di bawah ambang batas toksisitas alami sehingga tidak menimbulkan risiko yang signifikan.

Struktur Kristal

Untuk menentukan atau mengetahui fasa, komposisi fasa, dan ukuran kristal fasa dari lumpur di desa Kufar maka dilakukan pengujian XRD. Hasil XRD dianalisis menggunakan *Software Match 3!* yang mana data ICDD yang terdapat pada *Match 3!* dicocokkan dengan data XRD untuk mengetahui bentuk fasanya. Dari pencocokan kedua data tersebut, struktur kristal dalam suatu bahan atau material dapat diketahui. Dalam proses pencocokan, data XRF dapat membantu dalam penentuan fasa dari lumpur karena *Match 3!* akan menampilkan banyak kandidat fasa untuk dipilih (Bortolotti dkk., 2017; Nazmin dkk., 2019). Oleh karena itu, hasil XRF dapat menjadi referensi dalam memilih kandidat fasa yang paling sesuai dengan mineral yang terdapat pada lumpur.

Kandungan mineral yang tersusun pada sampel lumpur di Desa Kufar ditentukan berdasarkan puncak difraksi yang menunjukkan hubungan antara sudut difraksi (2θ) dan intensitas (I). Puncak-puncak difraksi setiap spektrum (puncak) yang muncul memiliki nilai sudut difraksi (2θ) yang berbeda. Setiap fasa memiliki spektrum atau memiliki nilai sudut difraksi yang berbeda atau khas (Ali dkk., 2022). Spektrum tersebut muncul akibat terjadinya difraksi sinar-X dari bidang pada sampel lumpur yang diuji menggunakan XRD. Berdasarkan hasil analisis XRD, teridentifikasi beberapa fasa pada sampel lumpur di Desa Kufar yang ditampilkan pada Gambar 3 dan Tabel 2.



Gambar 3. Hasil analisis data XRD sampel lumpur di Desa Kufar menggunakan Software Match 3!

Hasil analisis data XRD menggunakan Match 3! menunjukkan bahwa lumpur di Desa Kufar terdistribusi atas 5 fasa yaitu kalsit (CaCO_3), kuarsa (SiO_2), aluminium oksida ($(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1.333}$), ulvoespinel ($(\text{Fe}_{1.09}\text{Ti}_{0.91})(\text{Ti}_{0.09}\text{Fe}_{0.91})\text{O}_4$) dan grimaldi deuterate ($\text{CrO}(\text{OD})$). Berdasarkan hasil analisis menggunakan software Match 3!, fasa kalsit pada lumpur di Kufar memiliki puncak sudut 2θ pada $23,2^\circ$, $29,37^\circ$, $31,42^\circ$, $35,99^\circ$, $39,41^\circ$, $43,17^\circ$, $47,51^\circ$, $48,52^\circ$, $56,60^\circ$, dan $57,45^\circ$ dengan puncak utama pada sudut $29,37^\circ$. Selanjutnya, fasa kuarsa pada lumpur di Kufar memiliki puncak sudut 2θ pada $20,76^\circ$, $26,55^\circ$, $37,07^\circ$, $35,99^\circ$, $39,41^\circ$, $45,78^\circ$, $47,51^\circ$, $50,13^\circ$, $56,60^\circ$, dan $57,45^\circ$ dengan puncak utama pada sudut $26,55^\circ$. Fasa aluminium oksida pada lumpur di Kufar memiliki puncak sudut 2θ pada $29,41^\circ$ dan $45,78^\circ$ dengan puncak utama pada sudut $45,78^\circ$. Fasa ulvoespinel lumpur di Kufar memiliki puncak sudut 2θ pada $17,89^\circ$, $29,37^\circ$, $34,81^\circ$, dan $52,53^\circ$ dengan puncak utama pada sudut $34,81^\circ$. Terakhir, fasa grimaldi deuterate pada lumpur di Kufar memiliki puncak sudut 2θ pada $19,71^\circ$, $37,07^\circ$ dan $48,52^\circ$ dengan puncak utama pada sudut $19,71^\circ$.

