

SYNTHESIS, CHARACTERIZATION, AND APPLICATION OF MGO FROM BITTERN: A RIVIEW 2018 - 2025

Devilia Yuanita [□], Nuni Widiarti

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang
Gedung D6 Kampus Sekaran Gunungpati Telp. (024)8508112 Semarang 50229

Info Artikel

Diterima: 09-04-2026
Disetujui: 16-07-2026
Dipublikasikan 03-08-2026

Keywords:

Magnesium Oxide (MgO)
Bittern
Synthesis
Characterization
Application

Abstrak

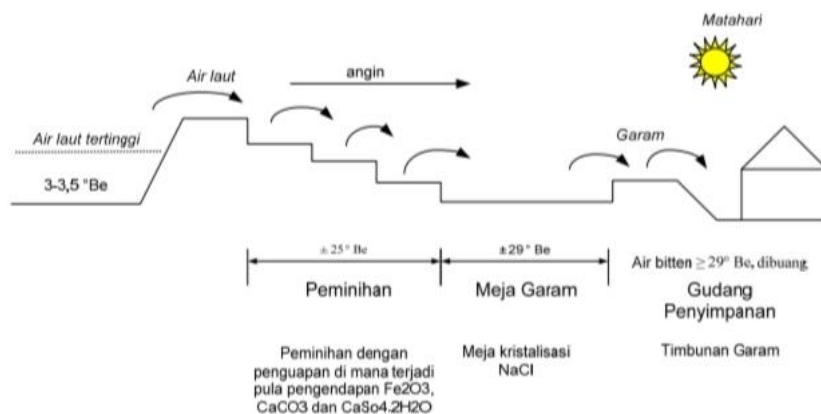
Bittern, produk samping cair dari industri garam, kini telah muncul sebagai bahan baku alternatif yang menjanjikan dan berkelanjutan untuk sintesis Magnesium Oksida (MgO). Tinjauan pustaka sistematis ini mengkaji secara komprehensif perkembangan terkini dalam periode 2018-2025 terkait sintesis, karakterisasi, dan beragam aplikasi fungsional MgO yang berasal dari bittern, yang sepenuhnya sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular. Metode sintesis utama seperti presipitasi kimia menggunakan NaOH atau $\text{Ca}(\text{OH})_2$ serta elektrolisis didiskusikan secara mendalam dan kritis untuk menyoroti parameter proses kunci dan pengaruhnya terhadap sifat produk akhir yang dihasilkan. Hasil karakterisasi MgO dirangkum meliputi analisis struktur kristal menggunakan XRD, morfologi permukaan melalui SEM dan TEM, serta penentuan luas permukaan spesifik dengan metode BET untuk memahami sifat fisikokimia material. Tinjauan ini mengeksplorasi aplikasi MgO bittern sebagai adsorben polutan (zat warna dan ion logam berat), katalis, fotokatalis, agen antibakteri, bahan refraktori, nutrisi pertanian, serta prekursor material maju di industri. Pemanfaatan limbah bittern ini memberikan implikasi lingkungan yang sangat positif melalui produksi material bernilai tambah tinggi, sekaligus mengurangi pencemaran air laut secara signifikan. Kesimpulannya, valorisasi bittern menjadi MgO memiliki signifikansi tinggi, meskipun tantangan terkait optimasi proses, peningkatan skala, dan eksplorasi aplikasi inovatif masih perlu diatasi secara strategis untuk mendukung pengembangan teknologi hijau yang lebih berkelanjutan di masa depan.

Abstract

Bittern, a liquid byproduct of the salt industry, has now emerged as a promising and sustainable alternative raw material for the synthesis of magnesium oxide (MgO). This systematic literature review comprehensively examines the latest developments from 2018 to 2025 regarding the synthesis, characterization, and various functional applications of MgO derived from bittern, which is fully aligned with the principles of the circular economy. Major synthesis methods, such as chemical precipitation using NaOH or $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and electrolysis, are discussed in depth and critically to highlight key process parameters and their influence on the properties of the resulting final product. The results of MgO characterization are summarized, including crystal structure analysis using XRD, surface morphology via SEM and TEM, and determination of specific surface area using the BET method to understand the material's physicochemical properties. This review explores the applications of MgO from bittern as an adsorbent for pollutants (dyes and heavy metal ions), a catalyst, a photocatalyst, an antibacterial agent, a refractory material, an agricultural nutrient, and a precursor for advanced materials in industry. The utilization of this bittern waste has highly positive environmental implications through the production of high-value-added materials, while significantly reducing marine water pollution. In conclusion, the valorization of bittern into MgO is of great significance, although challenges related to process optimization, scale-up, and the exploration of innovative applications still need to be addressed.

Pendahuluan

Magnesium Oksida (MgO), sebuah senyawa anorganik berbentuk padatan putih, merupakan material industri yang sangat vital karena kombinasi sifat uniknya. Dengan titik leleh sangat tinggi (sekitar 2800 °C), stabilitas termal yang baik, dan sifat basa, MgO menjadi komponen krusial dalam berbagai sektor (Advanced Ceramics Material, 2023). Aplikasinya membentang dari industri refraktori sebagai bahan pelapis tungku suhu tinggi, hingga sebagai katalis atau pendukung katalis dalam reaksi kimia organik dan petrokimia. Sifat adsorptifnya, terutama dalam bentuk nanopartikel dengan luas permukaan tinggi, menjadikannya efektif untuk remediasi lingkungan, seperti menghilangkan zat warna dan ion logam berat dari air limbah (Kun-asa *et al.*, 2021). Di bidang pertanian, MgO berfungsi sebagai sumber magnesium, unsur hara esensial bagi tanaman (Febriani, *et al.*, 2020). Selain itu, nanopartikel MgO menunjukkan aktivitas antibakteri yang kuat, membuka peluang aplikasi dalam produk sanitasi dan biomedis. Peningkatan permintaan global untuk MgO berkualitas tinggi mendorong pencarian sumber bahan baku alternatif yang lebih berkelanjutan dan ekonomis dibandingkan metode konvensional yang bergantung pada penambangan mineral magnesit atau ekstraksi dari air laut murni. Pada konteks ini, bittern muncul sebagai solusi yang sangat menjanjikan.



Gambar 1. Proses Pembentukan Bittern dari Air Laut (Nur Taufiq Syamsudin Putra Jaya, 2016).

Bittern adalah produk samping cair yang sangat pekat, tersisa setelah kristalisasi dan pemanenan natrium klorida (NaCl) dari air laut atau air garam dalam proses produksi garam (Ningrum & Jumaeri, 2022). Cairan ini, yang sering dianggap sebagai limbah industri, memiliki rasa pahit khas karena konsentrasi garam magnesium yang sangat tinggi, terutama dalam bentuk Magnesium Klorida (MgCl₂) dan Magnesium Sulfat (MgSO₄) (Kumaresan & Vaithyanathan, 2016). Komposisi kimia bittern sangat kaya, dengan kandungan magnesium dapat mencapai 89.000 hingga 101.000 ppm, jauh lebih tinggi dibandingkan air laut biasa. Selain magnesium, bittern juga mengandung ion-ion lain dalam konsentrasi signifikan seperti K⁺, Na⁺, Cl⁻, dan SO₄²⁻, serta elemen jejak seperti Bromin dan Boron. Komposisi ini dapat bervariasi tergantung pada sumber air garam dan kondisi proses evaporasi, yang menjadi pertimbangan penting dalam perancangan proses sintesis MgO.

Potensi ekonomi bittern sangat besar, mengingat volumenya yang melimpah di seluruh dunia. Di India saja, produksi bittern diperkirakan mencapai 70 lakh ton per tahun, setara dengan produksi garamnya (Kumaresan & Vaithyanathan, 2016). Pemanfaatan bittern untuk sintesis MgO mengubah limbah menjadi produk bernilai tambah, sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular. Hal ini tidak hanya menciptakan aliran pendapatan baru bagi industri garam tetapi juga mengatasi masalah lingkungan yang serius. Pembuangan bittern secara langsung ke perairan dapat menyebabkan peningkatan salinitas secara drastis, mengganggu ekosistem akuatik, dan bahkan menyebabkan kematian biota laut seperti yang dilaporkan terjadi pada penyu hijau di Meksiko. Kandungan elemen tertentu yang lebih tinggi dari normal juga dapat bersifat toksik. Oleh karena itu, urgensi pemanfaatan bittern didorong oleh dua faktor utama: pengurangan dampak lingkungan dari limbah dan valorisasi sumber daya untuk menghasilkan material fungsional.

Pemilihan bittern sebagai bahan baku sintesis MgO didasarkan pada beberapa keunggulan utama: ketersediaan yang melimpah dan berkelanjutan, biaya bahan baku yang sangat rendah, dan kandungan magnesium yang tinggi. Namun, tantangan utama terletak pada keberadaan ion-ion pengotor yang dapat mempengaruhi kemurnian dan sifat produk akhir MgO (Subhan *et al.*, 2024). Tantangan ini menuntut pengembangan proses pemurnian atau metode sintesis yang selektif, seperti desulfatasi untuk menghilangkan ion sulfat sebelum presipitasi. Keberadaan pengotor ini justru telah memicu inovasi dalam metode sintesis, mendorong penelitian untuk menghasilkan MgO dengan spesifikasi tertentu (misalnya, kemurnian tinggi atau ukuran nano) dari bahan baku yang kompleks ini (Saefudin *et al.*, 2021).

Penelitian dalam periode 2018-2025 menunjukkan minat yang terus meningkat pada valorisasi bittern menjadi MgO, khususnya dalam bentuk nanopartikel. Nanopartikel MgO diminati karena luas permukaan spesifiknya yang tinggi dan reaktivitas yang meningkat, yang sangat bermanfaat untuk aplikasi canggih seperti katalisis dan adsorpsi (Park *et al.*, 2016). Metode sintesis yang paling umum dilaporkan adalah presipitasi kimia dan elektrolisis, dengan berbagai teknik karakterisasi canggih (XRD, SEM, TEM, BET, FTIR, TGA) digunakan untuk menganalisis produk secara mendalam. Aplikasi MgO dari bittern telah dieksplorasi secara luas, mencakup bidang adsorpsi polutan, katalisis, agen antibakteri, bahan refraktori, dan pertanian. Keberhasilan dalam berbagai aplikasi ini seringkali dikaitkan dengan kemampuan untuk menghasilkan MgO dengan sifat yang terkontrol dari sumber limbah yang ekonomis ini.

