



Batuan Karbonat dan Pemanfaatannya di Dunia Industri

Isman Saleh^{1*}

Universitas Halu Oleo, Indonesia

*Korespondensi penulis: ismansaleh96@uho.ac.id¹

Abstract. Carbonate rocks are one of the most important geological resources with a significant role in various industrial sectors, particularly as the main raw material in cement, lime, and construction industries. This study aims to review the characteristics, quality, and industrial potential of three major carbonate rock types—limestone, dolomite, and marble—based on relevant scientific literature. The research employed a literature review method using a qualitative-descriptive approach through analysis and synthesis of previous studies. Data were collected from scientific publications addressing the mineralogical, chemical, and physical aspects of carbonate rocks and their implications for industrial performance. The findings indicate that the quality of carbonate rocks is largely determined by mineral composition (calcite and dolomite), chemical purity (CaO and MgO), and the presence of impurities such as silica, alumina, and iron oxides. High-purity limestone rich in calcite is identified as the most efficient raw material for cement and lime industries due to its stable processing behavior and lower energy requirements. Conversely, dolomite with high magnesium content requires process adjustments to prevent excessive MgO formation during calcination. Marble, both in natural and waste powder form, shows promising potential as a supplementary material in sustainable cement production. Overall, this study emphasizes that understanding the mineralogical and chemical variations of carbonate rocks is essential for optimizing their processing strategies and promoting sustainable industrial utilization.

Keywords: Carbonate Utilization; Cement Industry; Dolomite; Limestone; Marble

Abstrak. Batuan karbonat merupakan salah satu sumber daya geologi yang memiliki peranan penting dalam berbagai sektor industri, terutama sebagai bahan baku utama dalam pembuatan semen, kapur, dan material konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik, kualitas, serta potensi pemanfaatan berbagai jenis batuan karbonat, yaitu batugamping, dolomit, dan marmer, berdasarkan studi literatur yang relevan. Metode yang digunakan adalah literature review dengan pendekatan kualitatif-deskriptif melalui analisis dan sintesis berbagai hasil penelitian terdahulu. Data dikumpulkan dari berbagai publikasi ilmiah yang membahas aspek mineralogi, kimia, dan fisik batuan karbonat serta hubungannya dengan kualitas dan performa industri. Hasil kajian menunjukkan bahwa kualitas batuan karbonat sangat dipengaruhi oleh kandungan mineralogi (kalsit dan dolomit), kemurnian kimia (CaO dan MgO), serta keberadaan pengotor seperti silika, alumina, dan oksida besi. Batugamping berkalsit tinggi dengan kadar pengotor rendah merupakan bahan baku terbaik untuk industri semen dan kapur karena efisiensi energi dan kestabilan prosesnya. Sebaliknya, dolomit dengan kandungan magnesium tinggi membutuhkan penyesuaian proses untuk menghindari pembentukan fase MgO yang berlebihan. Marmer, baik dalam bentuk alami maupun limbah serbuk, berpotensi digunakan sebagai bahan tambahan semen ramah lingkungan. Kajian ini menegaskan bahwa pemahaman terhadap variasi mineralogi dan kimia batuan karbonat menjadi kunci dalam menentukan strategi pemrosesan dan pemanfaatan yang berkelanjutan bagi industri modern.

Kata kunci: Batugamping; Dolomit; Industri Semen; Marmer; Pemanfaatan Karbonat

1. LATAR BELAKANG

Kualitas batuan karbonat sebagai bahan baku industri menunjukkan variasi yang signifikan antarjenis batuan, yang terutama dikontrol oleh karakter mineralogi (misalnya batugamping yang didominasi kalsit versus dolomit yang didominasi dolomit), tingkat kemurnian kimia (keberadaan pengotor seperti silika, feldspar, oksida besi, dan lempung), serta sifat fisik yang dipengaruhi oleh tekstur dan porositas. Dalam berbagai industri seperti semen, kapur, dan agregat, karakter batuan menentukan (i) kebutuhan energi selama pemrosesan, termasuk penghancuran, penggilingan, dan kalsinasi; (ii) perilaku kimia selama proses produksi, seperti

daya bakar, dekarbonisasi, dan pelarutan asam; serta (iii) kualitas dan kinerja produk akhir, meliputi komposisi kimia klinker, reaktivitas kapur tohor, dan sifat mortar atau perekat. Batu gamping berkalsit tinggi dengan tingkat kemurnian yang baik umumnya menjadi bahan baku unggul bagi industri semen dan kapur karena membutuhkan energi lebih rendah serta meminimalkan komplikasi proses. Sebaliknya, dolomit dan marmer dengan kandungan magnesium tinggi atau pengotor tertentu sering kali memerlukan penyesuaian dalam jalur pemrosesan maupun formulasi produk. Selain itu, limbah batuan karbonat seperti bubuk marmer memiliki potensi untuk divalorisasi menjadi bahan tambahan dalam semen dan mortar, memberikan keuntungan ekonomi serta manfaat lingkungan apabila disesuaikan dengan kebutuhan produk. Sintesis ini mengintegrasikan bukti dari berbagai penelitian geologi, mineralogi, dan rekayasa proses untuk menegaskan bagaimana perbedaan jenis batuan karbonat memengaruhi kualitas bahan baku industri, serta menyoroti implikasi praktisnya terhadap pemilihan material dan strategi pemrosesan yang berkelanjutan.