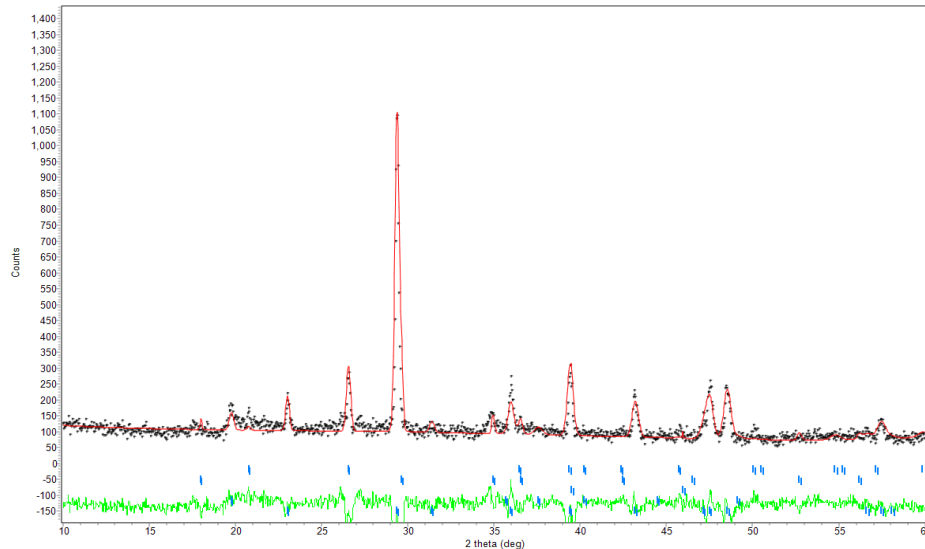
Hasil ini menunjukkan bahwa lumpur di Desa Kufar memiliki struktur kristal yang kompleks yang didominasi oleh kalsit dan kuarsa disertai oksida logam seperti aluminium oksida, ulvoespinel, dan grimaldi deuterate. Keberadaan kelima fasa tersebut

menunjukkan interaksi geokimia yang melibatkan proses presipitasi karbonat, pelapukan silikat, serta kemungkinan kontribusi material vulkanik atau hidrotermal dalam pembentukan lumpur di wilayah tersebut.

Komposisi Fasa

Selanjutnya, komposisi fasa dari lumpur di Desa Kufar dianalisis dari data XRD menggunakan perangkat lunak Rietica dengan metode *Rietveld*. Semakin kecil nilai *GoF* pada proses penghalusan atau pencocokan menggunakan metode *Rietveld* maka semakin baik hasil tersebut dan hasilnya dapat diterima. Untuk membuat data terhitung atau model, file CIF diunduh dari website *Crystallography Open Database*. File CIF yang diunduh disesuaikan dengan hasil analisis dari software Match 3!. Hasil pencocokan data terhitung dengan data terukur atau data XRD ditampilkan pada Gambar 4 yang mana titik-titik hitam adalah data terukur dan garis merah adalah data terhitung.

Hasil penghalusan data terhitung dan data terukur menggunakan Rietica disajikan dalam Tabel 3. Berdasarkan Tabel 3, sampel lumpur di Desa Kufar didominasi oleh fasa kalsit dengan persentasi berat sebesar 81,63 %, kemudian kuarsa sebesar 6,62%, aluminium oksida sebesar 4,49%, ulvoespinel sebesar 3,89% dan grimaldi deuterate sebesar 3,37%.



Gambar 4. Hasil analisis data XRD sampel lumpur di Desa Kufar menggunakan software Rietica

Tabel 3. Hasil penghalusan data XRD sampel lumpur di Desa Kufar menggunakan metode Rietveld pada software Rietica.

Fasa (Formula)	Parameter Kesesuaian (GoF)	Fraksi Berat Relatif (%)	Parameter Kisi (nm)			c/a
			a	b	c	
Kalsit (CaCO ₃)		81,63	4,9805	4,9805	17,0473	3,42
Kuarsa (SiO ₂)		6,62	4,916	4,916	5,4104	1,10
Aluminium Oksida ((Al ₂ O ₃) _{1.333})	1,27	4,49	3,9415	3,9415	3,9415	100
Ulvoespinel ((Fe _{1.09} Ti _{0.91})(Ti _{0.09} Fe _{0.91})O ₄)		3,89	8,4943	8,4943	8,4943	1,00
Grimaldi deuterate (CrO(OD)).		3,37	2,9513	2,9513	13,4136	4,54