Tujuan dari tinjauan pustaka ini adalah untuk merangkum dan menganalisis secara kritis perkembangan terkini (2018-2025) mengenai sintesis, karakterisasi, dan aplikasi MgO yang berasal dari bittern. Ruang lingkup tinjauan ini mencakup analisis metode sintesis utama, ringkasan hasil karakterisasi dari berbagai teknik analitik, eksplorasi berbagai bidang aplikasi, serta pembahasan implikasi lingkungan dan potensi pengembangan lebih lanjut. Tinjauan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman komprehensif tentang status terkini penelitian di bidang ini dan mengidentifikasi peluang serta tantangan untuk masa depan.

Metode

Artikel disusun menggunakan pendekatan metodologis yang sistematis untuk memastikan cakupan yang komprehensif dan analisis yang objektif terhadap literatur ilmiah terkini. Proses ini dirancang untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mengintegrasikan temuan-temuan relevan dari berbagai studi yang berfokus pada sintesis, karakterisasi, dan aplikasi Magnesium Oksida (MgO) dari bittern.

Strategi pencarian literatur dilakukan secara elektronik melalui beberapa basis data ilmiah utama, termasuk Scopus, Web of Science, Google Scholar, dan ScienceDirect. Basis data ini dipilih karena cakupannya yang luas terhadap jurnal internasional yang telah melalui proses *peer-review*, prosiding konferensi, dan publikasi akademis lainnya. Pencarian dilakukan dengan menggunakan kombinasi kata kunci yang relevan dalam Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia. Kata kunci yang digunakan antara lain: "MgO from bittern", "magnesium oxide synthesis bittern", "characterization MgO bittern", "applications MgO bittern", "bittern valorization", "sintesis MgO bittern", dan "pemanfaatan bittern". Fokus utama pencarian adalah pada publikasi yang diterbitkan antara tahun 2018 dan 2025, meskipun beberapa artikel fundamental dari tahun 2016-2017 juga disertakan jika sangat relevan dan sering dikutip oleh literatur yang lebih baru.

Kriteria inklusi dan eksklusi diterapkan untuk memastikan relevansi dan kualitas informasi. Kriteria inklusi meliputi: (1) jenis publikasi berupa artikel jurnal *peer-review*, prosiding konferensi, atau bab buku yang relevan; (2) fokus penelitian secara spesifik pada sintesis, karakterisasi, atau aplikasi MgO yang menggunakan bittern sebagai bahan baku utama; (3) publikasi dalam Bahasa Inggris atau Bahasa Indonesia; dan (4) rentang tahun publikasi antara 2016-2025. Sebaliknya, kriteria eksklusi meliputi: (1) studi yang menggunakan sumber magnesium selain bittern (kecuali sebagai perbandingan); (2) artikel yang tidak secara jelas mengidentifikasi bittern sebagai prekursor; (3) publikasi di luar rentang tahun yang ditetapkan (kecuali referensi fundamental); dan (4) publikasi berkualitas rendah seperti abstrak saja atau laporan non-ilmiah. Proses seleksi dimulai dari peninjauan judul dan abstrak, diikuti dengan pemeriksaan teks lengkap untuk artikel yang berpotensi relevan.

Data diekstraksi secara sistematis setelah artikel-artikel terpilih dikumpulkan. Informasi yang diekstraksi dari setiap artikel mencakup detail metode sintesis (reagen, parameter proses seperti suhu, pH, waktu reaksi, suhu kalsinasi), hasil karakterisasi utama (fasa kristal dan ukuran kristalit dari XRD, morfologi dari SEM/TEM, luas permukaan dari BET), serta temuan kunci terkait aplikasi (kapasitas adsorpsi, efisiensi katalitik, zona hambat antibakteri). Data kualitatif dan kuantitatif ini kemudian dikategorikan berdasarkan tema utama tinjauan (metode sintesis, karakterisasi, aplikasi).

Pendekatan sintesis naratif digunakan untuk mengorganisir dan mengintegrasikan informasi dari berbagai studi. Temuan-temuan dari studi individual dibandingkan dan dikontraskan untuk mengidentifikasi tren umum, pola yang konsisten, variasi, atau bahkan kontradiksi dalam literatur. Penekanan diberikan pada upaya untuk membangun hubungan sebab-akibat, misalnya, bagaimana parameter sintesis mempengaruhi sifat fisikokimia MgO, dan bagaimana sifat-sifat ini pada gilirannya mempengaruhi kinerja dalam aplikasi spesifik. Kesimpulan umum ditarik berdasarkan bobot bukti kolektif dari literatur yang ditinjau, dengan tujuan memberikan gambaran yang koheren dan komprehensif, bukan sekadar ringkasan studi individual. Pendekatan metodologis yang transparan ini bertujuan untuk memastikan ketelitian akademis dan kredibilitas dari tinjauan pustaka yang disajikan.

Hasil dan Pembahasan

Metode Sintesis MgO dari Bittern

Sifat yang paling menonjol dari MgO adalah stabilitas termalnya yang luar biasa. Dengan titik leleh yang sangat tinggi, mencapai sekitar 2800 °C, MgO mampu menahan kondisi termal yang ekstrem di mana banyak material lain akan meleleh atau terdekomposisi. Sifat ini, dikombinasikan dengan konduktivitas termal yang baik namun konduktivitas listrik yang sangat rendah pada suhu tinggi, menjadikannya material isolator termal dan elektrik yang ideal untuk aplikasi suhu tinggi. Secara kimia, MgO adalah oksida basa yang menunjukkan ketahanan yang sangat baik terhadap korosi oleh slag basa (limbah cair dalam proses metalurgi) dan lingkungan basa lainnya. Sifat basa ini juga menjadi dasar fungsionalitasnya sebagai katalis heterogen. Dari perspektif biologis, MgO menunjukkan biokompatibilitas yang baik dan dapat terurai secara hayati (*biodegradable*) dalam lingkungan fisiologis, melepaskan ion magnesium (Mg^{2+}) yang merupakan kofaktor esensial untuk lebih dari 300 reaksi enzimatik dalam tubuh manusia (Saber *et al.*, 2024). Sifat-sifat ini membuka pintu bagi aplikasi biomedis yang inovatif.

Sifat fisikokimia dan kinerja Magnesium Oksida (MgO) sangat dipengaruhi oleh metode sintesis yang digunakan, terutama dalam hal ukuran partikel, luas permukaan spesifik, kristalinitas, dan morfologi akhir. Pada konteks pemanfaatan bittern, terdapat dua jalur sintesis yang paling banyak dieksplorasi untuk memproduksi MgO dari bittern, yaitu presipitasi kimia dan elektrolisis. Setiap metode menawarkan kelebihan dan tantangan unik dalam upaya mengubah limbah cair ini menjadi material bernilai tinggi.

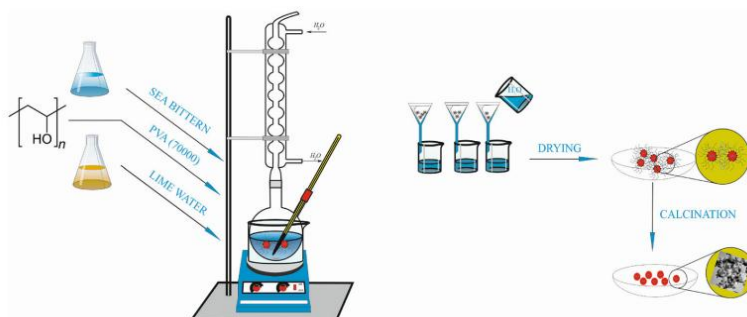
Metode Presipitasi

Metode presipitasi adalah pendekatan yang paling banyak dilaporkan dan dianggap paling matang untuk produksi MgO dari bittern dalam skala laboratorium hingga pra-desain pabrik. Prinsip dasarnya adalah reaksi pengendapan ion magnesium (Mg^{2+}) yang melimpah dalam bittern menjadi senyawa magnesium yang tidak larut, biasanya Magnesium Hidroksida ($Mg(OH)_2$), dengan penambahan agen presipitasi basa (Amrulloh *et al.*, 2017). Endapan $Mg(OH)_2$ yang terbentuk kemudian dipisahkan, dicuci untuk menghilangkan pengotor, dikeringkan, dan akhirnya dikalsinasi pada suhu tinggi untuk menghasilkan produk akhir MgO melalui reaksi dekomposisi termal: $Mg(OH)_{2(s)} \rightarrow MgO_{(s)} + H_2O_{(g)}$ (Romano *et al.*, 2023).

- **Reagen Presipitasi:** Pemilihan reagen presipitasi adalah keputusan krusial yang mempengaruhi kemurnian produk dan keekonomian proses.
- **Natrium Hidroksida (NaOH):** NaOH adalah basa kuat yang sering dipilih karena laju reaksinya yang cepat dan kemampuannya menghasilkan $Mg(OH)_2$ dengan kemurnian yang relatif tinggi (Battaglia *et al.*, 2022). Reaksi yang terjadi adalah $MgCl_{2(aq)} + 2NaOH_{(aq)} \rightarrow Mg(OH)_{2(s)} + 2NaCl_{(aq)}$ dan $MgSO_{4(aq)} + 2NaOH_{(aq)} \rightarrow Mg(OH)_{2(s)} + Na_2SO_{4(aq)}$. Keuntungan utama penggunaan NaOH adalah kontrol yang baik terhadap pH

larutan, yang penting untuk pengendapan selektif $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Namun, biaya NaOH yang relatif lebih tinggi dan potensi kontaminasi ion natrium pada produk akhir menjadi pertimbangan (Alamdari *et al.*, 2008).