2. KAJIAN TEORITIS

Batuan karbonat didefinisikan sebagai jenis batuan sedimen yang utamanya tersusun dari mineral karbonat, dengan batu kapur sebagai bentuk yang paling umum, mengandung setidaknya 50% berat kalsium karbonat dalam bentuk kalsit. Batuan ini dapat memberikan wawasan geologis yang berharga dan memiliki berbagai aplikasi dalam industri seperti konstruksi, pertanian, dan manufaktur kimia (Aquilano, Otálora, Pastero, & García-Ruiz, 2016).

Batuan karbonat umumnya terbentuk di lingkungan laut dangkal yang memiliki kondisi kimia dan biologis mendukung proses pengendapan kalsium karbonat (CaCO_3). Di perairan ini hidup berbagai organisme penghasil kapur, seperti hewan bercangkang, tumbuhan berkapur, dan bakteri pengendap CaO dalam skala mikroskopis. Sisa-sisa organisme tersebut, berupa cangkang dan kerangka berkapur, setelah mengalami akumulasi dan pemadatan, akan membentuk lapisan sedimen karbonat yang selanjutnya mengalami proses litifikasi menjadi batuan karbonat, seperti batugamping dan dolomit. Selain berasal dari aktivitas biologis, endapan karbonat juga dapat terbentuk secara kimiawi. Proses ini terjadi ketika ion kalsium (Ca^{2+}) dan karbonat (CO_3^{2-}) mengendap dari air laut akibat perubahan kondisi kimia, khususnya penurunan kadar karbon dioksida (CO_2) terlarut. Dalam kondisi normal, kalsit cenderung larut dalam air yang kaya CO_2 ; namun, apabila kandungan CO_2 menurun akibat perubahan suhu, tekanan, atau sirkulasi air, maka kalsit akan mengendap karena kelarutannya yang rendah di lingkungan air bebas CO_2 . Mekanisme biologis dan kimiawi inilah yang

bersama-sama berperan penting dalam pembentukan dan variasi jenis batuan karbonat di lingkungan laut dangkal (Tiab & Donaldson, 2012).

Batuan karbonat memiliki peranan yang sangat penting dalam berbagai sektor industri karena kandungan utamanya berupa kalsium karbonat (CaCO_3) dan magnesium karbonat (MgCO_3) yang bernilai tinggi secara ekonomi. Jenis batuan karbonat seperti batugamping (*limestone*), dolomit, dan marmer banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku utama dalam industri semen, kapur, dan bahan konstruksi.

Batugamping dan dolomit secara kolektif dikenal sebagai batuan karbonat, karena keduanya tersusun terutama oleh mineral karbonat seperti kalsit (CaCO_3) dan aragonit (CaCO_3). Istilah dolomit digunakan baik untuk menyebut mineral dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) maupun batuan yang didominasi oleh mineral tersebut. Meskipun pernah diusulkan penggunaan istilah khusus untuk membedakan antara batuan dan mineral dolomit, dalam praktiknya para ahli petrologi sedimen tetap menggunakan istilah dolomit untuk keduanya. Sebagian besar batuan dolomit di alam tidak terbentuk secara langsung, melainkan merupakan hasil proses dolomitisasi, yaitu perubahan kimia dari batu kapur yang semula mengandung mineral kalsium karbonat (CaCO_3) menjadi batuan yang mengandung mineral dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Proses dolomitisasi terjadi ketika ion magnesium (Mg^{2+}) dari air laut atau air pori menggantikan sebagian ion kalsium (Ca^{2+}) dalam struktur mineral karbonat. Transformasi ini dapat berlangsung dalam berbagai tahap waktu geologis. Jika terjadi hampir bersamaan dengan pembentukan batu kapur, proses tersebut disebut dolomitisasi penecontemporaneous; apabila berlangsung beberapa hari hingga bulan setelah pengendapan disebut dolomitisasi singenetik; sedangkan jika terjadi jauh setelah batuan mengeras dan mengalami perubahan geologis lanjutan, disebut dolomitisasi epigenetik. Proses ini berperan penting dalam mengubah tekstur, porositas, serta komposisi kimia batuan karbonat, sehingga memengaruhi kualitasnya baik sebagai reservoir hidrokarbon maupun sebagai bahan baku industri. Dengan demikian, pemahaman terhadap mekanisme dolomitisasi menjadi aspek penting dalam studi geologi karbonat dan eksplorasi sumber daya alam yang terkait (Schwab, 2003).