Selain itu, nilai parameter kisi a, b, dan c hasil penghalusan data menggunakan Rietica merepresentasikan sistem kristal dan keteraturan struktur masing-masing mineral. Fasa kalsit (CaCO₃) memiliki parameter kisi a=b=4,9805 nm dan c=17,0473 dengan rasio c/a=3,42 yang menunjukkan sistem kristal trigonal (rhombohedral) yang sesuai dengan karakteristik khas kalsit (Luo dkk., 2022). Fasa kuarsa (SiO₂) memiliki nilai a=b=4,916 nm dan c=5,4104 nm dengan rasio c/a=1,10 sesuai dengan struktur trigonal α-kuarsa yang stabil pada suhu ruang (Deer dkk., 2013) Sementara itu, fasa aluminium oksida ((Al₂O₃)_{1.333}) dan ulvoespinel ((Fe_{1.09}Ti_{0.91})(Ti_{0.09}Fe_{0.91})O₄) masing-masing menunjukkan parameter kisi a=b=c=3,9415 nm dan a=b=c=8,4943 nm dengan rasio c/a=1,00 yang menandakan sistem kubik ber-simetri tinggi (Lattard dkk., 2006). Variasi nilai c/a dari 1,00 hingga 4,55 menggambarkan perbedaan tingkat simetri dan kerapatan kisi antar mineral yang mencerminkan perbedaan kondisi kristalisasi serta komposisi kimia.

Dominasi fasa kalsit mengindikasikan bahwa material lumpur yang terbentuk di lokasi penelitian memiliki kandungan kalsium karbonat yang sangat tinggi yang merupakan karakteristik umum dari material endapan hasil proses mineralisasi karbonat. Kandungan kalsit yang tinggi juga menunjukkan adanya kemungkinan keterlibatan aktivitas geokimia antara ion Ca²⁺ dan CO₃²⁻ dalam kondisi pH basa yang mendukung proses presipitasi karbonat. Proses presipitasi CaCO₃ secara umum dikendalikan oleh keadaan supersaturasi terhadap fasa karbonat, rasio aktivitas ion Ca²⁺/CO₃²⁻ serta pH larutan dengan kondisi basa yang menggeser keseimbangan karbonat ke arah ion karbonat (CO₃²⁻) sehingga mempercepat pembentukan kalsit (Gebrehiwet dkk., 2012).

Kehadiran kuarsa (SiO₂) dengan persentase 6,62% menunjukkan adanya mineral silikat yang berasal dari proses pelapukan batuan silika atau partikel pasir halus yang terbawa bersama material lumpur. Kandungan silika relatif kecil dibandingkan kalsit namun keberadaannya dapat memengaruhi sifat fisik material seperti kekerasan dan stabilitas mekanik (Yu dkk., 2020).

Dominasi kalsit pada hasil XRD juga dapat dikaitkan dengan kondisi geologi regional daerah Seram bagian timur, khususnya di wilayah Kabupaten Seram Bagian Timur termasuk Desa Kufar sebagai lokasi pengambilan sampel. Secara umum, litologi di Seram Bagian Timur terdiri dari batuan karbonat, batuan silisiklastik, dan endapan permukaan. Batuan karbonat seperti batugamping (*limestone*) dan dolomit banyak dijumpai sebagai bagian dari satuan stratigrafi regional yang kaya akan kalsit (Martini dkk., 2004). Selain itu, batuan silisiklastik seperti batupasir, serpih, dan lanau mengandung mineral kuarsa, feldspar, serta mineral lempung seperti illit, smektit, dan kaolinit yang merupakan hasil pelapukan dan diagenesis material sedimen (Gibran dkk., 2022).

Selain itu, aluminium oksida (Al_2O_3) dengan fraksi 4,49% yang umumnya berasosiasi dengan fasa lempung atau aluminosilikat kemungkinan terbentuk dari proses pelapukan mineral feldspar atau mika di lingkungan sekitarnya (Dietel dkk., 2017). Kandungan Al_2O_3 yang rendah mengindikasikan bahwa proses pelapukan batuan aluminosilikat di area ini tidak terlalu dominan dibandingkan proses karbonatisasi.