- **Kalsium Hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, kapur):** $\text{Ca}(\text{OH})_2$ merupakan alternatif yang lebih murah dan menarik secara ekonomi. Reaksi yang terjadi adalah $\text{Mg}^{2+}_{(\text{aq})} + \text{Ca}(\text{OH})_{2(\text{s/aq})} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_{2(\text{s})} + \text{Ca}^{2+}_{(\text{aq})}$. Namun, penggunaannya memiliki tantangan. Kelarutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang rendah dalam air dapat memperlambat laju reaksi, dan yang lebih penting, ada risiko kontaminasi kalsium pada produk MgO jika kondisi reaksi tidak dikontrol dengan cermat (Jamal Salih, 2024).
- **Parameter Proses Kritis:** Keberhasilan metode presipitasi sangat bergantung pada kontrol yang cermat terhadap berbagai parameter proses untuk mengarahkan nukleasi dan pertumbuhan kristal.
- **Suhu dan pH:** Suhu reaksi dan pH larutan adalah parameter fundamental. Pengendapan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ terjadi pada kondisi basa (pH tinggi). Studi oleh Prabowo *et al.* (2022) menunjukkan bahwa suhu operasi optimal untuk konversi maksimum $\text{Mg}(\text{OH})_2$ dari bittern menggunakan NaOH adalah pada 35 – 37°C dengan konversi reaksi mencapai 99% (Park *et al.*, 2016).
- **Konsentrasi dan Rasio Molar:** Konsentrasi reagen dan rasio molar antara agen presipitasi dengan ion Mg^{2+} dalam bittern mempengaruhi efisiensi pengendapan, kemurnian, dan rendemen.
- **Pengadukan:** Kecepatan pengadukan memastikan homogenitas campuran, memfasilitasi transfer massa, dan secara langsung mempengaruhi laju nukleasi serta pertumbuhan kristal. Peningkatan kecepatan pengadukan secara eksplisit menunjukkan bahwa dari 120 rpm hingga 600 rpm selama sintesis menghasilkan peningkatan ukuran dan kristalinitas partikel MgO dari sekitar 50 nm menjadi 180 nm (Park *et al.*, 2016).
- **Waktu Reaksi dan Penuaan (Aging):** Waktu kontak yang cukup antara reagen dan periode penuaan endapan setelah presipitasi dapat meningkatkan kesempurnaan pertumbuhan kristal $\text{Mg}(\text{OH})_2$ dan kemurniannya dengan memungkinkan pelarutan dan pengendapan kembali partikel yang lebih kecil menjadi partikel yang lebih besar dan lebih stabil (pematangan Ostwald).
- **Suhu dan Waktu Kalsinasi:** Tahap kalsinasi adalah langkah transformatif yang sangat menentukan sifat akhir MgO . Suhu kalsinasi, yang umumnya berkisar antara 500°C hingga lebih dari 900°C, secara signifikan mempengaruhi kristalinitas, ukuran kristalit, luas permukaan spesifik, dan morfologi partikel MgO . Suhu yang lebih tinggi menghasilkan kristalinitas yang lebih baik dan ukuran kristalit yang lebih besar, namun seringkali dengan mengorbankan luas permukaan spesifik akibat sintering (Liu *et al.*, 2021).
- **Variasi Metode:** Untuk mengatasi tantangan spesifik seperti keberadaan ion karbonat, beberapa variasi metode telah dikembangkan. Metode **dekarboksilasi-presipitasi** melibatkan penambahan asam seperti H_2SO_4 sebelum penambahan agen presipitasi. Langkah ini bertujuan untuk menghilangkan ion karbonat atau bikarbonat dari bittern, yang jika tidak dihilangkan dapat mengganggu pembentukan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ murni atau membentuk MgCO_3 sebagai produk samping. Park *et al.* (2016) melaporkan bahwa penggunaan H_2SO_4 untuk dekarboksilasi sebelum penambahan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ secara signifikan meningkatkan kandungan MgO dalam produk akhir.



Gambar 2. Diagram skematis (atau bagan alir) dari proses pembuatan magnesium hidroksida/oksida dari air asin sisa (bittern) air laut (Jakić *et al.*, 2024).

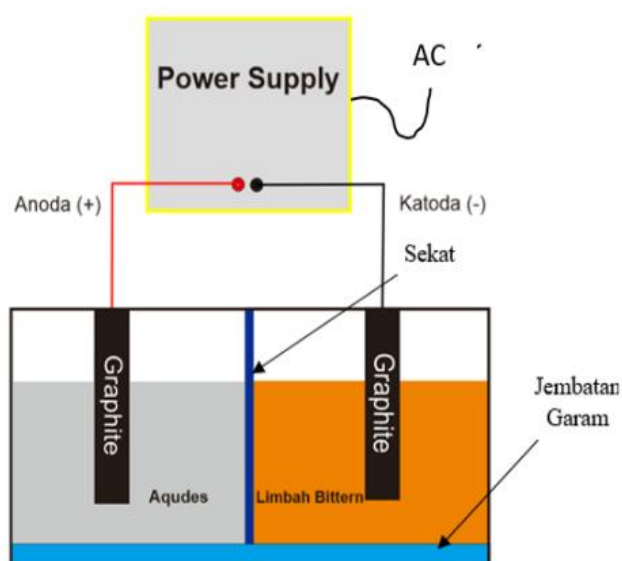
Metode Elektrolisis

Metode elektrolisis merupakan alternatif yang lebih "bersih" secara kimiawi untuk sintesis MgO dari bittern, karena tidak memerlukan penambahan reagen basa dari luar. Prinsip dasarnya adalah penggunaan energi listrik untuk menginduksi reaksi redoks dalam larutan bittern (Megawati *et al.*, 2021). Di katoda (elektroda negatif), molekul air direduksi untuk menghasilkan gas hidrogen dan ion hidroksida (OH^-) secara *in-situ*: $2\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_{2(\text{g})} + 2\text{OH}^-_{(\text{aq})}$. Ion OH^- yang baru terbentuk ini kemudian segera bereaksi dengan ion Mg^{2+} yang melimpah di sekitarnya untuk mengendapkan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ langsung pada atau di dekat permukaan katoda: $\text{Mg}^{2+}_{(\text{aq})} + 2\text{OH}^-_{(\text{aq})} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_{2(\text{s})}$ (Yang *et al.*, 2023). Endapan ini kemudian dipanen, dicuci, dikeringkan, dan dikalsinasi menjadi MgO, serupa dengan metode presipitasi.

- **Desain Sel dan Parameter Proses:**

- **Desain Sel:** Umumnya, sel elektrolisis dua kompartemen digunakan, di mana kompartemen anoda dan katoda dipisahkan oleh jembatan garam (misalnya, NaCl dalam gelatin) atau membran penukar ion. Pemisahan ini penting untuk mencegah produk anoda (misalnya, gas klorin jika ion Cl^- teroksidasi) bereaksi dengan produk katoda (Megawati *et al.*, 2021).
- **Elektroda:** Berbagai material telah digunakan, dengan nikel sebagai katoda dan karbon (grafit) sebagai anoda menjadi pilihan yang umum dilaporkan.
- **Parameter Listrik:** Tegangan atau arus yang diterapkan adalah parameter operasional kunci. Saefudin *et al.* (2021) meneliti pengaruh variasi tegangan (10, 12, 14, dan 16 Volt DC) dan menemukan bahwa peningkatan tegangan dapat meningkatkan jumlah endapan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ yang dihasilkan, dengan efisiensi konversi mencapai 95,28% pada tegangan 16 Volt. Sulistyio *et al.* (2024) juga mengkonfirmasi bahwa tegangan kerja secara signifikan mempengaruhi laju reaksi, dengan tegangan 16 Volt menghasilkan produksi MgO tertinggi.
- **Waktu Elektrolisis:** Durasi proses secara langsung mempengaruhi jumlah total produk yang dapat diendapkan.

Keuntungan utama metode elektrolisis adalah potensi untuk menghasilkan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ dengan kemurnian yang lebih tinggi, karena tidak ada penambahan ion asing seperti Na^+ dari NaOH. Namun, tantangan utamanya adalah konsumsi energi listrik yang bisa jadi signifikan, yang mempengaruhi keekonomian proses, terutama untuk produksi skala besar. Penelitian terus berlanjut untuk mengoptimalkan efisiensi energi, misalnya melalui desain sel yang lebih baik, katalis elektroda yang lebih efisien, atau integrasi dengan sumber energi terbarukan seperti fotovoltaik.



Gambar 3. Desain alat elektrolisis (Saefudin *et al.*, 2021).

Tabel 1. Perbandingan Metode Sintesis Utama MgO dari Bittern.

Fitur	Metode (NaOH)	Presipitasi Metode (Ca(OH) ₂)	Presipitasi Metode Elektrolisis Langsung
Reagen Utama	Bittern, NaOH	Bittern, Ca(OH) ₂	Bittern (sebagai elektrolit)
Kondisi Operasi	Suhu: Ambien - 70°C ; pH: Basa (dikontrol NaOH)	Suhu: Ambien - 50°C ; pH: Basa (dikontrol Ca(OH) ₂)	Tegangan: 10-22 V ; Suhu: Ambien
Kelebihan	Proses relatif sederhana ; Kontrol ukuran partikel baik; Rendemen tinggi jika optimal.	Biaya reagen Ca(OH) ₂ lebih rendah.	Potensi kemurnian produk lebih tinggi (minim reagen tambahan) ; Proses "lebih bersih".
Kekurangan	Biaya NaOH signifikan; kontaminasi Na ⁺ .	Potensi Ca ²⁺ pada produk MgO ; Kelarutan rendah.	Kontaminasi Konsumsi energi listrik bisa tinggi ; Desain sel bisa kompleks.
Ukuran/Morfologi MgO	Nanopartikel (bulat, kubik, berpori).	Nanopartikel (kubik).	(globular, Nanopartikel, morfologi tergantung parameter.

Karakterisasi MgO Hasil Sintesis dari Bittern

Karakterisasi material merupakan tahap krusial dalam rangka memahami hubungan antara metode sintesis dengan sifat fisikokimia dari MgO yang dihasilkan. Berbagai teknik karakterisasi seperti *X-Ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) *analysis*, dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), umumnya yang digunakan untuk mengevaluasi struktur kristal, luas permukaan, morfologi dan gugus fungsi permukaan dari MgO hasil sintesis (H.C.S. Perera, 2024). Informasi ini sangat penting karena menentukan kinerja dan efektivitasnya dalam berbagai aplikasi. Misalnya, sebagai katalis, adsorben, dan bahan refraktori.

Analisis Kristal dan Fasa (XRD)

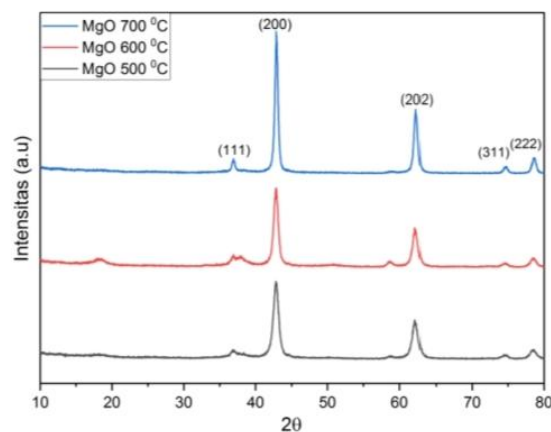
Analisis *X-ray Diffraction* (XRD) adalah teknik fundamental yang digunakan di hampir semua studi untuk mengkonfirmasi identitas fasa kristal, menentukan tingkat kristalinitas, dan memperkirakan ukuran rata-rata domain koheren (kristalit) dalam sampel MgO (Intan Febriani *et al.*, 2020).