Marmer merupakan batuan metamorf yang terbentuk dari hasil metamorfosis batuan karbonat, terutama batugamping (*limestone*) dan dolomit, yang mengalami perubahan akibat pengaruh suhu dan tekanan tinggi di dalam kerak bumi. Proses metamorfisme ini menyebabkan rekristalisasi mineral karbonat, sehingga menghasilkan tekstur baru yang lebih padat dan berbutir kasar. Marmer termasuk ke dalam kelompok batuan monomineralik, karena umumnya tersusun hampir sepenuhnya oleh mineral kalsit (CaCO_3). Namun, pada jenis marmer dolomitik, komposisi utamanya berupa mineral dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) dengan sedikit

campuran mineral lain seperti diopsida, mika, atau mineral silikat minor yang terbentuk akibat reaksi metamorfik antara karbonat dan pengotor silika (Mizerski, 2018; Dobiszewska et al., 2023).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *literature review* atau kajian pustaka yang bersifat kualitatif-deskriptif. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik, kualitas, serta potensi pemanfaatan batuan karbonat khususnya batugamping, dolomit, dan marmer sebagai bahan baku dalam industri semen, kapur, dan material konstruksi. Melalui metode ini, peneliti tidak melakukan eksperimen laboratorium secara langsung, melainkan mengumpulkan, menelaah, dan mensintesis hasil-hasil penelitian terdahulu yang relevan agar diperoleh kesimpulan komprehensif mengenai faktor-faktor yang memengaruhi kualitas batuan karbonat.

Data dalam penelitian ini sepenuhnya bersumber dari data sekunder yang diperoleh melalui penelusuran berbagai publikasi ilmiah seperti jurnal internasional, prosiding, laporan penelitian, serta buku-buku akademik yang membahas topik batuan karbonat dan aplikasinya dalam industri. Artikel yang digunakan dipilih berdasarkan kriteria tertentu, yaitu penelitian yang memuat analisis mineralogi, komposisi kimia, serta karakter fisik batuan karbonat yang berhubungan dengan penggunaannya sebagai bahan baku industri.

Proses pengumpulan data dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu pencarian literatur menggunakan kata kunci seperti “*limestone quality for cement industry*”, “*dolomite calcination*”, “*carbonate rocks industrial application*”, dan “*marble waste utilization*” pada basis data ilmiah seperti *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *ResearchGate*, dan *Google Scholar*. Setelah diperoleh berbagai sumber, dilakukan seleksi terhadap literatur yang relevan dan memenuhi kriteria kelayakan berdasarkan topik, metodologi penelitian, dan relevansi dengan tujuan kajian. Selanjutnya, dilakukan proses penyaringan dan klasifikasi data berdasarkan tema-tema utama, seperti jenis batuan karbonat, kandungan pengotor dan mineral utama, pengaruh terhadap kualitas industri, serta potensi pemanfaatan limbah karbonat sebagai bahan tambahan semen.

Data yang telah dikumpulkan kemudian dianalisis menggunakan pendekatan analisis isi (*content analysis*) dan sintesis tematik. Melalui analisis ini, informasi dari berbagai penelitian disusun secara sistematis dengan mengelompokkan temuan berdasarkan jenis batuan, parameter kimia (seperti CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃), serta implikasi terhadap kualitas produk industri. Analisis dilakukan dengan cara membandingkan hasil-hasil penelitian

terdahulu untuk menemukan kesamaan, perbedaan, dan tren ilmiah yang muncul terkait pengaruh mineralogi dan pengotor terhadap efisiensi proses kalsinasi, pembentukan klinker, dan reaktivitas kapur. Hasil analisis tersebut kemudian disintesis menjadi uraian deskriptif-komparatif yang menggambarkan hubungan antara karakter batuan karbonat dan kinerja industrinya.

Melalui metode literature review ini, penelitian berfokus pada analisis dan sintesis informasi yang tersedia untuk menegaskan hubungan antara komposisi mineralogi dan kimia batuan karbonat terhadap kualitasnya sebagai bahan baku industri. Hasil dari kajian ini kemudian diuraikan secara deskriptif dalam pembahasan, yang menampilkan perbandingan karakteristik antara batugamping, dolomit, dan marmer serta relevansinya dalam mendukung industri semen, kapur, dan material konstruksi yang berkelanjutan

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Jenis-jenis Batuan Karbonat dan Perannya di Dunia Industri

Batugamping

Batugamping merupakan batuan karbonat yang didominasi oleh mineral kalsit (CaCO_3) dan menjadi bahan baku utama dalam industri semen, kapur, serta berbagai aplikasi kimia. Kandungan CaCO_3 yang tinggi menjadikan batugamping sangat bernilai, sementara keberadaan mineral pengotor seperti silika, feldspar, oksida besi, dan lempung berpengaruh langsung terhadap perilaku proses dan kualitas produk akhir. Industri kalsium karbonat secara luas mengakui batugamping sebagai sumber utama bahan baku untuk produksi semen dan pembuatan kapur, dengan tingkat kemurnian serta kandungan pengotor sebagai parameter kunci yang menentukan efisiensi proses dan mutu hasil. Sejumlah penelitian antara lain oleh Abd-Elaal et al. (2017), Šiler et al. (2018), dan Phajuy & Singtuen (2022), serta studi regional seperti pada endapan East El Minya (Gharti, Hitan, Prasad, & Oli, 2020), menekankan pentingnya kandungan CaCO_3 dan pengotor non-karbonat terhadap keberlanjutan dan performa industri karbonat.