Hasil identifikasi ini sejalan dengan analisis XRF yang memperlihatkan bahwa unsur utama penyusun lumpur adalah kalsium (Ca) diikuti oleh unsur-unsur minor seperti Si, Al, Fe, dan Ti. Konsistensi antara hasil XRF dan XRD memperkuat validitas data bahwa sampel lumpur Desa Kufar merupakan material alam yang didominasi oleh kalsium karbonat ($CaCO_3$).

Ukuran Kristal

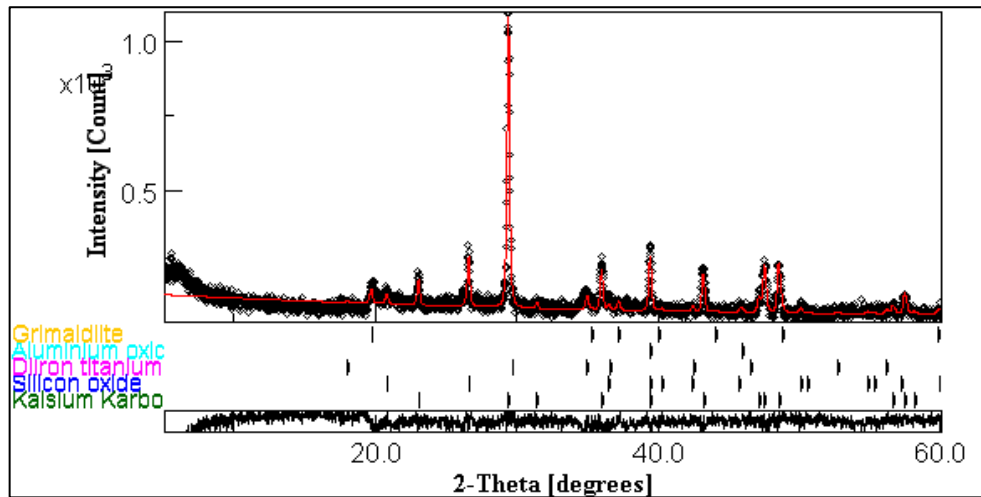
Selanjutnya, data XRD dianalisis menggunakan perangkat lunak MAUD untuk mengetahui ukuran kristal dari sampel lumpur di Desa Kufar. Perangkat lunak MAUD menggunakan metode *Rietveld* yaitu pencocokan data terhitung dengan data terukur. Hasil penghalusan menggunakan Maud dapat diterima jika nilai GoF-nya lebih kecil dari 2 (<2) (Kisi dan Howard, 2012). Untuk membuat data terhitung atau model, perangkat lunak Maud juga menggunakan file CIF

yang digunakan pada proses analisis menggunakan *Rietica*. Gambar 5 merupakan grafik hasil pencocokan data terhitung dengan data terukur hasil pengujian XRD menggunakan Maud yang mana garis hitam adalah data terukur atau hasil pengujian XRD dan garis merah adalah data terhitung.

Hasil penghalusan data terhitung dan data terukur menggunakan MAUD pada Tabel 4 menunjukkan ukuran kristal dari lumpur di Desa Kufar. Fasa kalsit memiliki ukuran kristal sebesar 137 nm dan fasa kuarsa memiliki ukuran kristal sebesar 94 nm. Sedangkan ukuran kristal untuk fasa aluminium oksida, ulvoespinel, dan grimaldi deuterate tidak terdefinisi karena intensitasnya yang rendah. Intensitas yang rendah menandakan bahwa kandungan fasa dalam sampel sangat kecil sehingga perhitungan ukuran kristal melalui model *Rietveld* menjadi tidak terdefinisi secara statistik. Dalam studi analisis nanofase, fasa minor dengan intensitas di bawah 5% sering kali menghasilkan nilai ukuran kristal yang tidak dapat didefinisikan dengan baik (Djerdj, 2019).

Ukuran kristal yang lebih besar pada fasa kalsit dibandingkan kuarsa menunjukkan bahwa proses kristalisasi kalsit di lingkungan tersebut berlangsung dalam kondisi yang lebih stabil secara termodinamika yang memungkinkan pertumbuhan kristal yang lebih sempurna. Hal ini sejalan dengan temuan Wolthers dkk. (2012) yang melaporkan bahwa pertumbuhan kristal kalsit pada sistem alami cenderung lebih cepat dibandingkan kuarsa karena solubilitas kalsium karbonat yang lebih tinggi serta kinetika presipitasi yang dipengaruhi oleh pH dan suhu lingkungan (Wolthers dkk., 2012).