X-ray Diffraction (XRD) secara konsisten digunakan untuk mengkonfirmasi pembentukan fasa MgO murni dengan struktur kristal kubik (periklase) setelah kalsinasi. Puncak-puncak difraksi yang tajam pada sudut 2θ yang sesuai (misalnya, 42.9° untuk bidang (200) dan 62.3° untuk (220)) mengindikasikan kristalinitas yang baik. Ukuran kristalit, yang dihitung menggunakan persamaan Scherrer, sangat dipengaruhi oleh suhu kalsinasi. Ningrum & Jumaeri (2022) pada Gambar 4 menunjukkan bahwa proses kalsinasi dilakukan pada tiga suhu berbeda, yaitu 500°C , 600°C , dan 700°C . Hasil XRD menunjukkan adanya puncak – puncak difraksi pada sudut 2θ di sekitar 37° , 43° , 62° , 74° , dan 78° , yang masing – masing mengacu pada bidang kristal (111), (200), (202), (311), dan (222). Puncak – puncak tersebut mengidentifikasi bahwa stuktur utama yang terbentuk adalah magnesium oksida (MgO) dengan susunan kristal kubik. Selain itu, terlihat intensitas puncak – puncak difraksi meningkat seiring naiknya suhu kalsinasi, mengindikasikan terjadinya peningkatan kristalinitas. Peningkatan suhu kalsinasi dari 500°C ke 700°C meningkatkan ukuran kristalit dari 6.3 nm menjadi 15.8 nm (Ananda Nurmalia Kusuma Ningrum, 2022). Trend ini menunjukkan bahwa suhu kalsinasi yang lebih tinggi memfasilitasi pertumbuhan butir kristal sehingga susuna atom dalam kisi kristal MgO semakin teratur.

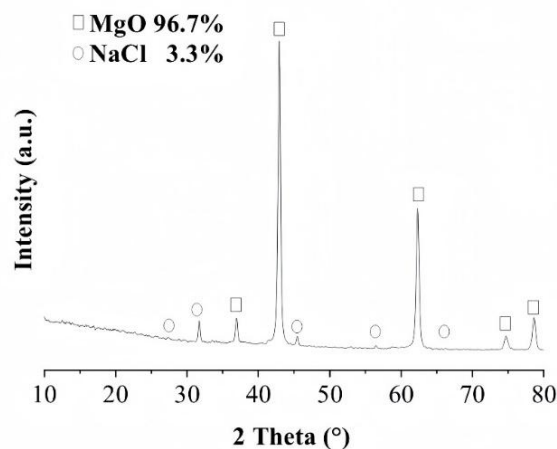
Hasil analisis XRD sitesis MgO bittern Yunita *et al.* (2021) pada Gambar 5 menunjukkan beberapa puncak intensitas tinggi yang muncul pada sudut 2θ di sekitar 37° , 43° , 62° , 74° , dan 78° . Masing - masing puncak tersebut berkaitan dengan bidang kristal kristal (111), (200), (202), (311), dan (222). Pola – pola ini mengindikasikan bahwa senyawa utama yang terbentuk adalah MgO dengan struktur kristal kubik. Identifikasi ini sesuai dengan data acuan dari *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS) No. 45-0946, yang merupakan pola difraksi standar untuk MgO murni. Puncak – puncak yang tajam dan simetris

pada pola XRD mengindikasikan bahwa senyawa MgO yang dihasilkan memiliki tingkat kristalinitas yang tinggi sehingga membentuk fasa kristalin MgO dengan susunan atom yang teratur. Selain puncak utama MgO, terlihat adanya beberapa puncak tambahan dengan intensitas lebih rendah yang ditandai dengan simbol bulat. Puncak – puncak difraksi ini mengidentifikasi keberadaan senyawa pengotor berupa natrium klorida (NaCl). Dari hasil analisis, diketahui bahwa komposisi sampel terdiri dari MgO sebesar 96,7% dan NaCl 3,3% (Yunita *et al.*, 2021). Kandungan NaCl ini menandakan bahwa senyawa pengotor tersebut belum sepenuhnya tereliminasi dari produk MgO. Karakteristik NaCl yang mudah larut dalam air, menunjukkan bahwa NaCl kemungkinan besar tidak terperangkap secara kuat dalam struktur kristal MgO. Hal ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pengotor seperti NaCl dapat tetap teradsorpsi atau tersisa dalam produk akhir apabila proses pencucian dan pemisahan tidak dilakukan secara optimal (Amrulloh *et al.*, 2019). Keberadaan senyawa pengotor ini menandakan perlunya peningkatan efektivitas pada tahap pemurnian bahan. Optimalisasi tahap pencucian, seperti penggunaan air deionisasi atau pencucian bertingkat, dapat mejadi salah satu solusi untuk menurunkan kadar pengotor dan meningkatkan kemurnian produk MgO (Sukma *et al.*, 2025)..

Hasil karakterisasi XRD secara keseluruhan menunjukkan bahwa MgO hasil sintesis dari bittern telah berhasil diperoleh dalam bentuk kristalin dengan struktur kubik, meskipun masih mengandung sedikit senyawa pengotor. Analisis ini membuktikan bahwa bittern sebagai limbah dari proses pembuatan garam air laut berpotensi besar sebagai sumber magnesium dalam sintesis MgO, asalkan proses pemurnian dilakukan secara lebih efektif.



Gambar 4. Hasil analisis XRD dari struktur MgO (Ananda Nurmalia Kusuma Ningrum, 2022).



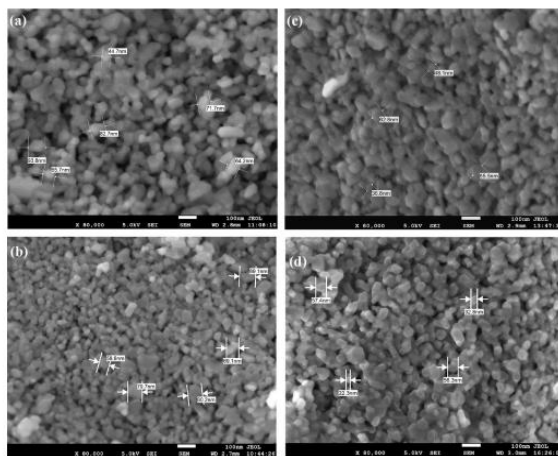
Gambar 5. Hasil analisis XRD dari Struktur MgO (Yunita *et al.*, 2021).

Analisis Luas Permukaan (BET) dan Morfologi (SEM/TEM)

Luas permukaan spesifik, yang diukur dengan metode *Brunauer-Emmett-Teller* (BET), adalah parameter krusial untuk aplikasi seperti adsorpsi dan katalisis. MgO yang disintesis dari bittern, terutama dalam bentuk nanopartikel, dilaporkan memiliki luas permukaan yang relatif tinggi (Majmundar, 1984). Terdapat hubungan terbalik antara suhu kalsinasi dan luas permukaan; suhu yang lebih tinggi menyebabkan sintering dan pertumbuhan butir, yang mengurangi luas permukaan.

Analisis morfologi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Transmission Electron Microscopy* (TEM) menunjukkan bahwa partikel MgO dari bittern dapat memiliki berbagai bentuk, termasuk hampir bulat (sferis), kubik, dan struktur berpori. Morfologi ini dipengaruhi oleh parameter sintesis seperti kecepatan pengadukan dan penggunaan aditif seperti surfaktan. (Yunita *et al.*, 2021) melaporkan bahwa penambahan surfaktan PVA membantu mengurangi aglomerasi partikel, sebuah tantangan umum dalam sintesis nanopartikel. Aglomerasi dapat mengurangi luas permukaan efektif, sehingga kontrol terhadap fenomena ini sangat penting.

Hasil analisis morfologi permukaan MgO yang dilakukan Jakić *et al.* (2024) pada Gambar 6, menunjukkan adanya perbedaan struktur butiran akibat variasi penambahan poli (vinil alkohol)/ PVA. Pada sampel tanpa penambahan PVA (Gambar 6a), morfologi permukaan tampak tidak teratur dengan distribusi partikel yang relatif kasar dan aglomerasi (penggumpalan) yang cukup tinggi, berkisar 64,2 nm hingga 82,7 nm. Hal ini menunjukkan bahwa pembentukan kristal MgO belum sepenuhnya homogen akibat tidak adanya agen pembentuk struktur. Penambahan PVA pada rasio 1:1 (Gambar 6b) menghasilkan struktur permukaan yang lebih terdispersi dengan bentuk butiran yang lebih seragam, dengan ukuran partikel mulai menurun hingga sekitar 58,6 nm, meskipun masih terlihat kecenderungan aglomerasi ringan. Selanjutnya, pada rasio PVA 1:1,5 (Gambar 6c), partikel terlihat semakin homogen dengan ukuran sekitar 36,8 nm. Komposisi PVA tertinggi yaitu 1:3 (Gambar 6d) menunjukkan morfologi permukaan yang paling halus dan terdistribusi merata, serta ukuran partikel terkecil yaitu berkisar antara 22,3 nm hingga 57,4 nm.

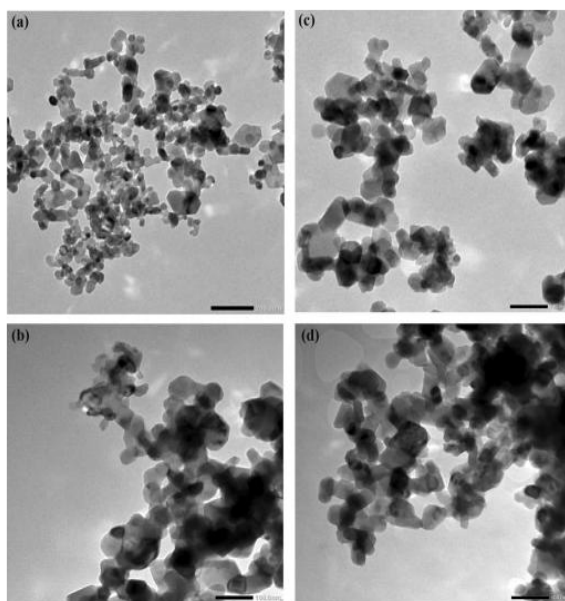


Gambar 6. Hasil analisis morfologi SEM magnesium oksida tanpa penambahan (a) dan dengan penambahan poli(vinil alkohol) pada perbandingan (b) 1:1, (c) 1:1,5 dan (d) 1:3. (Jakić *et al.*, 2024).