Secara umum, batugamping dengan kadar pengotor yang rendah diklasifikasikan sebagai bahan baku karbonat berkualitas tinggi. Oleh karena itu, penilaian kemurnian yang berbasis jenis batuan sangat penting dalam pemilihan bahan baku untuk industri semen dan kapur, guna memastikan efisiensi energi, kestabilan proses, dan mutu produk yang optimal (Abdelaal et al., 2017; Šiler et al., 2018).

Dolomit

Dolomit merupakan batuan karbonat yang kaya akan mineral dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) dan mengandung MgCO_3 dalam jumlah signifikan. Kandungan magnesium yang tinggi menyebabkan dolomit memiliki sifat pemrosesan dan kinerja yang berbeda dibandingkan dengan batugamping yang didominasi kalsit murni. Secara industri, dolomit dikenal sebagai bahan baku potensial untuk pembuatan besi dan baja, semen, kapur, serta berbagai produk berbasis karbonat lainnya. Namun demikian, komposisi Mg dan karakter mineraloginya berpengaruh terhadap kemampuan bakar, kebutuhan energi, serta perilaku klinker, sehingga sering kali diperlukan penyesuaian pada proses pemanasan dan formulasi bahan baku (Machner et al., 2017; Sivrikaya, 2018; Valverde, Perejon, Medina, & Perez-Maqueda, 2015).

Kandungan magnesium dalam dolomit dapat mengubah jalur reaksi selama proses kalsinasi dan pembentukan klinker, sehingga batuan karbonat dengan kadar Mg tinggi menunjukkan perbedaan kemampuan bakar dan reaktivitas dalam produksi kapur (Valverde et al., 2015; Machner et al., 2017). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa meskipun dolomit dapat digunakan dalam sistem semen Portland, diperlukan modifikasi pada desain campuran dan parameter pemrosesan untuk mengakomodasi fase serta produk sampingan berbasis magnesium, seperti pembentukan MgO (Machner et al., 2017).

Marmer

Marmer merupakan batuan karbonat metamorf yang kaya akan kalsit dan/atau dolomit (CaCO_3), dengan tekstur mikritik hingga berbutir kasar yang khas. Secara umum, marmer dapat digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan kapur dan semen setelah melalui proses pengolahan yang sesuai. Relevansi industri marmer tidak terbatas pada penggunaannya sebagai bahan ornamen, tetapi juga meluas ke bidang industri semen dan material konstruksi. Sejumlah studi menunjukkan bahwa marmer memiliki kesesuaian sebagai bahan baku semen, kapur, serta bahan tambahan semen (*supplementary cementitious material*), terutama ketika residu atau fraksi halus marmer dimanfaatkan sebagai pengisi (*filler*) dalam mortar dan beton (Avdeev et al., 2024).

Material turunan marmer, termasuk limbah bubuk marmer, semakin banyak dievaluasi sebagai substitusi parsial atau suplemen dalam campuran semen dan mortar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja material ini sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel, morfologi butiran, serta keberadaan pengotor minor (Alyousef, Benjeddou, Soussi, Khadimallah, & Mustafa Mohamed, 2019; Moreira et al., 2022). Kandungan kalsit yang tinggi pada marmer memberikan ketersediaan CaCO_3 yang baik, namun pengotor pewarna, silika, dan alumina

dapat memengaruhi kemurnian, proses pengolahan, dan performa penggunaan akhir dalam aplikasi industri (Moreira et al., 2022; Avdeev et al., 2024).

Pengaruh Jenis Batuan Terhadap Kualitas Industri di Berbagai Sektor Utama

Semen dan Material Semen

a. Batugamping (Kalsit Berkualitas Tinggi)

Batugamping dengan kemurnian kalsit yang tinggi merupakan bahan baku semen yang paling disukai, karena umumnya menghasilkan CaCO_3 murni dengan jumlah pengotor non-karbonat yang sangat rendah. Pengotor tersebut, seperti silika, alumina, dan oksida besi, diketahui dapat mengganggu proses pembentukan klinker serta meningkatkan kebutuhan energi pemrosesan. Karakterisasi mineralogi dan kimia terhadap berbagai batuan karbonat dari sejumlah wilayah secara konsisten mengidentifikasi batugamping sebagai bahan baku utama industri semen, di mana kualitas batuan sangat ditentukan oleh tingkat kemurnian kalsit dan rendahnya kandungan mineral gangue (Abdelaal et al., 2017; Phajuy & Singtuen, 2022; Šiler et al., 2018). Tingkat kemurnian yang tinggi memungkinkan penyelarasan kimia klinker secara lebih mudah dengan formulasi standar semen Portland, sehingga menurunkan kompleksitas reaksi dan menjaga kebutuhan energi tetap efisien. Sebaliknya, pengotor dopan dapat memodifikasi pembentukan fase klinker dan keseimbangan energi selama proses kalsinasi (Taylor, Al-Ghamdi, & Nasr-El-Din, 2003).