Sebaliknya, ukuran kristal kuarsa yang lebih kecil (~94 nm) mengindikasikan bahwa mineral ini kemungkinan terbentuk melalui proses sekunder atau berasal dari pelapukan mekanik material silikat yang terbawa ke permukaan. Ukuran kristal yang relatif halus juga dapat menunjukkan keterbatasan energi kristalisasi atau tingginya laju nukleasi selama pembentukan fasa tersebut. Kuarsa dengan ukuran kristal di bawah 100 nm sering dihasilkan dari proses re-deposisi silika dalam sistem sedimen berair atau vulkanik (Zueva dkk., 2023).



Gambar 5. Hasil analisis data XRD sampel lumpur di Desa Kufar menggunakan software Maud

Tabel 4. Hasil penghalusan data XRD sampel lumpur di Desa Kufar menggunakan MAUD dengan metode Rietveld

Sampel	Fasa (Formula)	Parameter Kesesuaian (GoF)	Ukuran Kristal (nm)
Lumpur	Kalsit (CaCO ₃)	1,73	137 (6)
	Kuarsa (SiO ₂)		94 (17)

Hasil analisis XRD dan XRF menunjukkan konsistensi bahwa material lumpur di Desa Kufar didominasi oleh kalsium karbonat (CaCO₃). Dominasi mineral ini menunjukkan bahwa endapan lumpur tersebut merupakan sumber CaCO₃ alami yang relatif aman dan berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku semen, mortar, dan filler pada beton mengingat CaCO₃ merupakan komponen penting dalam produksi semen dan peningkatan sifat mekanik material bangunan (Wiwattanachang dkk., 2023). Pada industri manufaktur polimer, CaCO₃ dapat digunakan sebagai filler (bahan pengisi) dalam plastik, karet, dan komposit untuk meningkatkan kekuatan, kekakuan, serta menurunkan biaya produksi (Bekuma dan Nigus, 2026). Selain itu, dalam industri kesehatan dan farmasi, CaCO₃ banyak digunakan sebagai bahan antasida, suplemen kalsium, serta bahan tambahan dalam formulasi tablet (Ambrogi, 2023).

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengkarakterisasi lumpur bor dari Desa Kufar, Maluku, secara komprehensif dengan pendekatan XRF dan XRD melalui analisis kuantitatif berbasis metode Rietveld. Hasil XRF menunjukkan bahwa material tersebut didominasi oleh kalsium (57,9 wt.%) sebagai unsur utama yang secara struktural terepresentasikan dalam bentuk fasa kalsit (CaCO₃) sebesar 81,63%, dengan

ukuran kristal 137 nm. Fasa minor yang teridentifikasi meliputi kuarsa (6,62%), aluminium oksida (4,49%), ulvoespinel (3,89%), dan grimaldi deuterate (3,37%). Nilai *Goodness of Fit* yang kecil (GoF = 1,27 untuk Rietica dan 1,73 untuk MAUD) mengonfirmasi keakuratan model *refinement*. Konsistensi antara data XRF dan XRD memperkuat bahwa lumpur Desa Kufar merupakan sumber CaCO₃ alami yang berpotensi untuk pengujian lanjutan terhadap sifat fungsional material guna memvalidasi kelayakannya sebagai bahan baku industri.

DAFTAR PUSTAKA

Aditio, M., Hutabarat, J., Haryanto, A. D., Catur, H., dan Widiatmoko (2018): Persebaran Sedimen Permukaan Dasar Laut dan Mineral Logam di Perairan Saumlaki dan Sekitarnya, Kabupaten Maluku Tenggara Barat, Provinsi Maluku, *Geoscience Journal*, 2(1), 15–26. <https://doi.org/10.24198/pgi.v2i1.15593>

Ali, A., Chiang, Y. W., dan Santos, R. M. (2022): X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions, *Minerals*, 12(2), 205. <https://doi.org/10.3390/min12020205>