Hasil ini mengindikasikan bahwa penambahan PVA berperan penting dalam menstabilkan pertumbuhan kristal, mengontrol ukuran partikel, dan mengurangi tingkat aglomerasi (Jakić *et al.*, 2024). Peningkatan homogenitas dan berkurangnya ukuran partikel pada rasio PVA yang lebih tinggi mengindikasikan terjadinya proses pembentukan partikel yang lebih terkendali selama sintesis, sesuai dengan studi sebelumnya yang menyebutkan bahwa PVA dapat berfungsi sebagai agen penutup (*capping agent*) dan matriks polimerik dalam pembentukan nanopartikel oksida logam (Wang *et al.*, 2023).

Analisis TEM magnesium oksida Jakić *et al.* (2024) pada Gambar 7, menunjukkan morfologi partikel MgO hasil sintesis dengan berbagai rasio penambahan poli(vinil alkohol)/ PVA. Pada sampel tanpa PVA (Gambar 7a), partikel MgO membentuk aglomerat besar dan tidak beraturan. Distribusi ukuran menunjukkan ketidakhomogenan yang mencerminkan pertumbuhan kristal tanpa kontrol. Penambahan

PVA pada rasio 1:1 (Gambar 7b), terlihat penurunan ukuran partikel dan distribusi yang lebih tersebar. Pada rasio 1:2 (Gambar 7c), morfologi semakin membaik dengan partikel lebih homogen dan mulai mengadopsi bentuk bulat. Sedangkan pada rasio 1:3 (Gambar 7d), partikel menunjukkan struktur nanokristalin yang paling seragam dan tersebar merata dengan aglomerasi paling rendah. Studi ini menandakan bahwa peningkatan konsentrasi PVA membantu mengontrol nukleasi dan pertumbuhan kristal, dengan menghasilkan partikel nano dengan kualitas morfologi yang paling baik (Jakić *et al.*, 2024b). Penambahan PVA sebagai surfaktan terbukti efektif dalam mengurangi ukuran partikel. Sabourimanesh (2015) melaporkan bahwa penggunaan PVA (massa molekul tinggi) dalam preparasi MgO menghasilkan ukuran partikel yang menurun dari sekitar 40 nm hingga 20 nm, dibandingkan dengan menggunakan surfaktan lain seperti PEG (Sabourimanesh, 2015).



Gambar 7. Hasil analisis morfologi TEM magnesium oksida tanpa penambahan (a) dan dengan penambahan poli(vinil alkohol) pada perbandingan (b) 1:1, (c) 1:2, dan (d) 1:3. (Jakić *et al.*, 2024).

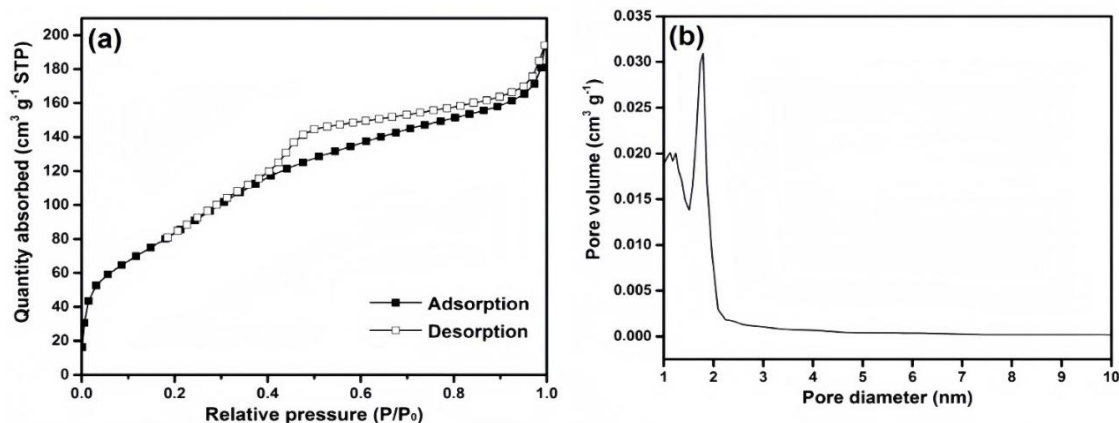
Analisis adsorpsi-desorpsi gas nitrogen menggunakan metode *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) adalah standar emas untuk mengukur luas permukaan spesifik material berpori. Luas permukaan yang tinggi secara langsung berkorelasi dengan jumlah situs aktif yang tersedia untuk reaksi. MgO yang disintesis dari bittern, khususnya dalam bentuk nanopartikel, dilaporkan memiliki luas permukaan yang jauh lebih besar dibandingkan dengan MgO yang berasal dari kalsinasi magnesit secara konvensional. Sebagai contoh, nano-MgO yang disintesis dapat mencapai luas permukaan spesifik sekitar $60.2 \text{ m}^2/\text{g}$, nilai yang jauh lebih tinggi dibandingkan partikel MgO komersial yang luas permukaannya hanya sekitar $19 \text{ m}^2/\text{g}$. Terdapat hubungan terbalik yang kuat dan konsisten antara suhu kalsinasi dan luas permukaan BET: suhu yang lebih tinggi, yang meningkatkan kristalinitas dan ukuran kristalit, juga memicu proses sintering (penggabungan dan pemadatan partikel), yang secara drastis mengurangi porositas dan luas permukaan. Oleh karena itu, optimasi proses sintesis seringkali melibatkan pencarian trade-off yang ideal antara mencapai kristalinitas yang cukup dan mempertahankan luas permukaan yang besar, tergantung pada persyaratan aplikasi target.

Penelitian Gao *et al.* (2017) pada Gambar 8, dilakukan analisis permukaan menggunakan metode adsorpsi - desorpsi nitrogen dengan pendekatan BET. Karakterisasi permukaan menggunakan metode adsorpsi - desorpsi nitrogen digunakan untuk mengetahui sifat tekstur dari MgO yang disintesis dengan bantuan surfaktan SDS. Kurva isoterm adsorpsi dan desorpsi nitrogen ditampilkan pada (Gambar 8a), menunjukkan tipe isoterm IV berdasarkan klasifikasi IUPAC. Ciri khas dari isoterm ini adalah adanya histeresis loop bertipe H3 antara proses adsorpsi (ditandai dengan simbol persegi hitam) dan desorpsi (persegi putih) pada tekanan relatif (P/P_0) sekitar 0,4 hingga 0,9. Histeresis tipe ini mengindikasikan

keberadaan mesopori dengan bentuk celah (*slit-shaped pores*) dengan diameter pori 2 – 50 nm, yang umumnya terbentuk dari tumpukan partikel lamelar atau agregat partikel berbentuk tidak beraturan (AbuMousa, 2022). Pada tekanan relatif rendah ($P/P_0 < 0,2$), kurva adsorpsi menunjukkan peningkatan bertahap pada jumlah nitrogen yang teradsorpsi, menandakan luas permukaan spesifik yang baik. Zona linear hingga $P/P_0 \approx 0,8$ mengindikasikan pori berkembang secara seragam, diikuti oleh lonjakan tajam mendekati $P/P_0 = 1,0$, yang menunjukkan fenomena kondensasi kapiler dalam pori meso. Adanya perbedaan jelas antara kurva adsorpsi dan desorpsi memperkuat dugaan struktur pori berbentuk *ink-bottle* atau vertikal silindris (Modwi A., 2022).

Distribusi ukuran pori yang dihitung menggunakan metode *Barrett-Joyner-Halenda* (BJH) ditunjukkan pada (Gambar 8b), hasil analisis memperlihatkan bahwa sebagian besar ukuran pori berada pada kisaran diameter 1,88 nm, yang mengindikasikan dominasi struktur mikropori dengan distribusi yang relatif sempit. Luas permukaan spesifik yang diperoleh dari analisis *Brunauer-Emmett-Teller* (BET) adalah material MgO yang disintesis dengan bantuan surfaktan *sodium dodecyl sulfate* (SDS) melalui metode hidrotermal menghasilkan luas permukaan spesifik yang tinggi, yaitu mencapai $321,3 \text{ m}^2/\text{g}$ dengan volume pori sebesar $0,30 \text{ cm}^3/\text{g}$ serta ukuran pori rata – rata 1,88 nm. Bentuk isoterm adsorpsi - desorpsi nitrogen dari material ini dikategorikan sebagai tipe IV dengan loop histeresis H3 yang tajam, hal ini menunjukkan adanya struktur mesopori celah yang umumnya terbentuk dari agregasi partikel nanoskala (Wanlin Gao, 2017).

Peningkatan luas permukaan ini dipengaruhi oleh berbagai parameter sintesis, termasuk rasio etanol terhadap air, waktu dan suhu reaksi, serta jumlah surfaktan. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa penggunaan SDS sebagai template memberikan kontribusi besar dalam membentuk struktur pori yang tinggi dan terdistribusi seragam, yang sangat bermanfaat untuk aplikasi katalis maupun adsorpsi. Hal ini sesuai dengan studi yang dilakukan Ding *et al.* (2015), menunjukkan semakin kecil ukuran partikel dan semakin terbuka struktur pori, maka semakin tinggi nilai BET-nya. Dengan struktur berpori yang luas, volume pori besar, dan distribusi ukuran pori yang mendukung, MgO hasil sintesis dalam penelitian ini memiliki potensi tinggi sebagai material adsorben gas, khususnya untuk aplikasi penangkapan CO_2 (Ding, 2015).



Gambar 8. (a) Hasil isoterm adsorpsi – desorpsi nitrogen (8b) Distribusi ukuran pori dari Sampel MgO yang disintesis dengan bantuan SDS melalui metode hidrotermal pada suhu kalsinasi 400°C selama 5 jam (Wanlin Gao, 2017).