Selain itu, studi regional menegaskan bahwa kesesuaian batuan karbonat sebagai bahan baku semen tidak hanya bergantung pada kemurnian kimia, tetapi juga pada karakteristik mineralogi dan sifat fisik-mekanisnya, termasuk kekerasan, porositas, dan kandungan pengotor, yang secara langsung memengaruhi kemampuan penggilingan dan efisiensi energi pemrosesan (Dagounaki, Sikalidis, Kassoli-Fournaraki, & Tsirambides, 2004).

b. Dolomit sebagai Bahan Baku Semen

Bahan baku yang berasal dari dolomit atau campuran dolomit–batugamping juga dapat digunakan dalam proses produksi semen, namun memerlukan penyesuaian pada parameter pemrosesan dan/atau desain campuran. Sejumlah studi telah membandingkan dolomit dan batugamping secara langsung sebagai pengganti parsial atau alternatif bahan baku, dan menunjukkan bahwa meskipun dolomit dapat ditambahkan dalam proporsi tertentu, kandungan magnesium (Mg) di dalamnya secara signifikan mempengaruhi mineralogi klinker serta kebutuhan energi pemrosesan (Machner et al., 2017; Stanienda-Pilecki, 2023).

Material yang mengandung dolomit juga memerlukan pertimbangan khusus terhadap pembentukan MgO selama proses kalsinasi, serta keseimbangan reaksi antara aluminat, silika, dan kapur dalam sistem kimia klinker (Machner et al., 2017; Valverde et al., 2015). Kandungan magnesium yang tinggi dapat menyebabkan modifikasi pada jalur pembentukan fase klinker dan meningkatkan konsumsi energi selama pembakaran. Meskipun demikian, batuan karbonat yang kaya dolomit dapat memberikan keuntungan tertentu dalam formulasi semen khusus, seperti peningkatan sifat ketahanan kimia atau variasi fasa hidrasi, asalkan dilakukan adaptasi proses yang tepat untuk mengurangi potensi masalah yang berkaitan dengan kandungan magnesium (Machner et al., 2017).

c. Limbah dan Turunan Marmer dalam Industri Semen

Literatur secara luas mendokumentasikan pemanfaatan marmer dan material turunannya sebagai komponen tambahan dalam formulasi semen, serta implikasinya terhadap kinerja lingkungan dan teknis. Limbah padat dan serbuk marmer dapat berfungsi sebagai pengganti sumber CaCO_3 alami, dengan berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan dalam proporsi sedang mampu meningkatkan indikator keberlanjutan tanpa mengorbankan kualitas material. Namun demikian, kemurnian, ukuran partikel, dan karakter mineralogi harus dikontrol secara ketat untuk menghindari dampak negatif terhadap proses pengikatan dan daya tahan produk akhir (Sánchez, Ramos, Polo, Ramón, & Utrilla, 2021; Valentini et al., 2021).

Analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) menyoroti bahwa lumpur limbah marmer berpotensi menggantikan batugamping dalam produksi semen, dengan hasil yang menunjukkan penurunan konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca (GRK) apabila diintegrasikan secara tepat ke dalam sistem produksi (Sánchez et al., 2021). Selain itu, studi eksperimental menunjukkan bahwa bubuk limbah marmer dapat berperan sebagai pengisi reaktif (*reactive filler*) atau sumber CaO tambahan dalam campuran mortar (Moreira et al., 2022).

Secara keseluruhan, temuan-temuan ini menegaskan bahwa material turunan marmer memiliki potensi signifikan untuk mendukung produksi semen yang lebih berkelanjutan, dengan syarat dilakukan optimalisasi ukuran partikel, reaktivitas, serta kompatibilitas kimia dengan sistem semen (Valentini et al., 2021).

Proses Produksi dan Dekarbonasi Kapur

Batuan karbonat yang mengandung dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) menunjukkan perilaku termal yang berbeda dibandingkan batugamping murni selama proses produksi kapur. Pada saat kalsinasi, dolomit terdekomposisi menjadi oksida kalsium (CaO) dan oksida magnesium

(MgO), sehingga menghasilkan dua produk utama yang memiliki karakteristik reaktivitas dan stabilitas berbeda. Kehadiran dolomit dalam bahan baku memengaruhi suhu dekarbonasi, kebutuhan energi, serta reaktivitas kapur hasil pembakaran. Proses dekomposisi dolomit terjadi dalam dua tahap: pertama, pelepasan CO₂ dari magnesium karbonat (MgCO₃) pada suhu lebih rendah, kemudian diikuti oleh dekarbonasi kalsium karbonat (CaCO₃) pada suhu yang lebih tinggi. Perbedaan ini mengakibatkan variasi kinetika reaksi dan efisiensi energi selama pembakaran. Penelitian mengenai dekomposisi termal dolomit menyoroti pentingnya pengendalian suhu dan waktu kalsinasi untuk memperoleh produk kapur yang optimal, baik dari segi reaktivitas maupun kemurnian (Valverde et al., 2015). Hasil-hasil studi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kandungan Mg dalam batuan dapat meningkatkan kompleksitas proses kalsinasi, namun juga membuka peluang untuk menghasilkan kapur dolomitik dengan karakteristik tertentu yang berguna bagi industri tertentu seperti semen, metalurgi, dan pertanian.