- Alloway, B. J. (Ed.) (2013): *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability* (Environmental Pollution), Springer Netherlands, Dordrecht, **22**.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Ambrogi, V. (2023): A New Challenge for the Old Excipient Calcium Carbonate: To Improve the Dissolution Rate of Poorly Soluble Drugs, *Pharmaceutics*, **15**(1), 300.
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15010300>
- Bekuma, N., dan Nigus, H. (2026): Experimental analysis of glass fiber reinforced epoxy composite with calcium carbonate (CaCO₃) as filler for automobile body panel application using multi-objective optimization, *Discover Materials*, **6**(1), 87.
<https://doi.org/10.1007/s43939-026-00568-9>
- Bortolotti, M., Lutterotti, L., dan Peponi, G. (2017): Combining XRD and XRF analysis in one Rietveld-like fitting, *Powder Diffraction*, **32**(S1), S225–S230.
<https://doi.org/10.1017/S0885715617000276>
- Ciptawati, E., Hilfi Azra Dzirkulloh, M., Oki Septiani, M., Rinata, V., Ainur Rokhim, D., Azfa Fauziyyah, N., dan Sribuana, D. (2022): Analisis Kandungan Mineral dari Lumpur Panas Sidoarjo sebagai Potensi Sumber Silika dan Arah Pemanfaatannya, *IJCA (Indonesian Journal of Chemical Analysis)*, **5**(1), 18–28.
<https://doi.org/10.20885/ijca.vol5.iss1.art3>
- Ciuła, J., Wiewiórska, I., Kulczycka, J., dan Willson, J. (2024): Analysis of the Physical and Chemical Composition of Sludge from the Water Treatment Plant, *Rocznik Ochrona Środowiska*, **26**, 479–492.
<https://doi.org/10.54740/ros.2024.045>
- Cosentino, I., Liendo, F., Arduino, M., Restuccia, L., Bensaid, S., Deorsola, F., dan Ferro, G. A. (2020): Nano CaCO₃ particles in cement mortars towards developing a circular economy in the cement industry, *Procedia Structural Integrity*, **26**, 155–165.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.019>
- Deer, W. A., Howie, R. A., dan Zussman, J. (2013): *An introduction to the rock-forming minerals* (Third edition), The Mineralogical Society, London, 498.
- Dietel, J., Dohrmann, R., Guggenberger, G., Meyer-Stüve, S., Turner, S., Schippers, A., Kaufhold, S., Butz-Braun, R., Condrón, L. M., dan Mikutta, R. (2017): Complexity of clay mineral formation during 120,000 years of soil development along the Franz Josef chronosequence, New Zealand, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, **60**(1), 23–35.
<https://doi.org/10.1080/00288306.2016.1245668>
- Djerdj, I. (Ed.) (2019): *Rietveld Refinement in the Characterization of Crystalline Materials*, MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
<https://doi.org/10.3390/books978-3-03897-528-1>
- Ely, S., Aththariq, M. I., Hilmi, A. R., Baqiya, M. A., Zainuri, M., dan Pratapa, S. (2023): Phase formation and crystallite size of tetragonal zirconia nanocrystals calcined between 825 and 875 °C, *AIP Conference Proceedings*, **2604**(1), 020005.
<https://doi.org/10.1063/5.0114825>
- Gebrehiwet, T. A., Redden, G. D., Fujita, Y., Beig, M. S., dan Smith, R. W. (2012): The Effect of the CO₃²⁻ to Ca²⁺ Ion activity ratio on calcite precipitation kinetics and Sr²⁺ partitioning, *Geochemical Transactions*, **13**(1).
- Gibran, A. K., Kusworo, A., Wahyudiono, J., dan Purwasatriya, E. B. (2022): Proses Diagenesis Batupasir Formasi Kanikeh, Seram Bagian Timur, Maluku, Indonesia, *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, **23**(2), 113–122.
<https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v23i2.412>
- González, M. F., Saadatkhah, N., dan Patience, G. S. (2024): Experimental methods in chemical engineering: X-ray fluorescence—XRF, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **102**(6), 2004–2018.
<https://doi.org/10.1002/cjce.25218>
- Kisi, E. H., dan Howard, C. J. (2012): *Applications of Neutron Powder Diffraction*, Oxford University Press, 509.
- Lattard, D., Engelmann, R., Kontny, A., dan Sauerzapf, U. (2006): Curie temperatures of synthetic titanomagnetites in the Fe-Ti-O system: Effects of composition, crystal chemistry, and thermomagnetic methods, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **111**(B12), 2006JB004591.
<https://doi.org/10.1029/2006JB004591>
- Luo, C., Yang, X., dan Li, J. (2022): Mechanical Properties of Single-Crystal Calcite and Their Temperature and Strain-Rate Effects, *Materials*, **15**(13), 4613.
<https://doi.org/10.3390/ma15134613>