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi. Puncak serapan yang kuat di bawah 600 cm^{-1} (misalnya, sekitar $400\text{-}500 \text{ cm}^{-1}$) adalah ciri khas ikatan Mg-O, yang mengkonfirmasi pembentukan MgO (Hirphaye *et al.*, 2023). Kehadiran puncak di sekitar 3400 cm^{-1} menunjukkan adanya molekul air yang teradsorpsi. *Thermogravimetric Analysis* (TGA) memvalidasi konversi termal $\text{Mg}(\text{OH})_2$ menjadi MgO, yang biasanya terjadi pada rentang suhu $300\text{-}450^\circ\text{C}$ (Khater *et al.*, 2015). Analisis komposisi elemental dan kemurnia digunakan teknik seperti *X-ray Fluorescence* (XRF) atau *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS). Studi melaporkan pencapaian kemurnian MgO hingga 96.71 wt% dari bittern, dengan pengotor utama berupa CaO (Jakić *et al.*, 2024).

Analisis Gugus Fungsi (FTIR): Spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR) adalah teknik yang sangat baik untuk mengidentifikasi ikatan kimia dan gugus fungsi yang ada dalam sampel. Spektrum FTIR dari MgO yang berhasil disintesis secara konsisten menunjukkan puncak serapan yang kuat dan tajam pada daerah bilangan gelombang rendah, umumnya di bawah 600 cm^{-1} (seringkali teramati di sekitar $400\text{--}500\text{ cm}^{-1}$). Puncak ini adalah sidik jari vibrasi ulur dari ikatan Mg-O, yang secara definitif mengkonfirmasi pembentukan magnesium oksida. Puncak serapan lain yang sering muncul adalah pita lebar di sekitar 3400 cm^{-1} , yang diatribusikan pada vibrasi ulur gugus -OH dari molekul air yang teradsorpsi secara fisik di permukaan partikel yang luas.

Analisis Termal (TGA/DTA): Analisis termogravimetri (TGA) dan analisis termal diferensial (DTA) sangat berguna untuk memantau proses dekomposisi termal dari prekursor $\text{Mg}(\text{OH})_2$ menjadi MgO. Kurva TGA yang khas untuk $\text{Mg}(\text{OH})_2$ menunjukkan penurunan massa yang signifikan dalam rentang suhu sekitar $300\text{--}450^\circ\text{C}$. Penurunan massa ini secara kuantitatif sesuai dengan pelepasan stoikiometri molekul air selama reaksi konversi. Kurva DTA yang menyertainya biasanya menunjukkan puncak endotermik yang tajam pada rentang suhu yang sama, yang sesuai dengan energi yang diserap untuk proses dehidroksilasi ini. Stabilitas termal dari produk MgO akhir yang telah terkonversi sempurna ditunjukkan oleh kurva TGA yang datar tanpa penurunan massa yang signifikan pada rentang suhu ini.

Analisis Komposisi Elemental (XRF/EDS): Untuk memverifikasi kemurnian produk dan mengidentifikasi pengotor, teknik seperti *X-ray Fluorescence* (XRF) dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) digunakan. Berbagai studi melaporkan pencapaian kemurnian MgO yang tinggi, dengan nilai seperti 96.6% dan 96.71% berat. Pengotor utama yang paling sering teridentifikasi adalah Kalsium Oksida (CaO), terutama ketika $\text{Ca}(\text{OH})_2$ digunakan sebagai agen presipitasi.

Aplikasi MgO Hasil Sintesis dari Bittern

Magnesium Oksida (MgO) yang di sintesis dari bittern memiliki karakteristik yang khas, terutama pada aspek luas permukaan yang tinggi dan tingkat reaktivitasnya. Sifat-sifat ini menjadikan MgO sebagai material multifungsional dengan potensi aplikasi yang luas dalam berbagai bidang. Salah satu penggunaan utamanya adalah sebagai adsorben dalam pengolahan limbah cair, katalis, bahan penyusun refraktori, dan agen antibakteri (H.C.S. Perera, 2024). Ketersediaan bittern sebagai sumber magnesium yang murah dan berlimpah menjadikan proses sintesis MgO tidak hanya ekonomis, tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah industri garam.

Adsorben untuk Polutan

Kelebihan Aplikasi: Keunggulan utama MgO sebagai adsorben terletak pada kombinasi beberapa faktor: (1) Luas Permukaan Spesifik yang Tinggi: Nanopartikel MgO menyediakan area yang sangat luas untuk interaksi dengan molekul polutan. (2) Situs Permukaan Aktif: Permukaan MgO memiliki situs asam Lewis (kation Mg^{2+} yang tidak terkoordinasi penuh) dan situs basa Brønsted (gugus hidroksil permukaan), yang dapat berinteraksi dengan berbagai jenis polutan. (3) Biaya Rendah dan Keberlanjutan: Kemampuannya untuk diproduksi dari sumber limbah (bittern) menjadikannya alternatif yang sangat hemat biaya dan berkelanjutan dibandingkan adsorben komersial seperti karbon aktif. (4) Ramah Lingkungan: MgO sendiri bersifat non-toksik dan ramah lingkungan.

Hasil dan Mekanisme: MgO dan prekursornya, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, telah menunjukkan efektivitas yang luar biasa dalam menghilangkan berbagai polutan dari air limbah.

- **Adsorpsi Zat Warna:** Jumaeri *et al.* (2022) menunjukkan bahwa $\text{Mg}(\text{OH})_2$ yang disintesis dari bittern air laut mampu menyerap zat warna anionik Congo Red dengan kapasitas adsorpsi optimum yang signifikan, yaitu 46.3 mg/g pada pH 8. Studi kinetika menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengikuti model pseudo-orde-dua, yang mengindikasikan bahwa kemisorpsi (interaksi kimia) adalah langkah penentu laju.
- **Adsorpsi Ion Logam Berat:** MgO sangat efektif dalam menghilangkan kation logam berat dari air. Sebuah studi melaporkan penggunaan komposit MgO@ZnO@Biochar untuk adsorpsi ion Cu^{2+} dan Pb^{2+} , dengan kapasitas adsorpsi maksimum masing-masing mencapai 50.63 mg/g dan 61.46 mg/g . Mekanisme penjerapan logam berat oleh MgO bersifat multifaset, melibatkan kombinasi dari (1) Pertukaran Ion, di

mana ion Mg^{2+} di permukaan dapat bertukar dengan ion logam berat; (2) Presipitasi Permukaan, di mana pH basa lokal di sekitar partikel MgO menyebabkan pengendapan logam sebagai hidroksidanya (misalnya, $\text{Cu}(\text{OH})_2$); dan (3) Kompleksasi, di mana ion logam membentuk ikatan koordinasi dengan gugus hidroksil di permukaan MgO.

Katalis dan Fotokatalis

Sifat basa permukaan MgO menjadikannya katalis heterogen yang menarik untuk reaksi seperti transesterifikasi dalam produksi biodiesel, sebuah analogi yang didukung oleh studi penggunaan CaO dari limbah cangkang (Kun-asa *et al.*, 2021; Viriya-empikul *et al.*, 2010). Sebagai fotokatalis, nanopartikel MgO dapat mendegradasi polutan organik di bawah iradiasi cahaya. Mekanismenya melibatkan generasi spesies oksigen reaktif (ROS) yang sangat oksidatif, yang mampu memecah molekul organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana (Muhaymin *et al.*, 2024).

Sebagai katalis heterogen, ia mudah dipisahkan dari campuran reaksi, memungkinkan daur ulang yang mudah dan proses yang lebih bersih. (2) Stabilitas Termal: Stabilitas termal MgO yang tinggi memungkinkannya digunakan dalam reaksi suhu tinggi. (3) Aktivitas Fotokatalitik: Sebagai semikonduktor dengan celah pita energi yang lebar, nanopartikel MgO dapat diaktifkan oleh cahaya (terutama UV) untuk menghasilkan spesies oksigen reaktif (ROS) yang sangat kuat, yang dapat mendegradasi polutan organik yang sulit diurai.

Hasil dan Mekanisme:

- Katalisis Basa: MgO menunjukkan aktivitas katalitik dalam konversi biomassa seperti kitin menjadi asam laktat. Secara analogi dengan CaO dari limbah cangkang yang terbukti sangat efektif untuk reaksi transesterifikasi dalam produksi biodiesel, MgO dari bittern memiliki potensi besar dalam aplikasi serupa karena sifat basanya.
- Fotokatalisis: Nanopartikel MgO menunjukkan efisiensi degradasi fotokatalitik yang luar biasa. Studi melaporkan efisiensi degradasi hingga 98% untuk zat warna Methylene Blue dalam 110 menit dan 93% dalam larutan biner dengan Methylene Violet. Mekanismenya melibatkan eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi di bawah iradiasi cahaya, menciptakan pasangan elektron-lubang (e^-/h^+). Lubang (h^+) yang sangat oksidatif dan elektron (e^-) yang reduktif kemudian bereaksi dengan molekul air dan oksigen terlarut untuk menghasilkan radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) dan radikal superoksida ($\text{O}_2^{\cdot-}$), yang merupakan agen pengoksidasi kuat yang memecah molekul organik menjadi CO_2 , air, dan senyawa anorganik sederhana.

Agen Antibakteri

Nanopartikel MgO menunjukkan aktivitas antibakteri yang signifikan terhadap bakteri Gram-positif dan Gram-negatif. Mekanismenya diyakini melibatkan generasi ROS, kerusakan membran sel akibat interaksi elektrostatis, dan perubahan pH lokal. (Ningrum & Jumaeri, 2022) melaporkan bahwa nano-MgO dari bittern menunjukkan zona hambat 5-8 mm terhadap *Escherichia coli*, dengan aktivitas tertinggi pada sampel yang dikalsinasi pada suhu terendah (500°C), yang menghasilkan ukuran partikel terkecil.

Kelebihan Aplikasi: (1) Spektrum Luas: Nanopartikel MgO efektif melawan berbagai bakteri Gram-positif dan Gram-negatif. (2) Biokompatibilitas: MgO dianggap biokompatibel dan dapat terurai secara hayati, menjadikannya kandidat yang aman untuk aplikasi biomedis dan kontak dengan makanan. (3) Mekanisme Multimodal: Mekanisme aksinya yang melibatkan beberapa jalur (dijelaskan di bawah) membuatnya sulit bagi bakteri untuk mengembangkan resistensi, tidak seperti antibiotik konvensional.