Karakteristik struktural dan mineralogi batuan karbonat memiliki peran penting dalam menentukan daya bakar serta kualitas kapur yang dihasilkan. Sifat-sifat seperti ukuran butir, porositas, orientasi kristal, dan tingkat kemurnian kalsit atau dolomit secara langsung memengaruhi perilaku kalsinasi selama proses pemanasan. Penelitian menunjukkan bahwa fitur mineralogi, khususnya kandungan dolomit dan proporsi magnesium, berpengaruh terhadap suhu dekomposisi, laju pelepasan CO₂, serta reaktivitas akhir kapur yang dihasilkan. Oleh karena itu, bahan baku yang mengandung dolomit perlu dikarakterisasi dan diproses secara cermat untuk memahami perubahan daya bakar dan kinetika termalnya (Vola et al., 2018). Pemahaman ini menjadi dasar penting dalam pengendalian suhu dan efisiensi energi pada proses produksi kapur industri agar diperoleh hasil dengan mutu dan kestabilan kimia yang optimal.

Keberadaan pengotor dalam batuan karbonat dapat memengaruhi reaksi kimia dengan asam serta perilaku pemrosesan selama produksi kapur, terutama dalam tahap pasca-perlakuan berbasis asam. Penelitian menunjukkan bahwa jenis batuan dan komposisi pengotor secara signifikan dapat mengubah laju reaksi ketika material terkena paparan asam, menyoroti sensitivitas proses produksi kapur terhadap komposisi mineralogi batuan karbonat. Temuan ini menegaskan bahwa variabilitas mineralogi dan kimia harus diperhitungkan dalam perancangan rezim kalsinasi, terutama di wilayah dengan litologi karbonat campuran, agar efisiensi energi, laju dekarbonasi, dan kualitas kapur yang dihasilkan dapat tetap optimal (Taylor et al., 2003).

Agregat Konstruksi dan Pengolahan Batu Hias

a. Batuan Karbonat sebagai Agregat

Batuan karbonat yang digunakan sebagai agregat konstruksi biasanya dievaluasi berdasarkan kekuatan, kekerasan, porositas, dan kandungan pengotor, karena faktor-faktor ini secara langsung memengaruhi daya tahan dan performa mekanis material akhir. Misalnya, batuan karbonat dari Kozani telah dikaji untuk menilai kesesuaian sebagai bahan baku semen dan agregat, yang menunjukkan kriteria sifat mineralogi dan mekanis yang penting bagi aplikasi industri (Dagounaki et al., 2004). Pertimbangan karakteristik batuan karbonat ini juga muncul dalam studi survei regional, di mana sumber daya karbonat dievaluasi untuk pemanfaatan sebagai batu hias dan agregat struktural (Pitawala, 2019). Evaluasi semacam ini menekankan pentingnya kualitas mineralogi dan fisik dalam menentukan keandalan batuan karbonat sebagai material konstruksi.

b. Kualitas Batuan Karbonat untuk Batu Hias

Kualitas batuan karbonat yang digunakan sebagai batu hias atau dekoratif sangat dipengaruhi oleh jejak pengotor, karena pengotor ini dapat memengaruhi kinerja visual dan estetika material. Kehadiran pengotor juga sering menjadi indikator potensi masalah kualitas, terutama ketika persyaratan penampilan menjadi faktor kritis (Christidis, Sakellariou, Repouskou, & Markopoulos, 2004). Selain itu, karakter mineralogi batuan karbonat memainkan peran penting dalam menentukan penampilan akhir serta perilaku pemrosesan bahan baku, termasuk saat digunakan sebagai komponen dalam mortar atau plester (Avdeev et al., 2024). Pemahaman ini membantu memastikan konsistensi warna, tekstur, dan daya tahan dalam aplikasi dekoratif.

c. Pemanfaatan Limbah Karbonat sebagai Agregat atau Bahan Tambahan

Penggunaan limbah karbonat, termasuk bubuk marmer, sebagai agregat atau bahan tambahan dalam mortar semakin didukung oleh penelitian. Studi menunjukkan bahwa pengolahan limbah karbonat menjadi ukuran partikel yang sesuai dapat meningkatkan kinerja mekanis dan reaktivitas material dalam campuran mortar (Moreira et al., 2022). Hasil-hasil ini menegaskan konstruksi, sekaligus potensi limbah karbonat untuk diubah menjadi input bernilai tambah dalam industri mendukung praktik produksi yang lebih berkelanjutan dengan memanfaatkan residu industri yang sebelumnya dianggap limbah.