- Lutterotti, L., Pillière, H., Fontugne, C., Boullay, P., dan Chateigner, D. (2019): Full-profile search-match by the Rietveld method, *Journal of Applied Crystallography*, **52**(3), 587–598. <https://doi.org/10.1107/S160057671900342X>
- Martini, R., Zaninetti, L., Lathuillière, B., Cirilli, S., Cornée, J.-J., dan Villeneuve, M. (2004): Upper Triassic carbonate deposits of Seram (Indonesia): palaeogeographic and geodynamic implications, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **206**(1), 75–102. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2003.12.020>
- Nazmin, S., Das, A., Khan, M. Z., Amin, M. S., dan Hanif, M. (2019): Soil Clay Mineralogical Phase Analysis of Ganges Floodplain Soils by XRD and XRF, *Open Journal of Soil Science*, **09**(12), 298. <https://doi.org/10.4236/ojss.2019.912019>
- Nejad, F. M., Tolouei, M., Nazari, H., dan Naderan, A. (2018): Effects of Calcium Carbonate Nanoparticles and Fly Ash on Mechanical and Permeability Properties of Concrete, *Advances in Civil Engineering Materials*, **7**(1), 651–668. <https://doi.org/10.1520/ACEM20180066>
- Peng, Y., Musah, M., Via, B., dan Wang, X. (2021): Calcium Carbonate Particles Filled Homopolymer Polypropylene at Different Loading Levels: Mechanical Properties Characterization and Materials Failure Analysis, *Journal of Composites Science*, **5**(11), 302. <https://doi.org/10.3390/jcs5110302>
- Purwaningsih, S. Y., Rosidah, N., Zainuri, M., Triwikantoro, T., Pratapa, S., dan Darminto, D. (2019): Comparison of X-ray diffraction pattern refinement using Rietica and MAUD of ZnO nanoparticles and nanorods: 9th International Conference on Physics and Its Applications, ICOPIA 2018, *Journal of Physics: Conference Series*, **1153**(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012070>
- Qi, J., Lu, X., Sai, N., Liu, Y., dan Du, W. (2024): Heavy metal concentrations in soil and ecological risk assessment in the vicinity of Tianzhu Industrial Park, Qinghai-Tibet Plateau, *PeerJ*, **12**, e18510. <https://doi.org/10.7717/peerj.18510>
- Wahab, N., Octavia, R., Ramli, I., dan Syaputra, I. (2025): Pengujian Unsur Logam Co, Oksida MgO dan Al₂O₃ Pada Jenis Tanah Limonite Dengan Menggunakan Metode X-Ray Fluorescence (XRF), *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, **9**(1), 14–21. <https://doi.org/10.32493/jitk.v9i1.44851>
- Wiwattanachang, N., Vichalai, C., dan Gao, P. H. (2023): Influence of calcium carbonate sludge on cement-stabilized subgrade quality as investigated by means of electrical resistivity measurements, *Scientific Reports*, **13**(1), 19392. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46282-x>
- Wolthers, M., Nehrke, G., Gustafsson, J. P., dan Van Cappellen, P. (2012): Calcite growth kinetics: Modeling the effect of solution stoichiometry, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **77**, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.11.003>
- Yu, Y., Zhang, J., Wang, H., dan Xin, Z. (2020): Silanized Silica-Encapsulated Calcium Carbonate@Natural Rubber Composites Prepared by One-Pot Reaction, *Polymers*, **12**(11), 2668. <https://doi.org/10.3390/polym12112668>
- Zueva, O. A., Postnikova, O. V., dan Postnikov, A. V. (2023): Nanoquartz in Late Cretaceous Deposits in the Lower Berezovskaya Subformation, *Minerals*, **13**(8), 993. <https://doi.org/10.3390/min13080993>