Hasil dan Mekanisme: Nanopartikel MgO yang disintesis dari bittern oleh (Ningrum & Jumaeri, 2022) menunjukkan aktivitas penghambatan yang signifikan terhadap bakteri patogen *Escherichia coli*, dengan diameter zona hambat mencapai 7.87 mm. Studi ini juga mengungkapkan korelasi penting: aktivitas antibakteri tertinggi dicapai oleh partikel dengan ukuran kristalit terkecil (disintesis pada suhu kalsinasi 500°C), yang menyiratkan bahwa rasio permukaan-ke-volume yang lebih tinggi meningkatkan interaksi dengan sel bakteri. Mekanisme antibakteri MgO diyakini melibatkan: (1) Generasi Spesies Oksigen Reaktif (ROS): Permukaan MgO dapat menghasilkan ROS seperti $\text{O}_2^{\cdot-}$, yang menyebabkan stres oksidatif fatal pada sel bakteri. (2) Kerusakan Membran Sel: Interaksi elektrostatis antara partikel MgO yang bermuatan

positif (pada pH fisiologis) dengan membran sel bakteri yang bermuatan negatif dapat menyebabkan kerusakan fisik pada membran, mengakibatkan kebocoran isi sel. (3) Alkalinisasi Lokal: Hidrasi MgO di permukaan menghasilkan lingkungan dengan pH tinggi secara lokal, yang dapat mengganggu fungsi enzim dan membran bakteri.

Bahan Refraktori dan Aplikasi Pertanian

Titik leleh MgO yang sangat tinggi ($\sim 2800^\circ\text{C}$) dan ketahanannya terhadap slag basa menjadikannya material refraktori utama untuk industri baja dan semen (Advanced Ceramics Material, 2023). Untuk aplikasi ini, kemurnian MgO sangat krusial. Sebuah paten India menjelaskan proses untuk menghasilkan MgO kualitas refraktori dengan kemurnian 99.3% dari bittern melalui tahap desulfatasi. Di bidang pertanian, magnesium adalah unsur hara esensial. (Jeyalakshmi & Jonathan, 2016) menunjukkan bahwa pupuk berbasis magnesium yang disintesis dari bittern secara signifikan meningkatkan pertumbuhan dan hasil panen tanaman bawang.

Potensi MgO dari bittern juga dieksplorasi dalam teknologi canggih. (Sulistyo *et al.*, 2024) meneliti penggunaannya sebagai bahan penyegel (*sealant*) dalam Sel Bahan Bakar Oksida Padat (SOFC) karena stabilitas termalnya. Sifat biokompatibel dan antibakterinya juga menjadikannya kandidat untuk pelapis implan biomedis guna mencegah infeksi.

Kelebihan Aplikasi: (1) Titik Leleh Ekstrem: Sifat paling menonjol dari MgO adalah titik lelehnya yang sangat tinggi (sekitar 2800°C), yang memungkinkannya menahan suhu ekstrem dalam tungku industri. (2) Ketahanan Korosi: MgO memiliki ketahanan yang luar biasa terhadap korosi oleh slag basa, yang merupakan produk samping umum dalam proses pembuatan baja dan semen. (3) Sumber Alternatif: Kemampuan untuk memproduksi MgO dengan kemurnian sangat tinggi dari bittern menawarkan sumber alternatif yang potensial lebih murah dan berkelanjutan daripada penambangan mineral magnesit.

Hasil dan Mekanisme: Untuk aplikasi refraktori, kemurnian adalah parameter yang paling krusial, karena pengotor seperti silika dan kalsium oksida dapat membentuk fasa dengan titik leleh rendah yang akan menurunkan kinerja material pada suhu tinggi. Sebuah paten India (IN238072) mendemonstrasikan proses yang dirancang khusus untuk menghasilkan MgO kualitas refraktori dengan kemurnian mencapai 99.3% dari bittern laut. Proses ini secara cerdas menggabungkan langkah desulfatasi (penghilangan sulfat menggunakan kalsium klorida) sebelum presipitasi, yang menunjukkan bahwa dengan rekayasa proses yang tepat, bittern dapat menjadi sumber yang layak bahkan untuk aplikasi yang paling menuntut ini.

Aplikasi dalam Pertanian

Kelebihan Aplikasi: (1) Sumber Hara Esensial: Magnesium adalah unsur hara makro sekunder yang merupakan inti dari molekul klorofil dan penting untuk fotosintesis serta aktivasi enzim. Pemanfaatan bittern menyediakan sumber magnesium dari limbah, mendukung pertanian berkelanjutan. (2) Pupuk Multi-Nutrien: Selain magnesium, bittern juga mengandung kalium dan elemen jejak lain yang bermanfaat bagi tanaman. (3) Perbaikan Tanah: Bittern dapat digunakan sebagai amandemen untuk memperbaiki struktur tanah dan membantu mengelola salinitas tanah dalam kondisi tertentu.

Hasil dan Mekanisme: (Jeyalakshmi & Jonathan, 2016) berhasil mensintesis pupuk majemuk, magnesium ammonium orthophosphate ($\text{Mg}(\text{NH}_4)\text{PO}_4$), dari bittern. Ketika diaplikasikan pada tanaman bawang (*Allium cepa*), hasilnya sangat signifikan: dibandingkan dengan kontrol, tanaman yang diberi pupuk dari bittern menunjukkan peningkatan dramatis pada semua parameter pertumbuhan, termasuk tinggi tanaman, jumlah daun (anakan), dan yang terpenting, berat umbi hasil panen hampir empat kali lipat lebih tinggi (10.3 g vs 2.6 g). Studi lain juga menyoroti potensi produk sampingan, seperti MgSO_4 yang dihasilkan dari proses penyerapan gas SO_2 menggunakan MgO dari bittern, yang juga memiliki nilai jual sebagai pupuk.

Implikasi Lingkungan dan Potensi Pengembangan

Pemanfaatan bittern untuk sintesis MgO adalah contoh paradigma dari ekonomi sirkular, di mana limbah dari satu proses industri menjadi bahan baku berharga untuk proses lainnya. Pendekatan ini secara

langsung mengatasi masalah lingkungan yang terkait dengan pembuangan bittern, seperti hipersalinitas dan toksisitas lokal, sambil mengurangi jejak karbon dan dampak lingkungan dari penambangan mineral primer. Analisis tekno-ekonomi awal, meskipun masih dalam tahap pra-kelayakan, menunjukkan potensi profitabilitas yang sangat tinggi. (Khater *et al.*, 2015) memproyeksikan pengembalian investasi tahunan sebesar 400% dengan periode pengembalian modal hanya 0.19 tahun, didasarkan pada biaya bahan baku yang sangat rendah. Nandiyanto *et al.* (2021) juga menunjukkan kelayakan proyek skala industri dengan potensi keuntungan yang signifikan, meskipun dengan periode pengembalian yang lebih konservatif.

Meskipun prospeknya cerah, beberapa tantangan dan arah penelitian masa depan perlu menjadi fokus untuk pengembangan lebih lanjut:

1. **Optimalisasi dan Peningkatan Skala:** Perlu penelitian lanjutan untuk mengoptimalkan metode sintesis yang ada guna meningkatkan efisiensi energi (terutama untuk elektrolisis), mengurangi penggunaan reagen, dan merancang reaktor yang efisien untuk transisi dari skala laboratorium ke skala pilot dan industri.
2. **Manajemen Pengotor dan Pra-perlakuan:** Pengembangan metode pra-perlakuan bittern yang efektif, murah, dan ramah lingkungan untuk menghilangkan ion-ion pengotor (seperti sulfat, kalsium, boron) sebelum sintesis sangat penting, terutama untuk aplikasi yang menuntut kemurnian tinggi seperti refraktori dan biomedis.
3. **Pemahaman Mekanisme Fundamental:** Studi yang lebih mendalam mengenai mekanisme interaksi pada antarmuka antara permukaan MgO dan lingkungannya (misalnya, mekanisme adsorpsi spesifik, jalur reaksi katalitik, interaksi dengan membran sel bakteri) diperlukan untuk merancang material dengan kinerja yang lebih unggul secara rasional.
4. **Penilaian Siklus Hidup (LCA):** Melakukan penilaian siklus hidup yang komprehensif sangat penting untuk mengevaluasi dampak lingkungan keseluruhan dari produksi MgO dari bittern (dari pengumpulan bittern hingga produk akhir) dan membandingkannya secara kuantitatif dengan rute produksi MgO tradisional untuk memvalidasi keunggulan lingkungannya.

Simpulan

Berdasarkan studi literature diatas dapat disimpulkan bahwa bitterm sebagai limbah cair hasil samping industri garam, memiliki potensi besar sebagai bahan baku alternatif dalam sintesis magnesium oksida (MgO) karena kandungan magnesium yang tinggi serta ketersediaannya yang melimpah. Berdasarkan telaah literatur periode 2015 – 2025, metode presipitasi dan elektrolisis merupakan teknik sintesis yang paling umum digunakan, dengan parameter proses seperti suhu, pH, dan tahap kalsinasi memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat fisikokimia produk akhir. MgO yang dihasilkan menunjukkan karakteristik berupa struktur kristalin dengan ukuran nanopartikel dan luas permukaan yang tinggi, sehingga mendukung penggunaannya dalam berbagai aplikasi seperti adsorben polutan, katalis atau fotokatalis, agen antibakteri, bahan refraktori, dan pupuk pertanian. Proses karakterisasi MgO menggunakan teknik XRD, SEM/TEM, BET, FTIR, dan TGA diperoleh gambaran komprehensif mengenai struktur, morfologi dan kemurnian produk. Kualitas MgO sangat dipengaruhi oleh proses sintesis dan metode yang digunakan. Pemanfaatan bitterm sebagai sumber magnesium tidak hanya berkontribusi dalam pengurangan limbah dan penerapan ekonomi sirkular, sehingga penelitian berkelanjutan dan inovasi dalam sintesis, karakterisasi, dan aplikasi MgO dari bitterm sangat penting untuk memaksimalkan nilai bitterm sebagai sumber daya terbarukan dan berkelanjutan, serta untuk mengembangkan material canggih yang dapat memberikan kontribusi positif bagi industri dan lingkungan.