Metode untuk Mengevaluasi Kualitas Batuan Karbonat sebagai Bahan Baku Industri

Sebuah tema yang konsisten dalam literatur adalah perlunya penilaian kualitas multifaset pada batuan karbonat, yang menggabungkan pengujian mineralogi, kimia, dan sifat fisik. Teknik analisis seperti difraksi sinar-X (XRD), mikroskop elektron pemindaian (SEM),

fluoresensi sinar-X (XRF), dan analisis petrografi memberikan informasi penting mengenai kandungan mineral, pengotor, dan fitur mikrostruktur, yang secara langsung memengaruhi perilaku pemrosesan bahan baku (Abdelaal et al., 2017; Šiler et al., 2018; Stanienda-Pilecki, 2023).

Identifikasi fase karbonat kaya magnesium (Mg) menjadi aspek penting karena dapat memprediksi reaktivitas batuan dalam berbagai aplikasi industri, termasuk produksi kapur dan semen. Dengan pemahaman ini, produsen dapat menyesuaikan strategi pemrosesan untuk mencapai kualitas produk akhir yang optimal sekaligus mengontrol konsumsi energi dan mengurangi potensi masalah akibat kandungan Mg tinggi (Stanienda-Pilecki, 2023).

Beberapa penelitian menyoroti bahwa jenis batuan karbonat secara signifikan memengaruhi laju pelarutan dalam asam serta kecepatan reaksi kimia, yang relevan untuk proses ekstraksi dan pemrosesan industri. Perbedaan komposisi mineralogi, kandungan pengotor, dan struktur mikro batuan menentukan reaktivitas kimia dan efisiensi proses, sehingga pemahaman sifat-sifat ini menjadi penting untuk mengoptimalkan desain proses dan performa produk akhir (Taylor et al., 2003).

Pengujian mineralogi menjadi aspek penting dalam menilai batuan karbonat sebagai bahan baku alternatif untuk industri semen. Karakterisasi mineralogi memungkinkan prediksi perbedaan kemampuan bakar antara dolomit dan batugamping, sehingga strategi pemrosesan dapat disesuaikan sebelum produksi. Identifikasi fase karbonat, khususnya yang kaya magnesium (Mg), melalui difraksi sinar-X (XRD) memberikan informasi kritis mengenai reaktivitas kimia dan perilaku termal bahan baku (Machner et al., 2017; Šiler et al., 2018; Stanienda-Pilecki, 2023).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Di antara semua jenis batuan karbonat, kualitas sebagai bahan baku industri dipengaruhi oleh mineralogi (kalsit vs. dolomit), kemurnian kimia (pengotor seperti silika, alumina, oksida besi, dan lempung), serta sifat tekstur fisik. Batugamping kalsit dengan kemurnian tinggi merupakan sumber semen dan kapur yang paling efisien dengan kinerja yang dapat diprediksi. Sementara itu, batuan dolomit menawarkan peluang penggunaan, tetapi memerlukan pengelolaan kandungan magnesium (Mg) yang cermat selama pemrosesan. Material marmer menghadirkan tantangan sekaligus peluang karena dapat divalorisasi dalam industri semen, dengan catatan sifat-sifatnya harus dikontrol agar integrasi ke produk akhir optimal. Hubungan ini telah didokumentasikan secara konsisten di berbagai studi yang mengevaluasi komposisi karbonat, perilaku pemrosesan, dan kinerja industri, mendukung kesimpulan bahwa mineralogi

dan kandungan pengotor seharusnya menjadi panduan utama dalam pemilihan bahan baku dan strategi pemrosesan.

DAFTAR REFERENSI

- Abdelaal, A. M., Sameah, S., & Ahmed, A. (2017). Characterization of calcium carbonate rocks, East El Minya deposits for possible uses as industrial raw materials. *Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 19(1), 81–89. <https://doi.org/10.21608/jpme.2017.39127>
- Alyousef, R., Benjeddou, O., Soussi, C., Khadimallah, M. A., & Mustafa Mohamed, A. (2019). Effects of incorporation of marble powder obtained by recycling waste sludge and limestone powder on rheology, compressive strength, and durability of self-compacting concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2019/4609353>
- Aquilano, D., Otálora, F., Pastero, L., & García-Ruiz, J. M. (2016). Three study cases of growth morphology in minerals: Halite, calcite and gypsum. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 62(2), 227–251. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2016.04.012>
- Avdeev, G., Kukeva, R., Yancheva, D., Mihailov, V., Tankova, V., Dimitrov, M., & Stamboliyska, B. (2024). Multi-analytical analysis of decorative color plasters from the Thracian tomb near Alexandrovo, Bulgaria. *Minerals*, 14(4), Article 374. <https://doi.org/10.3390/min14040374>
- Christidis, G. E., Sakellariou, N., Repouskou, E., & Markopoulos, T. (2004). Influence of organic matter and iron oxides on the colour properties of a micritic limestone from Kefalonia. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36(1), 72. <https://doi.org/10.12681/bgsg.16573>
- Dagounaki, C., Sikolidis, C., Kassoli-Fournaraki, A., & Tsirambides, A. (2004). Suitability of the Kozani area (NW Macedonia, Greece) carbonate rocks for the cement industry and as aggregates in constructions. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36(1), 80. <https://doi.org/10.12681/bgsg.16581>
- Dobiszewska, M., Bagcal, O., Beycioğlu, A., Goulías, D., Köksal, F., Płomiński, B., & Ürünveren, H. (2023). Utilization of rock dust as cement replacement in cement composites: An alternative approach to sustainable mortar and concrete productions. *Journal of Building Engineering*, 69, Article 106180. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106180>
- Gharti, R. B., Hitan, D. K., Prasad, M. K., & Oli, H. B. (2020). Chemical analysis of limestone of Bojhe, Halesi-Tuwachung Municipality, for industrial applications. *Amrit Research Journal*, 1(1), 59–64. <https://doi.org/10.3126/arj.v1i1.32455>
- Machner, A., Zajac, M., Ben Haha, M., Kjellsen, K. O., Geiker, M. R., & De Weerd, K. (2017). Portland metakaolin cement containing dolomite or limestone: Similarities and differences in phase assemblage and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 157, 214–225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.056>
- Mizerski, W. (2018). *Geologia dynamiczna* (4th ed.). PWN.

- Moreira, P. I., de Oliveira Dias, J., de Castro Xavier, G., Vieira, C. M., Alexandre, J., Monteiro, S. N., & de Azevedo, A. R. G. (2022). Ornamental stone processing waste incorporated in the production of mortars: Technological influence and environmental performance analysis. *Sustainability*, 14(10), Article 5904. <https://doi.org/10.3390/su14105904>
- Phajuy, B., & Singtuen, V. (2022). Mineralogical and geochemical characteristics of carbonate rocks for lime industry in Ban Pong, Chiang Mai Province, Northern Thailand. *Trends in Sciences*, 19(2), Article 2016. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.2016>
- Pitawala, H. M. T. G. A. (2019). Mineralogy, petrography, geochemistry and economic potential of carbonate rocks of Sri Lanka. *Journal of the Geological Society of Sri Lanka*, 20(1), Article 1. <https://doi.org/10.4038/jgssl.v20i1.24>
- Sánchez, A. R., Ramos, V. C., Polo, M. S., Ramón, M. V. L., & Utrilla, J. R. (2021). Life cycle assessment of cement production with marble waste sludges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(20), Article 10968. <https://doi.org/10.3390/ijerph182010968>
- Schwab, F. L. (2003). Sedimentary petrology. In *Encyclopedia of physical science and technology* (pp. 495–529). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00678-5>
- Šiler, P., Kolářová, I., Bednárek, J., Janča, M., Musil, P., & Opravil, T. (2018). The possibilities of analysis of limestone chemical composition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 379, Article 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/379/1/012033>
- Sivrikaya, O. (2018). A study on the physicochemical and thermal characterisation of dolomite and limestone samples for use in ironmaking and steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*, 45(8), 764–772. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1337264>
- Stanienda-Pilecki, K. (2023). X-ray diffraction as a highly selective and sensitive tool for the identification of Mg-rich carbonate phases in terms of the limestone with magnesium practical application. *Acta Montanistica Slovaca*, 28(3), 779–793. <https://doi.org/10.46544/AMS.v28i3.20>
- Taylor, K. C., Al-Ghamdi, A. H., & Nasr-El-Din, H. A. (2003). Effect of rock type and acidizing additives on acid reaction rates using the rotating disk instrument. In *International Symposium on Oilfield Chemistry* (SPE-80256-MS). Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/80256-MS>
- Tiab, D., & Donaldson, E. C. (2012). Introduction to mineralogy. In *Petrophysics* (pp. 1–26). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383848-3.00001-3>
- Valentini, L., Mascarin, L., Ez-zaki, H., Bediako, M., Marangu, J. M., & Bellotto, M. (2021). Use of waste calcium carbonate in sustainable cement. In V. M. C. F. Cunha, M. Rezazadeh, & C. Gowda (Eds.), *Proceedings of the 3rd RILEM Spring Convention and Conference (RSCC 2020)* (pp. 11–19). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76543-9_2
- Valverde, J. M., Perejon, A., Medina, S., & Perez-Maqueda, L. A. (2015). Thermal decomposition of dolomite under CO₂: Insights from TGA and in situ XRD analysis. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(44), 30162–30176. <https://doi.org/10.1039/C5CP05596B>

- Vola, G., Sarandrea, L., Della Porta, G., Cavallo, A., Jadoul, F., & Cruciani, G. (2018). The influence of petrography, mineralogy and chemistry on burnability and reactivity of quicklime produced in twin shaft regenerative (TSR) kilns from Neoarchean limestone (Transvaal Supergroup, South Africa). *Mineralogy and Petrology*, 112(4), 555–576. <https://doi.org/10.1007/s00710-017-0542-y>