Daftar Referensi

- Advanced Ceramics Material. (2023). Is Magnesium Oxide (MgO) a Refractory Material? <https://www.preciseceramic.com/blog/is-magnesium-oxide-mgo-a-refractory-material.html>.
- AbuMousa, R. A., Khezami, L., Ismail, M., Ben Aissa, M. A., Modwi, A., & Bououdina, M. (2022). Efficient Mesoporous MgO/g-C₃N₄ for Heavy Metal Uptake: Modeling Process and Adsorption Mechanism. *Nanomaterials*, 12(22), 3945. <https://doi.org/10.3390/nano12223945>

- Alamdari, A., Rahimpour, M. R., Esfandiari, N., & Nourafkan, E. (2008). Kinetics of magnesium hydroxide precipitation from sea bittern. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(2), 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.02.012>
- Amrulloh, H., Simanjuntak, W., & Situmeang, R. T. M. (2017). Sintesis $Mg(OH)_2$ dari Bittern Menggunakan Metode Elektrokimia. *ALKIMIA : Jurnal Ilmu Kimia Dan Terapan*, 1(1), 10–15. <https://doi.org/10.19109/alkimia.v1i1.1325>
- Amrulloh, H., Simanjuntak, W., Situmeang, R. T. M., Sagala, S. L., Bramawanto, R., & Nahrowi, R. (2019). Effect of Dilution and Electrolysis Time on Recovery of Mg^{2+} As $Mg(OH)_2$ from Bittern by Electrochemical Method. *The Journal of Pure and Applied Chemistry Research*, 8(1), 87–95. <https://doi.org/10.21776/ub.jpacr.2019.008.001.455>
- Amrulloh, H., Situmeang, R., Simanjuntak, W., & Sagala, S. L. (2020). Preparation of nano-magnesium oxide from Indonesia local seawater bittern using the electrochemical method. *Synthesis and Reactivity in Inorganic Metal-Organic and Nano-Metal Chemistry*, 50(8), 693–698.
- Battaglia, G., Domina, M. A., Romano, S., Tamburini, A., Cipollina, A., & Micale, G. (2022). Magnesium Hydroxide Nanoparticles Production from Natural Bitterns. *Chemical Engineering Transactions*, 96(August), 43–48. <https://doi.org/10.3303/CET2296008>
- Ding, Y., Song, G., Zhu, X., Chen, R., & Liao, Q. (2015). Synthesizing MgO with high specific surface for carbon dioxide adsorption. *RSC Advances*, 5(41), 30929–30935. <https://doi.org/10.1039/C4RA15127E>
- Gao, W., Zhou, T., Louis, B., & Wang, Q. (2017). Hydrothermal Fabrication of High Specific Surface Area Mesoporous MgO with Excellent CO_2 Adsorption Potential at Intermediate Temperatures. *Catalysts*, 7(4), 116. <https://doi.org/10.3390/catal7040116>
- Hirphaye, B. Y., Bonka, N. B., Tura, A. M., & Fanta, G. M. (2023). Biosynthesis of magnesium oxide nanoparticles using Hagenia abyssinica female flower aqueous extract for characterization and antibacterial activity. *Applied Water Science*, 13(9), 175.
- Intan Febriani, L., Nurhashiva, C., Veronica, J., Ragadhita, R., Bayu Dani Nandiyanto, A., & Kurniawan, T. (2020). Computation Application: Techno-Economic Analysis on the Production of Magnesium Oxide Nanoparticles by Precipitation Method. *International Journal of Informatics, Information System and Computer Engineering (INJIISCOM)*, 1(1), 117–128. <https://doi.org/10.34010/injiiscom.v1i1.5462>
- Jakić, J., Jakić, M., Yousefi, S., & Labor, M. (2024). PVA-assisted preparation of $Mg(OH)_2/MgO$ nanostructures from seawater bittern through precipitation method. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 49(2), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12046-024-02505-z>
- Jamal Salih, S. (2024). Green synthesis and characterization of polyphenol-coated magnesium-substituted manganese ferrite nanoparticles: Antibacterial and antioxidant properties. *Heliyon*, 10(10), e31428. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31428>
- Jeyalakshmi, R., & Jonathan, G. (2016). Synthesis of magnesium based fertilizer from bittern of the salt pans of Kanyakumari district and its applications to magnesium demanding crop onion (*Allium cepa*). *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 8(4), 856–860.
- Jumaeri, Nadiyya, A., Prasetya, A. T., & Woro Sumarni. (2022). Congo Red Dye Adsorption using Magnesium Hydroxide from Seawater Bittern. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 25(6), 205–211.
- Khater, E. M. H., Rafie, S. El, Shalaby, M. S., & EL-Rafei, A. M. (2015). Preparation and Characterization of Magnesia Precipitated from Waste Liquid Bittern. *International Journal of Scientific Research*, 4(9).
- Kumaresan, A., & Vaithyanathan, C. (2016). Synthesis of magnesium based fertilizer from bittern of the

- salt-pans of Kanyakumari district and its applications to magnesium demanding crop "Allium cepa." *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 8(7), 689–693.
- Kun-asa, K., Reubroycharoen, P., Yamazaki, K., Mimura, N., Sato, O., & Yamaguchi, A. (2021). Magnesium Oxide-Catalyzed Conversion of Chitin to Lactic Acid. *ChemistryOpen*, 10(3), 308–315.
- Liu, P., Dong, J., Chang, C., Zheng, W., Liu, X., Xiao, X., & Wen, J. (2021). Preparation of low-cost magnesium oxychloride cement using magnesium residue byproducts from the production of lithium carbonate from salt lakes. *Materials*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/ma14143899>
- Majmundar, H. H. (1984). Mineral commodity report -- Magnesium compounds--: Part 1 from the U.S. Bureau of Mines publication, Mineral Commodity Summaries. California Dept. of Conservation, Division of Mines and Geology.
- Megawati, E., Sriwidodo, & Setyabudi, I. (2021). Potential Combination of Bittern Water with Vitamin B Complex for Mineral Deficiency Therapy in Cattle: A Literature Study. *Jurnal Medik Veteriner*, 4(1), 137–154. <https://doi.org/10.20473/jmv.vol4.iss1.2021.137-154>
- Modwi, A., Elamin, M. R., Idriss, H., Elamin, N. Y., Adam, F. A., Albadri, A. E., & Abdulkhair, B. Y. (2022). Excellent Adsorption of Dyes via MgTiO₃@g-C₃N₄ Nanohybrid: Construction, Description and Adsorption Mechanism. *Inorganics*, 10(11), 210. <https://doi.org/10.3390/inorganics10110210>
- Muhaymin, A., Mohamed, H. E. A., Hkiri, K., Safdar, A., Azizi, S., & Maaza, M. (2024). Green synthesis of magnesium oxide nanoparticles using Hyphaene thebaica extract and their photocatalytic activities. *Scientific Reports*, 14(1).
- Ningrum, A. N. K., & Jumaeri. (2022). Preparation of Magnesium Oxide Nanoparticles from a Sea Water Bittern as an Antibacterial Agent Against Escherichia coli. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 11(1), 9–15.
- Nur Taufiq Syamsudin Putra Jaya, Hartati, R., & Widianingsih, W. (2016). Produksi Garam Dan Bittern Di Tambak Garam. *Jurnal Kelautan Tropis*, 19(1), 43. <https://doi.org/10.14710/jkt.v19i1.599>
- Park, J.-W., Lee, W.-K., & Lee, C.-H. (2016). Preparation of nano-magnesium oxide from seawater bittern using decarboxylation/precipitation method. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 636(1), 142–148.
- Perera, H. C. S., Gurunanthanan, V., Singh, A., Mantilaka, M. M. M. G. P. G., Das, G., & Arya, S. (2024). Magnesium oxide (MgO) nanoadsorbents in wastewater treatment: A comprehensive review. In *Journal of Magnesium and Alloys* (Vol. 12, Issue 5, pp. 1709–1773). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2024.05.003>
- Romano, S., Trespi, S., Achermann, R., Battaglia, G., Raponi, A., Marchisio, D., Mazzotti, M., Micale, G., & Cipollina, A. (2023). The Role of Operating Conditions in the Precipitation of Magnesium Hydroxide Hexagonal Platelets Using NaOH Solutions. *Crystal Growth and Design*, 23(9), 6491–6505. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.3c00462>
- Saberi, A., Baltatu, M. S., & Vizureanu, P. (2024). Recent Advances in Magnesium–Magnesium Oxide Nanoparticle Composites for Biomedical Applications. *Recent Advances in Magnesium–Magnesium Oxide Nanoparticle Composites for Biomedical Applications*, 11(5), 508.
- Sabourimanesh, A., Rashidi, A., Marjani, K., Motamedara, P. and Valizadeh, Y. (2015) Effects of Process Parameters on the Size of Nanostructure Magnesium Oxide Synthesized by a Surfactant and Ligand Assisted Wet Chemical Method. *Crystal Structure Theory and Applications*, 4, 28-34. <http://dx.doi.org/10.4236/csta.2015.42004>
- Saefudin, S., Sulisty, S., Sulardjaka, S., & Arfiansyah, R. (2021). Desain Sel Elektrolisis untuk Memproduksi MgO dari Limbah Garam Rakyat. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 16(2), 225–233.

- Subhan, M., Royanando, M., & Wulandari, Y. (2024). Pra Perancangan Pabrik Magnesium Hidroksida dari Bittern dan NaOH dengan Metode Presipitasi. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan IV (SENASTITAN IV) Surabaya, Senastitan IV, 1–5.
- Sukma, V. A., Dahla, A. V., Sudibyo, S., Wulandari, Y. R., & Ramandani, A. A. (2025). Sustainable Recovery of SiO₂, Al₂O₃, and MgO from Slag, Aluminum Cans, and Bittern. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 22(1), 47-58.
- Sulistyo, Abdu, R. R., Sulardjaka, & Slamet, S. (2024). Electrochemical Process Investigation of Synthesizing Magnesium Oxide from Bittern Solution for Solid Oxide Fuel Cells Sealant. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 18(4).
- Viriya-empikul, N., Pitakjakpipop-Krasae, P., Puttasawat, B., & Yoosuk, B. (2010). Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production cata. *Bioresource Technology*, 101(10).
- Wang, X., Li, Y., Meng, D., Gu, X., Sun, J., Hu, Y., & Zhang, S. (2023). A review on flame-retardant polyvinyl alcohol: additives and technologies. *Polymer Reviews*, 63(2), 324-364. <https://doi.org/10.1080/15583724.2022.2076694>
- Yang, J., Wei, Q., Tian, C., Li, D., Li, H., Qin, G., Hu, K., & Zhang, Q. (2023). Preparation of Biomass Carbon Composites MgO@ZnO@BC and Its Adsorption and Removal of Cu(II) and Pb(II) in Wastewater. *Molecules*, 28(19), 6982.
- Yunita, F. E., Sulistiyono, E., Natasha, N. C., Rhamdani, A. R., Firdiyono, F., Lalasari, L. H., Arini, T., Widyaningrum, E. S., & Yustanti, E. (2021). Investigation of surfactant effect during synthesis of magnesium oxide nanoparticles from bittern using ultrasonic destruction process. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5), 111